

**MODELAGEM DA TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO  
EM UMA PEQUENA BACIA URBANA:  
ANÁLISE DE INCERTEZAS**

KARLA DE ANDRADE E SILVA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto

DEDALUS - Acervo - EESC



31100016594



São Carlos  
1998

Class.	TESE - EESC
Cutt.	5525+
Tombo	T0112/98

311 00016594

Hidráulica e Saneamento

st 0964533

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S586m Silva, Karla de Andrade e  
Modelagem da transformação chuva-vazão em uma  
pequena bacia urbana : análise de incertezas / Karla  
de Andrade e Silva. -- São Carlos, 1998.

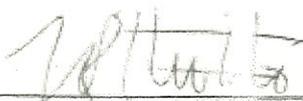
Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Hidráulica e Saneamento.  
Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto.

1. Análise de Incertezas. 2. Modelos hidrológicos -  
Modelos digitais de terreno. I. Título

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

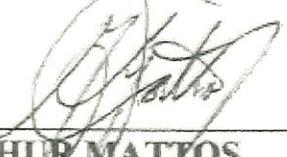
Candidata: Engenheira **KARLA DE ANDRADE E SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 05-03-1998  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Associado **ANTONIO MAROZZI RIGHETTO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Associado **ARTHUR MATTOS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



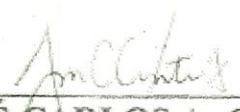
---

Prof. Doutor **ADEMIR PACELI BARBASSA**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



---

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**  
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



---

**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*A Deus e aos meus Pais*

### AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antonio Marozzi Righetto que, com paciência, não mediu esforços para transmitir conhecimentos e experiências, orientando-me na elaboração deste trabalho e contribuindo para o meu crescimento profissional.

Ao Professor Dr. Marcelo Pereira de Souza que tornou possível a utilização do sistema de informação geográfica.

Aos colegas Alexandre Grimaldi e Peter Krauss que concederam material bibliográfico para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos Válter, Alessandra, Sandro, Regina, Fernando, João, Jeremias e Guilherme.

Aos meus irmãos Marco Antônio e Christiane que compartilham de todos os meus ideais, apoiando-me em tudo para a realização dos meus sonhos.

## SUMÁRIO

<b><u>DEDICATÓRIA</u></b>	<b><i>i</i></b>
<b><u>AGRADECIMENTOS</u></b>	<b><i>ii</i></b>
<b><u>LISTA DE FIGURAS</u></b>	<b><i>vi</i></b>
<b><u>RESUMO</u></b>	<b><i>viii</i></b>
<b><u>ABSTRACT</u></b>	<b><i>ix</i></b>
<b><u>1. INTRODUÇÃO</u></b>	<b><i>1</i></b>
1.1. Considerações gerais	<b><i>1</i></b>
1.2. Modelos hidrológicos	<b><i>2</i></b>
1.3. Incerteza na modelagem hidrológica	<b><i>4</i></b>
1.4. Sistema de Informação Geográfica (SIG)	<b><i>5</i></b>
1.5. Modelo Digital de Elevação e Modelos Hidrológicos	<b><i>7</i></b>
1.5.1. Rede Triangular Irregular	<b><i>7</i></b>
1.5.2. Contorno / "Vector"	<b><i>9</i></b>
1.5.3. Grade / "Raster"	<b><i>9</i></b>
1.6. Objetivo da dissertação	<b><i>11</i></b>
1.7. Síntese do Modelo	<b><i>12</i></b>
<b><u>2. REVISÃO DA LITERATURA</u></b>	<b><i>14</i></b>
2.1. Novas tecnologias e incertezas nos modelos hidrológicos	<b><i>14</i></b>
2.2. O Modelo de GOODRICH (1991)	<b><i>31</i></b>
2.3. Modelo de escoamento superficial baseado em SIG "raster"	<b><i>33</i></b>
2.4. Análise de incerteza de HROMADKA (1989)	<b><i>36</i></b>
<b><u>3. METODOLOGIA</u></b>	<b><i>38</i></b>
3.1. Introdução	<b><i>38</i></b>
3.2. Caracterização da bacia e processos hidrológicos	<b><i>39</i></b>
3.2.1. Modelagem da bacia rural	<b><i>40</i></b>

	iv
3.2.1.1. Representação da bacia _____	40
3.2.1.2. Determinação das características geométricas dos elementos _____	41
3.2.1.3. Determinação do número de microcanais para cada elemento e das características médias dos canais _____	46
3.2.1.4. Variação temporal e espacial da precipitação _____	50
3.2.1.5. Equacionamento do escoamento superficial _____	51
3.2.1.6. O modelo de infiltração _____	53
3.2.1.7. Retenção superficial _____	54
3.2.2. Bacia urbana _____	55
3.2.2.1. Caracterização dos trechos de rua e da infra-estrutura da bacia _____	56
<b>3.3. Análise de incertezas _____</b>	<b>59</b>
3.3.1. Aplicação do método da Equação Integral Estocástica _____	59
<b>3.4. Fluxograma do modelo _____</b>	<b>63</b>
<b>4. APLICAÇÃO DO MODELO _____</b>	<b>68</b>
<b>4.1. Introdução _____</b>	<b>68</b>
<b>4.2. A bacia Experimental _____</b>	<b>68</b>
4.2.1. O sistema de galerias de águas pluviais _____	69
<b>4.3. Banco de dados digital _____</b>	<b>70</b>
4.3.1. Dados da rede triangular irregular _____	70
4.3.1.1. O procedimento de digitalização _____	71
4.3.1.2. Procedimento semi-automático para obtenção da altitude dos pontos nodais _____	76
4.3.1.3. Formação do arquivo polígono e considerações finais sobre os procedimentos gráficos para a rede triangular _____	78
4.3.2. Caracterização gráfica da área urbana _____	80
<b>4.4. O procedimento computacional para as simulações _____</b>	<b>83</b>
4.4.1. Condições iniciais e de contorno _____	84
4.4.2. Considerações sobre os sistemas de drenagem da bacia _____	84
4.4.3. Porcentagem da área permeável das sub-bacias urbanas _____	87
4.4.4. Intervalo de tempo _____	88
<b>4.5. Resultados e Discussão _____</b>	<b>90</b>
4.5.1. Análise do comportamento geral do modelo _____	90
4.5.1.1. Efeitos na determinação dos coeficientes de rugosidade superficial _____	91
4.5.1.2. Alterações na resposta hidrológica da bacia frente à variabilidade dos parâmetros de infiltração _____	92
4.5.1.3. A influência da concepção de escoamento em microcanais rurais sobre os hidrogramas de cheias _____	94
4.5.2. Avaliação das Incertezas na variabilidade espacial da chuva através de distribuições de frequência obtidas pelo método da integral estocástica _____	96
4.5.3. Considerações finais _____	104
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES _____</b>	<b>106</b>

*REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS* \_\_\_\_\_ 111

*LISTAGEM DO PROGRAMA* \_\_\_\_\_ 110

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Representação de uma linha em formato a) "vector" e b) "raster" .....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2: Representação de uma superfície por rede triangular irregular a partir de pontos amostrados da superfície e indicação do vetor declividade para um elemento e</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3: Indicação das faixas de escoamento em uma superfície modelada por contorno. ....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4: Exemplo de uma matriz de identificadores de pontos de uma superfície. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5: Exemplo de escoamento através das células de um modelo "raster" (Fonte: SMITH &amp; VIDMAR - 1994). ....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6: Subdivisão de uma bacia usando o método TAPES-C. Os pontos HP1 e HP2 são os pontos altos. Os hidrogramas foram calculados para as locações A, B e C para esta bacia.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7: Subdivisão de uma série de linhas de contorno a partir de segmentos de reta .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8: Modelo digital de uma parte da bacia, para aplicação de ZECH et al (1994), incluindo casas, ruas, zonas naturais, rios e coletores. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9: Vetores de declividade para os dois triângulos conectados à borda AC. 9a) Sentido de "saída da borda" dos vetores. 9b) Sentido de "entrada da borda" dos vetores. 9c) Vetor declividade do triângulo ACD apontando para a borda AC e vetor do triângulo ABC " saindo" da borda.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10: a) Cálculo do vetor normal <math>n</math> ao triângulo ABC. b) Cálculo do vetor horizontal <math>h</math> .c) Cálculo do vetor declividade <math>s</math> do triângulo. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11: Mapas de uma bacia de ZHANG &amp; MONTGOMERY (1994) mostrando a distribuição de <math>\ln(a/\tan\beta)</math> para grades de 4, 10, 30 e 90m. Células mais escuras indicam maiores valores do índice. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12: representação das efluências e das afluências em uma célula simples do modelo "raster".....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13: Conversão "vector" para "raster" das linhas de centro das ruas. a) Linha de centro da rua digitalizada e sobreposta à grade. b) Linha de centro "rasterizada". c) Linha de centro corrigida manualmente. As linhas tracejadas indicam a orientação da célula considerada pelo modelo hidrológico. As flechas indicam a direção do escoamento superficial ao longo da rua. ....</i>	<i>35</i>

<i>Figura 14: representação dos escoamentos em uma parte de uma bacia hidrográfica hipotética aproximada por elementos triangulares. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 15: representação no plano cartesiano de um elemento qualquer da superfície topográfica definido pelos vértices A, B e C. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16: Representação gráfica das retas <math>\tau</math> e <math>\tau_2</math> para um elemento qualquer.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17: elemento com apenas uma borda de saída com vetor declividade <math>s</math> paralelo a uma das bordas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 18: elemento com duas bordas de saída .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19: Representação da variabilidade aleatória da intensidade de precipitação..</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20: Representação da área urbana (ruas, canalizações e bocas de lobo) no interior de um elemento e equacionamento matemático para um nó qualquer.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21: Modelo de terreno “raster” da Bacia do córrego Madalena gerada pelo SIG. As cores representam a variação de altitude da área. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 22: Representação gráfica da concepção de escoamento em um microcanal....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 23: hidrogramas gerados para valores diferentes de <math>\Delta t</math>; a) <math>T= 20</math> anos; b) <math>T= 2</math> anos. Duração da chuva igual a 10 min.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 24: Comportamento de uma sub-bacia rural (trechos 1-6 – desenho 1) considerando-se valores diferentes para a rugosidade superficial. Chuva de duração de 10 min e período de retorno igual a 10 anos. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 25: Resultados obtidos para valores diferentes de condutividade hidráulica. ...</i>	<i>93</i>
<i>Figura 26 : Representação espacial da condutividade hidráulica para cinco distribuições geradas aleatoriamente. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 27: Hidrogramas de cheia em função da variação da forma e número de microcanais gerados nos elementos; a) rugosidade superficial igual a 0.3; b) rugosidade igual a 0.05. Período de retorno igual a 10 anos e duração da chuva igual a 20 minutos. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 28: Hidrogramas gerados aleatoriamente pelo modelo. a) Período de retorno igual a 2 anos; b) Período de retorno igual a 10 anos. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 29: Cenário futuro e simulação determinística (a) e sua respectiva função de transferência (b) para um período de retorno igual a 2 anos. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 30: Cenário futuro e simulação determinística (a) e sua respectiva função de transferência (b) para um período de retorno igual a 10 anos. ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 31: a) Representação do processo estocástico através das 30 funções de transferências geradas pelo modelo; b) distribuição da vazão de pico. Período de retorno igual a 2 anos.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 32: a) Representação do processo estocástico através das 30 funções de transferências geradas pelo modelo; b) distribuição da vazão de pico. Período de retorno igual a 10 anos.....</i>	<i>103</i>

### RESUMO

SILVA, K.A. Sobre *Modelagem da transformação chuva-vazão em uma pequena bacia urbana; análise de incertezas*. São Carlos, 1998. 115p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho versa sobre o desenvolvimento de um modelo hidrológico distribuído aplicável à bacias parcialmente urbanizadas. O modelo fundamenta-se na equação matemática diferencial de escoamento cinemático em canais, aproximada pelo método de diferenças finitas simples e lança mão da técnica de discretização de elementos finitos triangulares para aproximar a área de estudo. Em cada elemento que se encontra na parte rural da bacia é gerado um número aleatório de canais para este elemento; para aqueles situados na área urbana, as ruas são tomadas como canais dos elementos com a área de contribuição para as ruas estimadas com base no mapa urbano da área. A incerteza relativa à estrutura do modelo foi estimada incorporando-se as equações integrais estocásticas do tipo convolutivo, obtendo-se como resultado uma distribuição de probabilidades da variável de interesse para um evento futuro. O modelo hidrológico distribuído foi aplicado à uma sub-bacia do Córrego Monjolinho, São Carlos.

Palavras-chave: análise de incertezas; modelos hidrológicos - Modelos digitais de terreno

**ABSTRACT**

SILVA, K.A. *Sobre Modelagem da transformação chuva-vazão em uma pequena bacia urbana; análise de incertezas*. São Carlos, 1998. 115p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work deals with the development of a distributed hydrologic model to be applied to urban watersheds. The basin is discretized in triangular finite elements considering the characteristics of the urban and rural areas. The overland flow as well as the flow in pipes and canals were modeled by using the kinematic routing approach. The uncertainties related to the hydraulic and hydrological parameter values and rainfall distribution over the area were considered by including the stochastic integral equation method in the model. The model was applied to a small urban watershed of São Carlos city, SP.

Keywords: uncertainty analysis; hidrologic models - digital terrain models.

## 1. *INTRODUÇÃO*

### 1.1. *Considerações gerais*

Os problemas advindos da ocupação desordenada do espaço urbano, no que concerne dos perigos de ocorrência de enchentes, refletem, muitas vezes, a ausência de uma política de planejamento para o setor e a valorização do meio urbano ao longo do processo histórico de desenvolvimento das civilizações .

No Brasil, os impactos da urbanização, em particular sobre o escoamento das águas de chuva, somam-se às questões de ordem social e econômica, como a ocupação das áreas de risco de enchente pela população carente, a falta de atendimento pelo sistema de esgotamento sanitário e coleta de lixo, resultando como consequência das inundações, além de perdas materiais e muitas vezes de vidas humanas, na transmissão de doenças de veiculação hídrica, com grandes prejuízos para toda comunidade .

O planejamento adequado do uso e ocupação do solo urbano pode atenuar os efeitos das enchentes e fornecer diretrizes para as soluções de drenagem urbana evitando aquelas extremamente caras, tais como, canalizações, diques e barragens. Nesse sentido, o controle da expansão urbana pode ser estudado através da simulação do comportamento hidrológico da bacia para condições atuais e futuras, permitindo a obtenção de vários cenários, cada um representando uma política de atuação.

A técnica de simulação de sistemas, compreendida pelas etapas de modelagem, programação e experimentação em computador, se insere neste quadro como

uma ferramenta auxiliar nos processos de planejamento e de tomada de decisões (PERIN-1995). A fase de modelagem pode ser entendida pela representação aproximada do sistema real que, no atual trabalho, é definido por uma bacia hidrográfica e descrito por equações matemáticas que exprimem simplificadaamente os processos hidrológicos relevantes que ocorrem no seu interior. O modelo leva em conta a transformação da precipitação em escoamento superficial, uma vez que esta é a principal forma de contribuição às enchentes.

Apesar do conhecimento das simplificações e dos erros existentes na representação dos processos de escoamento que ocorrem numa bacia e da natureza aleatória desses fenômenos, é recente a preocupação em se considerar as incertezas que envolvem as variáveis dos modelos hidrológicos.

Neste trabalho, procurou-se desenvolver um modelo hidrológico urbano que avaliasse o caráter não determinístico de tais fenômenos, levando-se em conta os princípios hidráulicos básicos do escoamento.

Simultaneamente à importância do erro aleatório nos resultados da variável de interesse, foram usadas técnicas para aprimorar a entrada de dados, tornando o trabalho de obtenção destes dados mais efetivo, principalmente quando da simulação para várias condições da bacia.

## 1.2. Modelos hidrológicos

De uma maneira geral, os modelos podem ser classificados como: *físicos, matemáticos: conceituais e empíricos; localizados ou distribuídos; determinísticos ou estocásticos* (HROMADKA-1989; PERIN-1995; SMITH et al-1994; SMITH & VIDMAR-1994; TUCCI -1987).

Os modelos *físicos* descrevem um sistema real através de sua representação em uma escala reduzida. O modelo conceitual é uma abstração matemática do comportamento natural observado, tais como os modelos derivados das equações de escoamento não permanente de Saint - Venant, enquanto que os modelos *empíricos* não se baseiam em princípios físicos, mas em relações cujos parâmetros são definidos a partir de observações do sistema.

Os modelos *localizados* são utilizados para a determinação da vazão na seção de saída de uma bacia, e definem como dados de entrada, parâmetros hidrológicos médios sobre a área. Entretanto, nas áreas urbanas, há interesse nos fenômenos que ocorrem no interior da bacia. As ruas, por exemplo, são de importância porque carregam um grande volume de água. Para o estudo destes processos torna-se necessário a aplicação de um modelo hidrológico *distribuído*, onde a bacia é representada por células ou elementos com parâmetros hidrológicos representativos no interior de cada elemento, com o cálculo da resposta hidrológica em cada célula. Dependendo do modelo, vários parâmetros devem ser definidos para cada célula, resultando em uma grande quantidade de dados. Atualmente, várias metodologias têm surgido para desenvolver um conjunto de dados necessários, tornando-se mais efetiva a aplicação dos modelos hidrológicos em área urbana, como, por exemplo, a modelagem digital de terreno, por meio de um sistema de informação geográfica.

A distinção entre modelos *determinísticos* e modelos *estocásticos* pode ser estabelecida considerando-se o primeiro como um caso particular do segundo, quando este assume valores prefixados para as variáveis aleatórias do modelo. Portanto, os modelos determinísticos do escoamento superficial, usados para equacionar os vários processos físicos, contêm parâmetros ou coeficientes que têm significados bem definidos, mas cujos valores exatos são desconhecidos. Assim, é mais real formular um modelo probabilístico que leva em consideração o caráter aleatório de suas variáveis.

### 1.3. *Incerteza na modelagem hidrológica*

Antes da apresentação dos conceitos básicos relativos às novas tecnologias computacionais para a análise de dados gráficos, faz-se uma breve revisão das principais incertezas presentes na modelagem dos processos hidrológicos.

Quando se modela uma bacia para a determinação do hidrograma de chuva resultante para fins de projetos, os engenheiros encontram à frente quatro fontes de incertezas: aleatoriedade natural, dados, parâmetros e estrutura do modelo. (HAAN & WILSON-1991; MELCHING et al-1990)

As incertezas naturais referem-se às flutuações espaciais e temporais inerentes aos processos que ocorrem na bacia para uma chuva qualquer e quase sempre introduzem incertezas nos fenômenos físicos de geração do escoamento.

Os dados usados para verificar ou calibrar um modelo hidrológico contêm incertezas oriundas de várias causas, tais como aquelas geradas pelos instrumentos de medição da altura de chuva e da vazão numa seção de um rio, além de erros humanos de operação e de leitura, até erros causados por descontinuidades na área da seção transversal de um rio, particularmente nos rios de controle natural. As seqüências observadas de dados de chuva e de vazão podem ser vistas como a realização de um processo estocástico e a utilização destes dados, para bacias “similares”, não refletem verdadeiramente a bacia de interesse.

As incertezas presentes nos parâmetros do modelo, tais como rugosidade, taxas de infiltração, etc, retratam a variabilidade na determinação dos seus valores próprios para um dado evento e se manifestam no resultado de saída do modelo.

A determinação/estimativa da vazão de projeto, associada a um período de retorno, é realizada por meio de várias metodologias disponíveis: método racional,

técnicas do hidrograma unitário, modelos distribuídos baseados nas formulações de onda cinemática, etc. A incerteza na estrutura do modelo refere-se a sua habilidade de exprimir precisamente os processos principais dos escoamentos na bacia. Entretanto, não se pode afirmar que um modelo mais sofisticado seja sempre a melhor alternativa, uma vez que exige uma grande quantidade de dados, com qualidade nem sempre garantida. Somam-se a estes, os problemas relativos à resolução numérica do equacionamento matemático do fenômeno e erros numéricos.

#### **1.4. Sistema de Informação Geográfica (SIG)**

Um sistema de informação geográfica constitui em uma ferramenta poderosa, permitindo a ligação entre dados numéricos e dados referenciados geograficamente, tornando possível uma larga série de operações e processamento de informações, assim como produção de mapas, análise e modelagem (NAMIKAWA-1993; MAGUIRE-1995). Para executar todas as tarefas, um sistema de informação geográfica é composto de módulos para aquisição, manipulação e conversão de dados de entrada e de saída de resultados, tanto em formato de mapas quanto em formato tabular.

Os tipos de dados processados em um sistema de informação geográfica podem ser :

- “vector” (Figura 1.a): os dados são referenciados por uma série de coordenadas representando a posição verdadeira das características identificadas por pontos, áreas, etc.
- “raster” (Figura 1.b): os dados são armazenados como valores de células ou “pixels”, sendo o “pixel” a menor unidade que compõe uma imagem.

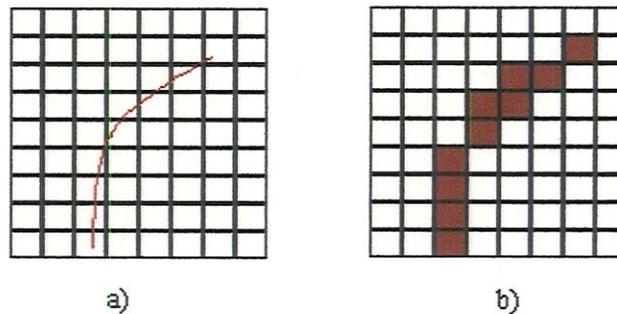


Figura 1: Representação de uma linha em formato a) “vector” e b) “raster”

Em um sistema de informação geográfica, cada entidade gráfica tem um atributo correspondente em um banco de dados, ou seja, o banco de dados armazena uma propriedade relativa àquela entidade e pode servir como uma importante ferramenta de pesquisa. Pode-se obter, por exemplo, a área de uma determinada região e identificar com base no banco de dados qual a atividade predominante desta região ou ligar, por exemplo, um reservatório às suas informações sobre altura, bombeamento ou localização .

A vantagem de um SIG sobre os programas com sistemas CAD (computer aided design) quanto à produção de mapas é, justamente, a capacidade de relacionar atributos alfanuméricos às entidades digitalizadas através do banco de dados, que pode ser próprio do sistema ou ,então, um gerenciador independente. Esta associação das informações das características geográficas e a possibilidade de acessar estes dados para uma determinada análise é a principal característica do SIG e o que o diferencia dos programas CAD ou outros programas cartográficos que fornecem somente a saída gráfica.

### **1.5. Modelo Digital de Elevação e Modelos Hidrológicos**

Um componente fundamental do processamento de informação geográfica é o modelo digital de elevação, ou como preferem alguns autores, modelo digital de terreno. O modelo digital de elevação é uma representação de uma superfície a partir das coordenadas x, y, e z de entidades definidas por pontos, linhas ou polígonos; ajuda na modelagem, na análise e na exibição dos fenômenos relacionados com a topografia ou superfícies similares (NAMIKAWA-1993; WEIBEL & HELLER-1995).

Verifica-se, atualmente, que há três combinações principais de modelos hidrológicos com modelos digitais de terreno, baseados em uma das seguintes características:

- rede triangular irregular (GOODRICH et al-1991)
- contorno/ “vector” (MOORE & GRAYSON-1991)
- grade/ “raster” (B. SMITH-1993)

#### **1.5.1. Rede Triangular Irregular**

Na modelagem da superfície por meio de uma rede triangular irregular, o triângulo é o elemento definidor da grade e representa uma face da superfície. Cada elemento triangular é formado por três vértices, os quais são pontos amostrados da superfície e três arestas que interligam estes vértices. A estrutura de armazenamento para a grade triangular irregular é bem variada podendo, por exemplo, ser representada pelos vértices do triângulo ou por suas arestas.

A rede triangular irregular é obtida por geração automática, através de rotinas computacionais, ou manualmente com definição dos elementos a partir de pontos amostrados do terreno, digitalizados com o valor da altitude para estes pontos.

Várias rotinas podem ser desenvolvidas para extrair características dos elementos da rede triangular irregular, tais como, declividade, área, definição do tipo de borda de um elemento (canal, divisor de bacias). Entretanto, os procedimentos de manipulação e obtenção destes dados tendem a ser mais complexos do que para a grade regular, além da necessidade de maior esforço computacional.

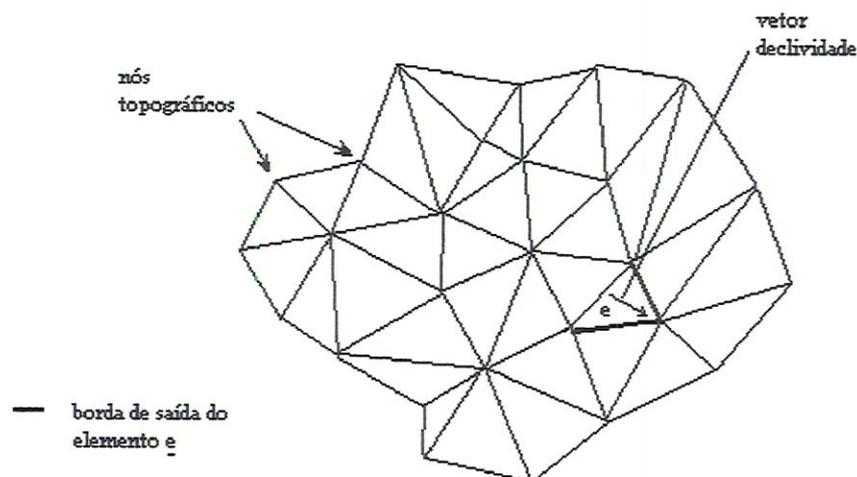


Figura 2: Representação de uma superfície por rede triangular irregular a partir de pontos amostrados da superfície e indicação do vetor declividade para um elemento  $e$

Na modelagem do escoamento superficial das águas de chuva em uma bacia, os elementos da rede triangular irregular são usados diretamente como planos de escoamento, com direção igual ao vetor declividade do elemento. Quando um elemento possui duas bordas de saída, as áreas de contribuição para os elementos de jusante podem ser ponderadas traçando-se uma reta paralela ao vetor declividade a partir do vértice comum às bordas de saída até encontrar a borda oposta a este vértice (Figura 2).

### 1.5.2. Contorno / "Vector"

Os modelos digitais de elevação "vector" são derivados a partir do mapa topográfico da área, sendo que as linhas de contorno ou curvas de nível são representadas pelas coordenadas cartesianas  $x, y$ , no plano horizontal, para cada curva.

Os dados de representação por contorno capacita a definição de faixas de escoamento, considerando os contornos como linhas equipotenciais e os pares de linhas ortogonais às equipotenciais como as faixas de escoamento. Os cálculos do escoamento para uma superfície assim modelada, são realizados a partir de uma série de equações unidimensionais.

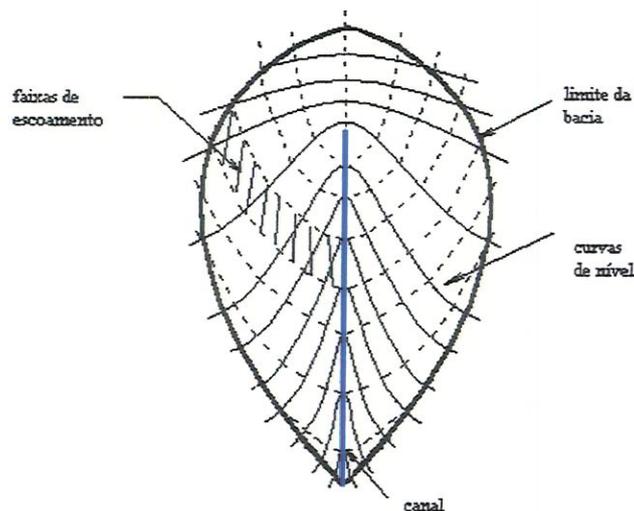


Figura 3: Indicação das faixas de escoamento em uma superfície modelada por contorno.

### 1.5.3. Grade / "Raster"

Grades regulares representam a superfície através de uma matriz de pontos com valores de elevação; a forma de armazenamento de valores relativos aos pontos com espaçamento regular é mais simples do que a da rede irregular, uma vez que para a matriz de pontos, a partir das coordenadas de um dos pontos e os espaça-

mentos nas duas direções , obtém-se as coordenadas de todos os pontos. Assim, torna-se necessário armazenar apenas o valor da elevação dos pontos no formato matricial como mostra o exemplo ilustrado na Figura 4; neste exemplo, os identificadores para as células podem representar o valor das cotas topográficas. A determinação do número de “pixels” que compõem a imagem é função da resolução desejada; considerando, por exemplo, que a Figura 4 representa uma área de 9km por 8km, onde cada “pixel” tem uma área de 1km x 1km, resulta em uma imagem de baixa resolução constituída de 9 linhas e 8 colunas. Esta área ficaria muito melhor definida se cada “pixel” tivesse, por exemplo, uma área de 10m x 10m.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 2 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 4: Exemplo de uma matriz de identificadores de pontos de uma superfície.

A aplicação do modelo digital de elevação “raster” como planos de escoamento, representados por um conjunto de “pixels” é pouco eficiente para a determinação da direção do escoamento dentro de uma célula simples, uma vez que cada célula da grade regular não define um plano de escoamento como acontece no modelo de rede triangular irregular. Os algoritmos desenvolvidos para o processamento destes modelos são baseados na análise das oito células vizinhas para a definição do escoamento em cada célula. (SMITH & VIDMAR - 1994)

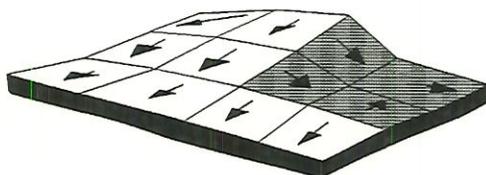


Figura 5: Exemplo de escoamento através das células de um modelo “raster” (Fonte: SMITH & VIDMAR - 1994).

A aquisição dos dados de entrada para o modelo digital de elevação é feita através de um programa de digitalização usado para criar e editar “coverages”, ou seja, arquivos contendo pontos, linhas ou polígonos. Os “coverages” de pontos podem representar, por exemplo, postes de luz, válvulas nas canalizações, poços de água, poços de visita, etc; os “coverages” de linhas podem representar, por exemplo, linhas centrais de ruas, rios /canais, limites políticos, etc; e os “coverages” de polígonos podem representar, por exemplo, zonas de uso da terra, lagos, tipos de solos, etc.

### 1.6. *Objetivo da dissertação*

O trabalho tem como objetivo principal a construção de um modelo hidrológico distribuído estocástico, incorporando-se ao modelo determinístico distribuído uma metodologia que leve em consideração as incertezas na previsão dos escoamentos no interior da bacia. Como uma característica principal do modelo, por meio de SIG será possível utilizar alta resolução na modelagem dos escoamentos superficiais com consideração da infra-estrutura física existente na bacia.

O modelo desenvolvido será aplicado a uma bacia urbana da cidade de São Carlos – bacia do Córrego Santa Maria Madalena – São Paulo, efetuando-se várias simulações para diversas condições da bacia e considerando-se a variabilidade espacial dos principais parâmetros presentes na formulação matemática dos fenômenos hidro-

lógicos modelados. A partir da incerteza relativa à distribuição espacial da chuva, serão desenvolvidas distribuição de frequência da vazão de pico, observando-se a sua variabilidade individual, ou seja, permanecendo inalteradas o conjunto de valores para os demais parâmetros.

### 1.7. *Síntese do Modelo*

O modelo apresenta a formulação para os processos hidrológicos de infiltração e escoamento superficial proveniente da contribuição dos canais naturais sobre a bacia que se combinam e formam o sistema principal de drenagem, conduzindo os escoamentos até a seção de saída.

A bacia hidrográfica é subdividida em elementos triangulares, mais ou menos regulares, determinando-se suas características, tais como área, declividade, conexões entre elementos, nos quais são gerados microcanais aleatórios onde se considera a ocorrência dos escoamentos pluviais. Para cada borda de saída, o número de microcanais que atravessam esta borda é aleatório e limitado pelo número de canais no interior do respectivo elemento. A seção de escoamento dos microcanais é determinada, diretamente, pela relação da declividade transversal para seções triangulares com o número de canais do elemento .

Os escoamentos nos canais de cada elemento são equacionados pelo modelo de onda cinemática, os quais são entradas para os elementos de jusante até que os canais principais sejam alcançados, onde faz-se a vazão de saída do elemento contribuir lateralmente para o trecho considerado. A formulação de onda cinemática é, também, empregada para os escoamentos nestes canais, com resolução numérica pelo método das diferenças finitas .

Em cada elemento são definidos valores diferentes para cada parâmetro do modelo, dentro de um intervalo estabelecido, obtendo-se várias respostas da bacia para um mesmo evento. No capítulo 4 são descritas todas as considerações e equacionamento matemático.

## 2. *REVISÃO DA LITERATURA*

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo teve como objetivo principal o conhecimento de novos aplicativos computacionais que ressaltam a integração SIG - modelo hidrológico com suas considerações sobre o comportamento do modelo, além de destacar alguns algoritmos que fornecem diretrizes para o desenvolvimento de rotinas de manipulação de dados espaciais.

No que diz respeito à necessidade de quantificar as incertezas envolvidas na modelagem da transformação chuva - vazão, procurou-se explicar sucintamente alguns métodos de análise usados por diferentes autores. Portanto, o equacionamento estocástico do modelo hidrológico encontra-se descrito com detalhes no capítulo 3.

### 2.1. *Novas tecnologias e incertezas nos modelos hidrológicos*

De uma maneira simplificada, pode-se dizer que os principais usos dos modelos hidrológicos chuva - vazão se destinam ao dimensionamento do sistema de drenagem, à previsão em tempo real, à extensão de séries históricas e à avaliação das alterações do uso da terra; esta última freqüentemente voltada para o estudo das previsões do sistema devido a ocupação urbana. Com relação aos processos físicos de escoamento das águas pluviais, a alteração devido a essa ocupação é sentida, em geral, pelo aumento da vazão de pico e uma diminuição do tempo de resposta.

O trabalho de BRAS et al (1975) avaliou o caso de Porto Rico, no qual argumentou-se que os efeitos da urbanização não eram significativos devido às características do solo local, argiloso e úmido, resultando em um impacto menor da impermeabilização devido ao desenvolvimento urbano. O trabalho foi de comparação para várias simulações e condições da bacia, obtidas a partir de dois modelos com diferentes graus de particularidade, sendo que o mais simples adota valores médios sobre a bacia, encontrando-se resultados próximos.

BRAS et al (1975) afirmaram que “ O sucesso de modelos simplificados em reproduzir os resultados de modelos detalhados é outra indicação do fato de que as bacias tendem a responder como filtros simples. O problema importante em modelagem urbana não é encontrar um filtro apropriado, mas estimar seus parâmetros apropriadamente .” Notaram, ainda, que a infiltração é importante, mas não é a única causa dos efeitos observados da urbanização. Finalmente, concluíram que as consequências da urbanização dependem não somente das características da bacia, mas também da distribuição espacial das áreas desenvolvidas influenciando a forma e magnitude das respostas hidrológicas principalmente para grandes regiões .

As características topográficas de uma bacia definem os efeitos do movimento da água na sua superfície, influenciando muitos aspectos do sistema hidrológico como, por exemplo, a determinação do caminho percorrido pelas águas de chuva e a distribuição espacial da umidade do solo.

Em uma análise crítica dos modelos que descrevem os fenômenos relacionados aos escoamentos em uma bacia e que levam em conta os seus aspectos topográficos e físicos, BEVEN (1989) argumentou que em desenvolvimentos futuros “ deve-se fazer a avaliação da necessidade de uma teoria de concentração dos processos em escala de sub-células para aproximar a correspondência em escala entre medições e resultados do modelo e aproximar a correspondência entre equações do modelo e processos de campo”. Assim, é preciso o desenvolvimento e/ou utilização de uma metodologia para discretização da bacia em pequenas áreas, onde os processos hidroló-

gicos juntamente com as características topográficas, do solo e da vegetação possam ser considerados uniformes ou representados por relações simples.

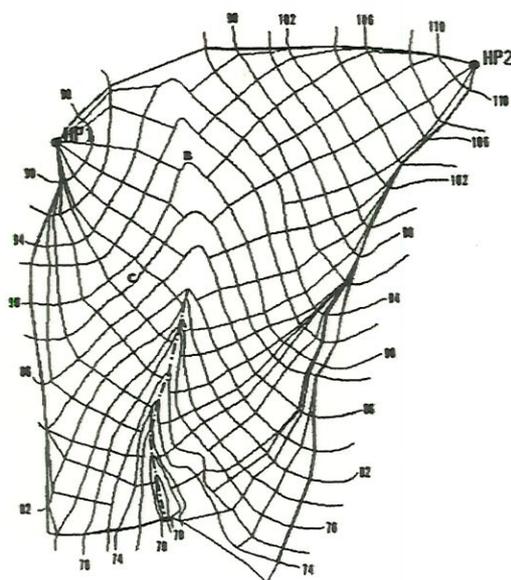
Por sua vez, a variabilidade espacial dos parâmetros pode ser quantificada pelos modelos hidrológicos distribuídos, possibilitando a análise do processo chuva - vazão para os pontos críticos no interior da bacia. Entretanto, a grande quantidade de dados necessários e tempos computacionais maiores tem sido um empecilho para o uso difundido destes modelos em comparação com outros do tipo “caixa preta”.

No que diz respeito do uso de modelos distribuídos e à representação da superfície topográfica pelos modelos de elevação, a análise de terreno é de importância cada vez maior no campo da Hidrologia, uma vez que permite o exame espacial dos processos que constituem o ciclo hidrológico com maior facilidade na manipulação dos dados necessários ao modelo. Neste contexto, MOORE & GRAYSON (1991) descreveram um método automatizado de divisão da bacia em elementos conectados, com base no estudo sobre “faixas de escoamento” e modelos digitais de elevação “vector”. Com esta forma de divisão, os modelos hidrológicos são estruturados, considerando a hidráulica do escoamento no interior da bacia, os efeitos topográficos sobre os mecanismos de produção do escoamento, além de permitir o cálculo direto de características do escoamento distribuído, tais como, velocidade e altura d’água.

No conceito de “faixas de escoamento”, as curvas de nível adjacentes e as linhas do escoamento definem elementos de formas irregulares (Figura 6) . O escoamento superficial entra no elemento ortogonal à curva de nível de montante, e sai ortogonalmente à curva de nível de jusante, sendo que pelas linhas adjacentes impõe-se a condição de parede. Para cada célula, os escoamentos são determinados sucessivamente para os elementos que formam a mesma faixa. Com esta aproximação da bacia, o escoamento unidimensional é considerado dentro de cada elemento, permitindo representar o fenômeno numa superfície complexa tridimensional através de uma série de equações acopladas unidimensionais e resolvidas pelo esquema de diferenças finitas ou elementos finitos.

O método apresentado por MOORE & GRAYSON (1991), TAPES-C (Topographic Analysis Programs for the Environmental Sciences - Contour), aproxima as linhas de escoamento entre as curvas de nível por segmentos de reta como mostra a Figura 7, simplificando o programa e reduzindo o tempo computacional necessário à divisão da bacia.

As linhas de escoamento são calculadas considerando-se dois critérios: 1) distância mínima entre as linhas de contorno adjacentes; 2) as linhas de escoamento são ortogonais às linhas de contorno de jusante. Segundo os autores, estes dois critérios foram usados no sentido de amenizar o erro causado pela consideração dos segmentos de reta na definição das linhas de escoamento, sendo o primeiro usado nas áreas montanhosas e o segundo nas áreas de vale. A aplicação destes critérios é determinado pela curvatura das linhas de contorno (curvatura plana em radianos por metro), ou seja, o espaçamento entre os segmentos de reta é função da curvatura da linha de contorno.



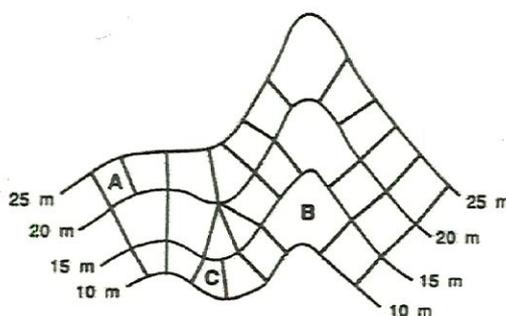


Figura 7: Subdivisão de uma série de linhas de contorno a partir de segmentos de reta

Os autores declararam que um valor máximo pode ser definido para o espaçamento e caso for necessário poder-se-á inserir novas divisões como mostram os pontos A, B e C da Figura 7. O TAPES-C realiza a divisão da bacia a partir das curvas de elevação mais baixas até encontrar o valor da curva mais alta, determinando sucessivamente os elementos para cada par adjacente de curvas e calculando para cada um vários atributos topográficos como, por exemplo, a área do elemento, a área contribuinte de montante e a conexão dos elementos de montante e jusante. Neste trabalho, a aplicação de dois modelos demonstrou a adequação da técnica, além de evidenciar que os modelos de terreno para a simulação dos processos hidrológicos são ferramentas poderosas em hidrologia computacional.

A aplicação dos modelos distribuídos em bacias naturais tem sido de grande sucesso, entretanto, a modelagem em áreas parcialmente urbanizadas apresenta maiores dificuldades, principalmente com relação aos dados de cobertura de terrenos heterogêneos e à definição complicada do escoamento superficial. Na parte urbanizada da bacia, o comportamento hidráulico dos coletores de águas pluviais é característica mais importante do projeto do sistema de drenagem.

O trabalho de ZECH et al (1994) refere-se a um estudo da modelagem da transformação chuva - vazão em bacias parcialmente urbanizadas. Um modelo digital de terreno, representando os níveis do solo para cada nó de uma rede fixa, foi usado

para definir a área urbanizada assim como a parte não desenvolvida da bacia. No modelo as casas e construções foram consideradas através do aumento artificial na elevação dos nós correspondentes, a fim de evitar o escoamento através das habitações como ilustra a Figura 8. A bacia escolhida para a verificação do modelo tem uma área de 15ha e uma grade quadrada de 5x5 m foi usada para assegurar que as casas não seriam desconsideradas pelo modelo. Ressaltaram que, para a rede natural de talvegues e para a rede coletora como valas artificiais, os coeficientes de rugosidade de Manning seriam corrigidos para compensar o comprimento excessivo das canalizações devido à grade quadrada. As comparações do modelo desenvolvido pelos autores com outros procedimentos mostraram que o modelo proposto pareceu ser mais preciso com a seguinte observação: “É interessante notar que a dificuldade principal está na determinação do tempo e da vazão de pico. Constatou-se que o volume de escoamento não é tão diferente de um modelo para outro”.

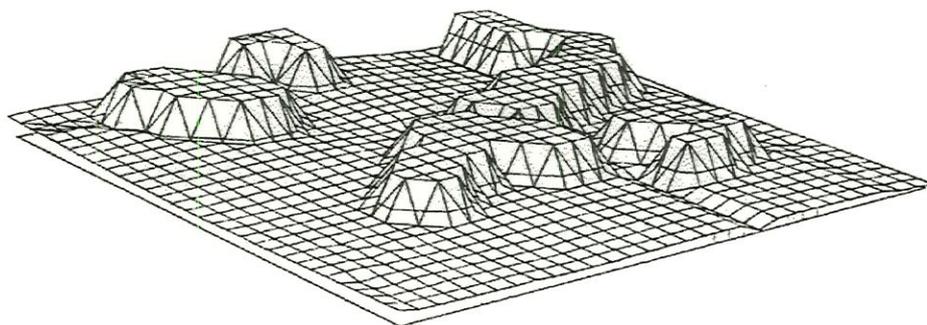


Figura 8: Modelo digital de uma parte da bacia, para aplicação de ZECH et al (1994), incluindo casas, ruas, zonas naturais, rios e coletores.

Com a crescente disponibilidade de trabalhos de representação da superfície da bacia por modelos digitais de terreno, que requerem a digitalização de pontos arbitrários da superfície, vários outros modelos foram desenvolvidos a fim de extrair as características da bacia através deste conjunto de pontos.

O trabalho de GARG & SEN (1994) apresenta um algoritmo para identificar as características da bacia, tais como, canais, divisores de água e planos de escoamento superficial. O algoritmo fornecido extrai as informações referentes à uma rede

triangular irregular, gerada manualmente ou de forma automatizada a partir dos pontos amostrados. No entanto, a geração automática pode representar erroneamente a área física, resultando como por exemplo, a identificação incorreta dos canais que drenam a bacia. O escoamento sobre cada plano triangular é considerado paralelo ao correspondente vetor declividade e as bordas que representam os lados dos triângulos são definidas pelos autores como:

- ◆ segmentos de divisor de água: aquelas bordas cujos triângulos conectados têm vetores declividade apontados no sentido de “saída da borda”. (Figura 9a)
- ◆ segmentos de canal: aquelas bordas cujos vetores declividades dos triângulos conectados apontam para elas. (Figura 9b)
- ◆ segmentos de limite de escoamento: aquelas bordas que têm um dos vetores de declividade de um dos triângulos conectados apontando no sentido de “entrada da borda” e o outro no sentido de “saída da borda”. O escoamento superficial de um plano triangular passa para outro mais baixo através dos limites de escoamento. (Figura 9c)

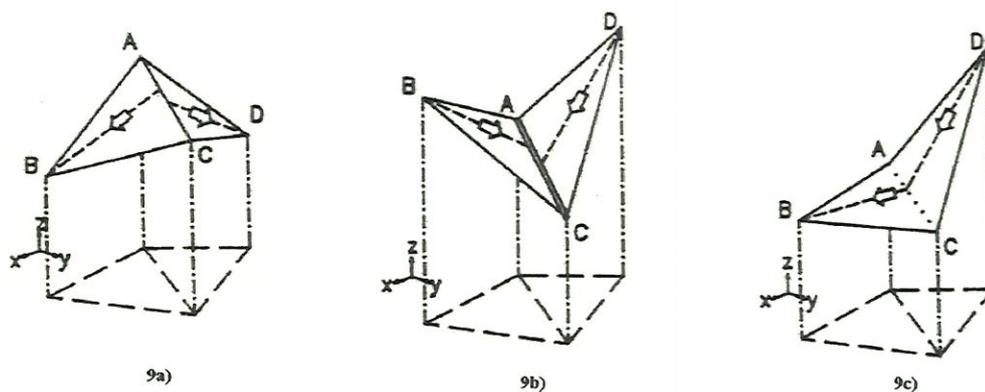


Figura 9: Vetores de declividade para os dois triângulos conectados à borda  $AC$ . **9a)** Sentido de “saída da borda” dos vetores. **9b)** Sentido de “entrada da borda” dos vetores. **9c)** Vetor declividade do triângulo  $ACD$  apontando para a borda  $AC$  e vetor do triângulo  $ABC$  “saindo” da borda.

Os segmentos de canal são, então, ligados para formar a rede de drenagem. O escoamento superficial contribui para o segmento de canal através dos triângulos conectados que podem estar ligados a outros por meio dos limites de escoamento.

O procedimento para a determinação das características dos elementos é baseado na análise vetorial para cada triângulo da rede, identificando os vetores das bordas pela diferença das coordenadas dos vértices do elemento que as definem. Pelo produto vetorial de dois destes vetores, calcula-se o vetor normal  $n$  ao plano (Figura 10a). Um segundo produto deste último pelo vetor unitário vertical resulta no vetor horizontal  $h$  (Figura 10b). Finalmente o vetor declividade é o produto vetorial de  $h \times n$  (Figura 10c). A análise permite a determinação de várias características da bacia.

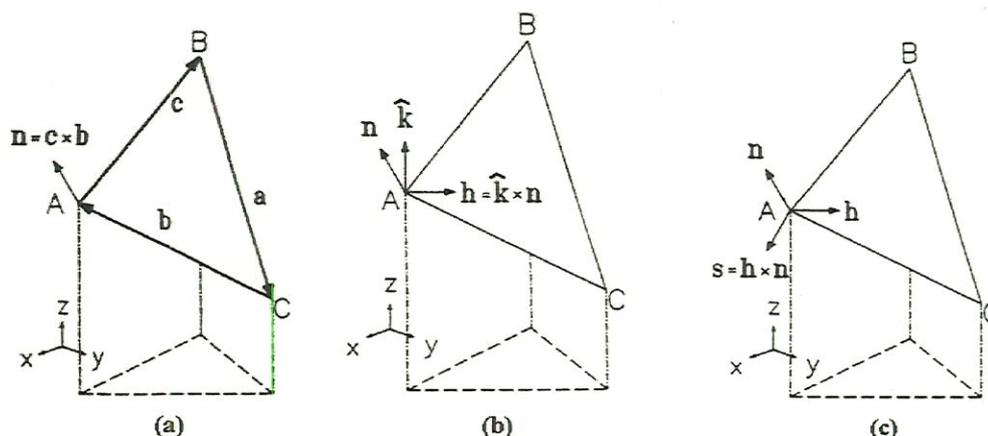


Figura 10: a) Cálculo do vetor normal  $n$  ao triângulo  $ABC$ . b) Cálculo do vetor horizontal  $h$ . c) Cálculo do vetor declividade  $s$  do triângulo.

Além dos algoritmos para a obtenção das características topográficas da área, determinação dos possíveis caminhos de escoamento, divisores da bacia e sistema de drenagem, é possível superpôr mais informações sobre o modelo digital de terreno, tais como, tipos de solo, com classificações correspondentes aos coeficientes de escoamento típicos. Desta forma, pode-se efetuar vários cálculos automaticamente, tornando-se, relativamente fácil, verificar as consequências de possíveis alternativas de ocupação da bacia.

A representação do terreno por modelos digitais de elevação propiciou, também, o surgimento de análise da resolução dos dados sobre as respostas de modelos hidrológicos.

Os objetivos dos estudos de ZHANG & MONTGOMERY (1994) e WOLOCK & PRICE (1994) foram de comparar os efeitos da resolução espacial sobre as previsões do TOPMODEL. A versão do modelo usado no estudo simula o conceito de área fonte variável de geração do escoamento. O conceito de área fonte variável estabelece que o escoamento superficial é produzido somente sobre uma fração pequena da área total da bacia quando a precipitação cai sobre uma área superficial saturada ou quando o escoamento subsuperficial alcança a superfície.

O índice topográfico  $\ln(a/\tan\beta)$  é um parâmetro fundamental do TOPMODEL sendo que, para cada elemento da bacia,  $a$  representa a área de drenagem de montante por unidade do comprimento de contorno entre células adjacentes;  $\tan\beta$  é a declividade da superfície do terreno local. O valor de  $a$  e  $\tan\beta$  são calculados pelas relações :

$$a = \frac{(\text{número de células de montante} + 1) * \text{área da célula}}{C}$$

C

onde C é o comprimento de contato entre células adjacentes.

$$\tan\beta = \frac{\text{variação da elevação entre pontos vizinhos}}{\text{distância horizontal entre pontos vizinhos}}$$

O parâmetro  $\ln(a/\tan\beta)$  é usado para prever a redistribuição topográfica da umidade subsuperficial através de uma relação fundamental do modelo entre este parâmetro e a quantidade de umidade do solo para qualquer ponto  $i$ . Calculando-se

$\ln(a/\tan\beta)$  para cada "pixel" através de "software" usando dados digitais de elevação, determina-se para cada tempo a localização e extensão das áreas saturadas. Altos valores de  $\ln(a/\tan\beta)$  indicam maior potencial de desenvolver a saturação e ocorrem nas locações onde grandes áreas de montante são drenadas (alto valor de  $a$ ) e onde o gradiente gravitacional é baixo (baixo valor de  $\tan\beta$ ). A fração da área superficial saturada é, então, multiplicada pela intensidade de precipitação para o cálculo da quantidade de escoamento superficial.

ZHANG & MONTGOMERY (1994) avaliaram os efeitos dos modelos digitais de elevação com resolução de 4-, 10-, 30-, e 90- m para duas bacias na Califórnia e Oregon. Constataram que a média da distribuição de  $\ln(a/\tan\beta)$  aumentou quando a resolução tornou-se mais grosseira. Verificaram, também, que a vazão de pico simulada aumentou e que a altura para o plano de água decresceu quando foi aumentado o tamanho da célula da grade do modelo digital de elevação.

WOLOCK & PRICE (1994) calcularam a distribuição de  $\ln(a/\tan\beta)$  com resolução dos modelos digitais de elevação de 30-, e 90- m para algumas regiões. O estudo mostrou que "as previsões do TOPMODEL foram muito sensíveis à média da distribuição de  $\ln(a/\tan\beta)$ , afetada pela resolução dos dados e escala do mapa." e, que a representação mais detalhada da superfície topográfica "não é necessariamente a melhor fonte de informação topográfica para estimar a configuração do plano d'água pelo TOPMODEL".

Com relação à aplicação dos modelos, muito se tem discutido sobre os resultados, considerando-se graus de complexidade variados, como aqueles que se baseiam nos princípios físicos do escoamento e modelos mais simples. O trabalho de

LOAGUE & FREEZE <sup>1</sup> *apud* SMITH et al (1994) é um exemplo de que modelos empíricos calibrados forneceram melhores resultados que modelos baseados em princípios físicos, porém, não calibrados. “...o rigor teórico não é por si só promessa de precisão dentro de uma aplicação arbitrária ... e seu emprego incorreto não invalida, em geral, tais modelos” (SMITH et al -1994), comentários esses referentes à discussão da aplicação sobre duas bacias reais de um modelo de terreno relativamente detalhado. Pode-se dizer que é um pensamento errôneo esperar que um modelo que inclui processos físicos, quando aplicado sobre uma parte complexa da natureza com considerações topográficas e numéricas, produzirá simulações tão precisas quanto às medições de um experimento controlado.

Os modelos distribuídos atuais baseiam-se nas equações diferenciais parciais de escoamento no solo e na superfície. Estas equações requerem a especificação da condutividade hidráulica, porosidade, características de umidade do solo e parâmetros de rugosidade de escoamento superficial. Utiliza-se para a resolução uma aproximação numérica das equações, onde o domínio do escoamento é dividido em um número de elementos, os quais podem apresentar valores diferentes para os seus parâmetros. A estimativa dos valores dos parâmetros é difícil uma vez que não há uma correspondência em escala entre modelo e medições de campo (BEVEN -1993). Não é certo, entretanto, concluir que um modelo matemático seja falho porque seus parâmetros exibem variação espacial. “O fato de que não existe um valor médio simples da rugosidade de Manning para uma bacia inteira, não significa que sua relação seja inaplicável.” (SMITH et al-1994)

---

<sup>1</sup> Loague, K.M., and R.A. Freeze, A comparison of rainfall runoff modeling techniques on small upland catchments, *Water Resources Research*, 21(2), 229-248, 1985 *apud* SMITH, R.E., D.R. GOODRICH, D.A. WOOLHISER and J.R. SIMANTON, 1994. Comment on “Physically based hydrologic modeling 2, Is the concept realistic?” by R.B. GRAYSON, I.D. MOORE and T.A. McMAHON, *Water Resources Research*, 30(3): 851-854

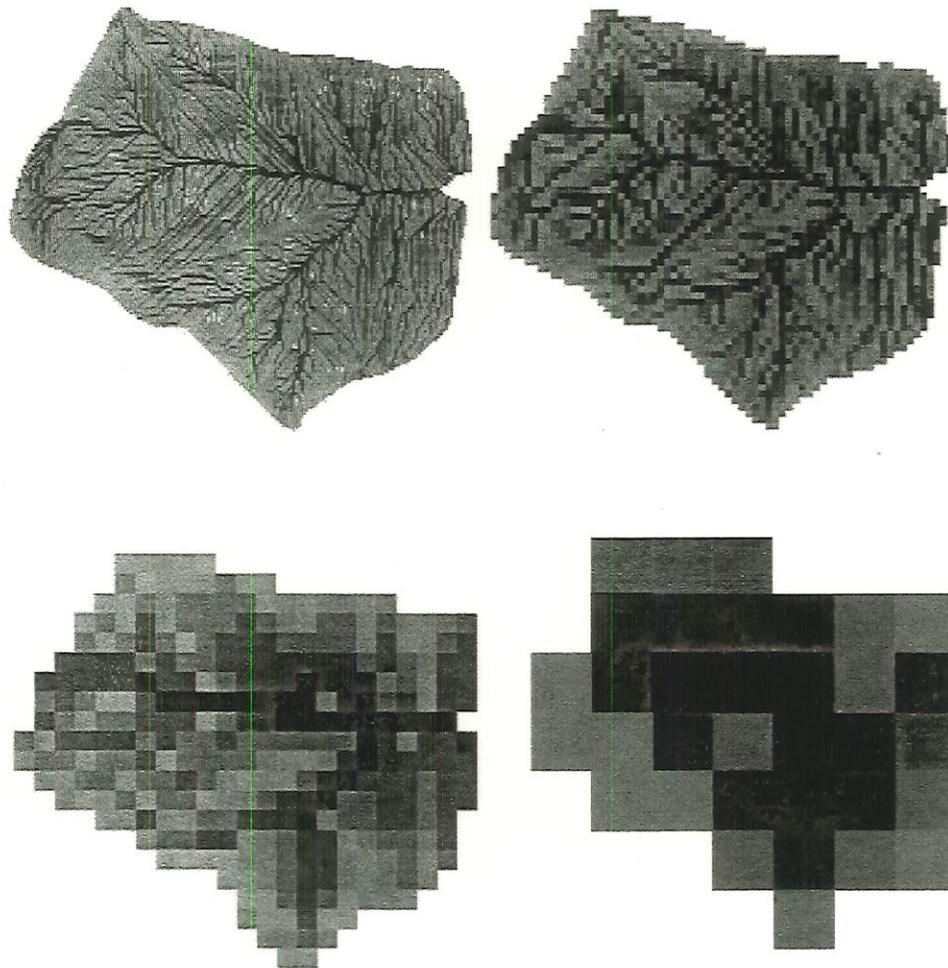


Figura 11: Mapas de uma bacia de ZHANG & MONTGOMERY (1994) mostrando a distribuição de  $\ln(a/\tan\beta)$  para grades de 4,10,30 e 90m. Células mais escuras indicam maiores valores do índice.

Todos os modelos são aproximações dos fenômenos que constituem o ciclo hidrológico, contendo parâmetros livres que devem ser calibrados para uma situação particular na qual o modelo é aplicado, não sendo difícil obter resultados representativos do comportamento das variáveis observadas. Por outro lado, sabe-se que os erros nos resultados de um modelo refletem não somente os erros na sua estrutura mas, também, os erros associados com a especificação dos dados de entrada e con-

dições de contorno e os erros das medições das variáveis observadas. (BEVEN-1989)

Numa citação preliminar do uso de modelos hidrológicos distribuídos, BEVEN (1989) declarou que os resultados de tais modelos deveriam estar associados à estimativa de sua incerteza.

O trabalho de SCHILING & FUCHS (1986) consideraram a influência combinada de várias incertezas consistindo de um estudo das fontes de erros e seus efeitos sobre a modelagem dos escoamentos. O volume e a vazão de pico resultantes de várias técnicas de modelagem foram, então, comparadas aos resultados obtidos por um modelo de referência, com um grau de complexidade maior, representando a alta resolução espacial da chuva, taxas variáveis de perda, hidrogramas de escoamento para vários locais da bacia e escoamento dinâmico pleno nos condutos. Para identificar os componentes que causavam mais imprecisão, os hidrogramas obtidos com o modelo de referência foram comparados àqueles gerados pela simplificação de alguns dos componentes individualmente: procedimento de propagação, modelo de escoamento superficial, taxas de perdas ou resolução espacial da chuva. Concluíram que a resolução dos dados de chuva é de importância superior para a precisão dos hidrogramas calculados.

Nesse estudo, SCHILING & FUCHS (1986) reduziram a resolução espacial da chuva de 81 postos de medição para, apenas, uma entrada de chuva aplicada sobre toda a bacia resultando em uma severa redução de credibilidade do modelo. Notaram que “os erros nas entradas de chuva são amplificados pela transformação chuva - vazão” tal que um erro na altura de chuva de 30 % resulta num erro de volume de 60 % e um erro da vazão de pico de 80 %” e concluíram que “... é inadequado usar um modelo de escoamento sofisticado para alcançar um nível desejado de precisão se a resolução da chuva é baixa”.

MELCHING et al (1990) apresentaram uma estrutura que fornece informações sobre a probabilidade das descargas de pico de enchentes produzidas por eventos individuais de chuva, sendo expressa por uma função de distribuição acumulada e/ou função densidade de probabilidade. A estrutura apresentada possibilita o uso de vários métodos de análise de confiança, por exemplo, simulação Monte Carlo, com a finalidade de avaliar o efeito combinado das incertezas sobre o hidrograma de saída dos modelos hidrológicos.

A distribuição de probabilidade do resultado do modelo hidrológico para um evento, sujeito às várias incertezas, é avaliado pela comparação da variável hidrológica de saída com algum estado limite, ou seja, uma escolha do valor da variável,  $T_H$ , para a qual se deseja saber a probabilidade excedente deste valor, e foi representado pela seguinte equação:

$$Z = T_H - \lambda h(\theta)$$

onde  $h(\cdot)$  é uma função que representa as estimativas do modelo;  $\theta$  é um vetor contendo os parâmetros e dados de entrada para o modelo; e  $\lambda$  é um fator de correção do modelo que expressa a relação entre o resultado ótimo do modelo e o valor verdadeiro da variável hidrológica.

O limite hidrológico é uma variável usada no método para estimar a função de distribuição acumulada da variável de interesse, fixando o valor de  $T_H$  como, por exemplo,  $28\text{m}^3/\text{s}$ , determinando-se a probabilidade excedente,  $P_E$ , que para o método de Monte Carlo é obtida diretamente por:

$$P_E = \frac{\text{número de funções com } Z < 0}{\text{número total de funções}}$$

O valor de  $T_H$  é aumentado, e a correspondente  $P_E$  é calculada até que seja obtida a função de distribuição acumulada.

O procedimento de análise, AFOSM, da confiança dos modelos chuva - vazão foi aplicado à uma bacia de 15000 km<sup>2</sup>, usando-se o modelo HEC-1 para demonstrar a técnica. Dos resultados obtidos, concluíram que “ os principais contribuintes para a não confiança das predições do modelo são as perdas iniciais e parâmetros de perda contínua em HEC-1, que presume confirmar quantitativamente o consenso de que a maior incerteza na previsão é a estimacão da chuva efetiva”.

Prosseguindo a revisão de trabalhos de análise dos resultados de modelos hidrológicos, BINLEY et al (1991) avaliou a incerteza de um modelo hidrológico distribuído, o qual emprega as equações do escoamento e representa a bacia como um número de planos e canais. O escoamento foi modelado pela equação de onda cinemática unidimensional e resolvida pelo método de diferenças finitas, enquanto o escoamento subsuperficial foi representado pela equação de Richards. A distribuição espacial dos parâmetros foi considerada uniforme: condutividade hidráulica saturada, o conteúdo de umidade saturada, o potencial inicial de capilaridade do solo e o coeficiente de rugosidade do escoamento superficial. Estes parâmetros foram calibrados para sua aplicação em uma bacia real de 3.9 km<sup>2</sup>. Para se obter a variabilidade da função de resposta, foram comparados o método Monte Carlo e Rosenblueth. O primeiro envolve um grande número de realizações dos valores dos parâmetros e, logo, das respostas do modelo. O segundo é descrito de forma generalizada por:

$$E [ (y)^N ] = 1/2^m [ (q_{+++...m})(y_{+++...m})^N + (q_{-++...m})(y_{-++...m})^N + \dots + (q_{---...m})(y_{---...m})^N ]$$

onde  $E [ (y)^N ]$  é o valor esperado do momento  $N$  da função  $y$ ,  $m$  é o número de parâmetros,  $(y_{+++...m})^N$  indica o momento  $N$  da função avaliada com os  $m$  parâmetros para ou média + ou média - 1 desvio padrão e a função  $q$  é definida em termos de uma matriz de correlacão  $\rho$  dos parâmetros como

$$q_{i,j,...,m} = 1 + \sum_{g=1}^m \sum_{h=1}^m g' h' \delta_{g,h} \rho_{g,h}$$

onde

$$\delta_{g,h} = 0 \quad g \geq h$$

$$\delta_{g,h} = 1 \quad g < h$$

e  $g$  e  $h$  são -1 ou +1 dependendo do sinal de permutação do subscrito da função  $q$ .

Exemplo:  $q_{++++} = 1 + \rho_{12} - \rho_{13} + \rho_{14} - \rho_{23} + \rho_{24} - \rho_{34}$

O método de Rosenblueth permite a determinação aproximada da média e variância da resposta a partir do conhecimento das respostas simuladas para valores médios  $\pm$  desvio padrão para cada parâmetro. O método requer  $2^m$  simulações, onde  $m$  é o número de parâmetros. As respostas encontradas foram bem próximas, além de evidenciar que o método de Rosenblueth permite uma estimativa inicial razoável com base em um pequeno número de simulações. O efeito das mudanças do uso do solo sobre a incerteza dos resultados foi também avaliado. A investigação da sensibilidade da incerteza nos resultados do modelo para as características de uso do solo foi feita através de simulações Monte Carlo, usando a mesma faixa de valor para os quatro parâmetros calibrados no modelo e mudando os valores de parâmetros anteriormente definidos para vegetação, com predominância de gramado (1ª situação) e floresta (2ª situação), tais como: albedo, capacidade de interceptação, etc. No entanto, verificou-se que o parâmetro referente ao potencial inicial de capilaridade do solo,  $\Psi_{in}$ , pode ser significativamente diferente para as duas condições estudadas. Este foi modificado e o hidrograma médio apresentou, claramente, sensibilidade às mudanças da bacia. Os limites de incerteza também foram sensíveis, em particular para a vazão de pico. BINLEY et al (1991) notaram pouca diferença nos hidrogramas médios e limites quando uma análise similar a Monte Carlo foi realizada sobre a alteração do uso do solo, porém, mantendo-se a distribuição original (gramado) para  $\Psi_{in}$ . “Os resultados, portanto, enfatizam a importância das estimativas e limites adequados de cada um dos parâmetros para prever os efeitos das mudanças das características da bacia”.

Apesar de todos os problemas relativos às incertezas presentes na modelagem hidrológica, não se pode deixar de reconhecer a importância de considerar os princí-

pios hidráulicos básicos, como, por exemplo, a equação de onda cinemática. KIBLER (1993) examinou as considerações fundamentais no contexto da modelagem de onda cinemática para escoamentos superficiais, ressaltando que o sucesso do esforço de modelagem depende do esquema de solução numérica, da determinação da chuva efetiva e das relações de resistência. No trabalho de KIBLER et al<sup>2</sup> *apud* KIBLER (1993) realizou-se um inventário de quarenta “softwares” de drenagem urbana disponíveis, dos quais apenas sete utilizavam o procedimento de onda cinemática, que se situou bem atrás do método racional e do hidrograma unitário sintético de Snyder com relação à frequência de uso. KIBLER (1993) testou três esquemas numéricos de solução das equações de escoamento superficial cinemático: método das características; Newton Raphson; e uma versão de passo fixo para o esquema de diferenças finitas adiantado no tempo. Os resultados obtidos mostraram a influência das técnicas numéricas alternativas e das relações de atrito, conseguindo-se melhores resultados com a redução do passo  $\Delta x$  para a aplicação do esquema de Newton Raphson e diferenças finitas .

Finalizando este item introdutório sobre a questão relativa às incertezas nos modelos hidrológicos, o trabalho de McCUEN et al (1984) apresentou e classificou vários métodos existentes para estimar o tempo de concentração de uma bacia, parâmetro necessário a vários modelos que tratam os problemas de enchentes. Os erros no parâmetro temporal causam erros nos dimensionamentos que se baseiam nesta estimativa, uma vez que a precisão dos hidrogramas de cheia é sensível à precisão do parâmetro temporal estimado.

---

<sup>2</sup> Kibler, D.F., M.E. Jennings, G.L. Lewis, B.A. Tschantz, and S.G. Walesh, “ Vendor Survey Report by ASCE Task Committee on Microcomputer Software in Urban Hydrology” Proceedings of Sixth ASCE Conference on Computing in Civil Engineering , 367-374, Atlanta , September 1989 *apud* KIBLER, D.F., 1991. Model Mania in Urban Hydrology : Present Dilemmas , *Proceedings of the 18th Annual Conference and Symposium*, Orleans, LA, USA.

Dentre as equações usadas para estimar o tempo de concentração, onze equações foram comparadas, usando-se dados coletados de quarenta e oito bacias urbanas, das quais trinta e seis tiveram área menor do que 800 ha . Estas equações utilizam parâmetros de definição de características hidráulicas e geométricas como, por exemplo, declividade, coeficiente de rugosidade, área de drenagem, que são relacionadas à bacia ou canal, quando este contribuir significativamente para o tempo de percurso da água na bacia . O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para uma partícula de água escoar hidraulicamente do ponto mais distante da bacia até a saída ou ponto de projeto.

Para cada bacia, foi calculado um tempo de concentração após uma inspeção de campo, sendo este valor tratado como “verdadeiro” e base para comparar as fórmulas empíricas dos seguintes métodos: Carter, Eagleson, Espey - Winslow, FAA, Onda cinemática, Kerby-Hathaway, Kirpich (Pa.), Kirpich (Tenn), SCS Lag, SCS Velocity, Van Sckile (McCUEN et al 1984). Estes métodos foram comparados através de estatística de tendência normalizada, erro médio, desvio padrão dos erros. As menores tendências foram obtidas com o método de velocidade de Eagleson, mas segundo os autores, já era esperado pelo fato de ser muito similar àquele utilizado para o cálculo dos valores medidos em condições de campo. Quatro outros métodos forneceram bons resultados: SCS Lag, FAA, Kerby -Hathawaye e Espey-Winslow. Concluíram então, que “ os resultados de comparação dos onze métodos para estimativa do tempo de concentração indicam que estas estimativas feitas por equações empíricas estão sujeitas a consideráveis erros quando aplicados à uma bacia simples”.

## 2.2. *O Modelo de GOODRICH (1991)*

O método dos elementos finitos tem se revelado uma ferramenta eficiente na obtenção de soluções aproximadas para alguns tipos de equações diferenciais parciais que descrevem um fenômeno físico. O potencial do uso desta técnica na modelagem

hidrológica tem sido demonstrado pela sua flexibilidade de aproximar fronteiras com geometria complexa. (CARDOSO - 1996)

Numa reunião de conceitos de discretização do domínio, representado pela bacia hidrográfica de estudo, em elementos triangulares e o uso de modelos digitais de terreno de rede triangular irregular, GOODRICH et al (1991) apresentaram um trabalho no qual as células da rede foram usadas diretamente como elementos de discretização da área, sobre os quais ocorrem o escoamento. A metodologia desenvolvida pelos autores utiliza as equações de onda cinemática bidimensionais, aproximando as derivadas espaciais por interpolações discretas sobre as faces topográficas da rede triangular irregular e a derivada temporal por um esquema de diferenças finitas. A diferença fundamental deste trabalho em relação a outros que fazem o uso desta técnica é a consideração do escoamento face a face, discretizando cada face em um número de elementos triangulares coplanares, obtendo-se a resposta por integração sobre cada uma das faces; toma-se como condição de contorno de jusante o valor da altura d'água do elemento de montante, anteriormente calculada, ao invés da solução padrão que integra sobre todos os nós do domínio para cada passo de tempo. Esta metodologia fornece um pequeno número de equações a serem resolvidas simultaneamente. O modelo desenvolvido liga o escoamento de superfície ao esquema de discretização por diferenças finitas para os escoamentos em canais com bons resultados nas simulações realizadas. No entanto, nos vários trabalhos envolvendo a aproximação da bacia por elementos têm-se encontrado o problema de “choques cinemáticos”, que ocorrem onde as faces de jusante apresentam uma declividade menor e/ou uma rugosidade hidráulica maior (CARDOSO - 1996).

O trabalho de ROSS<sup>3</sup> et al *apud* CARDOSO (1996) simulou a partir da hipótese de onda cinemática, o escoamento em canal e em superfície utilizando elementos finitos, concluindo que dificuldades de convergência podem aparecer devido à

---

<sup>3</sup> Ross, B.B., D.N. Contractor, and V.O. Shanholtz, 1977. Finite element simulation of overland and channel flow., Trans. ASAE, 20(4); 705 712 *apud* CARDOSO N.,A ., 1996. *Aplicabilidade das equações de Saint-Venant a modelos bi-dimensionais de escoamento superficial*, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina

presença de choques cinemáticos quando as seções transversais do canal forem variáveis.

No modelo desenvolvido, GOODRICH et al (1991) concluíram pelas simulações realizadas que “ a técnica possui robustez numérica suficiente para manipular os choques cinemáticos”, não se conseguindo, entretanto, evitá-los .

Neste trabalho de dissertação, a parte física da modelagem chuva - vazão é baseada no modelo de GOODRICH et al (1991), diferenciando-se quanto à idéia de integração sobre cada face, a qual foi substituída pela hipótese de que o escoamento ocorre através de microcanais em cada elemento da rede irregular sendo as equações resolvidas numericamente por diferenças finitas simples; acredita-se que esta hipótese seja uma boa aproximação do fenômeno uma vez que os planos que representam os elementos do sistema não são na realidade perfeitos. Por outro lado, tomando-se como base as experiências de diversos autores quanto à modelagem do escoamento através de onda cinemática, a convergência e estabilidade da solução numérica deverão ser verificadas.

### **2.3. Modelo de escoamento superficial baseado em SIG “raster”**

Na revisão de modelos distribuídos aplicados à bacias urbanas, destaca-se o modelo construído por SMITH (1993) ligado à dados obtidos por “layers” para realizar a análise de escoamento urbano, utilizando um SIG “raster”. Por meio deste modelo calculam-se as três principais formas de escoamento em área urbana : escoamento superficial, escoamento em ruas e escoamentos nas galerias. A célula apresentada na Figura 5 mostra os componentes envolvidos no escoamento superficial.

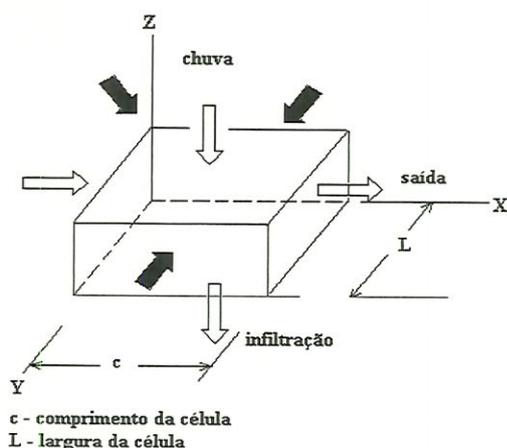


Figura 12: representação das efluências e das afluições em uma célula simples do modelo "raster".

A transformação da chuva efetiva em escoamento superficial é realizada por meio do acoplamento da equação da continuidade e da equação de escoamento para canais largos, considerando para as células projetadas como elementos de rua a equação de Manning para seções retangulares. Nas células contendo entrada de galerias, considerou-se que se a soma das entradas na célula e canalização for maior do que a capacidade de esgotamento do conduto existente, o funcionamento ocorre à seção plena e o excesso esco superficialmente; caso contrário, a vazão é totalmente conduzida pela galeria e o escoamento superficial não ocorre. A localização de cada poço de visita ou nó é baseada no sistema de coordenadas usado no conjunto de dados "raster"; as informações específicas das canalizações, tais como, comprimento, rugosidade, declividade, etc, são tomadas por meio de um arquivo de dados separado.

Os dados das "layers" representando solo, área impermeável, valor  $n$  de Manning e o sistema de ruas foram tomados considerando um tamanho de célula de largura igual a 12 m, por corresponder à largura das ruas residenciais. No conjunto de dados "rasterizados" as células das ruas foram identificadas com um atributo igual a um, enquanto todas as outras células foram consideradas com o valor zero. No procedimento de conversão da área urbana, representada pelas linhas centrais das ruas, houve a necessidade de correção manual no sentido de "afinar" as linhas e não prejudicar o processo de escoamento pelas ruas, realizando-se a correção da matriz de

células em formato ASCII – formato padrão para representação de caracteres – em um processador “word”, o que foi considerado relativamente simples em vista do pequeno tamanho da “layer”. A Figura 13 ilustra o procedimento de conversão descrito.

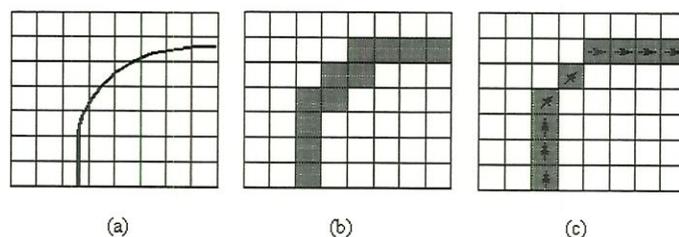


Figura 13: Conversão “vector” para “raster” das linhas de centro das ruas. a) Linha de centro da rua digitalizada e sobreposta à grade. b) Linha de centro “rasterizada”. c) Linha de centro corrigida manualmente. As linhas tracejadas indicam a orientação da célula considerada pelo modelo hidrológico. As flechas indicam a direção do escoamento superficial ao longo da rua.

O modelo foi aplicado à uma bacia de 9.4ha, definida por um “layout” simples, o que facilitou a sua representação “raster” quando se considera os procedimentos para a determinação das conexões entre as células do modelo. A determinação da direção do escoamento é feita com base na análise das oito células vizinhas, sendo que para as células identificadas como ruas esta comparação é feita apenas com as células vizinhas que também representam as ruas. Em trabalho complementar foram, também, realizadas várias simulações com ótimos resultados comparados aos hidrogramas medidos levando à seguinte conclusão: “Embora sendo um procedimento tedioso, a digitalização pode ser vista como uma metodologia básica para entrada de dados...” além de “oferecer uma significativa redução do tempo para a obtenção de dados fornecendo resultados aceitáveis para a modelagem hidrológica”. (SMITH & VIDMAR- 1994)

#### 2.4. *Análise de incerteza de HROMADKA (1989)*

Um modelo hidrológico pode ser escrito de forma genérica como (HAAN & WILSON -1991):

$$Q = f(I, P, t) + e$$

onde  $Q$  representa a resposta do modelo,  $I$  as entradas (precipitação, uso de solo, etc),  $P$  os parâmetros que devem ser estimados (rugosidade do canal, parâmetros de infiltração, etc),  $t$  o tempo e  $e$  o erro nas respostas. A função  $f$  inclui os algoritmos e estrutura do programa que compõe o modelo. Cada representação dos processos do ciclo hidrológico elaborada para estimar a vazão de pico fornece um valor diferente, resultando em incerteza quanto à validade da estrutura do modelo.

No trabalho de HROMADKA (1989) o problema da incerteza é considerado através de um método que pode ser incorporado em quase todos os modelos de escoamento superficial.

O método é baseado na teoria da equação integral estocástica e é usada para representar a variação total entre os dados de escoamento medido e as estimativas correspondentes do modelo. Pode-se dizer, de forma simplificada, que a equação integral estocástica relaciona a diferença entre as vazões medidas e as vazões simuladas pelo modelo, através da convolução de uma função conhecida como, por exemplo, a precipitação, e uma função  $F$  cujo valor pode ser determinado para cada evento de chuva.

No entanto, para um evento futuro qualquer o valor da função  $F$  não é conhecido mas é derivado de uma distribuição de valores derivados de todos os eventos anteriores e uniformemente distribuídos no intervalo  $[1, m]$  onde  $m$  é o número de eventos disponíveis.

Para demonstrar o uso do método , HROMADKA (1989) considerou a aplicação de vários modelos em diferentes bacias, observando que “ obviamente, o método da equação integral estocástica depende não somente do modelo usado, mas também do espaço amostral das chuvas associadas com a chuva de projeto, e os erros de amostragem tipicamente encontrados em qualquer análise estatística”.

### 3. *METODOLOGIA*

#### 3.1. *Introdução*

A essência do modelo hidrológico para bacias urbanas, proposto no presente trabalho, é a aproximação numérica dos fenômenos mais significativos que constituem o processo de escoamento superficial, somando-se às possibilidades de alta resolução na determinação destes processos através da representação gráfica do traçado urbanístico da área e da infra-estrutura física existente na bacia.

No modelo, os fenômenos hidrológicos são analisados quantitativamente a partir da representação discreta da bacia hidrográfica, a qual é definida como uma malha de pequenos elementos conexos. Para estes elementos, são considerados parâmetros físicos médios, porém, uniformemente distribuídos dentro de um intervalo que exprime a incerteza quanto à determinação do seu valor.

Os escoamentos são determinados em cada elemento finito que discretiza a bacia hidrográfica. Para a área permeável da bacia, os escoamentos são considerados conforme o princípio hortoniano, segundo o qual a geração dos escoamentos ocorre a partir da progressiva diminuição da capacidade de infiltração, como consequência do acúmulo de água no solo. Estes escoamentos são conduzidos pelos microcanais para os elementos de jusante, sendo cada canal do elemento definido através de um conjunto de características médias como, por exemplo, declividade, comprimento, rugosidade e área de contribuição. Embora o escoamento superficial tenha interação

direta com outros componentes do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração e interceptação, estes não foram considerados no modelo.

Para a área urbana da bacia, consideram-se os escoamentos originários de superfícies impermeáveis, tais como, telhados, além da contribuição de superfícies permeáveis como, por exemplo, quintais e jardins, levando-se em conta as condições de umidade e intensidade de chuva. Esses escoamentos são modelados a partir das ruas, nas quais as sarjetas são consideradas como canais dos elementos urbanos e galerias de águas pluviais. Dessa microdrenagem os escoamentos são transferidos para os canais principais e por eles propagados até o exutório da bacia.

Considera-se, no modelo, a ligação entre as sub-bacias do domínio, inclusive as contribuições da área urbana para a área rural, além da representação simples do caminho percorrido pelas águas pluviais no interior da área urbana. Facilidades de construção dos dados do modelo são possíveis através da adequação de “softwares” gráficos disponíveis aos algoritmos desenvolvidos para modelos de terreno.

Na análise de resposta do modelo, considera-se a incerteza combinada relativa à determinação dos diversos parâmetros e da estrutura do modelo, através do método da equação integral estocástica. Essa equação representa o erro entre o resultado real e o simulado, obtido pela convolução de uma função conhecida, como por exemplo a precipitação, e uma função definida a partir de realizações de um processo estocástico.

O método para análise de incertezas, a representação dos fenômenos hidrológicos e os passos de construção do modelo são apresentados nos itens seguintes.

### **3.2. Caracterização da bacia e processos hidrológicos**

Com a finalidade de alcançar maior clareza na exposição dos procedimentos e considerações do processo de modelagem, preferiu-se descrever separadamente os passos para a representação dos fenômenos ligados ao escoamento superficial que ocorrem na área urbana e na área rural da bacia.

#### **3.2.1. Modelagem da bacia rural**

Os procedimentos numéricos e a representação da bacia descritos neste item tratam da hipótese do trabalho, na qual os escoamentos em toda a área rural ocorrem através de uma rede de microcanais da bacia hidrográfica, esta aproximada por elementos finitos triangulares.

Assume-se, no modelo, que os escoamentos sejam totalmente definidos pelas características geométricas dos elementos como, por exemplo, a área, caracterização dos microcanais e dos valores médios dos parâmetros de um elemento.

##### **3.2.1.1. Representação da bacia**

A figura 14 ilustra uma discretização, por elementos finitos triangulares de parte de uma bacia hipotética, onde os escoamentos de superfície ocorrem através de uma rede de microcanais que se interligam para formar o sistema natural de drenagem.

Os processos de propagação do escoamento e de transformação chuva - vazão são simulados para cada elemento, o qual é considerado uma unidade na qual os parâmetros do modelo são uniformes. Desta forma, considerando-se as condições de precipitação e os valores médios dos parâmetros do solo, os escoamentos poderão ocorrer em diferentes locais da bacia, os quais são equacionados de elemento para elemento. Assim, como ilustra a figura 14, a vazão de saída em uma borda  $j$  de um elemento  $e$ , será a de entrada para o elemento de jusante, ou quando a borda  $j$  coincidir com um trecho de canal, a vazão será de contribuição lateral para o trecho.

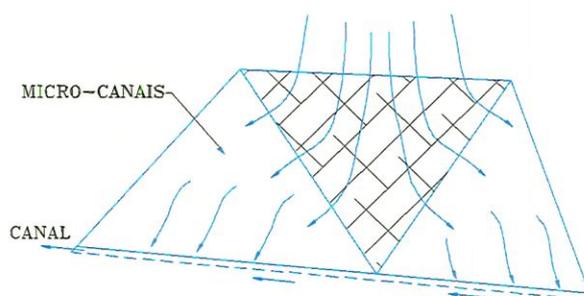


Figura 14: representação dos escoamentos em uma parte de uma bacia hidrográfica hipotética aproximada por elementos triangulares.

No modelo, considera-se que os microcanais no interior de um elemento são totalmente definidos pela sua representação média, ou seja, o escoamento ocorrerá em um microcanal com características médias de declividade, seção transversal, comprimento, área de contribuição e rugosidade. Assim, para o elemento em destaque na figura 14, a vazão total de saída será igual a vazão do microcanal médio multiplicado pelo número de canais do elemento. A determinação das características médias é tratada no sub-item seguinte.

### 3.2.1.2. Determinação das características geométricas dos elementos

Com base na análise vetorial dos pontos que definem um plano apresentada por GARG & SEN (1994), desenvolveu-se um algoritmo para a determinação das seguintes características de interesse do elemento: área, declividade e direção principal do escoamento, esta última intimamente relacionada à conexão entre os vários elementos que representam a bacia.

Considerando-se na figura 15 como um elemento qualquer da superfície topográfica hipotética da figura 14, o vetor posição de cada ponto do plano, com coordenadas  $x_v$ ,  $y_v$  e  $z_v$ , onde o subscrito  $v$  refere-se a um dos vértices  $A$ ,  $B$  ou  $C$  do elemento, tem-se:

$$\vec{r}_v = x_v \vec{i} + y_v \vec{j} + z_v \vec{k}$$

onde  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  são os vetores unitários ortogonais; a partir destes vetores posição, define-se os vetores das bordas  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  e  $\mathbf{c}$ , expressos por:

$$\mathbf{a} = \mathbf{r}_C - \mathbf{r}_B; \mathbf{b} = \mathbf{r}_A - \mathbf{r}_C; \mathbf{c} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$$

São definidas as seguintes diferenças entre as coordenadas dos vértices:

$X1 = x_B - x_A$	$X2 = x_A - x_C$	$X3 = x_C - x_B$
$Y1 = x_B - x_A$	$Y2 = x_A - x_C$	$Y3 = x_C - x_B$
$Z1 = x_B - x_A$	$Z2 = x_A - x_C$	$Z3 = x_C - x_B$

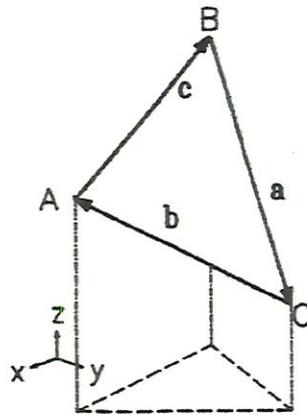


Figura 15: representação no plano cartesiano de um elemento qualquer da superfície topográfica definido pelos vértices  $A, B$  e  $C$ .

Considerando as várias operações vetoriais (ver item 2 –Revisão de Literatura–), o vetor declividade do plano é expresso por :

$$\vec{s} = [(Y_1 \times Z_2 - Y_2 \times Z_1) \times (X_1 \times Y_2 - X_2 \times Y_1)]\vec{i} + [(Z_1 \times X_2 - Z_2 \times X_1) \times (X_1 \times Y_2 - X_2 \times Y_1)]\vec{j} - [(Z_1 \times X_2 - Z_2 \times X_1)^2 + (Y_1 \times Z_2 - Y_2 \times Z_1)^2]\vec{k}$$

ou

$$\vec{s} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$$

Nota-se na equação anterior, que a componente vertical é sempre negativa, indicando que o vetor declividade estará apontando sempre no sentido de “descida” do plano, simplificando a análise de entrada/saída de vazão para cada borda do elemento, quando se toma um vetor paralelo ao vetor  $\vec{s}$  definido por um ponto da reta que contém a borda analisada e pelo vértice do plano oposto a esta borda .

Um melhor entendimento do que foi descrito no parágrafo anterior pode ser conseguido considerando-se, como mostra a figura 16, uma reta  $r$  tal que, por exemplo  $A(x_A, y_A, z_A) \in r$ ,  $C(x_C, y_C, z_C) \in r$  e um ponto qualquer  $X(x, y, z) \in r$ , e sendo o

vetor  $\vec{b} = (X_2, Y_2, Z_2)$  paralelo a  $r$ , pode-se ver que  $A\vec{X}$  e  $\vec{b}$  são linearmente dependentes tal que:

$$X = A + \lambda \vec{b}$$

que é chamada equação vetorial de  $r$ , e que pode ser, também escrita como:

$$(x, y, z) = (x_A, y_A, z_A) + \lambda(X_2, Y_2, Z_2)$$

ou

$$x = x_A + \lambda X_2$$

$$y = y_A + \lambda Y_2$$

$$z = z_A + \lambda Z_2$$

Estas são chamadas equações paramétricas de  $r$ .

Se nas equações anteriores  $X_2$ ,  $Y_2$  e  $Z_2$  forem não nulos, então a equação pode ser escrita sem o parâmetro  $\lambda$ , obtendo-se a equação da reta  $r$  na forma simétrica:

$$\frac{x - x_A}{X_2} = \frac{y - y_A}{Y_2} = \frac{z - z_A}{Z_2} \quad (3.1)$$

Com esse resultado, pode-se dizer que a equação de uma reta  $r_2$ , paralela a  $s(a_s, b_s, c_s)$  e que passa pelo vértice do triângulo oposto a reta  $r$  ( $A, C$ ), ponto  $B$ , é expressa por: :

$$\frac{x - x_B}{as} = \frac{y - y_B}{bs} = \frac{z - z_B}{cs} \quad (3.2)$$

onde  $(x, y, z)$  representa um ponto qualquer desta reta.

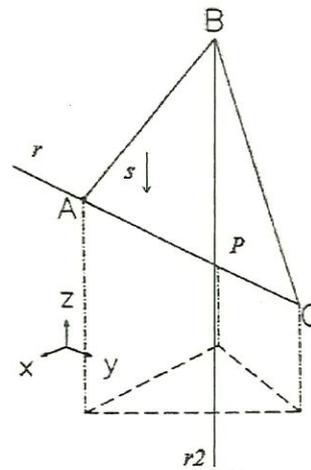


Figura 16: Representação gráfica das retas  $r$  e  $r_2$  para um elemento qualquer

A partir das equações (3.1) e (3.2) pode-se determinar analiticamente o ponto  $P(x_p, y_p, z_p)$  em que a reta  $r_2$  e a reta  $r$  são concorrentes. Se o vetor dado por  $\vec{BP}$  tiver o mesmo sentido do vetor declividade  $\vec{s}$ , então, a borda será de “saída” do elemento. Caso contrário, a borda será definida como “entrada” para este plano.

Condições especiais em que os componentes dos vetores direcionais para as retas  $r_2$  e  $r$  são nulos, ou então, quando a borda analisada é paralela ao vetor  $\vec{s}$ , são tratadas particularmente a fim de se evitar erros na determinação destas características. O mesmo procedimento é descrito para as bordas  $a$  e  $c$  da figura 15.

Finalmente, os valores da área do elemento,  $AE$ , e da declividade,  $\tan\theta$ , são obtidas, respectivamente, por :

$$AE = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \\ x_C & y_C & 1 \end{vmatrix}$$

$$\tan \theta = \frac{cs}{\sqrt{as^2 + bs^2}}$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação do plano.

### ***3.2.1.3. Determinação do número de microcanais para cada elemento e das características médias dos canais***

A partir da hipótese básica do modelo proposto, que considera os escoamentos em toda a bacia através de microcanais definidos pelas irregularidades naturais da superfície no interior de cada elemento, desenvolveu-se um algoritmo que permite a geração aleatória do número de canais para cada célula de discretização da bacia. Tal procedimento atua em duas fases; considerando-se um valor inicial (“seed”), determina-se uma seqüência aleatória de números reais entre (0,1) que é posteriormente transformado no valor da variável aleatória. Estes valores foram gerados pelo método da congruência multiplicativa (BRATLEY et al -1983; PERIN-1995), expresso pela equação :

$$s_i = (s_{i-1} \times \beta) \text{ mod } \alpha$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes e os números  $s_i$ ,  $i=1,2,\dots$ , definem uma seqüência iterativa de números inteiros gerados pelo valor inicial.

O valor real entre (0,1) é dado por :

$$r_i = \frac{s_i}{\alpha}$$

Definindo  $X$  como sendo a variável aleatória discreta que representa o número de canais do elemento e limitada pelos valores extremos  $a$ ,  $b$  inteiros de um intervalo, a variável é calculada através da atribuição para  $X$  do resultado inteiro da seguinte expressão:

$$X \leftarrow \lfloor a + (b - a + 1) \times r_i \rfloor$$

onde  $0 < r < 1$ ,  $a < a + (b - a + 1) \times r < b + 1$  e  $a \leq X \leq b$

Determinado o número de canais no interior de cada célula, as características médias dos microcanais, são determinadas segundo a seguinte classificação:

1) *Elemento com uma borda de saída*

Neste caso, se a aresta onde não há saída de vazão,  $L_2$ , for paralela ao vetor declividade do plano (Figura 17), tem-se

$$L_m = \frac{L_2}{2}$$

onde  $L_m$  é o comprimento médio do microcanal e  $L_2$  é o comprimento da aresta paralela a  $s$ .

No caso de não haver condição de paralelismo entre  $s$  e  $L_2$ , tem-se:

$$L_m = \frac{h}{2}$$

sendo  $h$  a altura do triângulo, considerando-se a base como sendo igual a borda de saída deste elemento.

Nesse caso, a área média de contribuição da borda de saída do elemento,  $A_m$ , é igual a área total da célula, ou seja:

$$A_m = AE$$

## 2) Elemento com duas bordas de saída (Figura 18)

Admite-se que os comprimentos médios dos canais que cruzam as bordas de saída são determinados por:

$$L_{m1} = \frac{L_2}{2} \quad \text{e} \quad L_{m2} = \frac{L_1}{2}$$

onde  $L_{m1}$  é o comprimento médio dos canais que atravessam a borda 1, e  $L_{m2}$  é o comprimento médio dos canais que atravessam a borda 2.

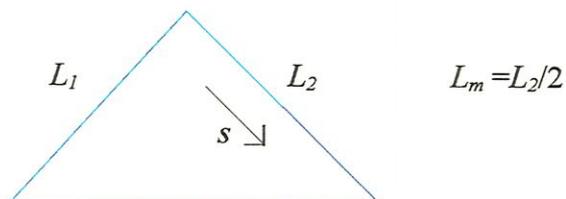


Figura 17: elemento com apenas uma borda de saída com vetor declividade  $s$  paralelo a uma das bordas

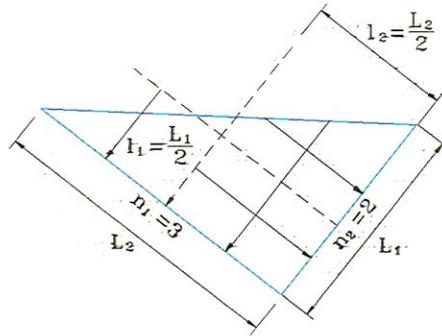


Figura 18: elemento com duas bordas de saída

As áreas de contribuição para cada borda são ponderadas com base no número e comprimento médio dos microcanais e expressas por:

$$A_{m1} = \frac{AE \cdot N_{c1} \cdot L_{m1}}{(N_{c1} \cdot L_{m1} + N_{c2} \cdot L_{m2})}$$

$$A_{m2} = \frac{AE \cdot N_{c2} \cdot L_{m2}}{(N_{c1} \cdot L_{m1} + N_{c2} \cdot L_{m2})}$$

sendo:

$N_{ci}$  o número de canais que atravessam a borda  $i$ , e  $A_{mi}$  a área média que contribui para a borda  $i$

Para a determinação da declividade transversal dos microcanais, com a suposição de que suas seções transversais sejam triangulares, foi estabelecida uma função entre a largura média do elemento e do número de canais no seu interior, ou seja:

$$d = \frac{1}{h} \times \left( \frac{l}{2n} \right)$$

em que  $d$  é o inverso da declividade transversal,  $l$  é a largura média do elemento,  $h$  é a altura estimada do microcanal e  $n$  é o número de canais.

### 3.2.1.4. Variação temporal e espacial da precipitação

A variabilidade temporal de um evento chuvoso qualquer é representada por uma variável aleatória com distribuição uniforme,  $X_2$ , a qual são atribuídos valores de intensidade de precipitação. A variável  $X_2$  é expressa por:

$$X_2 \leftarrow a + (b - a) \times r$$

onde  $a$  e  $b$  definem os extremos reais do intervalo contínuo, e  $r$  é um valor real entre (0,1). O algoritmo para a obtenção de  $r$  encontra-se descrito no item 3.2.1.3.

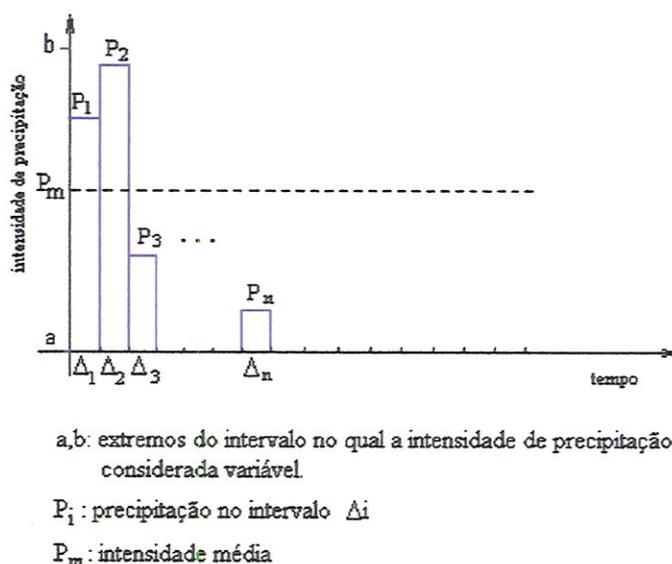


Figura 19: Representação da variabilidade aleatória da intensidade de precipitação.

A figura 19 mostra a variação da intensidade de precipitação a partir de uma chuva média tal que o total precipitado sobre a bacia seja o mesmo para a precipitação uniforme e para a variável no tempo. Considera-se o extremo inferior do intervalo igual a zero e o extremo  $b$  variável durante o processo de geração da intensidade de chuva,  $P_i$ . Para o instante inicial,  $t_0$ , o valor de  $b$  é dado por:

$$b = T_D \cdot P_m / \Delta_{tempo}$$

em que  $T_D$  é a duração média da chuva e  $P_m$  é a intensidade média obtida pela equação de intensidade – duração – frequência.

Para os intervalos seguintes, o valor do limite superior  $b$  é calculado por:

$$b_i = (T_D \cdot P_m - \sum_{j=1}^{i-1} P_j \cdot \Delta_{tempo}) / \Delta_{tempo}$$

O mesmo procedimento é utilizado na consideração de uma chuva variável no espaço, assumindo um valor inicial (“seed”) diferente para a geração dos números aleatórios como foi descrito no item precedente.

### 3.2.1.5. Equacionamento do escoamento superficial

Considera-se que os escoamentos de superfície e canais sejam representados pelo modelo de onda cinemática, derivado de simplificações nas equações de Saint - Venant; assim, utilizando-se as seguintes equações:

Eq. da continuidade: 
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Eq. dinâmica: 
$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V \partial V}{\partial x} + \frac{g \partial h}{\partial x} + \frac{Vq}{A} = g(S_o - S_f)$$

onde:

A: área de uma seção transversal [ $L^2$ ]; Q: vazão na seção considerada [ $L^3/T$ ]; t : tempo [T]; x: distância [L]; q: contribuição lateral [ $L^3/TL$ ]; V: velocidade [L/T]; g : ace-

leração da gravidade  $[L/T^2]$ ;  $S_0$ : declividade do fundo do canal  $[L/L]$ ;  $S_f$ : declividade da linha de energia  $[L/L]$ ;  $h$ : altura d'água  $[L]$ ;  $\frac{Vq}{A}$ : termo que considera a contribuição da quantidade de movimento devido a contribuição lateral no trecho  $[L/T^2]$ .

Na equação dinâmica, tomando-se apenas os termos gravitacional e de atrito, conjuntamente com a equação da continuidade, tem-se o modelo de onda cinemática, expresso por :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$S_0 = S_f$$

A formulação de onda cinemática é simples e permite o cálculo distribuído ao longo dos trechos do canal; porém não pode ser usado quando existe efeitos de jusante como ondas de maré e remanso provocado por represamento, pois, nesse modelo considera-se que o escoamento seja unidirecional de montante para jusante.

Para a resolução numérica do modelo cinemático foi utilizado o método das diferenças finitas que, em geral, representa o domínio discretizado por retângulos espacialmente uniformes, transformando-se as derivadas parciais em diferenças simples dos valores pontuais das características envolvidas. Assim, para a aproximação numérica da equação de onda cinemática, empregou-se um esquema de diferença central que utiliza os valores médios das variáveis dependentes para a determinação dos valores das incógnitas do modelo.

Com as discretizações dos termos da equação, o modelo pode ser representado pela expressão seguinte obtida pela atribuição do valor 0.5 aos coeficientes de ponderação  $\theta$  e  $\phi$  presentes na formulação geral de Preissmann da equação da continuidade (HOLDEN & STEPHENSON -1995):

$$\frac{1}{2\Delta t} \times \left\{ (A_{i-1}^n - A_{i-1}^{n-1}) + (A_i^n - A_i^{n-1}) \right\} + \frac{1}{2\Delta x} \times \left\{ (Q_i^n - Q_{i-1}^n) + (Q_i^{n-1} - Q_{i-1}^{n-1}) \right\} = q$$

Sendo  $A_i^n$  e  $Q_i^n$  as variáveis desconhecidas, as quais são calculadas por aproximação numérica e relacionadas por  $Q = \alpha A^\beta$ , onde  $\alpha$  e  $\beta$  são determinados a partir de expressões empíricas, como a equação de Chézy e de Manning.

### 3.2.1.6. O modelo de infiltração

O processo de infiltração foi modelado segundo a equação de Green & Ampt e apresentado por SMITH (1993), expressando-se a taxa de infiltração por :

$$f_t = K \times \left( \frac{\varphi \times \Delta\theta}{F_t} + 1 \right)$$

onde  $f_t$  é a taxa de infiltração em  $\text{cm h}^{-1}$  para o tempo  $t$ ,  $K$  é a condutividade hidráulica em  $\text{cm h}^{-1}$ ,  $\Psi$  é o potencial da frente de sucção em  $\text{cm}$ ,  $\Delta\theta$  é o conteúdo de umidade disponível no solo (porosidade efetiva do solo menos o conteúdo de umidade inicial), e  $F_t$  é a infiltração acumulada em  $\text{cm}$ . Para a equação de infiltração,  $K$  é considerado como a metade da condutividade hidráulica saturada. Como  $f = dF/dt$ , a equação anterior integrada resulta na seguinte expressão para a infiltração acumulada :

$$F_{t+dt} - F_t - \varphi \times \Delta\theta \times \ln \left( \frac{(F_{t+dt} + \varphi \times \Delta\theta)}{(F_t + \varphi \times \Delta\theta)} \right) = K \times dt$$

onde  $dt$  é o passo de tempo em segundos. Um procedimento numérico como o de Newton - Raphson pode ser usado para resolver a equação acima.

Para o tempo inicial, considera-se que o valor da infiltração acumulada é zero e para um instante  $t$ , obtém-se  $F_t$ , e em seguida a taxa de infiltração  $f_t$ . Uma comparação é feita entre esta última e a chuva incremental para o mesmo intervalo de tempo  $dt$ . Caso a taxa de infiltração seja superior a intensidade de chuva  $i$ , então a infiltração acumulada é calculada pela equação :

$$F_{t+dt} = F_t + i \cdot dt$$

### 3.2.1.7. Retenção superficial

O modelo de retenção superficial expressa as perdas do sistema por armazenamento, interceptação e evaporação como uma função da precipitação e da capacidade de armazenamento através da equação de decaimento exponencial de LINSLEY (1949) e utilizada por MACHADO (1981).

O equacionamento do modelo é descrito por:

$$V = A_d \left( 1 - \exp \left( - \frac{P - F}{A_d} \right) \right)$$

onde  $V$  é o volume armazenado;  $A_d$  é a máxima capacidade de armazenamento nas depressões e apresenta valores distintos para superfícies permeáveis e impermeáveis;  $P$  é a precipitação acumulada e  $F$  é a infiltração acumulada.

Considerando as perdas em depressões, pela equação da continuidade pode-se escrever (MACHADO - 1981):

$$(i - f_r) - \tau = \frac{dV}{dt}$$

onde:  $i$  é a intensidade de precipitação (m/s);  $f_r$  é a taxa de infiltração (m/s);  $\tau$  é a taxa de suprimento de escoamento de superfície (m/s) e  $dV/dt$  corresponde à variação do volume armazenado em relação ao tempo (m/s).

A partir de operações matemáticas envolvendo as duas equações anteriores, pode-se escrever a equação de retenção superficial em função da altura d'água disponível para escoamento, ou seja :

$$y_2^{n+1} = y_1^{n+1} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{P - F}{A_d}\right) \right)$$

em que:

$y_2^{n+1}$  é a profundidade d'água na sub-bacia, no instante  $n+1$ , disponível para escoamento (m) .

$y_1^{n+1}$  é a profundidade d'água na sub-bacia, no instante  $n+1$ , após infiltração :

$$y_1^{n+1} = (i - f_r)^{n+1} \cdot \Delta t \quad (\text{m})$$

### 3.2.2. *Bacia urbana*

A determinação dos escoamentos na área urbanizada da bacia é mais complexa do que para a área rural devido às complicações relativas à representação das galerias pluviais.

No modelo hidrológico, considera-se para os elementos situados na área urbana, que os escoamentos provenientes de superfícies permeáveis e impermeáveis ocorrem diretamente nas ruas, seguindo o caminho definido pela maior declividade do

terreno. Nas sarjetas, os escoamentos recebem as contribuições de montante e contribuições laterais ao longo do percurso. Considera-se o processo de escoamento no interior das galerias, quando o escoamento na sarjeta alcança uma boca de lobo, onde, então é propagado para jusante, recebendo contribuições de montante da própria galeria e contribuições da sarjeta nos pontos nodais da rede de drenagem

### *3.2.2.1. Caracterização dos trechos de rua e da infra-estrutura da bacia*

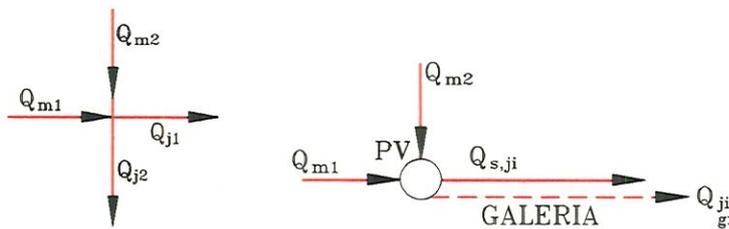
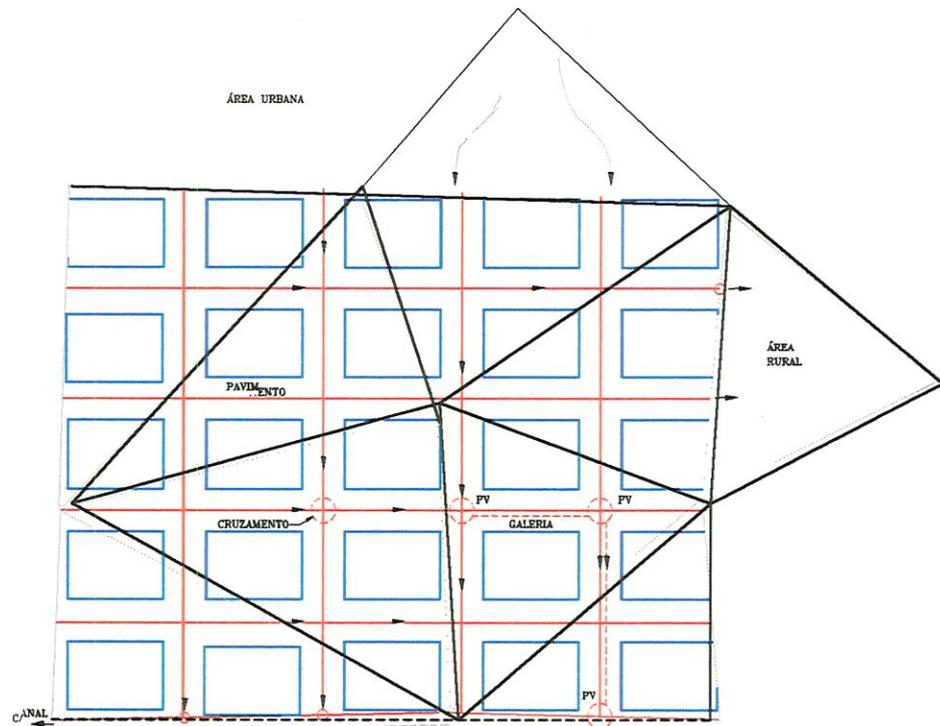
Por meio dos recursos do programa gráfico disponível para o desenvolvimento do modelo, foi possível estabelecer um algoritmo que fizesse a associação entre cada elemento que caracteriza a área urbana e os trechos de rua, os quais são considerados no modelo como pequenos segmentos de reta definidos por cruzamentos, bocas de lobo, e quando necessário, segundo um julgamento próprio, pelo ponto de cruzamento das arestas de um elemento urbano com estes trechos. A rede de galerias de águas pluviais são inseridas sobre o trecho, levando-se em conta a informação contida em planta da área urbana no que diz respeito à sua existência e localização. As entradas de água para as galerias são consideradas representando-se as bocas de lobo como pontos isolados no interior da área. Considera-se, ainda, que o funcionamento das galerias será sempre como condutos livres, ou seja, o excesso de água escoará pelas ruas da área urbana, mantendo-se a capacidade máxima de condução de vazão com superfície livre da galeria. A figura 20 é um exemplo da caracterização de uma área qualquer da parte urbanizada da bacia hipotética.

Considera-se para as áreas de contribuição de cada um dos trechos um valor médio que deve ser estimado com base no mapa urbano da área. Esses lotes foram, para fins de contribuição, parcelados em duas frações, adotando-se um procedimento semelhante ao algoritmo apresentado por PORTO (1995): 1) área impermeável co-

nectada que despeja as águas pluviais diretamente na rede de drenagem; 2) parcela permeável do lote composta de jardins, parques, quintais, etc. Poder-se-ia pensar na representação gráfica destes micro-terrenos e no desenvolvimento de um algoritmo que determinasse automaticamente uma área de contribuição diferente para cada trecho de rua. Entretanto, levando-se em conta que não se dispõe precisamente de todas as informações necessárias ao modelo e a necessidade de grande investimento para desenvolvimento de um algoritmo computacional, preferiu-se estabelecer a condição de uma área média de contribuição para todos os trechos. Pode-se dizer que tal estimativa não é totalmente arbitrária uma vez que os loteamentos definidos para a ocupação urbana não apresentam grandes diferenças em suas dimensões.

Por outro lado, o tipo de discretização definido para o modelo possibilita considerar para cada elemento da área um parâmetro  $\alpha$ , definido neste trabalho como coeficiente de fração urbana, ou seja, para cada célula é viável considerar uma ocupação diferente como, por exemplo, áreas residenciais, comerciais, com ou sem a presença de áreas verdes que refletem diretamente no valor do parâmetro  $\alpha$  da parte urbanizada da bacia. O procedimento parece vantajoso, uma vez que as características do escoamento da área, que contribui para cada trecho, serão influenciados pelo tipo de ocupação do elemento, sendo possível incluir dados sobre densidade populacional das células a fim de fornecer informações para as estimativas do parâmetro  $\alpha$ .

Admitiu-se que os escoamentos na área urbana podem, também, ser modelados pela teoria de onda cinemática em canais, cujas equações e esquema de discretização encontram-se no sub-item da modelagem da área rural. As demais informações sobre seção transversal e parâmetros físicos para o escoamento em área urbana são descritos no capítulo sobre aplicação do modelo.



$Q_{j1} = Q_{j2} = (Q_{m1} + Q_{m2}) / n$  ;  
em que  $n$  é o número  
de trechos que partem  
do nó.

$Q_T = Q_{m1} + Q_{m2}$   
se  $Q_T < Q_{ji,gs,max}$   
então  
 $Q_{ji,gs} = Q_T$   
 $Q_{s,ji} = 0$ .

ou

se  $Q_T > Q_{ji,gs,max}$   
então  
 $Q_{ji,gs} = Q_{ji,gs,max}$   
 $Q_{s,ji} = Q_T - Q_{ji,gs}$

Figura 20: Representação da área urbana (ruas, canalizações e bocas de lobo) no interior de um elemento e equacionamento matemático para um nó qualquer.

### 3.3. *Análise de incertezas*

O modelo até então desenvolvido pode ser classificado como um modelo hidrológico determinístico geometricamente distribuído uma vez que não se considera no seu equacionamento uma metodologia que possa levar em conta a incerteza na determinação dos valores dos parâmetros físicos do modelo. Para este tipo de modelo, as equações matemáticas são resolvidas, usando-se um valor médio para os seus parâmetros, obtidos a partir de observações dos experimentos de campo. Realizando-se, porém, repetidas observações, estes valores médios poderão variar, e caso esta variação seja grande, o valor médio usado pode não ser mais satisfatório. Pode-se dizer, portanto, que as constantes físicas do modelo não são constantes, mas são variáveis governadas por alguma distribuição de probabilidade.

O método da Equação Integral Estocástica (HROMADKA-1989) foi incorporado ao modelo a fim de fornecer uma distribuição de resultados da variável hidrológica de interesse.

#### 3.3.1. *Aplicação do método da Equação Integral Estocástica*

Seja M o modelo hidrológico de transformação chuva - vazão representado por:

$$M: P^i(t) \rightarrow Q_{sim}^i(t) \quad (3.3)$$

onde  $Q_{sim}^i(t)$  é o hidrograma simulado para uma seção de estudo e  $P^i$  a precipitação para uma determinada chuva  $i$ .

Chamando de  $Q_m^i(t)$  o hidrograma observado para essa seção, os valores de  $Q_{sim}^i(t)$  e  $Q_m^i(t)$  são relacionados pela equação:

$$Q_m^i(t) = Q_{sim}^i(t) + E_{M(t)}^i \quad (3.4)$$

onde  $E_{M(t)}^i$  é o erro total do modelo devido às incertezas na modelagem do escoamento superficial para a bacia hidrográfica.

Aplicando-se a integral estocástica para referir os valores dos hidrogramas medido e simulado, tem-se:

$$Q_m^i(t) = Q_{sim}^i(t) + \int_0^t k_1^i(t, s) h^i(s) ds \quad (3.5)$$

A integral da equação acima representa o erro total do modelo, sendo  $k_1^i$  uma função temporal conhecida como, por exemplo, a precipitação, e  $h^i$  uma função que relaciona  $k_1^i$  com o erro total do modelo, que é dado pela diferença  $Q_m^i(t) - Q_{sim}^i(t)$ . A função  $h^i(t)$  é determinada pelo método de convolução padrão.

Rescrevendo-se a equação 3.5 com a função de precipitação  $P^i(t)$  e a integral de convolução, tem-se :

$$Q_m^i(t) = Q_{sim}^i(t) + \int_0^t P^i(t-s) h^i(s) ds$$

Para um evento futuro de chuva,  $f$ , o valor do erro,  $E_{M(t)}^f$ , não é conhecido, mas expresso por uma distribuição de resultados  $[E_{M(t)}^f]$ , estimada a partir do conjunto de eventos,  $\{E_{M(t)}^i\} = \{Q_m^i(t) - Q_{sim}^i(t), i = 1, 2, \dots, n\}$ , em que  $n$  é o número

máximo de eventos. Assim, tem-se uma distribuição  $[h^i(t)]$  para a função  $h$ , determinada por um conjunto de resultados de  $h^i$ , obtidos de eventos simulados,  $\{h^i(t); i = 1, 2, \dots, n\}$ , através da equação anterior. Conhecido  $h^i$ , o hidrograma resultante para o evento futuro é obtido a partir do conjunto de hidrogramas gerados, isto é:

$$[Q^f(t)] = Q_{sim}^f(t) + \left\{ \int_0^t P^f(t-s) h^i(s) ds \right\} \quad i=1, 2, \dots, n$$

ou

$$[Q^f(t)] = \begin{bmatrix} (Q^f(t))_1 \\ (Q^f(t))_2 \\ (Q^f(t))_3 \\ \vdots \\ (Q^f(t))_n \end{bmatrix}$$

sendo  $(Q^f(t))_i$  o hidrograma correspondente ao  $i$ ésimo cenário, especificado por  $h^i$ .

A variância do erro total do modelo,  $\sigma_f^2(t)$  na predição do evento futuro é estimada por :

$$\sigma_f^2(t) = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^m \left( \int_0^t P^f(t-s) h^i(s) ds \right)^2, t > 0$$

onde  $n$  representa o número de eventos de chuva disponíveis .

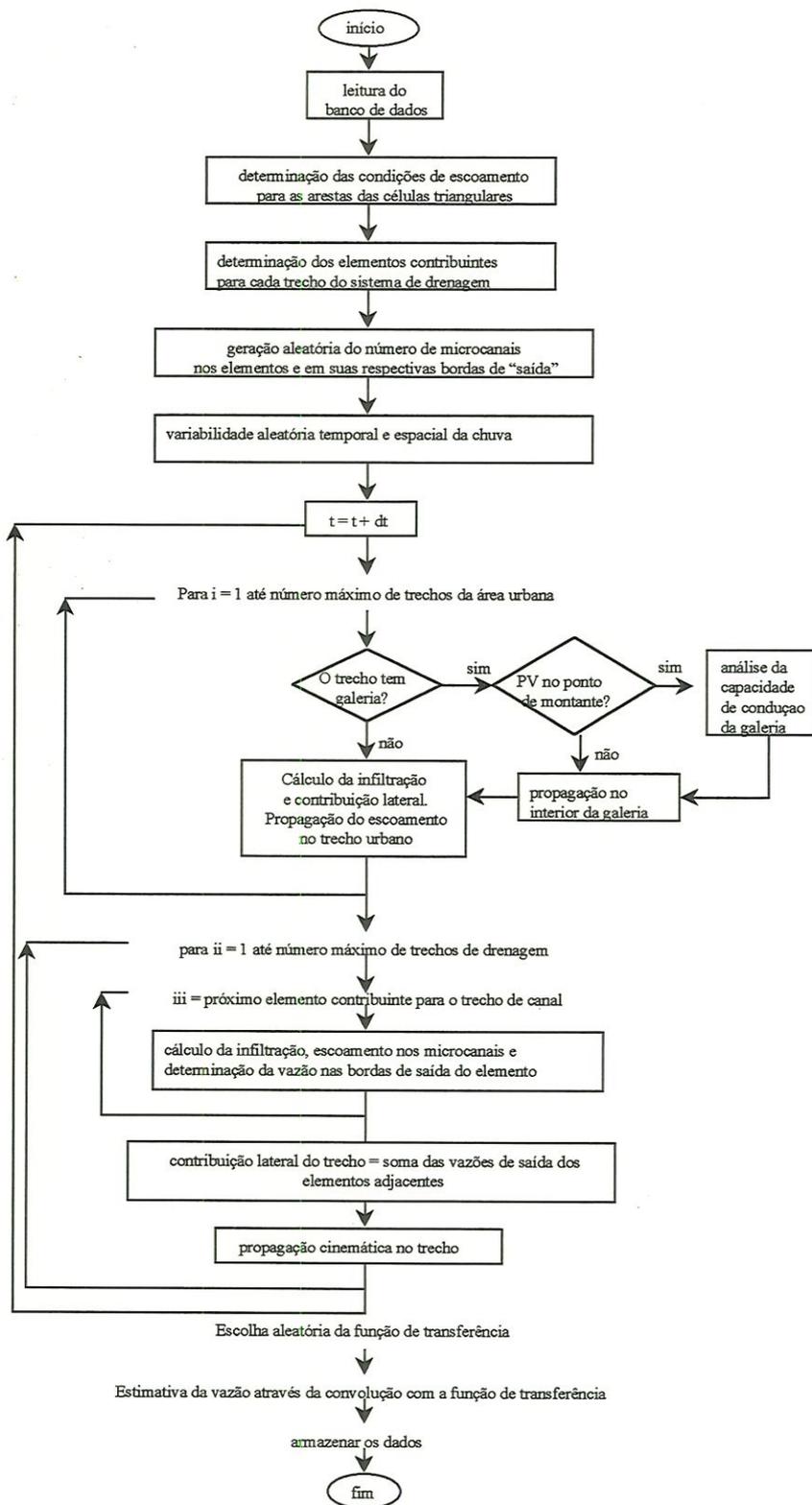
A distribuição de uma variável de interesse  $A$ , que representa a vazão de pico do hidrograma de cheia para um evento futuro  $f$ ,  $[A_f]$ , é obtida a partir de vários hidrogramas gerados para eventos de chuva conhecidos, ou seja :

$$[A_f] = \max[Q^f(t)]$$

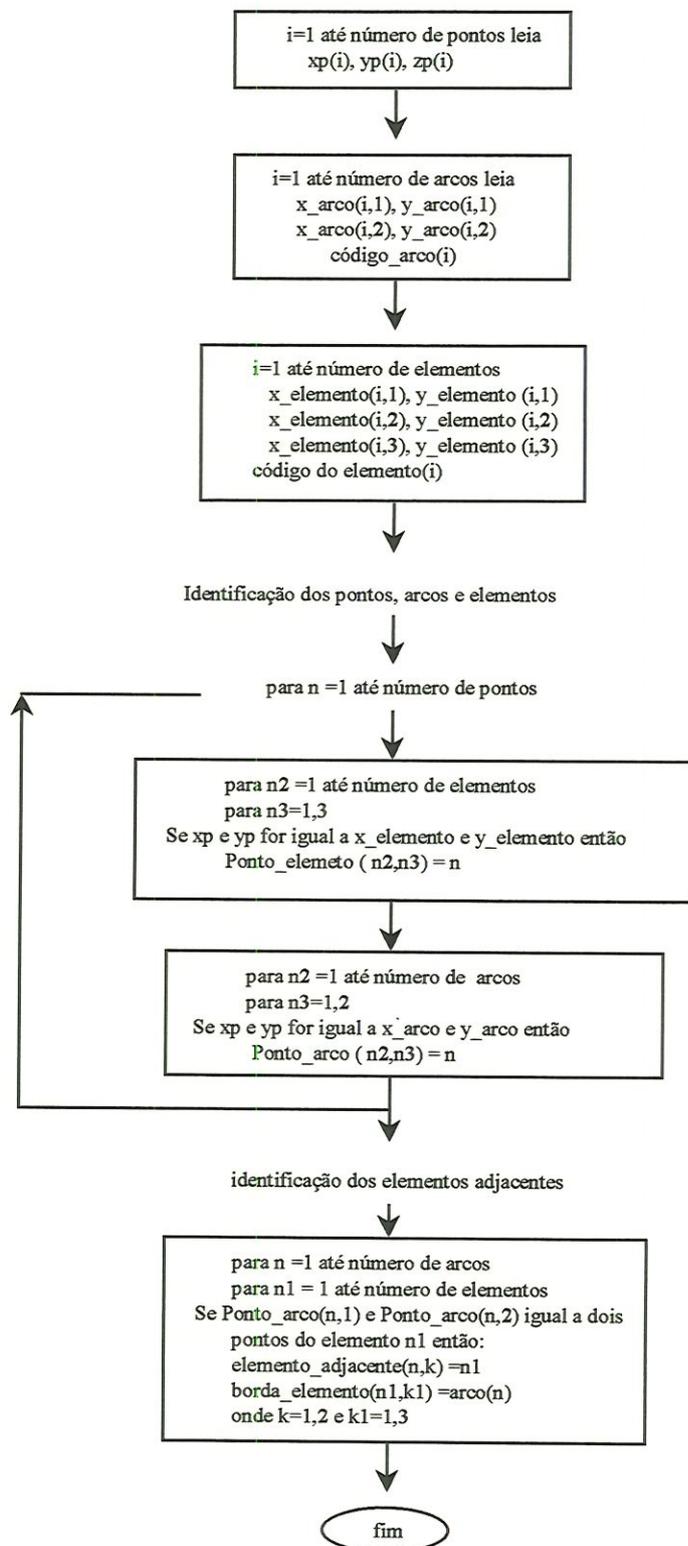
com  $m$  realizações,  $[A_f]$  é a distribuição de frequência dos valores da vazão de pico, isto é,  $\{\max(Q^f(t))_i, i = 1, 2, \dots, n\}$  onde

$$Q^f(t)_i = Q_{sim}^f(t) + \int_0^t P^f(t-s)h^i(s) ds, i = 1, 2, \dots, n$$

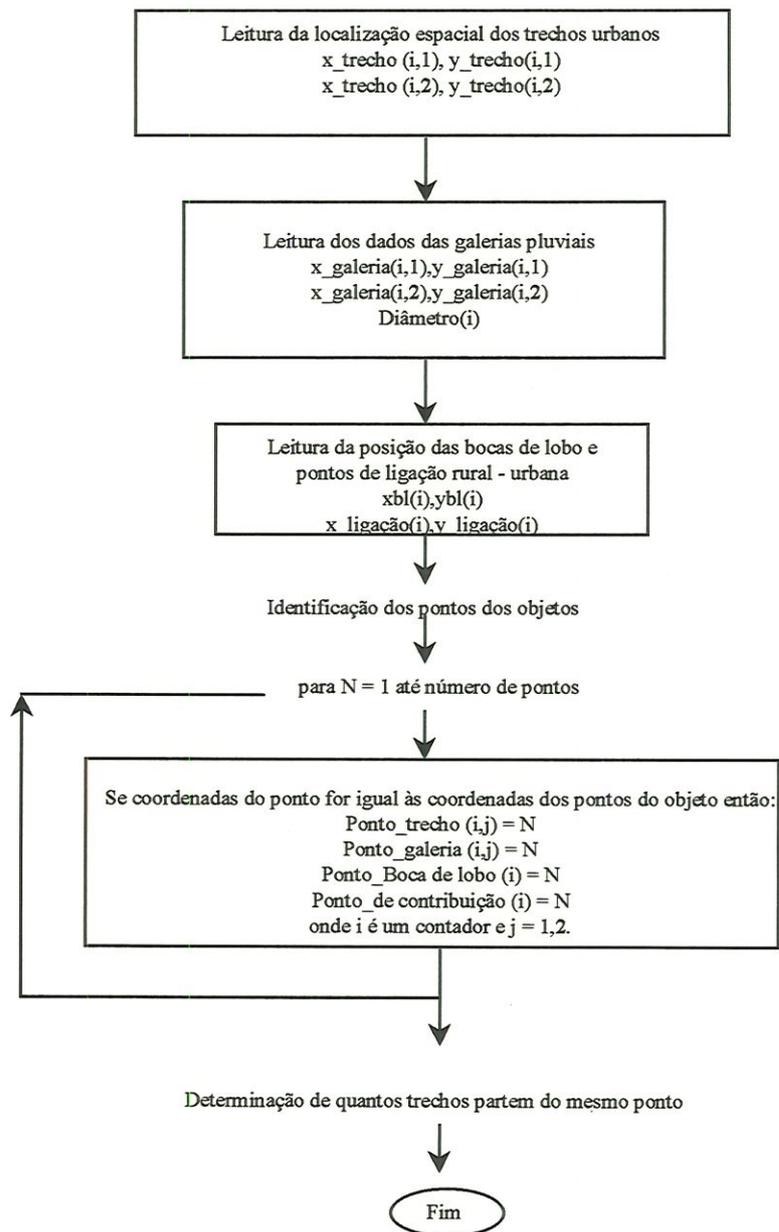
### 3.4. Fluxograma do modelo



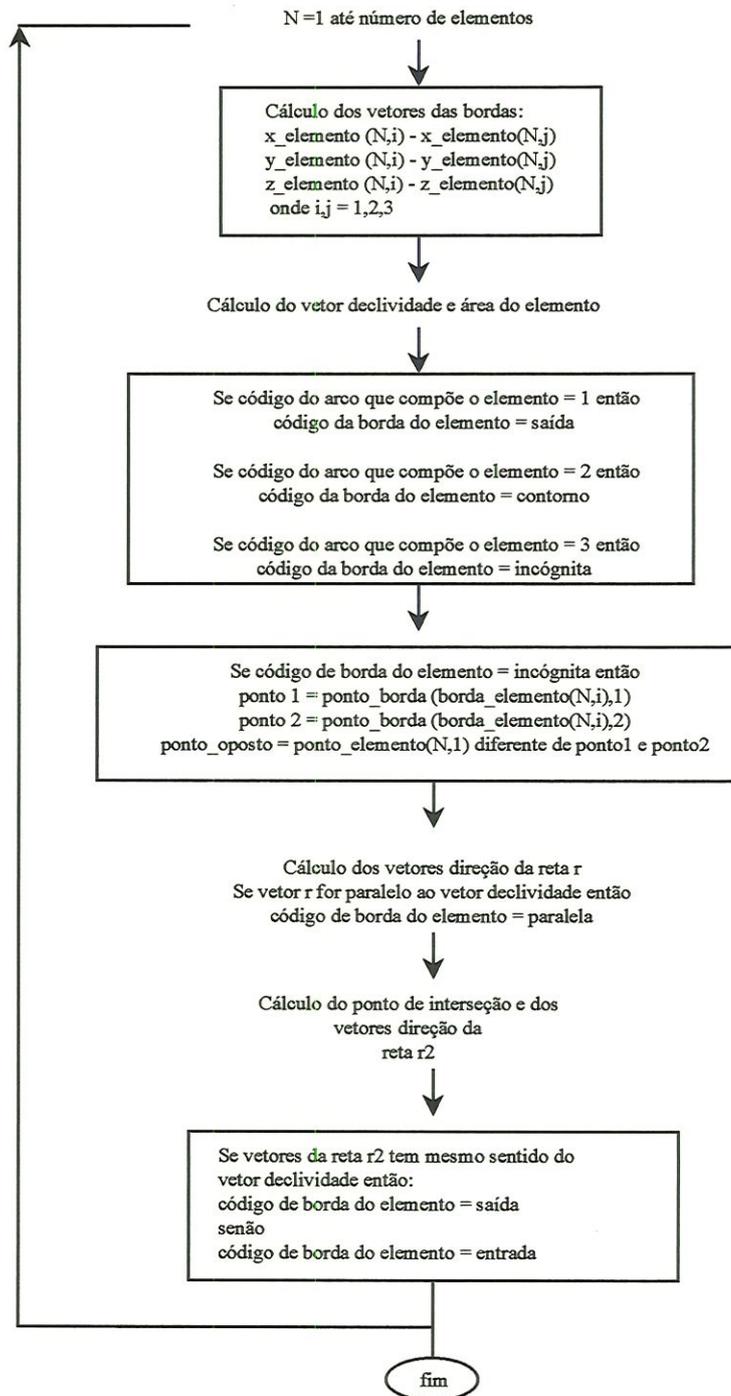
Fluxograma do algoritmo para identificação dos objetos/entidades obtidos através do programa comercial de digitalização TOSCA 2.12



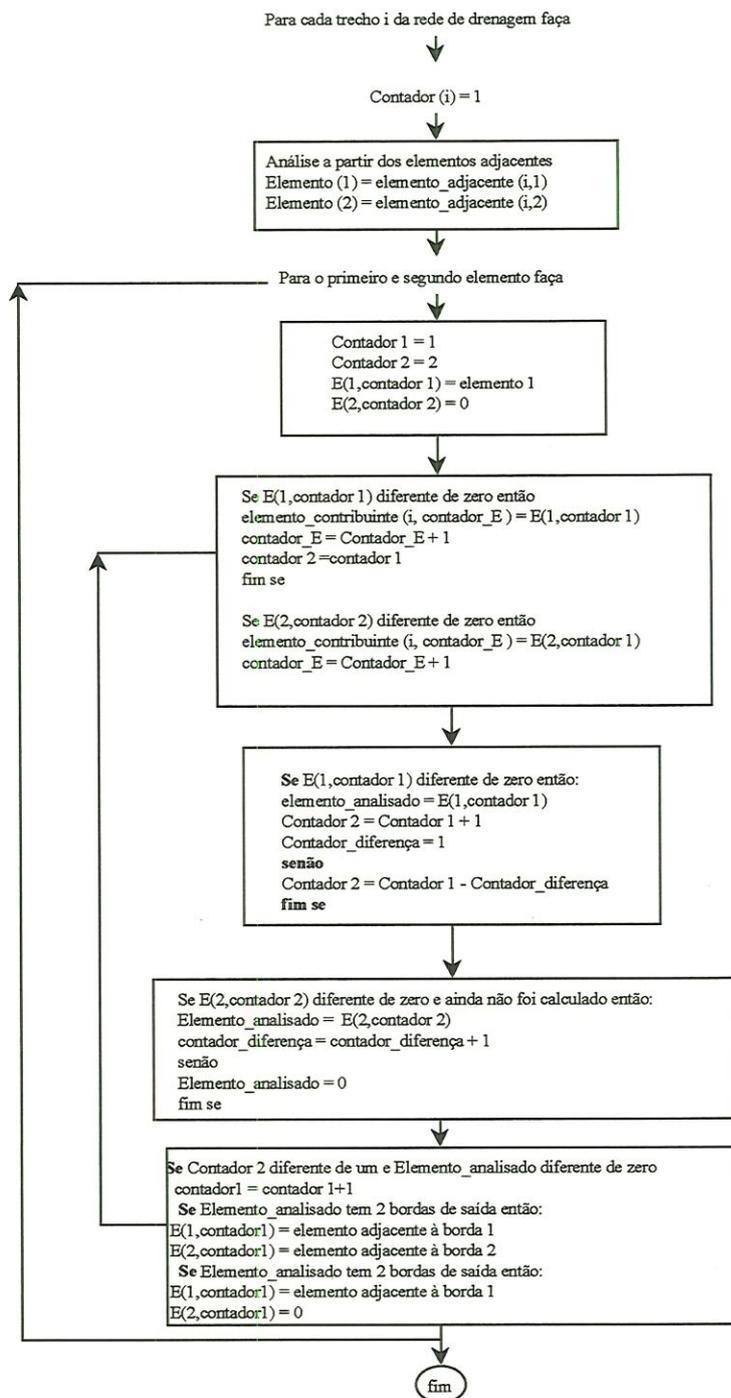
Fluxograma para a identificação dos trechos da área urbana, galerias, bocas de lobo e pontos de ligação da área rural e urbana considerando-se a estrutura de armazenamento do “software” comercial TOSCA 2.12



Fluxograma para a determinação da natureza do escoamento através das arestas de uma célula triangular



### Algoritmo para a determinação dos elementos que contribuem para um canal



## 4. *APLICAÇÃO DO MODELO*

### 4.1. *Introdução*

Este capítulo descreve as características da bacia urbana analisada, com considerações sobre o sistema de galerias da área, e mostra o procedimento para a obtenção do banco de dados relativo às informações topográficas, assim como a entrada gráfica do traçado urbano e da localização da rede de águas pluviais.

São apresentadas, também, várias simulações para chuvas com duração e total precipitado conhecidos, a fim de demonstrar a adequação do modelo e a aplicação da integral estocástica na determinação da distribuição de frequência da vazão de pico para uma chuva futura.

### 4.2. *A bacia Experimental*

A bacia selecionada para os testes iniciais de operação do modelo é drenada pelo córrego Santa Maria Madalena, afluente do córrego Monjolinho, que atravessa a cidade de São Carlos, SP, na sua posição norte.

A bacia do córrego Madalena tem uma área aproximada de 10 km<sup>2</sup>, sendo que 1,2 km<sup>2</sup> constituem-se na parte urbana; a bacia apresenta um processo contínuo de crescimento de jusante para montante.

Os dados topográficos da bacia foram extraídos de um mapa planialtimétrico na escala 1:10000, com equidistância das curvas de nível de 5m e transformado para a escala 1:15000. Nesse mapa encontra-se representado o diagrama unifilar da área urbana, indicando o traçado das linhas centrais das ruas.

#### *4.2.1. O sistema de galerias de águas pluviais*

No que diz respeito às informações sobre a existência e localização da rede de galerias de águas pluviais, essas foram obtidas através de consultas no Departamento de Obras da Prefeitura Municipal de São Carlos. O posicionamento das canalizações foram indicadas diretamente sobre o mapa da área.

Como consequência da falta de um cadastro da prefeitura contendo as informações citadas, fez-se necessário uma visita ao local para que as bocas de lobo pudessem ser localizadas; levou-se em consideração as possibilidades de representação desses dados na escala do mapa disponível.

Com o objetivo de contornar a falta de informações topográficas em uma escala apropriada, que pudesse representar diretamente a direção do escoamento nas áreas urbanas, realizou-se um levantamento experimental nas ruas, a fim de se determinar os percursos das águas pluviais. O sentido do escoamento foi inserido sobre o “lay-out” da área urbana.

É importante lembrar que, para as simulações do modelo, todas as declividades dos trechos de galerias de águas pluviais foram consideradas iguais às declividades dos respectivos trechos de ruas sob os quais encontram-se situados.

### **4.3. Banco de dados digital**

A partir da base do programa que considera a bacia representada por elementos finitos triangulares, com especificações sobre as bordas dos elementos que são trechos dos canais principais de drenagem, descreve-se neste sub-item os procedimentos adotados para a obtenção e transmissão destes dados na forma digital para o modelo distribuído.

Os dados referentes à área urbana – ruas, galerias e bocas-de-lobo – são, também, armazenados no formato digital do programa de digitalização utilizado na construção do banco de dados necessário ao modelo.

#### **4.3.1. Dados da rede triangular irregular**

A necessidade de se aprimorar a entrada do conjunto de dados para o modelo distribuído resultou na construção de um “pseudo” modelo de terreno através de procedimentos que possibilitaram a adequação dos “softwares” disponíveis para o desenvolvimento do trabalho.

A representação dos elementos finitos triangulares, assim como uma breve descrição dos programas comerciais utilizados encontram-se nos próximos sub-itens.

#### 4.3.1.1. O procedimento de digitalização

Os “softwares” para a aquisição e manipulação dos dados gráficos da rede triangular constituem-se de um programa comercial de digitalização, *TOSCA* versão 2.12, que é utilizado na construção de arquivos “vector” das entidades representadas, e de um sistema de informação geográfica, *IDRISIW*, que realiza diversas operações com imagens geradas no formato “raster”. O *TOSCA* recebe as informações através de uma mesa digitalizadora e de um cursor móvel na sua superfície, gerando arquivos cujos formatos são compatíveis para a leitura pelo *IDRISIW*.

A estrutura de armazenamento do *TOSCA* permite trabalhar com entidades que possam ser representadas por pontos, linhas e polígonos, os quais são referenciados pelas suas coordenadas no plano  $x-y$ . Os polígonos são formados pela união de linhas, as quais são editadas como “arcos” durante o processo de entrada desses dados, ou seja, atribui-se para essas “features” os identificadores dos polígonos à esquerda e à direita de cada linha. Para os pontos e linhas são atribuídos identificadores que poderão ser dados iniciais para outras funções do sistema como, por exemplo, a interpolação de uma superfície, ou então, servir como referência para a formação de um conjunto específico de informações sobre as respectivas “features”.

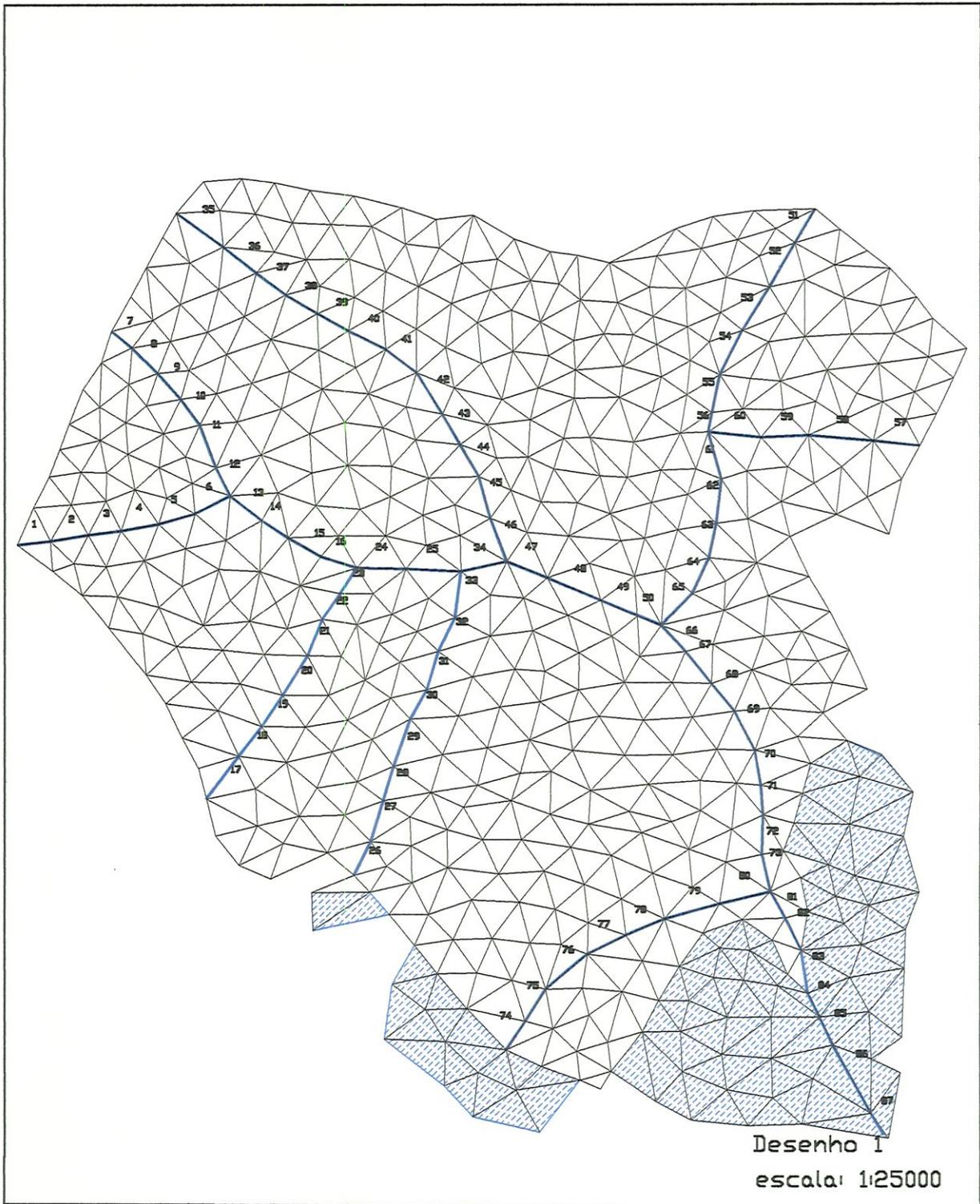
A partir do conhecimento da estrutura de armazenamento do arquivo de polígonos, que para o presente trabalho representa as células da rede, acrescentou-se algumas operações para a formação de uma rede triangular tridimensional, com coordenadas  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , onde  $z$  é a altitude de cada um dos vértices dos elementos. Essas operações encontram-se descritas a seguir.

#### *4.3.1.1.1. Representação do sistema de drenagem ,divisores e arestas internas da bacia*

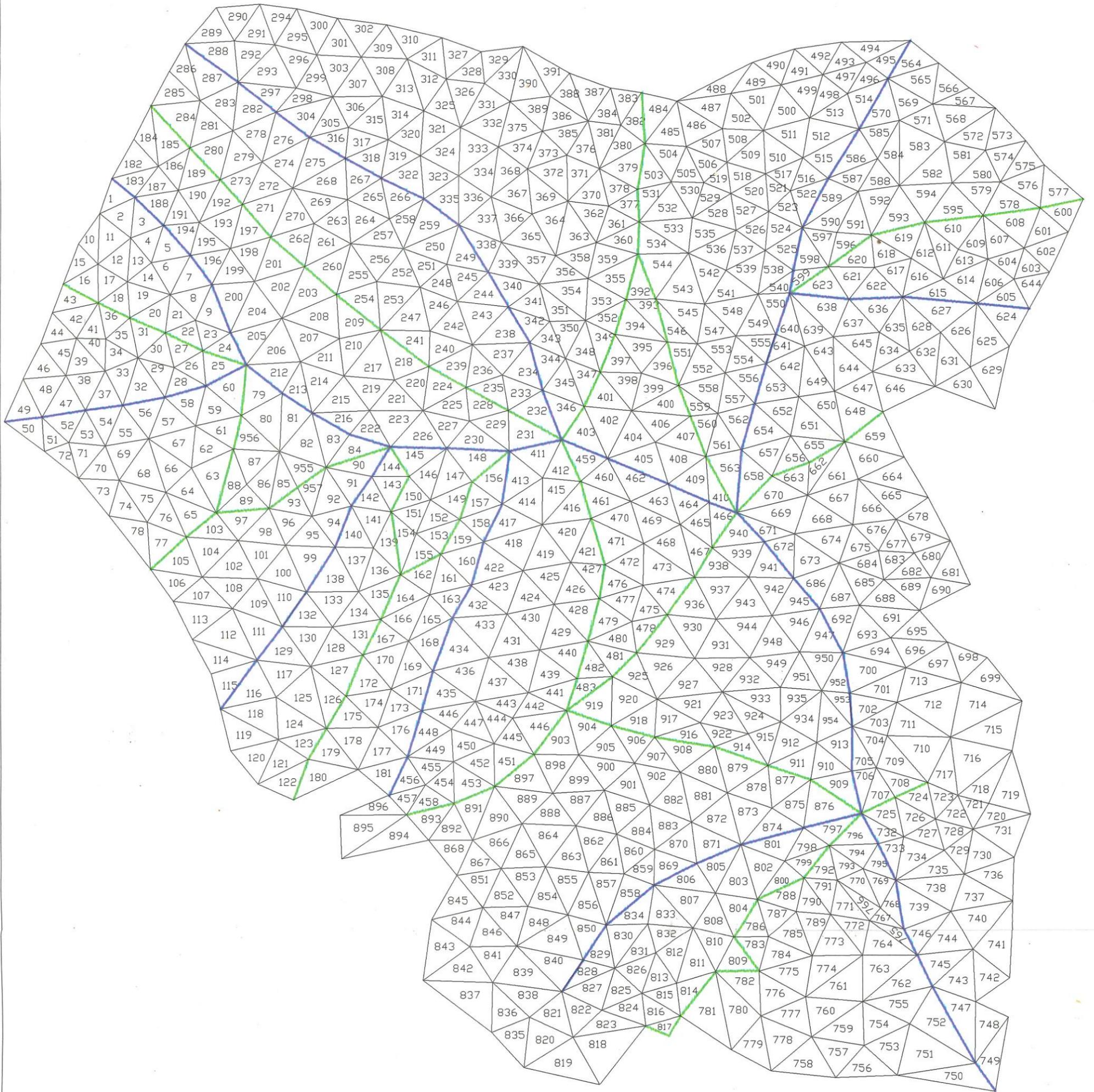
Com base no método utilizado para a definição das condições de borda dos elementos, poder-se-ia lançar mão de um procedimento automático para a determinação dos trechos de canal e divisores das sub-bacias; por sua vez, considerando-se a geração manual dos elementos, aliada ao fato de que a forma automatizada pode representar erroneamente o sistema de drenagem e os limites de bacias, convencionou-se que essas entidades são previamente definidas a partir do mapa planialtimétrico da área.

Antes de inicializar o processo de digitalização, numerou-se, seqüencialmente, as 957 sub-áreas, sendo que esses valores inteiros foram tomados como identificadores das células. A obtenção da malha de elementos finitos tem início na rede natural de drenagem.

O desenho 1 mostra a discretização da bacia em elementos triangulares, escala 1:25000, com os trechos de canal devidamente numerados de montante para jusante. O desenho 2 mostra a numeração dos elementos e destaca as bordas correspondentes aos trechos de canal e os divisores das sub-bacias internas na escala 1:15000. Esse mesmo desenho foi fixado à mesa digitalizadora e o cursor colocado sobre cada um dos vértices das bordas, sempre na direção de maior declividade. As informações sobre as localizações dos dois pontos de uma aresta e o registro dos polígonos a esquerda e à direita dessa “feature” foram enviadas ao programa gráfico; cada aresta é, deste modo, representado por um segmento de reta. O arquivo final foi salvo com o nome de arco.vec. É importante destacar que as coordenadas desses pontos foram referenciadas a partir de quatro pontos, definidos como pontos de controle, que delimitam uma região retangular a qual contém a bacia do córrego Madalena.



Discretização utilizada na modelagem dos escoamentos na bacia do córrego Madalena. Destaca-se a área urbana (parte sombreada) e a numeração dos trechos dos canais de drenagem.



DESENHO 2 - Escala 1:15.000

Essas coordenadas são expressas por:  $(x_1, y_1) = (197000, 7564000)$ ;  $(x_2, y_2) = (201000, 7564000)$ ;  $(x_3, y_3) = (201000, 7569000)$ ;  $(x_4, y_4) = (197000, 7569000)$ . Os valores referem-se às coordenadas *UTM*<sup>4</sup> com unidades em metros.

O identificador para a rede de drenagem foi fixado no valor inteiro igual a 1 (um). Os valores dos identificadores das arestas dos elementos estão diretamente relacionados ao programa principal no que diz respeito à determinação do número de trechos de canal e às variáveis ligadas ao processamento para a determinação da conexão e seqüência de cálculo entre os elementos.

Uma rotina simples poderia ser implementada para a ordenação automática desses trechos não sendo necessária a digitalização seqüencial dessas arestas como foi descrito nos parágrafos anteriores. Entretanto, sendo que a bacia do Madalena é relativamente pequena, não houve a necessidade do desenvolvimento de tal algoritmo.

Nesse primeiro estágio insere-se, também, os divisores das sub-bacias. O procedimento é o mesmo definido para os trechos de canal, salvo as condições impostas quanto à direção de maior declividade e do valor numérico dos identificadores que, aqui, assumem o valor igual a 2 (dois). A aquisição destas arestas em seqüência da rede de drenagem teve por objetivo alcançar uma maior simplicidade no processo de digitalização; essas e as demais arestas que definem os elementos podem ser obtidas em qualquer ordem.

---

<sup>4</sup> Universal Transversa de Mercator - projeção de mapa na qual os meridianos e paralelos são linhas retas que se interceptam perpendicularmente. A origem do sistema tem início no Equador e no meridiano de 45° Gr., somadas as constantes de 10000 km e 500 km, respectivamente.

Com relação às arestas internas, todas foram identificadas pelo valor numérico igual a 3, que representa, no programa principal, uma variável incógnita diretamente associada à direção do escoamento e que deverá ser especificada pelo programa. Essas arestas não foram numeradas para fins do controle da digitalização em consequência da facilidade visual proporcionada pelos canais e divisores da bacia já editados graficamente. É importante destacar, entretanto, a definição correta dos polígonos conectados à borda durante o processo.

O arquivo final, arco.vec, é necessário para dar origem ao arquivo polígono como descrito no sub-item 4.3.1.3 .

#### ***4.3.1.2.Procedimento semi-automático para obtenção da altitude dos pontos nodais***

O trabalho necessário para a representação tridimensional da rede triangular diz respeito à geração de um segundo arquivo contendo os pontos referentes aos vértices dos elementos, informando-se pelos identificadores as suas altitudes. Esses valores poderiam ser obtidos manualmente através de uma consulta ao mapa planialtimétrico da área, porém, preferiu-se seguir uma forma semi-automatizada, onde são necessárias algumas interações com o operador.

O primeiro passo deste processo consistiu na formação de um arquivo, pontos.vec, dos vértices dos elementos, editados no *TOSCA* com o mesmo sistema de referência para o arquivo tipo arco. Os identificadores atribuídos a esses pontos assumiram o valor inteiro igual a 1 (um). Tomando-se por base que o sistema *IDRISIW* opera com imagens “raster”, o arquivo de pontos foi transformado (comandos *INICIAL* e *CONVERSION*) em uma imagem, na qual cada “pixel” representou uma área de 100 m<sup>2</sup>, ou seja, um ponto do arquivo “vector” corresponde a uma área ex-

pressa por um “pixel” com identificador igual a 1. Esta precisão resultou numa imagem formada por 500 linhas e 400 colunas. Não se julgou necessário trabalhar com uma melhor resolução para as operações que se seguem.

A forma semi-automática prevê a geração do modelo de terreno da área com a mesma resolução, o qual é multiplicado (comando OVERLAY) pelo arquivo “raster” dos pontos, resultando em uma nova imagem que contém os vértices e suas respectivas altitudes. A multiplicação das imagens equivalem à multiplicação dos valores das células que se encontram numa mesma posição, uma vez que o armazenamento das imagens é na forma matricial (ver introdução).

Para a obtenção do modelo de terreno, as curvas de nível da área delimitada pelos quatro pontos de controle, os quais encontram-se definidos no item 4.3.1.1.1, foram digitalizadas com identificadores iguais as suas altitudes; os pontos cotados no mapa da área foram aproximados por linhas traçadas manualmente a fim de se conseguir obter uma superfície uniforme. A imagem correspondente a esse arquivo “vector” foi gerada pelo *IDRISIW* e interpolada uma superfície aproximada do terreno (comando INTERCON). É importante enfatizar que o número de linhas e colunas é o mesmo definido para a imagem de pontos. A figura 21 é a representação do modelo digital de elevação no formato “raster” da área de aplicação do modelo.

A imagem contendo os pontos e suas elevações foram vetorizadas no *IDRISIW*, gerando o arquivos pontos2.vec. (comando POINVEC)

As operações finais e todos os arquivos relativos a área rural são mostrados no item seguinte.

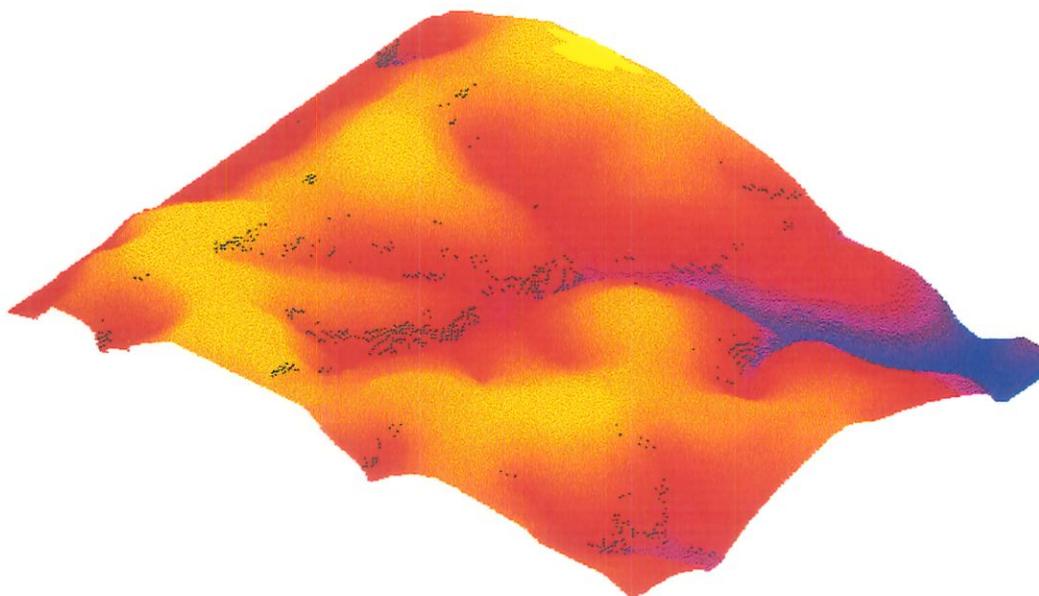


Figura 21: Modelo de terreno “raster” da Bacia do córrego Madalena gerada pelo SIG. As cores representam a variação de altitude da área.

#### ***4.3.1.3. Formação do arquivo polígono e considerações finais sobre os procedimentos gráficos para a rede triangular***

Os arquivos formados a partir dos procedimentos descritos nos itens anteriores constam de um arquivo com 1480 arcos e um outro com 523 pontos.

Para as entidades representadas nesses arquivos, as coordenadas dos pontos das arestas do primeiro arquivo devem ser precisamente iguais as coordenadas dos vértices do segundo arquivo referentes a uma mesma localização. Por sua vez, devido as operações de multiplicação e vetorização efetuadas, além da imprecisão natural

quanto ao posicionamento do cursor durante a edição gráfica dos dados, os valores dessas coordenadas diferem segundo o erro cometido pelo operador e pelas realizações no sistema de informação geográfica.

A fim de se efetuar a correção, os dois arquivos foram concatenados no *TOSCA* resultando em um arquivo “coverage”, dados.vec, contendo os arcos e pontos editados. O comando *Snap* foi executado a fim de unir todos os pontos referentes a uma mesma localização. Com esse arquivo “corrigido”, extraíram-se os arquivos de arcos e de pontos. O arquivo polígono, células.vec, foi gerado pelo comando *CICLE* a partir do “novo” arquivo de arcos.

Os arquivos finais referentes à rede triangular irregular são, portanto, formados por: a) arquivo com identificação dos canais, divisores e arestas internas: arcof.vec; b) arquivo dos vértices e suas altitudes: pontosf.vec; c) arquivo que armazena a estrutura de cada elemento triangular: células.vec.

Embora os procedimentos de representação gráfica da rede pareçam, a uma primeira vista, muito cansativos, ainda assim, acredita-se não ser tão tedioso relativamente à extração manual e formação deste banco de dados. Deve-se ter em mente que a obtenção manual está muito mais sujeita a falhas, além de ser mais difícil a detecção dos erros cometidos pelo operador. A favor da representação gráfica, destaca-se a possibilidade do desenvolvimento de rotinas de verificação como algumas usadas neste trabalho. Desta forma, desenvolveram-se rotinas para a verificação da união precisa de todos os pontos para uma mesma localização, determinação da existência de linhas duplas no arquivo em decorrência de duas edições de uma mesma entidade, verificação das altitudes ao longo da rede natural de drenagem e a análise da contribuição dos elementos para os trechos de canal; a partir dessas rotinas, informa-se precisamente o local do erro, facilitando o trabalho de correção pelo operador.

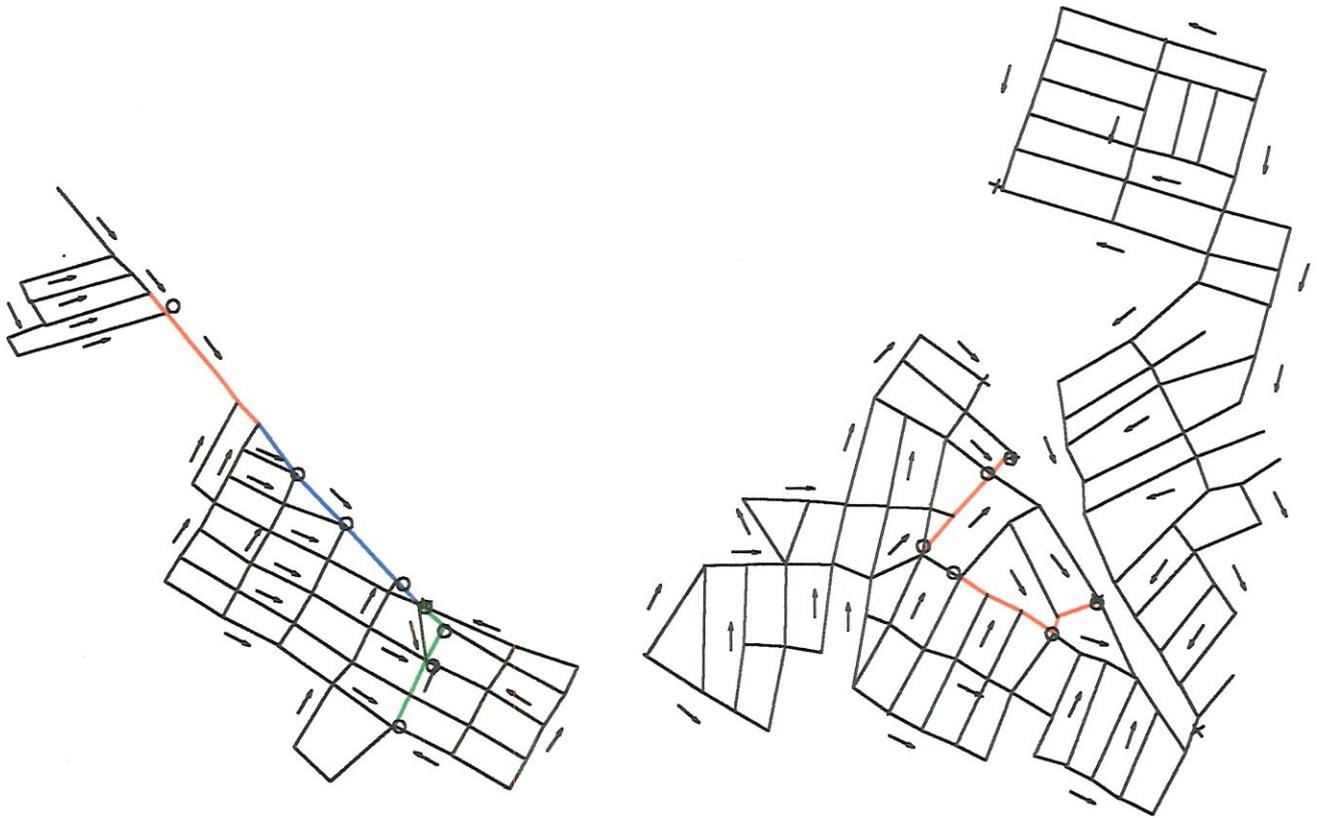
As rotinas para a análise das altitudes foram desenvolvidas em consequência da escala do mapa, da resolução do modelo de terreno e, portanto, do processo de

interpolação, podendo-se encontrar, em alguns locais, valores mais altos para os pontos de jusante. Esta verificação seria de maior importância caso o procedimento de ordenação dos trechos de canal fosse totalmente automatizado; deve-se lembrar que estes valores são usados nas estimativas das declividades dos trechos.

Quanto à contribuição seqüencial dos elementos, devido a pequenos erros na determinação semi-automática, ou mesmo manual, das altitudes dos pontos, a rotina computacional procura a ocorrência de elementos de armazenamento na bacia, indicando o identificador do elemento e deixando fácil a correção manual pelo operador a partir dos arquivos arco e de pontos.

#### ***4.3.2. Caracterização gráfica da área urbana***

O traçado urbano da área e o sistema de galerias de águas pluviais foram fielmente representados e ligados aos elementos situados na parte urbana através de recursos do programa gráfico disponível. O desenho 3 mostra a parte urbanizada, escala 1:15000, destacando o sentido principal dos escoamentos.



- galeria com diâmetro de 600mm
- galeria com diâmetro de 800mm
- galeria com diâmetro de 1000mm
- \* ponto de ligação da área urbana e rural
- o Boca de lobo

Desenho 3 escala 1:15000

Diagrama unifilar da área urbana da bacia do córrego Madalena.  
As setas indicam o sentido principal dos escoamentos.

A edição gráfica dos trechos urbanos foi efetuada pela digitalização dos trechos como segmentos de reta, conforme foi estabelecida para as arestas dos elementos, lembrando-se que o primeiro ponto digitalizado é sempre o ponto de montante. Os trechos de toda a parte urbana são editados segundo a ordem definida pela direção de escoamento, a qual foi especificada através de visitas ao campo. Os quatro pontos de controle para a rede triangular estabelecem o sistema de referência.

Diferentemente à edição das arestas dos elementos, os trechos são digitalizados como linhas, sendo que os identificadores recebem os valores numéricos dos elementos sobre os quais encontram-se situados. Desta forma, como foi descrito na metodologia, as informações hidrológicas, para esses trechos, assumem aquelas relativas ao elemento triangular.

É importante enfatizar que no cruzamento entre arestas e trechos de rua, o trecho é definido segundo o critério do operador, desde que sejam respeitadas as condições de escoamento já definidas.

O sistema de galerias foi digitalizado após terminada a representação da área urbana, cujo procedimento determina que os trechos de ruas com galerias sejam novamente editados com seus identificadores iguais aos diâmetros, em mm. Finalmente as bocas-de-lobo são consideradas entidades pontuais com identificadores iguais a 1 (um).

A ligação entre as áreas rurais e urbanas foi estabelecida pela inserção de pontos sobre os locais que recebem a contribuição; aos pontos foram atribuídos os identificadores seqüenciais das bordas que contribuem/recebem para esses locais. O mesmo é válido para a contribuição direta da área urbana para um trecho de canal.

O arquivo é armazenado nesta ordem, sendo necessária a informação do número de trechos de ruas, canalizações, PV's e locais de contribuição entre as áreas rurais e urbanas. A finalização do arquivo é determinada pelo comando *Snap*. Poder-

se-ia gerar arquivos independentes para cada entidade e limitar o procedimento de leitura através do indicador de fim-de-arquivo.

Numa avaliação do procedimento de edição das áreas urbanas, pode-se dizer que é interessante e conveniente o desenvolvimento de um algoritmo que possa localizar automaticamente os trechos de rua sobre os elementos; dispensa-se, desta forma, a tarefa do usuário de fornecer o identificador do elemento. Tendo-se em mão uma escala mais apropriada para a representação da área urbana, o processo de aquisição desses dados tornar-se-ia mais simples, com possibilidades de caracterização de todos os elementos hidráulicos e dispensando-se as visitas de campo para a determinação da direção dos escoamentos pelas sarjetas. Esta última tarefa pode ser substituída pela formação de um arquivo com os pontos de interesse da área e suas respectivas altitudes.

Os quatro arquivos gerados pelo *TOSCA* constituem-se no banco de dados digital da bacia do córrego Madalena.

#### ***4.4. O procedimento computacional para as simulações***

A descrição das considerações do modelo para a realização de várias simulações, no que diz respeito aos valores dos parâmetros, intervalo de cálculo, relação área - vazão para a resolução da equação diferencial, são mostradas nos sub-itens seguintes.

#### *4.4.1. Condições iniciais e de contorno*

Inicialmente, as vazões em todas as bordas dos elementos e para todos os nós da rede de drenagem da bacia foram consideradas iguais a zero. Para os canais principais da bacia, tal condição foi imposta verificando-se que as vazões de base nesses canais são pequenas e uma vez que a determinação precisa desses dados não faz parte do escopo deste trabalho devido ao tempo limitado para a obtenção experimental dos dados necessários.

Vazões nulas são condições de contorno para todas as bordas dos elementos que foram classificadas como divisores das sub-bacias, e, também, para os nós de montante dos primeiros trechos de canais da rede de drenagem.

Considerando-se a área urbana como uma rede de canais artificiais, as condições iniciais e de contorno são as mesmas definidas para o sistema de macrodrenagem.

#### *4.4.2. Considerações sobre os sistemas de drenagem da bacia*

Para a resolução da equação diferencial da continuidade, as relações de resistência são aproximadas por equações empíricas as quais levam em consideração as características físicas e geométricas dos canais. Entretanto, como exposto em itens anteriores, a não existência de um conjunto de informações incluindo batimetria do córrego principal, dados vazão - altura d'água, além de informações sobre o estado de conservação do sistema de drenagem, resultou na aproximação da equação de atrito para seções regulares, como, por exemplo, a equação de Manning para canais largos e que é expressa por:

$$Q = \frac{y^{5/3} \cdot \sqrt{I} \cdot L}{\eta}$$

sendo  $Q$ : vazão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $y$ : altura d'água [m];  $I$ : declividade do trecho;  $L$ : largura da seção transversal [m];  $\eta$ : coeficiente de rugosidade de Manning.

Simulações foram realizadas considerando-se valores diferentes para a largura do sistema de drenagem e suposta variar linearmente no intervalo [1, 7] metros a partir das seções de montante, ao longo de todos os trechos. Os resultados para as condições simples da bacia, sem infiltração e considerando-se apenas a contribuição da área rural, mostraram soluções estáveis e convergentes para a diminuição dos valores do passo de tempo. Para a parte urbanizada da bacia, as soluções encontradas também foram mais estáveis para a diminuição do intervalo temporal. Entretanto, a instabilidade do sistema quando se considera a contribuição simultânea da área rural, para a condição sem infiltração, e da área urbana, pode ter origem no procedimento de ligação das áreas através dos pontos de contribuição. Lembra-se que tal procedimento parte do princípio de que a vazão da área urbana é entrada para um elemento rural onde faz-se a propagação em microcanais secos até contribuir lateralmente para um trecho do canal principal. Em alguns pontos de ligação, atribuiu-se o identificador do trecho de um canal uma vez que o ponto encontrava-se próximo da respectiva “feature” (o desenho 3, item 4.3.2, mostra o diagrama unifilar da área urbana com identificação dos pontos de ligação). Assim, para uma chuva de curta duração, foram obtidas as contribuições pontuais e laterais ao longo dos canais que atravessam a parte urbana da bacia.

Não se verificou a contribuição da área rural para os eventos de chuva considerados, com o valor do parâmetro de condutividade hidráulica igual a 50mm/h. As simulações para as condições de infiltração foram realizadas para largura variável do canal. A rugosidade para a rede de drenagem foi considerada uniforme e assumindo

o valor de 0.045; o valor foi retirado do trabalho de MACHADO (1981), descrevendo o canal em terra, sinuoso, com arbustos e pedras.

Para o sistema de microdrenagem, as considerações acima valem-se para as ruas, alterando-se apenas o coeficiente de rugosidade que passa a assumir o valor igual a 0.014 para superfícies asfálticas, com base no trabalho de CHEN & SHUBINSKI (1971) e a largura dos trechos de rua, igual a 7 m. Em geral, nos projetos dos sistemas viários, acredita-se que esse valor não esteja distante daqueles utilizados para ruas de faixas simples e mão dupla, que caracteriza toda a área urbana da bacia do córrego Madalena. A área elementar urbana que contribui para cada trecho foi considerada igual a 0.25 ha .

Com relação à rede de galerias de águas pluviais, estas são compostas de condutos circulares com diâmetros de 0,6, 0,8 e 1,0 m; considerou-se para todas as canalizações um coeficiente de rugosidade igual a 0.012 relativo a tubos de barro. A relação de atrito para condutos circulares foi simplificada pela determinação através de regressão não linear dos parâmetros  $k$  e  $m$  na equação  $Q = k.A^m$  , em que a variável  $A$  é o valor da área.

Finalmente, a partir da equação linear estabelecida para toda a área não urbanizada da bacia (Metodologia - 3.2.1.3) que relaciona declividade transversal e número de microcanais para um elemento qualquer, fez-se as seguintes considerações para a determinação do inverso da declividade transversal: 1) considerou-se como uma constante a largura média dos elementos, igual a 150m, uma vez que as células triangulares são mais ou menos uniformes; 2) a profundidade máxima do microcanal é igual a 0.75m quando o número de microcanais,  $n$ , é igual a 1; para  $n = 20$ , a profundidade é igual a 0.15m. Procurou-se estimar os valores de forma a representar o fenômeno de escoamento na parte natural da bacia. A figura 22 ilustra as características médias de um microcanal: comprimento, área de contribuição ( através das quais a largura média foi estimada ), e profundidade.

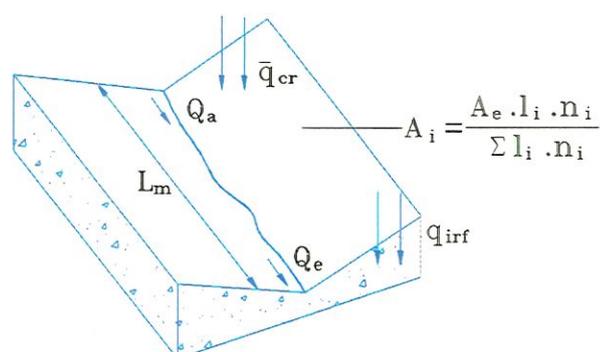


Figura 22: Representação gráfica da concepção de escoamento em um microcanal

#### 4.4.3. Porcentagem da área permeável das sub-bacias urbanas

Em uma bacia urbana o parâmetro de permeabilidade afeta diretamente no aumento ou diminuição do volume escoado conforme sua variação crescente.

A estimativa/determinação da área permeável dos elementos foi limitada à uma consulta de trabalho anteriormente desenvolvido para uma sub-bacia urbana de São Carlos. Desta forma, tomando-se por base os estudos de MACHADO (1981), a porcentagem de área permeável foi considerada igual ao valor médio de 0.25. Embora os estudos do autor não tenham sido realizados para a bacia de aplicação do modelo atual, julgou-se ser este valor uma boa aproximação para o parâmetro. Uma estimativa mais precisa pode ser conseguida através de informações contidas em levantamentos aerofotogramétricos. Para as simulações, o parâmetro corresponde à permeabilidade em cada micro-terreno que contribui para o trecho urbano.

Considerou-se uniforme a porcentagem de área permeável em toda a parte urbanizada da bacia em consequência da própria característica de ocupação predominantemente residencial da área.

#### 4.4.4. *Intervalo de tempo*

O critério para a difusão e estabilidade numérica está relacionado aos coeficientes de ponderação, os quais definem o esquema de diferenças finitas (explícito, central ou implícito), e aos valores do passo de distância,  $\Delta x$ , e do passo de tempo,  $\Delta t$ . (HOLDEN e STEPHENSON - 1995)

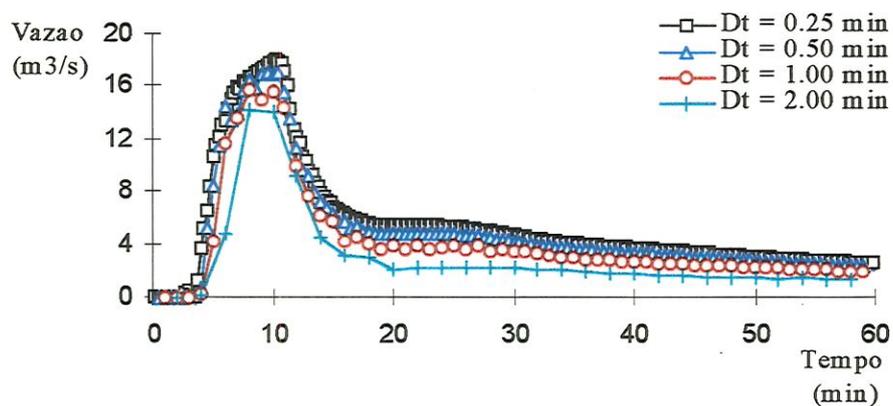
Lembrando-se que o critério de Courant para a estabilidade numérica depende dos valores de  $\Delta t$  e  $\Delta x$ , a uniformidade dos elementos da rede triangular facilita o estudo relativo às oscilações numéricas. Deve-se, no entanto, futuramente, deter-se a uma análise mais profunda da estabilidade do modelo incluindo outros esquemas de soluções numéricas.

Com o objetivo de verificar a estabilidade numérica do modelo atual e estabelecer um único  $\Delta t$  para o conjunto de simulações a serem realizadas, efetuou-se, previamente, alguns testes para a análise do comportamento do modelo frente às variações dos valores do intervalo de tempo.

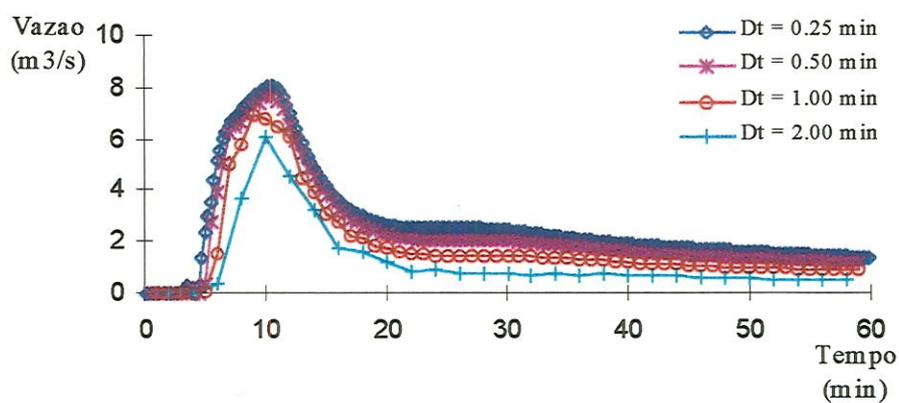
A figura 23 é um exemplo de resposta do modelo para uma sub-bacia (trecho 74 – 80: desenho 1, item 4.3.1.1.1 ) quando se utiliza valores diferentes do passo de tempo. Com base nos resultados, estabeleceu-se que a discretização do tempo em intervalos de 0.25 min para áreas rurais e urbanas seriam suficientes para se obter a convergência e estabilidade das simulações numéricas realizadas. Por outro lado, constatou-se que para as áreas urbanas o valor do passo de tempo igual a 1 minuto não produz instabilidade da solução numérica.

O fenômeno de ondas parasíticas, ou seja, ondas numéricas geradas pela solução aproximada da equação diferencial, não foi observado nas simulações realizadas. HOLDEN & STEPHENSON (1995) não obtiveram as oscilações mencionadas, con-

siderando-se algumas soluções obtidas a partir do esquema de diferenças finitas, para valores de  $\Delta t$  e  $\Delta x$  próximos dos valores médios usados nesse trabalho.



a)



b)

Figura 23: hidrogramas gerados para valores diferentes de  $\Delta t$ ; a)  $T = 20$  anos; b)  $T = 2$  anos. Duração da chuva igual a 10 min

#### 4.5. *Resultados e Discussão*

Os resultados obtidos e apresentados neste item são fundamentados no procedimento computacional adotado para a bacia do córrego Madalena.

Com o intuito de se conseguir uma primeira avaliação do comportamento do modelo em função da variação dos parâmetros de entrada, foram realizados testes nos quais o parâmetro analisado assumiu valores uniformemente distribuídos num intervalo [A,B] ou como percentuais sobre a média considerada. Estes foram considerados ora constantes em toda bacia, ora variáveis de elemento para elemento, porém, constantes no seu interior.

Neste item, tem-se a apresentação das distribuições de freqüência da vazão de pico obtidas pela consideração da incerteza espacial da chuva através da integral estocástica.

Finalmente, discute-se sobre a habilidade do modelo em produzir cenários relativos às diversas formas de ocupação da bacia, levando-se em conta a estrutura de armazenamento das imagens geradas pelo sistema de informação geográfica utilizado.

##### 4.5.1. *Análise do comportamento geral do modelo*

Inicialmente, apresentam-se algumas simulações realizadas que dizem respeito a escolha/estimativa dos parâmetros de rugosidade superficial e de infiltração, analisados separadamente. Os resultados mostrados foram obtidos para chuvas de curta duração uma vez que estas são as de maior interesse na determinação dos hidrogramas de cheia para bacias urbanas.

Para os resultados envolvendo variação da rugosidade superficial da bacia e os efeitos da propagação nos microcanais na simulação dos hidrogramas de cheias foram obtidos a partir de condições simples sem infiltração e chuva uniforme no espaço-tempo.

#### 4.5.1.1. Efeitos na determinação dos coeficientes de rugosidade superficial

Os limites do parâmetro de rugosidade superficial para a parte não urbanizada da bacia foram considerados iguais a 0.05 e 0.30, com base nos valores encontrados na literatura. Para a superfície asfáltica não se estabeleceu valores percentuais sobre o valor médio da rugosidade a fim de evitar valores irreais para o coeficiente. As precipitações sobre a área foram determinadas pela equação intensidade - duração - frequência da cidade de São Carlos (BARBASSA-1991). A partir dos resultados encontrados, verifica-se que o valor do parâmetro correspondente ao limite superior do intervalo traduz-se na diminuição da vazão de pico. Para o limite inferior, obteve-se um aumento do deflúvio e uma diminuição do tempo de pico.

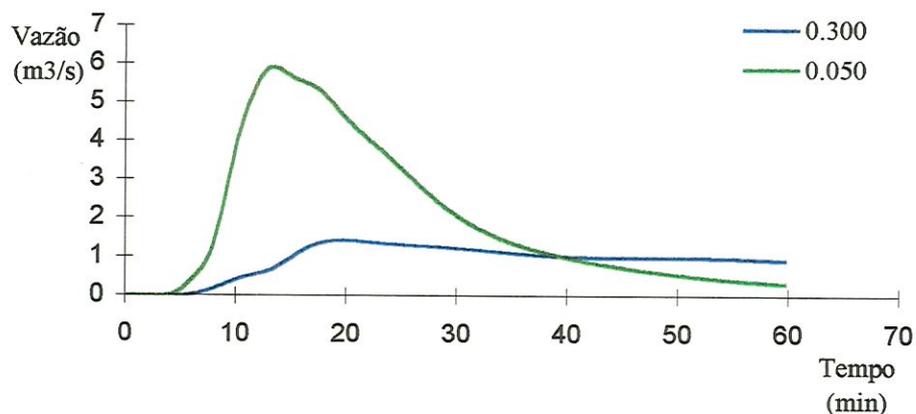


Figura 24: Comportamento de uma sub-bacia rural (trechos 1-6 – desenho 1) considerando-se valores diferentes para a rugosidade superficial. Chuva de duração de 10 min e período de retorno igual a 10 anos.

O erro no balanço em volume total entre o volume precipitado e o volume escoado foi determinado para condições simples, sem infiltração. Os valores encontrados para as simulações estiveram entre 0.024% e 2%. Acredita-se que o procedimento de cálculo da área molhada usando-se a equação para condutos circulares e a posterior propagação do escoamento pelas galerias, utilizando-se a relação área-vazão obtida através de regressão não linear, seja uma causa do aumento do erro.

#### *4.5.1.2. Alterações na resposta hidrológica da bacia frente à variabilidade dos parâmetros de infiltração*

O resultado final do modelo em relação aos parâmetros de infiltração, traduz-se na variação do volume total escoado.

As modificações dos hidrogramas de cheia devido a adoção de valores diferentes para os parâmetros de infiltração são particularmente mais sensíveis para o valor atribuído à condutividade hidráulica da equação de infiltração de Green & Ampt, alterando significativamente o deflúvio de pico, porém, com pouca influência sobre o tempo de pico. No entanto, os valores referentes ao potencial de capilaridade e conteúdo de umidade do solo também causam alterações nos hidrogramas de saída da bacia e reforçam a importância das condições iniciais do solo sobre o comportamento hidrológico da bacia.

Testes com valores da condutividade hidráulica do solo variável espacialmente no intervalo de 2 a 6 cm/h foram obtidos através do algoritmo de geração de números aleatórios. Simultaneamente, o modelo produziu as imagens no formato “vector” correspondentes aos testes simulados. Posteriormente, as imagens foram convertidas para o formato “raster” e trabalhadas no sistema de informação geográfica.

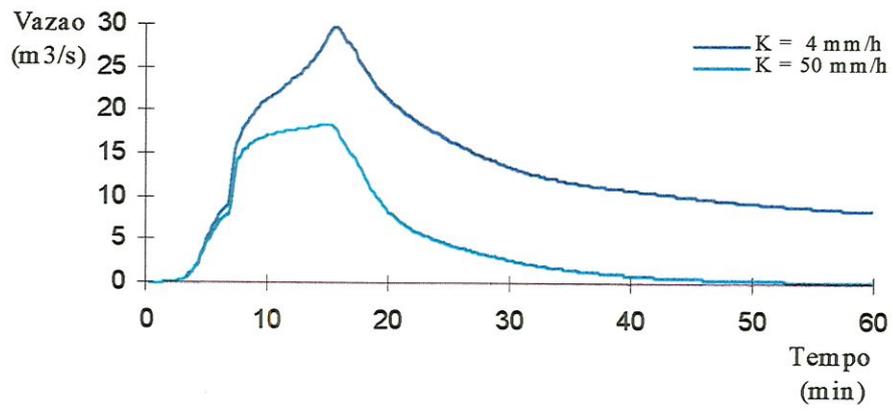


Figura 25: Resultados obtidos para valores diferentes de condutividade hidráulica.

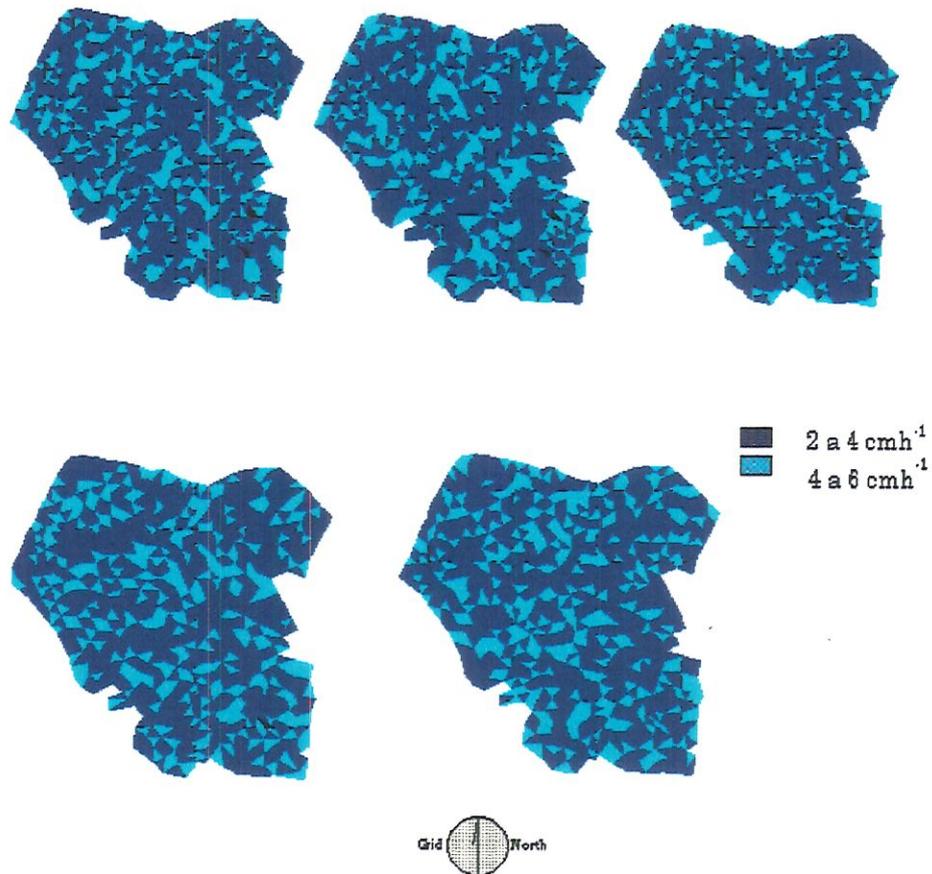


Figura 26 : Representação espacial da condutividade hidráulica para cinco distribuições geradas aleatoriamente.

Na figura 26, as manchas representam áreas com valores do parâmetro situados entre 2 e 4 cm/h (mais escuras) e 4 e 6 cm/h (áreas mais claras); a operação de classificação foi realizada pelo SIG (comando RECLASS). A semelhança entre as imagens reflete o comportamento válido da rotina desenvolvida para a geração de números aleatórios uniformemente distribuídos num intervalo.

Pelos resultados obtidos verificou-se pequenas alterações da vazão de pico e pôde-se concluir, com base na representação espacial do parâmetro, figura 26, que a distribuição estatística adotada pelo modelo não foi capaz de gerar variações espaciais condizentes com a real distribuição do parâmetro no interior da bacia.

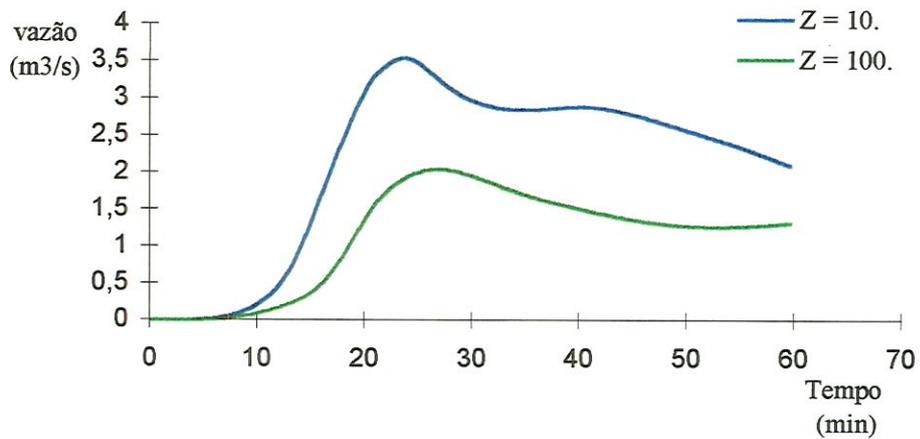
#### *4.5.1.3. A influência da concepção de escoamento em microcanais rurais sobre os hidrogramas de cheias*

Com o objetivo de verificar a influência do número e forma dos microcanais rurais sobre a resposta hidrológica da bacia, realizaram-se várias simulações, a partir das condições simples da bacia.

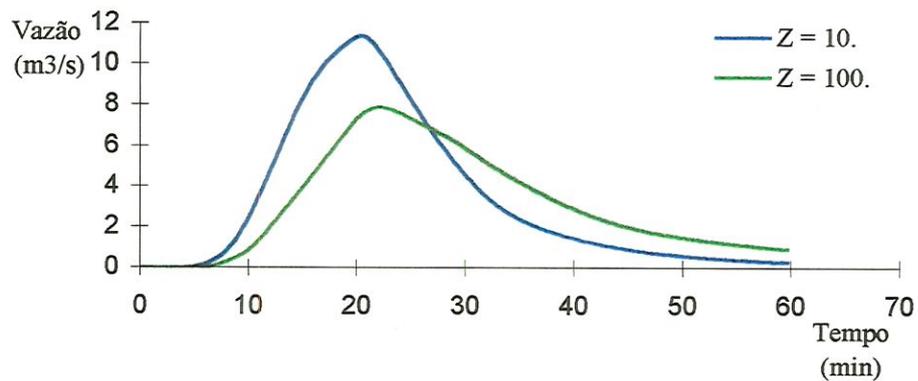
Os resultados foram obtidos considerando-se a relação linear para número de microcanais e declividade transversal, e a situação em que todos os elementos são dotados de apenas um microcanal com declividade transversal mais baixa, na tentativa deste representar o escoamento superficial em plano como é encontrado em outros modelos hidrológicos distribuídos.

Os resultados respondem a expectativa, isto é, ocorre um aumento do deflúvio para a declividade transversal mais alta uma vez que para tal situação tem-se velocidades maiores. A figura 27 mostra a alteração na resposta hidrológica da bacia frente

a esta variável. Alterações mais significativas foram encontradas para maiores valores da rugosidade superficial; entretanto, deve-se ter em mente a importância da comparação dessas simulações com valores observados para uma análise mais real dos efeitos do parâmetro.



a)



b)

Figura 27: Hidrogramas de cheia em função da variação da forma e número de microcanais gerados nos elementos; a) rugosidade superficial igual a 0.3; b) rugosidade igual a 0.05. Período de retorno igual a 10 anos e duração da chuva igual a 20 minutos.

#### 4.5.2. *Avaliação das Incertezas na variabilidade espacial da chuva através de distribuições de frequência obtidas pelo método da integral estocástica*

O modelo considerou na geração do deflúvio a variação da distribuição espacial e temporal da precipitação nas 957 sub-áreas ou elementos que aproximam a bacia.

O problema da ausência de dados reais de chuva-vazão foi contornado através da consideração do hidrograma de cheia para uma simulação inicial como sendo o hidrograma observado calculado de modo determinístico, a fim de permitir a obtenção dos valores das funções de transferências.

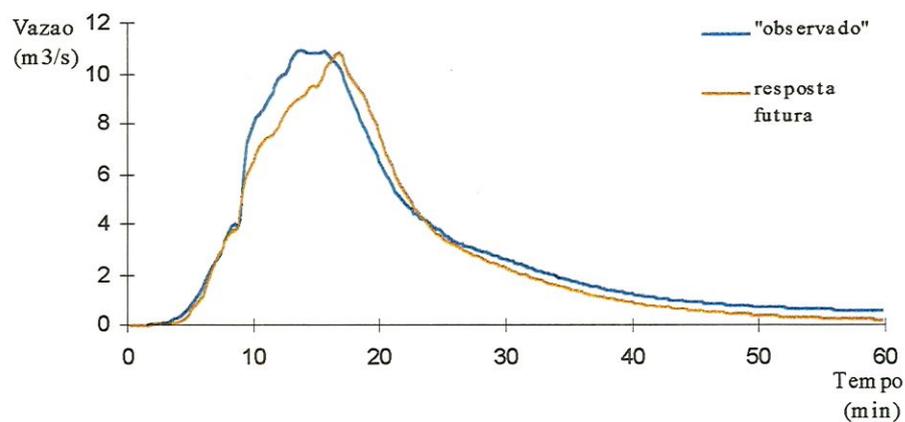
As vazões simuladas para a determinação do processo estocástico foram obtidas pela geração aleatória de 32 distribuições espaciais de chuva. As variações consideradas partiram da hipótese de uma mesma altura de chuva para as 957 áreas, adotando-se uma distribuição temporal registrada em intervalos de 5 minutos e gerado conforme o algoritmo descrito no item 3.2.1.4. Supôs-se a segunda distribuição da chuva gerada pelo modelo como a simulação correspondente a previsão de uma chuva futura a partir da qual desenvolveu-se a distribuição de frequência do deflúvio de pico.

A função conhecida da integral estocástica foi definida como sendo a precipitação média sobre toda a bacia, ou seja:

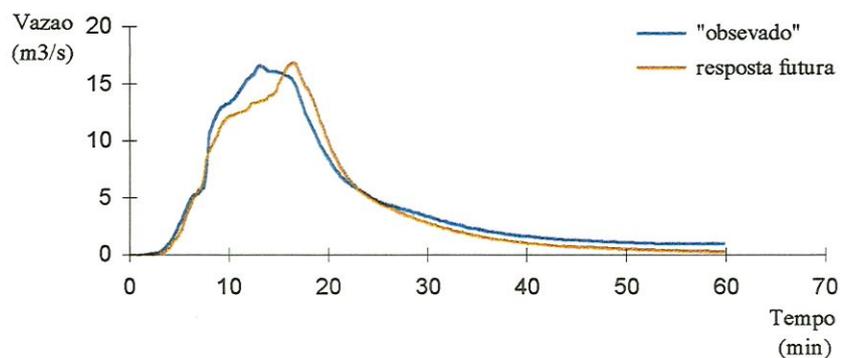
$$P_m(t) = \frac{\sum (P_j(t) \times A_j)}{\sum A_j}$$

sendo  $P_m(t)$  a precipitação média da área no instante  $t$ ;  $P_j$  a precipitação no elemento  $j$  e no tempo  $t$ ;  $A_j$  a área do elemento  $j$  da bacia.

A figura 28 mostra os hidrogramas considerados como dados observados e a segunda simulação tomada como uma chuva futura.



a)



b)

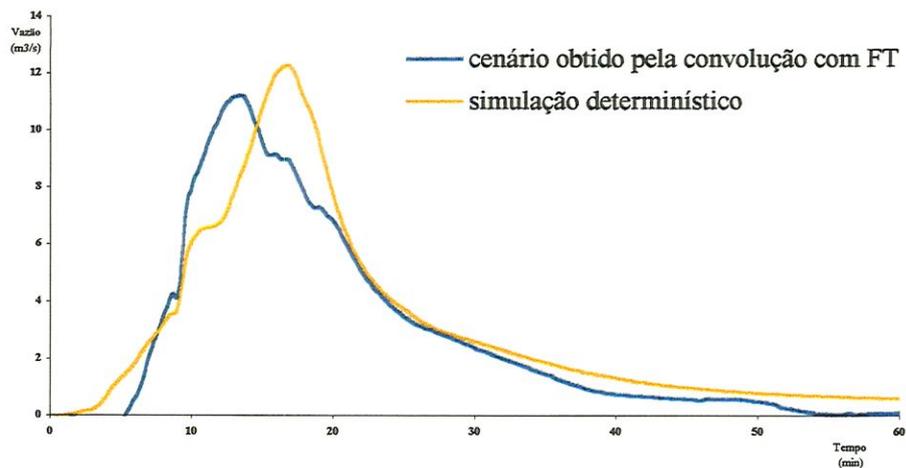
Figura 28: Hidrogramas gerados aleatoriamente pelo modelo. a) Período de retorno igual a 2 anos; b) Período de retorno igual a 10 anos.

Para cada uma das 30 simulações realizadas, obtém-se uma função de transferência através da resolução do sistema expresso por:

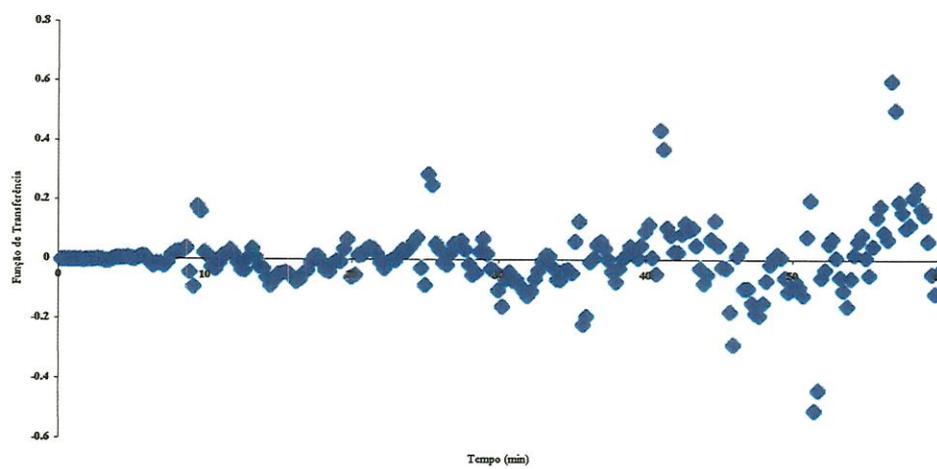
$$E^k = \sum_{j=1}^k P_m^{k-j} \cdot F^j$$

em que E representa o erro entre o hidrograma da primeira simulação e o hidrograma obtido deterministicamente para uma distribuição temporal e espacial da precipitação;  $P_m$  é a chuva média sobre a área; F é a função de transferência.

As figuras 29 e 30 mostram um dos possíveis cenários obtidos aleatoriamente e sua função de transferência, considerando-se os eventos uniformemente distribuídos no intervalo [1,30] para os períodos de retorno de 2 e 10 anos, respectivamente.

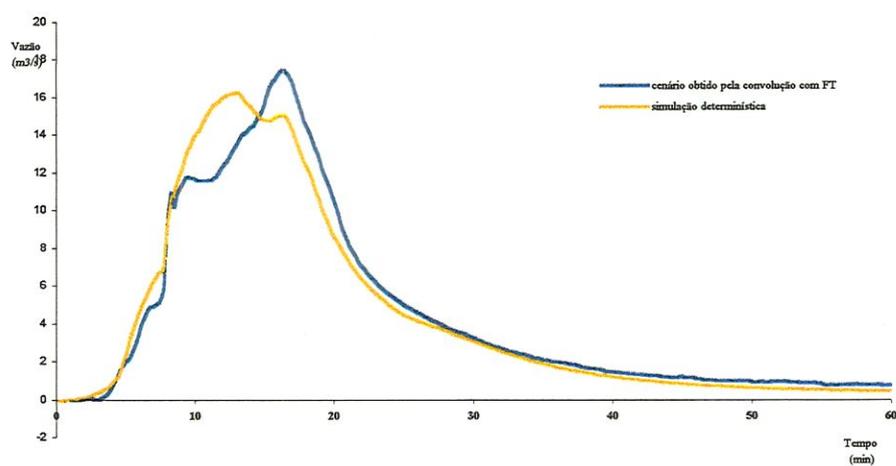


(a)

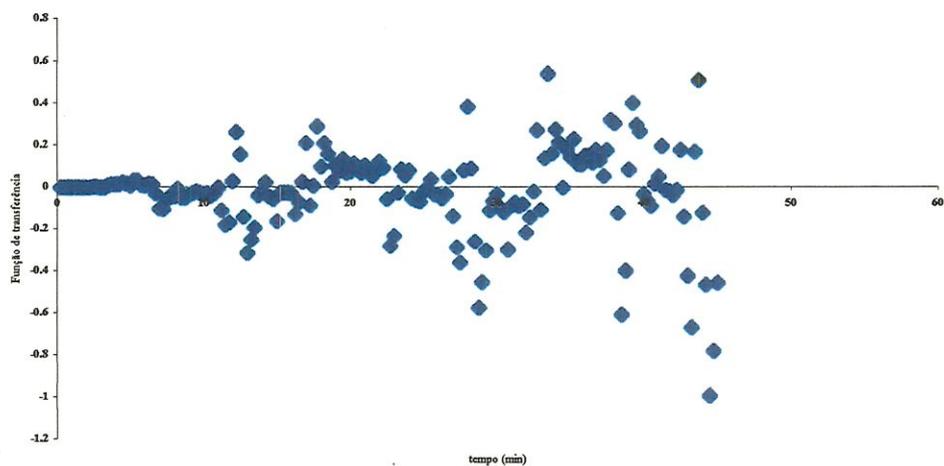


(b)

Figura 29: Cenário futuro e simulação determinística (a) e sua respectiva função de transferência (b) para um período de retorno igual a 2 anos.



(a)



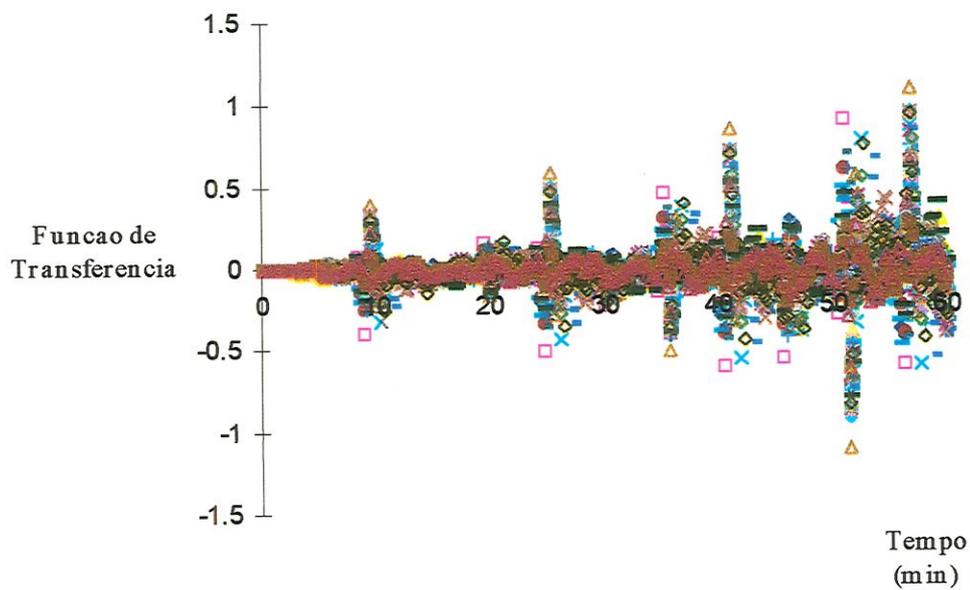
(b)

Figura 30: Cenário futuro e simulação determinística (a) e sua respectiva função de transferência (b) para um período de retorno igual a 10 anos.

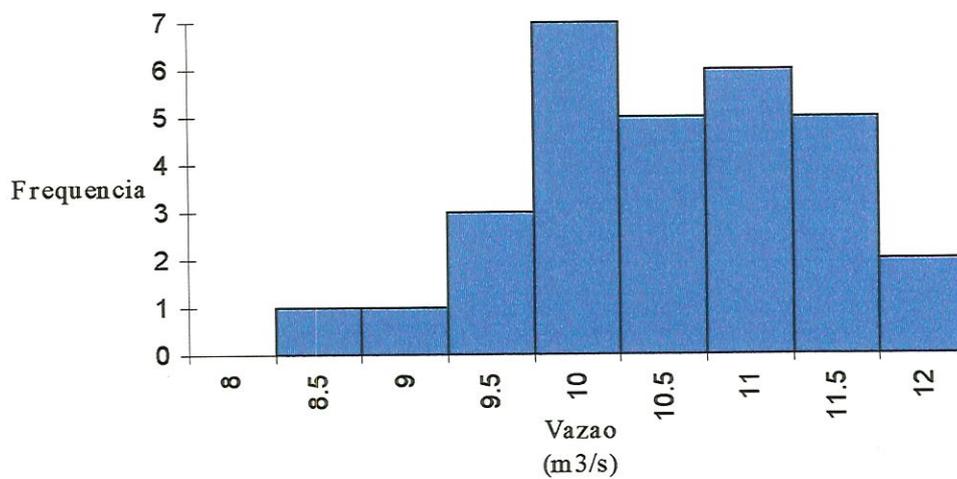
Os resultados obtidos pela variação do parâmetro de entrada do modelo foram satisfatórios para a obtenção da distribuição de frequência desejada da variável de interesse, uma vez que se conseguiu uma variação expressiva da vazão de pico frente a variação espacial da chuva. A família de 30 funções de transferência, ou seja, o processo estocástico, e sua respectiva distribuição de frequência para o deflúvio de pico são mostradas nas figuras 31 e 32 para períodos de retorno igual a 2 e 10 anos e duração média igual a 10 minutos.

As realizações das funções de transferências são mostradas nas figuras 31 e 32 na forma de densidade de pontos. Observa-se que a geração de distribuições espaciais diferentes não apresentou uma tendência em subestimar ou superestimar as quantidades do escoamento.

No que diz respeito à aplicação do método da integral estocástica, HROMADKA (1989) ressalta a importância da redução da variância da incerteza através de um espaço amostral suficientemente grande a fim de manter a significação estatística.



a)



b)

Figura31: a) Representação do processo estocástico através das 30 funções de transferências geradas pelo modelo; b) distribuição da vazão de pico. Período de retorno igual a 2 anos.

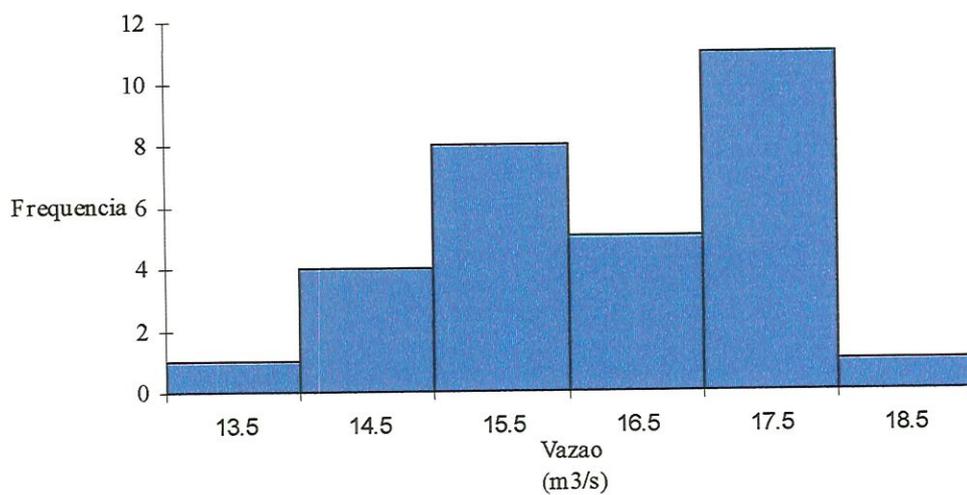
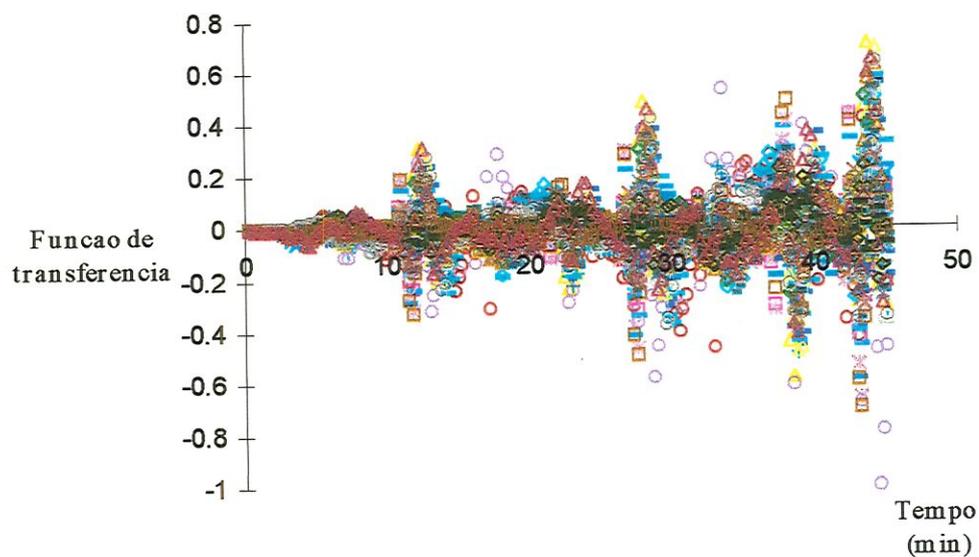


Figura 32: a) Representação do processo estocástico através das 30 funções de transferências geradas pelo modelo; b) distribuição da vazão de pico. Período de retorno igual a 10 anos.

Com base nas simulações realizadas, verificou-se que a convolução de todos os valores ao longo do tempo com a função de transferência pode causar oscilações no hidrograma de cheia referente ao cenário futuro. Pode-se intuir que essas oscilações tenham como causa diferenças mais acentuadas entre os valores “observados” e simulados para um mesmo tempo.

Para uma análise realística das incertezas relativas à distribuição da precipitação devem ser estudados o comportamento do modelo frente às variações da natureza da chuva (fraca, média, intensa) com base em dados experimentais obtidos em bacias devidamente instrumentadas e que permitam a coleta de informações sobre os processos hidrológicos. Conseqüentemente, a incerteza quanto a aquisição dos dados terá menor influência sobre as simulações do modelo hidrológico.

#### 4.5.3. *Considerações finais*

O trabalho realizado pode ser visto como um ensaio numérico do modelo distribuído em virtude da ausência de dados observados dos fenômenos hidrológicos. No modelo, destaca-se a incorporação da integral estocástica para a análise das mudanças espaciais e temporais da precipitação, tornando-se possível fornecer informações sobre a distribuição da variável de interesse. É importante enfatizar que não foi considerada a interdependência entre os elementos relativa ao estudo da variabilidade espacial da chuva, sendo necessária a introdução de um modelo que possa representar melhor a sua distribuição e deslocamento espaciais.

Por outro lado, lembrando que além da geração de chuvas aleatórias, tem-se a determinação aleatória do número de microcanais na bacia, procurou-se desenvolver um gerador confiável de números aleatórios distribuídos uniformemente no interior de um intervalo, não se utilizando o gerador do sistema FORTRAN em conseqüência do desconhecimento do seu algoritmo. Segundo BRATLEY et al (1983), a qualidade dos

geradores de números aleatórios está vinculada a uma bateria de testes empíricos a serem realizados antes de sua aceitação. Portanto, utilizou-se os valores dos coeficientes de PERIN (1995), que segundo o autor tem fornecido bons resultados.

No que diz respeito aos procedimentos de manipulação do modelo e dos resultados apresentados anteriormente, pode-se dizer que o modelo reduziu o trabalho de preparação das entradas e saídas dos dados necessários ao modelo e possibilitou uma primeira análise do seu comportamento, principalmente, do método estocástico empregado para a geração de cenários em decorrência de uma chuva hipotética.

Embora para alguns autores o esforço na construção e calibração de um modelo distribuído só se justifique pela produção de cenários para planejamento de ocupação da bacia, é importante lembrar que o avanço no campo computacional conjuntamente com a crescente potencialidade de “softwares” para a manipulação e operação de dados gráficos, vem reduzindo o tempo de extração dos dados e o tempo de processamento de suas simulações. Somam-se a esses fatores o uso cada vez mais difundido da tecnologia de sistema de informação geográfica nas administrações municipais, o que resultará em informações digitais disponíveis para a utilização de tais modelos.

Com relação a sua potencial habilidade na produção de cenários para auxiliar as questões de planejamento, a implementação de algoritmos simples baseados na estrutura matricial do sistema *IDRISIW* pode possibilitar a união das operações do *SIG* com o modelo distribuído. O procedimento de união das informações sobre os tipos de solos, a densidade populacional e as futuras áreas urbanas, seria fundamentado na conversão da rede triangular irregular para o formato “raster”. Assim cada célula da rede estaria representada por sub-células de mesma dimensão, nas quais seriam analisados os processos hidrológicos. Os dados sobre o traçado urbanístico da área e toda sua infra-estrutura também seriam constituídos por células regulares que permitiriam a representação minuciosa de cada lote urbano. As dificuldades encontradas na literatu-

ra quanto à conversão dos arquivos podem ser solucionadas através do desenvolvimento de algoritmos computacionais que “percorram” as imagens e que possam corrigir os locais onde a determinação da direção do escoamento torna-se difícil.

Finalmente, a representação da área no sistema de coordenadas UTM pode possibilitar o desenvolvimento de algoritmos para a realização do deslocamento automático das células convectivas no interior da bacia.

## 5. *CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES*

Desenvolveu-se um modelo hidrológico distribuído estocástico aplicável às bacias urbanas com o intuito de atender a necessidade de se considerar a natureza aleatória dos parâmetros do modelo. A incerteza relativa à distribuição espacial da chuva foi avaliada através de simulações sequenciais para chuvas com duração e total precipitado conhecidos. Paralelamente, o avanço no campo de gerenciamento e análise de dados geográficos e facilidades nas linguagens de programação visual resultou numa melhor interação com o modelo.

A modelação cinemática dos escoamentos em sarjetas, galerias, canais, e em microcanais gerados aleatoriamente na parte rural da bacia teve por fim representar fielmente os processos de escoamento. É importante lembrar que a inexistência de dados precipitação-deflúvio para a bacia estudada não permitiu uma análise mais conclusiva da concepção de escoamento por meio dos microcanais rurais.

A ligação do modelo hidrológico distribuído a um “software” comercial de digitalização e a um sistema de informação geográfica deixou mais eficiente a tarefa de obtenção dos dados topográficos e de localização da rede de elementos finitos, e permitiu, também, a caracterização fiel do traçado urbano da área e da infra-estrutura física existente na bacia. Entretanto, a automatização do procedimento de entrada gráfica deve ser reestruturada quando da utilização de “softwares” mais apropriados para a manipulação e geração do banco de dados necessários ao modelo.

O método da equação integral estocástica incorporado no modelo distribuído desenvolvido considerou a contribuição do erro aleatório na determinação da variável de interesse para um evento futuro. A aplicação é simples e pode fornecer medidas da incerteza na modelagem dos escoamentos, especialmente do deflúvio de pico de uma chuva de projeto.

No que diz respeito às simulações realizadas, os erros de balanço de volume total para condições simples, sem infiltração, mostraram resultados satisfatórios, os quais encontraram-se entre os valores 0,024% e 2%, e deixaram evidente a necessidade de avaliação do modelo em função dos dados reais. Os resultados dos testes de sensibilidade dos parâmetros de infiltração e rugosidade superficial confirmaram o comportamento esperado do modelo frente à variação dos valores desses parâmetros. As distribuições de frequência obtidas para a vazão de pico pelo método estocástico ressaltou a importância do estudo das incertezas na determinação de hidrogramas de cheias em bacias maiores onde essa variação pode ser mais expressiva. Deve-se estudar em trabalhos futuros a incerteza da distribuição espacial da chuva efetiva, ou seja, analisar a incerteza conjunta da precipitação e dos parâmetros de infiltração.

O modelo pode ser aplicado no dimensionamento do sistema de galerias e na análise do comportamento hidráulico da rede existente, com a localização precisa dos pontos críticos da área. O modelo pode ser, ainda, utilizado como uma ferramenta auxiliar no planejamento da ocupação urbana da bacia, tomando-se por base o estudo das alterações e comportamento hidrológicos através de simulações de vários cenários; a implementação de rotinas computacionais simples pode servir para analisar a distribuição espacial de parâmetros referentes a cobertura do solo, tipo de solo, densidade populacional, etc. Os recursos gráficos do modelo tornam fácil a análise para várias condições da bacia.

Com relação às recomendações é necessário em trabalhos futuros a obtenção de valores dos parâmetros de infiltração, de deflúvio e precipitação a fim de que se possa comparar os valores simulados pelo modelo e os observados em campo. A par-

tir desses valores, pode-se dar início à formação de um banco de dados que sejam representativos para a análise dos fenômenos no interior da área urbana.

### **LISTAGEM DO PROGRAMA**

O programa de cálculo, escrito na linguagem de alto nível FORTRAN PowerStation versão 1.0a, encontra-se no disquete anexado ao trabalho.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BARBASSA, A.P., 1991. *Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos, SP.* São Carlos, 1991. 327p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BEVEN, K., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling, *Advances in Water Resources*, 16: 41 51.
- BEVEN, K., 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically - based models, *Journal of Hydrology*, 105: 157 172.
- BINLEY, A.M., K.J. BEVEN, A. CALVER and L.G. WATTS, 1991. Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions, *Water Resources Research*, 27 (6): 1253 1261.
- BRAS, R.L. and F.E. PERKINS, 1975. Effects of urbanization on catchment response, *Journal of Hydraulics Division*, 101: 451 466.
- BRATLEY, P. B.L.FOX And L.E. SCHRAGE , 1983. *A Guide to Simulation.* Springer - Verlag, New York.

- CARDOSO N.,A ., 1996. *Aplicabilidade das equações de Saint-Venant a modelos bi-dimensionais de escoamento superficial*, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHEN,C.W. and R.P. SHUBINSKI, 1971. Computer Simulation of Urban Storm Water Runoff, *Journal of Hydraulics Division*, 97: 289 301.
- GARG, N.K. and B.J. SEM, 1994. Determination of Watershed Features for Surface Runoff Models, *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(4): 427 447.
- GOODRICH, D.C., D.A . WOOLHISER and T.O . KEEFER, 1991. Kinematic Routing Using Finite Elements on a Triangular Irregular Network, *Water Resources Research*, 27(6): 995 1003.
- HAAN,C.T. and B.N.WILSON. Uncertainty in Urban Hydrologic Modeling, *Proceedings of the 18th Annual Conference and Symposium*.
- HOLDEN, A .P. and D. STEPHENSON, 1995. Finite Difference Formulations of Kinematic Equations, *Journal of Hydraulic Engineering*, may: 423 426.
- HROMADKA II, T.V., 1989. Approximating rainfall-runoff modelling uncertainty using the stochastic integral equation method, *Advances in Water Resources*, 12: 21 25.
- HROMADKA II, T.V. and R.H. McCUEN,1989. An Approximate Analysis of Surface Runoff Model Uncertainty, *Journal of Hydrology*, 111:321 360.

- KIBLER, D.F., 1991. Model Mania in Urban Hydrology : Present Dilemmas , *Proceedings of the 18th Annual Conference and Symposium*, Orleans, LA, USA.
- LINSLEY, R.K., Jr; M.A .KOHLER And J.L.H. PAULHUS, 1949. Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York.
- MACHADO, E.S.(1981). *Modelo hidrológico determinístico para bacias urbanas*. São Carlos, 1981. 286p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MAGUIRE , D.J. 1991. *An Overview and definition of GIS in* MAGUIRE, D.J., M.F. GOODCHILD, D.W. RHIND, 1991. Geographical Information Systems - Principles, *Logman Scientific and Technical*.
- McCUEN, R.H., S.L. WONG and W.L. RAULS, 1984. Estimating urban time of concentration, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(7): 887 904.
- MELCHING, C.S., B.C. YEN and H.G. WENZEL, 1990. A Reliability Estimation in Modeling Watershed Runoff with Uncertainties, *Water Resources Research*, 26(10): 2275 2286.
- MOORE,I.D. and R.B. GRAYSON, 1991. Terrain - based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data, *Water Resources Research*, 27(6): 1177 1191.
- NAMIKAWA, L.M., 1993 . *Modelagem Digital de Elevação* - Monografia referente ao Exame Integrado em Computação Aplicada. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

- PERIN, C.F., 1995. *Introdução à Simulação de Sistemas*. Editora da UNICAMP.
- PORTO, R.L.L. ,1995. *Escoamento Superficial Direto* in TUCCI, C.E.M., R.L.L. PORTO E M.T. BARROS, 1995. *Drenagem Urbana* - Coleção ABRH de Recursos Hídricos - Porto Alegre: ABRH / Editora da Universidade/ UFRGS.
- SCHILLING, W. and L. FUCHS, 1986. Erros in Stormwater Modeling - A Quantitative Assessment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(2): 111 123.
- SMITH, M.B., 1993 . A GIS - based distributed parameter hydrologic model for urban areas, *Hydrological Processes*, 7: 45 61.
- SMITH, M.B. and A . VIDMAR, 1994. Data Set Derivation for GIS - Based Urban Hydrological Modeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(1) : 67 76.
- SMITH, R.E., D.R. GOODRICH, D.A . WOOLHISER and J.R. SIMANTON, 1994. Comment on "Physically based hydrologic modeling 2, Is the concept realistic?" by R.B. GRAYSON, I.D. MOORE and T.A . McMAHON, *Water Resources Research*, 30(3): 851 854.
- TUCCI, C.E.M., 1987. *Modelos Determinísticos* in BARTH,F.T., C.T. POMPEU, H.D. FILL, C.E.M. TUCCI, J. KELMAN and B.P.F. BRAGA JR, 1987. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, *Coleção ABRH de Recursos Hídricos*.

WEIBEL,R. And M. HELLER - Digital Terrain Modelling in MAGUIRE, D.J., M.F. GOODCHILD, D.W. RHIND, 1991. Geographical Information Systems - Principles, *Logman Scientific and Technical*.

WOLOCK, D.M. and C.V. PRICE,1994. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography - based watershed model, *Water Resources Research*, 30(11): 3041 3052 .

ZECH, Y., X. SILLEN, C. DEBOURCES and A . VAN HAUWARETR, 1994. Rainfall - Runoff Modelling of Partly Urbanized Watersheds: Comparison Between a Distributed Model Using GIS and other Models Sensitivity Analysis, *Water Science Technology*, 29(1-2): 163 170.

ZHANG,W. and D.R. MONTGOMERY, 1994 . Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation and Hydrologic Simulations, *Water Resources Research*, 30(4): 1019 1028.

**OBRAS CONSULTADAS:**

PAPOULIS,A . 1965. *Probability, Random Variables and Stochastic Process*, McGraw - Hill.

TSOKOS,C.P. and W.J. PADGETT, 1974. *Random Integral Equations with Applications to Life, Science and Engineering*. Academic Press 108.

TUCCI, C.E.M.. 1995. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, vol 4.