Campus de São Carlos

**"ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO
E PARÂMETROS HIDROLÓGICOS EM BACIA EXPERIMENTAL:
ESTUDO DA TRANSFORMAÇÃO DA CHUVA EM UMA
PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA URBANA"**

Volume I

Karla de Andrade e Silva

ORIENTADOR: Prof.Dr. Antonio Marozzi Righetto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**“ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO E
PARÂMETROS HIDROLÓGICOS EM BACIA EXPERIMENTAL:
ESTUDO DA TRANSFORMAÇÃO DA CHUVA EM UMA PEQUENA
BACIA HIDROGRÁFICA URBANA”**

Volume I

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 09./06./03

Ass.: *Karla de Andrade e Silva*

Karla de Andrade e Silva

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto

São Carlos

2003

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043582

Class. TESE- EESC
 Cuff. 5348
V.1
 Tombo T196/03
 Sysno 132.7183

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

S586a
v.1

Silva, Karla de Andrade e

Análise da variabilidade espacial de precipitação e parâmetros hidrológicos em bacia experimental : estudo da transformação da chuva em uma pequena bacia hidrográfica urbana / Karla de Andrade e Silva. -- São Carlos, 2003.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área : Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto.

1. Variabilidade espacial. 2. Precipitação. 3. Condutividade hidráulica. 4. Modelo hidrológico. 5. Sistema de informação geográfica. 6. Modelo numérico de terreno. 7. Análise de incertezas. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Tese defendida e julgada em 11/04/2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **ANTONIO MAROZZI RIGHETTO** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Tit. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **EDUARDO MÁRIO MENDIONDO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ADEMIR PACELI BARBASSA**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADO

Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

"A fé está em nossa vida bem mais do que supomos, e inspira as nossas ações bem mais do que imaginamos. Creio que a fé é precursora de todas as nossas idéias. Sem fé não teríamos criado hipóteses, teorias, ciências ou matemática. Penso que a fé é uma extensão do espírito. É a chave que abre a porta do impossível. Negar a fé é refutar a si mesmo e ao espírito que gera todas as nossas forças criadoras." – Charles Chaplin

Este trabalho é dedicado a **DEUS**,
motivo maior de nossa existência, por tudo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Rubens e Mercês, que me ensinaram a viver com dignidade, pelo amor desde os primeiros instantes da minha vida, não bastaria um muitíssimo obrigado.

Aos meus irmãos Marco Antônio e Christiane pela união e grande amizade ao longo de nossas vidas e com carinho especial ao meu querido sobrinho Heitor.

À CAPES e à FINEP pelos recursos concedidos.

Ao orientador Professor Antonio Marozzi Righetto pela paciência na realização deste trabalho.

À Regina Célia, Guilherme Marques, Válder Pádua, Cláudio Krüger, José Américo Bordini e João Augusto Filho pelo material bibliográfico cedido, apoio e debates que tanto contribuíram para consolidar idéias, traçar metas e alcançar os objetivos da pesquisa.

Aos professores Eduardo Mario Menciondo, Fazal Hussain Chaudhry, Harry Edmar Schulz e Woodrow N. L. Roma pelo apoio e incentivo na realização do trabalho

Ao Professor Marcelo Pereira de Souza pela utilização do Laboratório de Sistema de Informação Geográfica.

Ao Professor Francisco Vechia pelo empréstimo de dataloggers, fundamentais na instalação de três estações pluviográficas.

Ao José Roberto Maramarque pelo apoio no trabalho de reconhecimento da área, na coleta dos dados chuva-vazão e nas campanhas de medição de infiltração, pela instalação das estações linigráficas e pluviográficas e pela eficiência na determinação da curva-chave.

Ao Edson, Musetti e Vadinho, técnicos do Laboratório de Hidráulica, pela competência na fabricação do infiltrômetro de disco, pelas dicas e ajuda

na realização das primeiras medições com o aparelho. Ao Musetti pelo auxílio na segunda campanha de medição com o infiltrômetro de disco.

Ao Paulo Fragiácomo, técnico do Laboratório de Saneamento, pelo auxílio nas análises de umidade das amostras de solo.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento Pavi e Sá, a Valderez, Márcia, Cecília, Rose, Flávia e Alex, ao Valdecir, Sérgio, Wagner e André pelo trabalho sempre eficiente e profissionalismo que contribuíram para a conclusão da pesquisa.

Ao Sidnei Musetti ,técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de São Carlos, cuja experiência e boa vontade foram importantes para a realização da análise granulométrica das amostras de solo coletadas.

À Prefeitura Municipal de São Carlos pela construção de dois abrigos necessários à instalação dos equipamentos ao longo do córrego do Gregório.

Ao Sr. José Roberto C. Alvarez, Diretor Municipal da Saúde da Prefeitura de São Carlos, pelo consentimento para instalação de posto pluviográfico junto ao Posto de Saúde Dr. Aldo de Creci.

Ao Seu Aristides Daquino pelo consentimento para instalação de posto pluviográfico no Sítio Bom Retiro e pela recepção sempre afável durante as coletas dos dados.

À Sra. Arlete Suely Della Colleta Keppe pelo consentimento para instalação de posto pluviográfico em área próxima à Faculdade de Direito de São Carlos.

Com carinho especial ao Seu Luís Pozzi e a Dona Sônia Pozzi pela recepção agradável e pelo consentimento para realização dos experimentos de infiltração no Sítio São Rafael.

A todos os amigos que sempre estiveram comigo e a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho. Em especial ao Gustavo.

A DEUS, por iluminar o meu caminho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas.....	xiv
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 Modelos Hidrológicos Distribuídos.	7
3.1.1 Incertezas nos hidrogramas de cheia devido à variabilidade espacial da precipitação.....	10
3.1.2 Interpolação Superficial da Precipitação.....	13
3.1.3 Distribuição Espacial da Condutividade Hidráulica Saturada e da Umidade do solo.....	16
3.2 Infiltração de Água no Solo.....	22
3.3 Dados Hidrológicos em Bacias Urbanas.....	26
3.4 Sistema de Informação Geográfica aplicado à modelagem hidrológica de bacias hidrográficas.....	26
4. BACIA EXPERIMENTAL DO CÓRREGO DO GREGÓRIO.....	37
4.1 Caracterização física do Município de São Carlos, São Paulo.....	37
4.2 Histórico do crescimento urbano do Município de São Carlos, São Paulo.....	38
4.3 A Bacia do Córrego do Gregório.....	39
4.4 Características da área de estudo.....	41

5. ESTUDO EXPERIMENTAL.....	50
5.1 Descrição do estudo.....	50
5.2 Infiltração.....	52
5.2.1 Procedimento experimental.....	54
5.2.2 Ensaios realizados.....	62
5.2.3 Distribuição espacial.....	88
5.3 Precipitação.....	91
5.3.1 Eventos: variabilidade espacial pelo método multiquadrático.....	97
5.4 Medição de Vazão.....	105
6. ESTUDO TEÓRICO.....	116
6.1 Formulação matemática do modelo de simulação hidrológica.....	116
6.1.1 Sub-Modelo de Detenção Superficial.....	121
6.1.2 Sub-Modelo de Infiltração.....	122
6.1.3 Sub-Modelo de Precipitação.....	124
6.1.4 Sub-Modelo Escoamento superficial.....	125
6.1.4.1 Células de encosta.....	125
6.1.4.2 Células tipo Galeria.....	127
6.1.4.3. Células tipo Boca de lobo.....	128
6.1.4.4. Equacionamento para grupos de células de rio situadas abaixo da cota de inundação.....	129
6.2 Esquema topológico do modelo.....	130
6.3 Aplicação.....	134
6.3.1 Ajuste do modelo de simulação.....	139
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	165
ANEXO A : Experimentos de Infiltração de Água no Solo.....	170
ANEXO B : Eventos chuvosos registrados na bacia urbana do córrego do Gregório (período de janeiro a março de 2000).....	258
ANEXO C : Código fonte do modelo de simulação hidrológica.....	297

ANEXO D: Tabelas de medição de velocidade no exutório da sub-bacia do Córrego do Gregório.....	405
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	409

LISTA DE FIGURAS

Figura 31: distribuição de umidade do solo obtida pela krigagem ordinária. Fonte: Bardossy e Lehmann (1998)	20
Figura 3.2: distribuição de umidade do solo obtida pelo método Krigagem Drift Externa. Fonte: Bardossy e Lehmann (1998).....	22
Figura 3.3: Projeto do infiltrômetro de pressão negativa de Perroux e White (1988).	25
Figura 3.4: Representação da bacia urbana por lotes. Greene e Cruise (1996).....	30
Figura 3.5: Topologia do modelo de Greene e Cruise (1996).....	31
Figura 3.6: representação da bacia por células de escoamento Miguez e Mascarenhas	36
Figura 4.1: Curvas planialtimétricas da subbacia do córrego do Gregório. Fonte: Carta topográfica 1:10000 do município de São Carlos – IBGE (1971).....	43
Figura 4.2: Rede de drenagem da subbacia do Córrego do Gregório.....	44
Figura 4.3: Coeficiente de Manning como indicativo das características do sistema de drenagem.	45
Figura 4.4: Feições geológicas e pedológicas da área de estudo. Fonte: Lorandi apud Oliveira(1999).....	46
Figura 4.5: Fotografia aérea da área de estudo correspondente ao alto e médio curso do Córrego do Gregório. A moldura refere-se às coordenadas UTM (sentido horário a partir do canto inferior esquerdo): (202;7560),(202;7564),(208;7564) e (208;7560). Unidade: Km.....	48
Figura 4.6: Uso e ocupação do solo da sub-bacia do Gregório. Adaptado de Queiroz (1996). Destaca-se, na figura, o traçado da rodovia Washington Luiz cortando a área rural a leste.	49
Figura 5.1: Localização dos experimentos de infiltração realizados no período de junho a agosto dos anos de 1999 e 2000. O detalhe azul representa a localização do segundo conjunto de experimentos realizados na estiagem de 2001.....	53
Figura 5.2: Amostras regularmente espaçadas cobrindo a área de 1,3 ha localizada no Sítio São Rafael.....	54
Figura 5.3: Infiltrômetro de disco utilizado para a determinação da curva da capacidade de infiltração de água no solo.....	56
Figura 5.4: Projeto do infiltrômetro de disco (Perroux e White –1988) utilizado nos experimentos de campo	57
Figura 5.5: Paisagem predominante na área rural da sub-bacia do Gregório. O vale corresponde ao córrego cujas nascentes encontram-se no Sítio São Rafael.....	60
Figura 5.6: Enchimento do infiltrômetro de disco durante ensaio realizado no Sítio Cachimbo. A superfície aparentemente uniforme apresenta grandes desníveis devido trânsito de maquinário pesado e pastagem do gado.....	60
Figura 5.7: Colocação do infiltrômetro no local de ensaio referido na figura 11. Utilização do nível para garantir a mesma altura da lâmina d'água sobre o solo....	61
Figura 5.8: Colocação de argila para selar a passagem da água pelo sulco onde o infiltrômetro foi inserido.....	61

Figura 5.9: Localização dos pontos dos ensaios de infiltração: pontos pretos. Os pontos vermelhos representam as estações de medição.....	63
Figura 5.10: Curva da capacidade de infiltração obtida no primeiro ensaio localizado próximo ao ponto 1. Bacia do Gregório. Data:04/06/99.....	64
Figura 5.11: Curva capacidade de infiltração obtida no segundo ensaio próximo ao ponto 1. Bacia do Gregório. Data: 18/06/99.....	64
Figura 5.12: Curva capacidade de infiltração obtida para o primeiro experimento de infiltração realizado próximo ao local 2. Bacia do Gregório. Data:26/07/99.....	65
Figura 5.13: Curva capacidade de infiltração obtida no segundo ensaio realizado próximo ao local 2. Bacia do Gregório. Data: 26/07/99.....	65
Figura 5.14: Curva Capacidade de infiltração e curva granulométrica obtidas para a primeira amostra da primeira linha. Local: Sítio São Rafael. Junho/2001.....	67
Figura 5.15: Histograma da frequência relativa da condutividade hidráulica saturada observada na primeira e segunda campanhas de medição. Unidade em mm/h.....	80
Figura 5.16: Histograma obtido através dos experimentos de campo realizados em 2001. Unidade em mm/h.....	82
Figura 5.17: Histograma dos valores observados da condutividade hidráulica saturada.....	83
Figura 5.18: Função densidade de probabilidade normal ajustada às observações da condutividade hidráulica saturada.....	84
Figura 5.19: função densidade de probabilidade lognormal ajustada aos valores da condutividade hidráulica saturada observados na 1ª e 2ª campanhas de medição (Amostra 2). Ano: 1999 e 2000.....	84
Figura 5.20: Função densidade de probabilidade lognormal ajustada aos valores da condutividade hidráulica saturada observados na terceira campanha de medição (Amostra 2). Ano: 2001.....	85
Figura 5.21: Função densidade de probabilidade normal considerando-se os valores da condutividade hidráulica saturada observados nas três campanhas de medição.....	85
Figura 5.22: Função de densidade lognormal para os valores da condutividade hidráulica saturada observados nas três campanhas de medição.....	86
Figura 5.23: Semi-variograma experimental da condutividade hidráulica saturada na Bacia do córrego do Gregório. Lag = 100 m	89
Figura 5.24: Semi-variograma experimental da condutividade hidráulica saturada na Bacia do córrego do Gregório. Lag = 120 m.....	90
Figura 5.25: Estatística para o valor do lag igual a 100 e 120 metros.....	90
Figura 5.26: Localização geográfica dos postos de medição de chuva.....	92
Figura 5.27: Posto pluviográfico instalado interior ao sítio Bom Retiro.....	94
Fonte: da autora.	
Figura 5.28: Posto pluviográfico próximo a Faculdade de Direito de São Carlos. Fonte: da autora.....	95
Figura 5.29: Posto pluviográfico próximo a E.M.E.I João Batista Paim. Fonte: da autora.....	95
Figura 5.30: Postos pluviográficos e linigráficos ao longo do Córrego do Gregório: posto 4 à esquerda e posto 5 à direita.....	96
Figura 5.31. Isoietas no instante t = 10 min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.....	99

Figura 5.32. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.....	99
Figura 5.33. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	99
Figura 5.34. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	99
Figura 5.35. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	99
Figura 5.36. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	99
Figura 5.37. Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	100
Figura 5.38. Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	100
Figura 5.39. Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	100
Figura 5.40. Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	100
Figura 5.41. Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.	100
Figura 5.42 Alturas pluviométricas médias observadas e $[P_{m(t)}/P_{mm}]$ e coeficientes de variação $[(C_v(t)/C_{vm})]$, em intervalos de 5min; $P_{mm}=1,96\text{mm}$ e $C_{vm}=0,38$	100
Figura 5.43. Isoietas no instante $t = 10$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.44. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.45. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.46. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.47. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.48. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	101
Figura 5.49. Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	102
Figura 5.50. Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	102
Figura 5.51. Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	102
Figura 5.52. Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	102
Figura 5.53. Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.	102
Figura 5.54. Alturas pluviométricas médias observadas e $[P_{m(t)}/P_{mm}]$ e coeficientes de variação $[(C_v(t)/C_{vm})]$, em intervalos de 5min; $P_{mm}=0,89\text{mm}$ e $C_{vm}=0,40$. . .	102

Figura 5.55. Isoietas no instante $t = 10$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.....	103
Figura 5.56. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	103
Figura 5.57. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	103
Figura 5.58. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	103
Figura 5.59. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	103
Figura 5.60. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	103
Figura 5.61. Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.	104
Figura 5.62. Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm. . .	104
Figura 5.63. Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm. .	104
Figura 5.64. Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm. .	104
Figura 5.65. Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm. .	104
Figura 5.66. Alturas pluviométricas médias observadas e $[P_{m(t)}/P_{mm}]$ e coeficientes de variação $[(C_{v(t)}/C_{vm})]$, em intervalos de 5min; $P_{mm}=1,17\text{mm}$ e $C_{vm}=0,54$. .	104
Figura 5.67: Curva-chave no exutório da sub-bacia do córrego do Gregório.....	105
Figura 5.68: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 08/02/00.....	106
Figura 5.69: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 11/02/00.....	107
Figura 5.70: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 8/03/00.....	108
Figura 5.71 : Primeiro local de medição dos escoamentos em sarjeta situado em frente ao Fórum de São Carlos. Do lado esquerdo da foto vê-se o córrego do Gregório. Dez/2001 Foto: da autora.....	110
Figura 5.72: Segundo local de medição dos escoamentos em sarjeta localizado no lado esquerdo da via pública em frente a entrada lateral do fórum. Dez/2001. Foto da autora.....	110
Figura 5.73 : Instalação do linígrafo com cabeamento sob a calçada. Na foto, pode-se notar o acúmulo de sedimentos no reservatório projetado. Foto: da autora.....	111
Figura 5.74: Local de medição na encosta que dá acesso ao fórum pela Rua São Paulo. Na foto, nota-se a medição à montante da boca de lobo. Foto da autora....	111
Figura 5.75 : Instalação dos dataloggers e pluviógrafo no terreno do fórum de São Carlos. Nota-se a instalação do pluviógrafo no alto da torre metálica. Foto: da autora.....	112
Figura 5.76: Variação do nível d'água na entrada do Fórum pela Rua São Paulo. Evento chuvoso em 22/11/01. Vazão = $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$	113
Figura 5.77: Registro da variação do nível d'água nos dois pontos de medição. Vazão = $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$	114

Figura 5.78: Variação da altura do escoamento na sarjeta obtida para o ponto 2. Data:19/12/01. Vazão = 0.62 m ³ /s (descontando-se a lâmina d'água de 6cm que não é devido a precipitação ocorrida como verificado em dias não chuvosos).....	115
Figura 6.1: Bacia hipotética aproximada por malhas regulares com resoluções distintas.....	117
Figura 6.2: Configuração da área urbana conforme padrão de representação do sistema hidrológico.	119
Figura 6.3: Representação gráfica do balanço hídrico em cada célula do modelo. As direções da vazão afluente e efluente são explicativas, sendo que a primeira pode ocorrer em até sete direções e a segunda em apenas uma. (Adaptado de Smith – 1993).....	120
Figura 6.4: Área de contribuição para célula inicial de canal fictício. O cálculo dos escoamentos superficiais é efetuado a partir das células de montante até alcançar a célula de rio.	133
Figura 6.5: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 10 metros. O detalhe mostra a concentração dos escoamentos nas vias urbanas.....	135
Figura 6.6: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 10 metros).....	136
Figura 6.7: Sistema de vias urbanas referente à sub-bacia do Córrego do Gregório, São Carlos, SP. As áreas selecionadas indicam as regiões próximas aos locais de concentração de águas conforme Oliveira (1999).....	137
Figura 6.8: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 50 metros.....	137
Figura 6.9: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 50 metros).....	138
Figura 6.10: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 100 metros.....	138
Figura 6.11: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 100 metros).....	139
Figura 6.12: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 10 metros.....	143
Figura 6.13: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 50 metros.....	144
Figura 6.14: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 100 metros.....	144
Figura 6.15: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 10 metros.....	145
Figura 6.16: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 50 metros.....	145
Figura 6.17: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 100 metros.....	146
Figura 6.18: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 10 metros.....	146
Figura 6.19: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 50 metros.....	147
Figura 6.20: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 100 metros.....	147

Figura 6.21: Rede de galerias pluviais na sub-bacia do Gregório. Resolução 10 metros.....	148
Figura 6.22: Localização das bocas de lobo da sub-bacia do Gregório (imagem vetor).....	148
Figura 6.23: Áreas de influência dos postos definidas a partir do polígono que abrange as células nas quais se aplicam o método de interpolação multiquadrático.....	149
Figura 6.24: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 19 de fevereiro de 2000.....	150
Figura 6.25: Hidrograma simulado para a uniformidade espacial da chuva registrada pela estação 5, próxima ao exutório, para o evento do dia 19/02/2000.....	150
Figura 6.26: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 19 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.....	151
Figura 6.27: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 13 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0.8 e ISE = 6.01.....	154
Figura 6.28: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 13/02/2000.....	155
Figura 6.29: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 13 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.....	155
Figura 6.30: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 11 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0.87 e ISE = 5.82.....	156
Figura 6.31: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 11/02/2000.....	156
Figura 6.32: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 11 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.	157
Figura 6.33: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 12 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0.95 e ISE = 4.58.....	157
Figura 6.34: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 12/02/2000.....	158
Figura 6.35: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 12 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.....	158
Figura 6.36: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0.89 e ISE = 8.19.....	159
Figura 6.37: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000 considerando-se pequeno déficit de umidade do solo.....	159
Figura 6.38: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 08/02/2000.....	160
Figura 6.39: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.....	160
Figura 6.40: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 31 de janeiro de 2000.....	161
Figura 6.41: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 31 de janeiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.....	161
Figura 6.42: Separação do escoamento da área urbana para o evento de 8 de fevereiro de 2000.....	162
Figura 6.43: Consideração de impermeabilização da área de estudo. Os valores de rugosidade foram mantidos das simulações anteriores.....	163

Figura 6.44: Hidrograma de cheia simulado para valor médio da condutividade hidráulica saturada do solo.....	164
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Declividade dos cursos d'água da sub-bacia do Gregório.....	44
Tabela 4.2: Características do estado natural do trecho. Valores de rugosidade foram atribuídos a partir de visitas no campo e adaptado de Barbassa (1991)	45
Tabela 5.1: Classificação granulométrica do solo.....	65
Tabela 5.2: Ajuste da infiltração unidimensional em estado permanente pelas equações de escoamento tridimensional sob infiltrômetro de disco (amostra 1).....	70
Tabela 5.2: Ajuste da infiltração unidimensional em estado permanente pelas equações de escoamento tridimensional sob infiltrômetro de disco (amostra 2).....	76
Tabela 5.4: Estatística descritiva das observações referentes às campanhas de medição realizadas nos anos de 1990 e 2000. Unidade da variável em mm/h.....	79
Tabela 5.5: Análise preliminar do histograma da variável observada durante a primeira e segunda campanhas de medição.....	79
Tabela 5.6: Valores das frequências relativas e absolutas da variável observada nos anos de 1999 e 2000. Unidade do parâmetro em mm/h.....	80
Tabela 5.7: Estatística descritiva das observações referentes à campanha de medição realizada em 2001. Unidade em mm/h.....	81
Tabela 5.8: Análise preliminar do histograma da condutividade hidráulica observada entre os meses junho a agosto de 2001.....	81
Tabela 5.9: Valores das frequências relativas e absolutas da condutividade hidráulica observada em 2001. Unidade em mm/min.....	81
Tabela 5.10: Estatística descritiva de todas as observações da condutividade hidráulica saturada. Unidade em mm/h.....	82
Tabela 5.11: Análise preliminar do histograma da condutividade hidráulica observada para as três campanhas de medição.	83
Tabela 5.12: Valores das frequências relativas e absolutas da condutividade hidráulica observada nas três campanhas de medição. Unidade em mm/h.	83
Tabela 5.13: Estatísticas χ^2 da condutividade hidráulica saturada para o teste de ajuste da distribuição normal de lognormal.....	86
Tabela 5.14: Estatística para a amostra obtida durante a 1ª e 2ª campanha de medição. Lag igual a 100 e 120 metros.....	89
Tabela 5.15: Total precipitado nos meses de janeiro a março de 2000.	97
Tabela 5.16: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 08/02/00	106
Tabela 5.17: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 11/02/00	107
Tabela 5.18: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 08/03/00	108
Tabela 6.1: Entrada de dados para o modelo distribuído.....	131
Tabela 6.2: Regiões de concentração de águas segundo Oliveira (1999)	136
Tabela 6.3 : Indicador de qualidade do ajuste na calibração em função do valor ISE.....	140
Tabela 6.4: Total de células da bacia e rede de drenagem.....	141
Tabela 6.5: Comparação dos eventos ocorridos no período chuvoso de 2000 e estimativa do coeficiente de escoamento superficial.....	142

RESUMO

Silva, K.A. *"Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação e de Parâmetros Hidrológicos em Bacia Experimental: Estudo da Transformação da Chuva em uma Pequena Bacia Hidrográfica Urbana"* São Carlos, 2003. 419 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

A primeira parte deste trabalho consistiu na instalação de pluviógrafos e linígrafos e levantamento de eventos hidrológicos com a obtenção de dados da distribuição espacial de precipitações observadas e hidrogramas resultantes. Experimentos de infiltração de água no solo foram realizados a partir de infiltrômetro de disco a fim de caracterizar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica na bacia, obtendo-se dois conjuntos de dados que mostraram ser lognormalmente distribuídos com médias iguais a 15,8 mm/h e 5,47 mm/h. Estudo teórico foi conduzido na segunda parte do trabalho compreendendo o desenvolvimento de modelo hidrológico. A concepção do modelo parte da premissa de que toda a área da bacia possa ser representada por células derivadas de um Modelo Numérico de Terreno (MNT), especificando-se em cada célula o equacionamento hidráulico – hidrológico. As heterogeneidades do solo e da precipitação foram estudadas através de simulação do modelo considerando-se distribuições espaciais diferentes para a condutividade hidráulica saturada e eventos de chuva. Os resultados mostraram que as diferenças entre as vazões de pico podem ser maiores que 100%, considerando-se graus de resolução máximo e mínimo quanto à precipitação, e reafirmaram o consenso de que o conhecimento da distribuição espacial da chuva é fundamental na calibração de modelos hidrológicos distribuídos.

Palavras-chave: drenagem urbana; variabilidade espacial; precipitação; infiltração; condutividade hidráulica saturada; modelo hidrológico; modelo numérico de terreno; sistema de informação geográfica.

ABSTRACT

Silva, K.A. *"Analysis of the spatial Variability of Precipitation and of Hydrologic Parameters in Experimental Basin: Study of Rainfall-Runoff Transformation in a Small Urban Hydrographic Basin"* São Carlos, 2003. 419 p. (Doctoral Thesis) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In first part of this work consists on the installation of pluviographic, water-height graphs and surveying of hydrological events with obtained data from spatial distribution of precipitation observed and resultant hydrograms. Experiments of water infiltration in the soil were done by an infiltrometer disc to characterize the spatial variability of hydraulic conductivity and the losses of infiltration in the basin obtaining two sets of data that showed to be lognormally distributed in average equal to 15.8 mm/h and 5.47 mm/h. A theoretic study was conducted in the second part of work comprehending the development of hydrologic model distributed. The conception of the model proceed from the premise that all basin area can be represented by cells derived from a Digital Terrain Model (DTM) specifying in each cell the hydraulic equation – hydrologic. The soil heterogeneity and the precipitation were studied by model simulation considering spatial distributions different to the hydraulic conductivity saturated of the soil and to pluvial events. The results pointed out the differences among peak outflow can be more than 100 % considering minimum and maximum resolution degrees as the precipitation and affirmed the consensus that the acquaintance of the pluvial spatial distribution is fundamental in the adjustment of hydrologic models distributed.

Keywords: urban drainage; spatial variability; precipitation; infiltration; saturated hydraulic conductivity; hydrologic model; digital terrain model; geographic information system.

1. INTRODUÇÃO

A concentração das atividades econômicas no meio urbano, iniciada a partir da revolução industrial no século XVIII, foi responsável pelo deslocamento populacional no sentido campo - cidade em todo o mundo. Tal fator, aliado ao crescimento natural da população, transformou as cidades em grandes metrópoles, acentuando-se a degradação da qualidade de vida dos seus habitantes e do meio ambiente, particularmente dos recursos hídricos.

A urbanização acelerada das cidades altera significativamente o ciclo hidrológico das áreas ocupadas, resultando, freqüentemente, em inundações das áreas próximas aos canais de drenagem durante o período das chuvas. O agravamento dessa situação ao longo dos anos desencadeou um grande interesse por parte de pesquisadores quanto aos estudos de drenagem urbana.

O conceito de Hidrologia Urbana surgiu da integração entre ações direcionadas ao controle das águas pluviais e demais áreas relacionadas ao meio ambiente, adquirindo fundamentação científica e multidisciplinar a partir da década de 70. Os trabalhos desenvolvidos nessa linha de pesquisa passaram a ter como principal objetivo a determinação do impacto da urbanização sobre os escoamentos utilizando-se de modelos de simulação hidrológica (Silveira-1998).

Atualmente, o desenvolvimento e aplicação de modelos hidrológicos vêm utilizando tecnologias ligadas à cartografia digital.

O avanço dos processadores computacionais e a nova visão quanto à gestão das águas pluviais propiciaram o desenvolvimento de vários modelos hidrológicos distribuídos, conceituais ou com embasamento físico, associados a softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Essa integração entre modelo hidrológico e SIG torna relativamente fácil simular cenários referentes às diversas políticas de manejo dos solos, recursos hídricos e ocupação urbana, além de servir à previsão de cheias, delimitação de áreas inundáveis e à implementação de obras de drenagem.

A fim de melhorar a modelagem dos processos hidrológicos, a ligação com os recursos gráficos do SIG tornou-se mais aprimorada através da utilização da representação numérica do terreno diretamente como discretização do sistema hidrológico, possibilitando que as estruturas hidráulicas presentes no meio urbano fossem levadas em consideração (Green e Cruise - 1996; Smith - 1993; Silva - 1998; Silveira e Desborges-1999, Zech et al - 1993).

O tipo do modelo numérico do terreno (MNT) passou a ser investigado quanto à sua maior facilidade para representar todas as características de ocupação da bacia e estruturas hidráulicas diferentes da paisagem natural. Trabalhos referentes aos MNT's são amplamente encontrados na literatura e apresentam aspectos positivos e negativos quanto aos formatos matricial, vetor e linha de contorno. A escolha de um tipo ou outro está condicionado às capacidades do software de SIG e à sua utilização pelos órgãos públicos e centros de pesquisa.

Ainda que os modelos hidrológicos distribuídos permitam modelar fisicamente os fenômenos hidrológicos, a aplicação desses modelos deve ser criteriosa em decorrência das incertezas relativas à estrutura dos modelos, à estimativa dos parâmetros, às condições iniciais e de contorno.

Trabalhos de experimentação em campo têm mostrado que os parâmetros hidrológicos são correlacionados espacialmente e regidos por distribuições de probabilidade. Desta forma, a aplicação de modelos

distribuídos torna-se mais realística quando realizada conjuntamente com campanhas de medições de forma a quantificar as incertezas dos parâmetros e variáveis na modelagem hidrológica.

Além das incertezas inerentes às variáveis e parâmetros hidrológicos, os efeitos quanto à resolução dos modelos numéricos de terreno têm sido considerados uma vez que os dados e as características da área são tomados uniformes para cada célula do modelo.

Neste contexto, o presente trabalho posiciona-se como estudo teórico-experimental dos processos hidrológicos visando à análise da variabilidade espacial da precipitação e dos parâmetros hidrológicos presentes nos processos de transformação chuva-vazão.

Com o propósito de realizar estudos de experimentação, selecionou-se parte da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, situada no município de São Carlos, SP, como área de pesquisa objetivando, também, o controle de cheias que freqüentemente ocorrem nessa área.

A área de pesquisa tem sido objeto de pesquisa desde a década de 70 em que foram realizados a caracterização espacial da bacia, registros de eventos hidrológicos e estudos de simulação dos escoamentos através de sistemas de micro-drenagem, como mostra o trabalho de Machado (1981). Barbassa (1991) e Queiroz (1996) enriqueceram os estudos de modelam na bacia do córrego do Gregório. Até então, não haviam sido realizados levantamentos experimentais que pudessem servir ao estudo da variabilidade espacial da precipitação e de parâmetros do solo e sua influência sobre o comportamento hidrológico do sistema.

Na primeira parte deste trabalho, que é relativa à experimentação, obteve-se um número significativo de ensaios de infiltração de água no solo e eventos sobre a distribuição espaço-temporal de chuvas observadas com registro de linigramas em duas seções do córrego do Gregório. Foram também registrados linigramas em duas sarjetas da porção urbanizada da bacia.

A segunda parte deste trabalho foi dedicada à elaboração e implementação de um modelo hidráulico-hidrológico distribuído integrado a um sistema de informação geográfica.

A experiência da autora em modelagem de terreno fundamentou a escolha do esquema topológico representado por uma malha regular a fim de otimizar a manipulação das informações necessárias à simulação do sistema.

A essência do modelo consiste em trabalhar com dois planos de informação: escoamentos de superfície e escoamentos em galerias pluviais. A integração entre os planos é realizada considerando-se os escoamentos sem pressão na rede pluvial e descargas livres no sistema de macro-drenagem.

A principal motivação do trabalho foi quantificar as incertezas quando a bacia hidrográfica é representada por um modelo hidrológico distribuído de alta resolução capaz de considerar todas as características da bacia conjuntamente com informações espaço-temporais da precipitação e dados espaciais da condutividade hidráulica do solo.

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade do desenvolvimento de ferramentas que possam promover o estudo científico dos processos de geração dos escoamentos e análise das aleatoriedades naturais inerentes a esses processos, além de servir ao dimensionamento de galerias de águas pluviais, à determinação de pontos críticos e áreas inundáveis, e, finalmente, como sistema de suporte a decisão para fins de planejamento.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa dar suporte aos estudos e à utilização de modelos hidrológicos distribuídos a partir do levantamento de informações hidrológicas, tais como chuva, vazão e infiltração, considerando-se as incertezas inerentes a esses processos. Assim, com o modelo implementado alcança-se o principal objetivo da pesquisa que é a análise da variabilidade espacial da precipitação e condutividade hidráulica saturada do solo no processo da transformação chuva-vazão em pequenas bacias urbanas.

Os objetivos específicos do trabalho destinam-se à:

- obtenção de dados hidrológicos através das estações pluviográficas e linigráficas que registram as informações em um sistema eletrônico de dados (data logger).
- determinação de hidrogramas e isoietas de chuvas intensas.
- realização de levantamentos experimentais dos parâmetros hidráulicos do solo através dos ensaios realizados em campo utilizando-se infiltrômetros de disco.
- dar início a formação de um banco de dados hidrológicos que possa servir ao estudo dos processos dos escoamentos superficiais em áreas urbanas uma vez que, no Brasil, tais informações são praticamente inexistentes.
- aquisição automática das informações sobre uso e ocupação do solo a partir das fotos aéreas digitais da cidade de São Carlos (SAAE - 1998).

- implementação de um modelo hidrológico distribuído integrado a um sistema de informação geográfica.
- análise de sensibilidade do modelo em relação à variabilidade dos parâmetros hidrológicos e à utilização de dados topográficos nas escalas 1:10000 e 1:2000.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em decorrência da amplitude do tema deste trabalho, a revisão da literatura foi organizada de forma a apresentar alguns trabalhos abrangentes dentro do contexto de cada assunto abordado.

Primeiramente, são apresentados os trabalhos relacionados aos efeitos da aleatoriedade de variáveis e parâmetros hidrológicos, tais como, precipitação, condutividade hidráulica e umidade do solo, sobre os hidrogramas de cheia.

Trabalhos referentes à integração de simulação hidrológica e sistema de informação geográfica são apresentados no último item deste capítulo.

3.1 Modelos Hidrológicos Distribuídos:

Trabalhos relacionados à modelagem dos escoamentos pluviais em bacias hidrográficas são amplamente encontrados na literatura. Além da grande importância do tema, a complexidade e variabilidade inerentes à natureza dos sistemas hidrológicos acabam funcionando como determinante do grande número de pesquisas que são desenvolvidas nessa área.

Tucci (1987) apresenta a seguinte classificação para os modelos hidrológicos matemáticos:

- “Concentrado e distribuído: um sistema é concentrado (*lumped*) quando seus parâmetros e variáveis variam somente em função

do tempo; quando esses componentes variam também segundo o espaço, o sistema é dito distribuído.

- Estocástico e determinístico: um modelo é estocástico quando qualquer variável X_t , Y_t , E_t , onde X_t é a entrada, Y_t , a saída e E_t , o erro, são variáveis aleatórias, tendo uma distribuição de probabilidades.
- Conceitual e empírico: um modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos.”

No caso de modelos hidrológicos distribuídos conceituais, as equações que representam o balanço hídrico são aplicadas em sub-áreas nas quais os parâmetros e variáveis são considerados uniformes.

Beven (1989) conceitua os modelos distribuídos com embasamento físico como apenas modelos concentrados conceituais aplicados em pequena escala, uma vez que há uma grande diferença entre a escala na qual são definidas as equações físicas de geração dos escoamentos e a escala na qual se considera a uniformidade dos processos hidrológicos.

Honberger et al (1985) definem a Hidrologia como uma ciência ainda muito mais empírica uma vez que os modelos hidrológicos distribuídos não representam bem as heterogeneidades dos processos envolvidos na transformação chuva-vazão. Os autores também discutem os problemas quanto à calibração desses modelos citando a interdependência e a não unicidade dos valores ótimos dos parâmetros.

A dificuldade encontrada na modelagem dos processos hidrológicos é devida às complexidades inerentes aos fenômenos envolvidos, o árduo trabalho de se realizar experimentação em campo, à escala na qual o processo é analisado e à variabilidade temporal/espacial da precipitação e das características da bacia (Honberger et al, 1985) .

Nesse sentido, a sazonalidade da cobertura vegetal influencia diretamente no valor dos parâmetros hidráulicos do solo como, por exemplo, umidade e condutividade hidráulica. Essa variação dificulta estabelecer um conjunto de valores ótimos desses parâmetros que seja independente da escala temporal.

Com relação ao problema de escala da bacia, o trabalho de Koren et al (1999) apresenta a análise quanto à dependência de escala de quatro modelos hidrológicos concentrados, cada um com grau distinto quanto à formulação dos processos de infiltração. Para tanto, a variabilidade espacial da precipitação foi considerada através da subdivisão de uma área, aproximadamente 65536 km², em números diferentes de sub-bacias: 1, 4, 16, 256, 1024 e 4096. Os modelos nos quais a geração dos escoamentos foi calculada pelo excedente da infiltração mostraram-se mais dependentes da escala do modelo, resultando em menos escoamento superficial com aumento da escala. Constataram ainda esses modelos podem dar melhores resultados do que os que sofrem menos influência da escala caso sejam calibrados.

Essa atenuação dos escoamentos e, portanto, dos fluxos de água quando se aumenta a escala da bacia tem sido consenso entre os pesquisadores uma vez que as alterações quanto à intensidade de chuva registrada pelos postos de medição são menos significativas em grande escala (Amorocho, 1961 apud Wood et al, 1988).

3.1 Amorocho, J., 1961. Discussion on "Predictin storm runoff on small experimental watershed" By N.E.Minshall. J.Hydraulic Div., Am.Soc.Civ. Eng., 87 (HY2): 185-191. apud Wood, E.F., M.Sivapalan, K.Beven and L. Band, 1988. Effects of Spatial Variability and Scale with Implications to Hydrologic Modeling. Journal of Hydrology. Vol. 102: 29 47

Western e Blöschl (1999) avaliaram a influência da escala do modelo sobre as previsões de umidade do solo através dos conceitos de distância entre as amostras (espaçamento), cobertura total (extensão) e área de influência de cada amostra (suporte). Os autores valeram-se de técnicas geoestatísticas e analisaram a tendência produzida pela escala sobre as propriedades estatísticas de um conjunto de dados, que foi obtido em 1536 locais distribuídos regularmente numa área de 10 km². A análise do variograma foi efetuada a partir de geoestatística padronizada a fim de considerar o caráter de organização espacial da umidade do solo, constatando a aplicabilidade dessa técnica nos estudos hidrológicos. Com relação à hipótese de menor espaçamento, a variância e o comprimento de correlação foram próximos aos valores reais mas os efeitos relativos à extensão foram maiores quanto às alterações na escala de medição. Os resultados do trabalho mostraram que a geoestatística é adequada na avaliação das tendências introduzidas pela escala de medição considerando-se os termos de espaçamento, extensão e suporte.

Além do problema relativo à escala da bacia, devem ser ponderadas as incertezas envolvidas na transformação chuva-vazão de forma a dar suporte aos estudos de modelagem hidrológica.

3.1.1 Incertezas nos Hidrogramas de Cheia devido à Variabilidade Espacial da Precipitação

O conhecimento da distribuição temporal e espacial da chuva é de grande interesse para os profissionais que trabalham nas áreas de planejamento e dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, principalmente no sentido de dar suporte à utilização dos modelos hidrológicos distribuídos.

No entanto, devido à aleatoriedade natural da precipitação, a distribuição espacial da chuva é uma fonte de incerteza na determinação dos hidrogramas de cheia em uma bacia hidrográfica.

Estudos da aleatoriedade espacial da precipitação e seu efeito sobre os hidrogramas de cheia podem ser realizados através de graus de resolução distintos quanto às informações de chuva. Por exemplo, a comparação dos escoamentos gerados a partir de um hietograma variável no espaço/tempo é realizada considerando-se as seguintes informações: 1) aplicando-se o hietograma obtido por apenas uma estação pluviométrica; 2) aplicando-se o hietograma médio a partir dos hietogramas reais medidos sobre toda a bacia; 3) aplicando-se o hietograma da estação mais próxima ou o agrupamento das informações das estações com maior influência sobre cada sub-bacia.

O trabalho de Schiling e Fuchs (1986) é um exemplo clássico em que foram consideradas as incertezas quanto à resolução dos dados de chuva e estrutura do modelo, concluindo que a escassez de informações relativas à precipitação tem maior influência sobre a precisão dos hidrogramas calculados.

Os autores *op.cit.* 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 maior imprecisão, os hidrogramas obtidos com o modelo de referência foram comparados àqueles gerados pela simplificação de alguns dos seus componentes individualmente. Os autores 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 com erros de até 80% da vazão de pico. Os autores afirmaram ser paradoxal o emprego de modelos muito sofisticados quando não se dispõe de informações com o mesmo grau de resolução do modelo.

Nesse sentido, Hromadka II et al (1988), também concluíram que a escassez de dados chuva-vazão pode tornar questionável a utilização de modelos com alto grau de resolução da bacia hidrográfica.

Faurès et al (1995) instrumentaram uma micro-bacia (4,4 ha) analisando as características de chuvas convectivas quanto à variação espaço-temporal das precipitações, direção e velocidade dos ventos. Enquanto essas últimas não exerceram impacto significativo sobre o volume escoado e vazão de pico, a variabilidade espacial da precipitação pôde alterar expressivamente os escoamentos simulados mesmo em pequena escala.

Silva e Righetto (1997) apresentaram um modelo distribuído no qual a variabilidade espacial da chuva foi analisada pelo Método da Integral Estocástica (Hromadka II, 1989). O método consistiu em se obter uma distribuição da vazão de pico a partir da soma do hidrograma simulado mais a convolução entre uma função de transferência e o evento de chuva, expressa por:

$$\left[Q^f(t) \right] = Q_{sim}^f(t) + \left\{ \int_0^t P^f(t-s)h^i(s)ds \right\} \quad i=1...n \quad 3.1$$

em que $(Q^f(t))_i$ é o hidrograma correspondente ao iésimo cenário, especificado pela função de transferência h^i . Essa função de transferência é obtida através de dados observados de chuva-vazão conforme a equação:

$$Q_m^i(t) = Q_{sim}^i(t) + \int_0^t P^i(t-s)h^i(s)ds \quad i=1...n \quad 3.2$$

$Q_m^i(t)$ o hidrograma observado; $Q_{sim}^i(t)$ é o hidrograma simulado; P_i é a precipitação para uma determinada chuva i ; n é o número máximo de eventos.

Embora os autores tenham substituído a ausência de dados observados por simulações determinísticas, o trabalho tornou possível uma primeira análise do método da equação integral estocástica. Os autores adotaram um modelo de distribuição uniforme da chuva no espaço e tempo e obtiveram uma variabilidade de até 30% no valor da vazão de pico em uma bacia urbana de 10 Km².

O consenso de que se deve incorporar de algum modo as aleatoriedades quanto à distribuição espacial da chuva tem propiciado a aplicação de diversas técnicas que buscam restringir as incertezas na modelagem chuva-vazão. Nesse sentido, pode-se mencionar o procedimento GLUE (Lamb et al, 1998; Beven, 1993) que é baseado na técnica Monte Carlo e que permite a combinação de diferentes conjuntos de observações através dos princípios de Bayes. Os trabalhos de Binley et al (1991), Rogers et al (1985), Chaybey et al (1999) também abordam as incertezas nas previsões dos modelos hidrológicos distribuídos resultantes da variação espacial da chuva.

3.1.2 Interpolação Superficial da Precipitação

Em geral, os dados de chuva e de escoamento superficial são bastante raros, sendo necessária a utilização de métodos para cálculo da distribuição espacial e temporal da chuva. A complexidade do fenômeno físico resulta na dificuldade em se determinar essa variável para diversos pontos de uma bacia hidrográfica.

Shah et al (1996) apresentaram trabalho de modelagem estocástica da chuva no espaço e tempo, sendo avaliados os efeitos da variabilidade espacial da chuva em uma pequena bacia de 10,55 km². O trabalho consiste

na aplicação de um modelo de séries temporais ARIMA diferenciado a fim de gerar séries discretas de valores ao longo de linhas distribuídas no espaço. Para um ponto da região atribui-se o valor obtido a partir dos valores definidos anteriormente, chamado processo unidimensional. A partir de então, uma transformação Gaussiana com médio zero e desvio padrão unitário é realizada resultando em uma nova função a partir da qual são gerados valores em duas dimensões espaciais e uma temporal; a média e o desvio padrão da função transformada são tratados como parâmetros do modelo. As simulações representaram bem o movimento da célula de chuva sobre a bacia e com a consideração de uma velocidade definida possibilitou reproduzir a estrutura de correlação espaço-tempo da chuva. Embora o modelo não tenha sido avaliado para chuvas altamente variáveis, o trabalho dá diretrizes para a modelagem de chuvas convectivas. A integração de um modelo estocástico de chuva e um modelo hidrológico distribuído pode servir à avaliação da interação entre a variabilidade espacial da chuva e os mecanismos de produção do escoamento.

Métodos mais simples podem ser utilizados juntamente com modelos distribuídos para aproximar a superfície representativa da célula de chuva a partir de pontos em que são conhecidas as alturas de chuva.

Balascio (2001) apresenta uma revisão dos métodos de interpolação superficial a partir de dados pontuais de chuva com ênfase na utilização de equações multiquadráticas. A altura de chuva para um ponto qualquer da superfície interpolada é considerada como variável aleatória correlacionada com as alturas precipitadas nos pontos conhecidos. Entre os métodos empregados para interpolação de superfícies, o autor faz referência aos métodos de krigagem, sendo este o mais utilizado, distância inversa e equações polinomiais. Em geral, esses métodos são aplicados em grandes áreas, obtendo-se estimativas para as sub-áreas da região de estudo.

O autor (op.cit.) apresentou uma comparação entre uma forma não-tendenciosa das superfícies multiquadráticas e alguns métodos de

interpolação superficial não-tendenciosa. As estimativas foram consideradas não-tendenciosas quando a superfície numérica pôde representar bem a altura uniforme de chuva maior do que zero para qualquer local da região. Ou seja, é desejável que a técnica de interpolação superficial seja capaz de determinar exatamente uma superfície horizontal para qualquer altura.

Segundo Balascio (2001), a análise multiquadrática representa a superfície como uma soma do número de superfícies quádricas, definidas por hiperbolóides circulares, centradas nos pontos com altura de chuva conhecida. A tendência desse método foi reduzida através do acréscimo ao somatório dessas superfícies de um valor constante: no caso de uma altura de chuva uniforme, os coeficientes de ponderação presentes nos hiperbolóides circulares passaram a ser iguais a zero e a constante passou a assumir o valor da altura uniforme da chuva. O autor concluiu que essa formulação não-tendenciosa para a superfície multiquadrática não garante que toda superfície plana seja bem representada mas torna mais rara a ocorrência de valores inferiores aos medidos para a situação particular de uniformidade da chuva.

Kaviski e Krüger (1993) implementaram programas computacionais para o traçado de mapas de isolinhas a partir de métodos de interpolação superficial tais como: interpolação clássica, aproximação de mínimos quadrados, interpolação ponderada, interpolação ótima, técnica de krigagem e interpolação spline. Os autores utilizaram função multiquadrática e compararam os resultados com aqueles obtidos pelos outros métodos. Concluíram que os métodos de krigagem e interpolação ótima são mais adequados para traçar as isolinhas. No entanto, concluíram que os resultados obtidos pela função multiquadrática são eficientes com a vantagem de que esse método é bem mais simples quanto à implementação.

Oliveira (1994) estimou dados pluviométricos interdependentes com a altitude utilizando o método *cockriging* – modelo geoestatístico. Foram consideradas 26 estações pluviométricas e estudado o período de estiagem medido de 1971 a 1980. O resultado foi a confecção de mapas de isoietas com melhor definição de isovalores. O autor op cit. concluiu que o método pode ser usado em hidrologia não somente na confecção de mapas de isoietas como também para o cálculo de outras variáveis do ciclo hidrológico.

3.1.3 Distribuição Espacial da Condutividade Hidráulica Saturada e da Umidade do solo

A representação espacial das heterogeneidades do solo tem sido aproximada através de técnicas aleatórias ou geoestatísticas segundo a correlação espacial entre as amostras.

Sharma et al (1980) apresentaram trabalho de experimentação e análise dos parâmetros de infiltração medidos através de infiltrômetros de dois anéis sobre uma área de 9,4 ha. Os autores analisaram a distribuição de frequência dos parâmetros da equação de Philip aplicada aos dados coletados nesse estudo. Constataram que a variação dos parâmetros não segue qualquer padrão com relação ao tipo de solo ou à posição geográfica na bacia, não podendo garantir a delimitação de zonas hidrologicamente homogêneas. O conceito de média similar foi usado na comparação dos dados, na qual se determinaram fatores de escalas dependentes da condutividade hidráulica e da pressão de sucção do solo, chegando a uma função de distribuição lognormal para representação dos fatores de escala.

No entanto, uma vez constatada uma distribuição espacial estruturada dos parâmetros de infiltração, os estudos são conduzidos no sentido de analisar através de variogramas as características espaciais do conjunto de

experimentos realizados em campo, ou população amostral. Tal estudo é fundamentado na estrutura espacial de variáveis regionalizadas (Matheron, 1971, apud Loague e Gander, 1990).

Camargo (2001) resume os seguintes passos no emprego de técnicas geoestatísticas: 1) análise exploratória; 2) cálculo e modelagem do variograma; 3) krigagem.

O variograma é definido como uma função geoestatística que possibilita o estudo da distribuição das variáveis regionalizadas em função de um espaço e direção, o que possibilita a consideração da anisotropia espacial. Caso os parâmetros do variograma (patamar, alcance e efeito pepita) sejam diferentes para direções variadas, a distribuição espacial do fenômeno é denominada anisotrópica; se há uma similaridade entre os variogramas então a distribuição espacial é isotrópica.

Em termos práticos, o método geoestatístico considera que as observações mais próximas são mais semelhantes do que outras mais afastadas. O variograma é portanto uma medida de não-similaridade entre as observações (Camargo - 2001).

Em geral, utiliza-se a forma do semi-variograma que é expresso como a metade da distância ao quadrado entre os pares de dados, ou seja:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad 3.5$$

Em que $N(h)$ é o número de pares de dados separados por um vetor h ; Z é o valor da variável na posição x_i e x_{i+h} .

A partir do semi-variograma experimental ajusta-se um modelo teórico que melhor represente a tendência das observações, tornando as estimativas por krigagem mais precisas (Camargo, 2001).

O método de krigagem tem a vantagem de não estimar apenas os valores da variável espacialmente distribuída, como nos demais métodos de interpolação superficial, mas também avaliar o erro provável associado à mesma (Oliveira, 1994).

Loague e Gander (1990) realizaram estudo sobre 247 medições de infiltração a fim de comparar os resultados com o estudo de Sharma et al (1980) em que foram realizados 60 experimentos na mesma área. O estudo foi conduzido de forma a avaliar a redução de incertezas a partir de informações adicionais sobre o processo monitorado utilizando-se técnicas de geoestatística. Demonstraram que há uma redução das incertezas com o aumento dos dados de infiltração. No entanto, concluíram que a geoestatística pode não ser adequada para descrever a variabilidade da infiltração em uma bacia relativamente uniforme.

Assim como a condutividade hidráulica do solo, o parâmetro de umidade exerce grande influência sobre a geração dos escoamentos numa bacia hidrográfica e tem sido alvo de diversas pesquisas.

A aquisição dos dados de umidade do solo pode ser realizada através de sensoriamento remoto e medições em campo. Cada um dos métodos inclui dificuldades na obtenção desse parâmetro.

Bardossy e Lehmann (1998) apresentaram um interessante trabalho relativo ao estudo da distribuição espacial da umidade do solo, utilizando-se informações topográficas a partir de um modelo digital de terreno. As medições de umidade foram realizadas semanalmente em 60 locais numa bacia de 6,3 km². A variabilidade do parâmetro foi investigada através de variogramas constantes no tempo.

O variograma é expresso pela equação abaixo:

$$\gamma_t(h) = \text{Var}_x[Z(x+h,t)-Z(x,t)] \quad 3.6$$

De posse do variograma experimental, foram interpolados valores entre os pontos de medição. Os autores lançaram mão de diferentes métodos geoestatísticos para gerar os mapas de umidade do solo, tais como:

1) Método de Krigagem Ordinária

O método supõe que o valor esperado da umidade, Z , seja constante para um dado tempo, t , e expresso por:

$$E[Z(x,t)] = m(t) \quad 3.7$$

O estimador linear:

$$Z^*(x,t) = \sum \lambda_i Z(x_i,t) \quad 3.8$$

que minimiza a variância, pode ser encontrado resolvendo-se o seguinte sistema de krigagem:

$$\sum \lambda_i \gamma_i(x_j - x_i) + \mu = \gamma_t(x_j - x) \quad j=1, \dots, n \quad 3.9$$

$$\sum \lambda_i = 1 \quad 3.10$$

Em que λ_i são os pesos e μ é um multiplicador de Lagrange.

A figura 3.1 mostra o mapa obtido pelo método de krigagem ordinária para o dia selecionado. Padrões circulares foram tipicamente produzidos por esse método. Nessa figura o fundo do vale pode ser visto em função dos valores altos de umidade. No entanto, o mapa obtido não correspondeu àquele que era esperado. Os autores chegaram à conclusão de que o fato do método negligenciar qualquer conhecimento físico a respeito da dinâmica de água no solo pode ser a razão para não ter se obtido o desejado.

Figura 3.1: distribuição de umidade do solo obtida pela krigagem ordinária.
Fonte: Bardossy e Lehmann (1998).

2) Método de Krigagem "drift" Externa

O método da Krigagem Drift Externa inclui uma variável adicional $Y(x)$ que é linearmente relacionada com $Z(x)$, e a equação para o valor esperado passou a ser expressa por:

$$E[Z(x,t) | Y(x)] = a(t) + b(t)Y(x) \quad 3.11$$

Onde a e b são constantes desconhecidas.

Minimizando-se a variância, obtêm-se o sistema linear:

$$\sum \lambda_i \gamma_t(x_j - x_i) + \mu_1 + \mu_2 Y(x_j) = \gamma_t(x_j - x) \quad 3.12$$

$$\sum \lambda_i = 1 \quad 3.13$$

$$\sum \lambda_i Y(x_j) = Y(x) \quad 3.14$$

onde μ_1 e μ_2 são multiplicadores de Lagrange.

Para a variável $Y(x)$, os parâmetros constantes no tempo foram derivados de um modelo digital de terreno. O parâmetro $\ln(a/\tan\beta)$ do **TOPMODEL** foi usado para demonstrar como o método de Krigagem Drift Externa fornece mapas de umidade mais próximos da realidade. Esse parâmetro combina o ângulo de declividade e a área da bacia para um determinado local. Tal parâmetro permitiu calcular o quanto de escoamento superficial alcançou um ponto da bacia, infiltrando-se e/ou propagando-se para o ponto seguinte.

A figura 3.2 evidencia a forte relação entre a distribuição de umidade no solo e a topografia. O mapa obtido pelo método de Krigagem Drift Externa teve uma resolução melhor do que pelo método de Krigagem Ordinária. Porém, os autores verificaram que para as regiões mais altas, os valores poderiam exceder os valores físicos possíveis. A fim de corrigir esse problema, Bardossy e Lehmann introduziram um indicador I_α , para um valor inicial α , tal que:

$$I_\alpha(x,t) = 1 \text{ se } Z(x,t) \leq \alpha \quad 3.15$$

$$I_\alpha(x,t) = 0 \text{ se } Z(x,t) > \alpha \quad 3.16$$

O indicador I_α pode ser entendido como a probabilidade de $Z(x,t)$ ser menor ou igual a α .

Figura 3.2: distribuição de umidade do solo obtida pelo método Krigagem Drift Externa. Fonte: Bardossy e Lehmann (1998)

3.2 Infiltração de Água no Solo

Com relação à infiltração, a distribuição espacial desse processo é fortemente influenciada pela heterogeneidade do solo: existência de macroporos, distribuição e tamanhos dos grãos e umidade inicial. Em decorrência dessas incertezas, tem sido questionada a utilização de um valor

médio que pode causar grandes erros nas estimativas dos escoamentos superficiais.

A influência de macroporos no escoamento da água no solo foi revisada por Beven e Germann (1982) que enfocaram as implicações dessas aberturas na propagação de poluentes e sugeriram o aumento da complexidade dos modelos de movimento de água no solo. A modelagem desse processo é apresentada por Beven e Germann (1981) apud Merz e Bárdossy (1998) através do modelo de onda cinemática obtido pela combinação das seguintes equações:

$$\frac{\partial \theta_{ma}}{\partial t} + \frac{\partial q_{ma}}{\partial z} = S_{ma} \quad \text{e} \quad q_{ma} = \alpha \theta_{ma}^{\beta} \quad 3.3 \text{ e } 3.4$$

em que S_{ma} é o termo de contribuição do sistema de macroporos; θ_{ma} é o conteúdo de água no macroporo; α e β são parâmetros

A utilização das equações anteriores dá-se conforme os três estágios de escoamento definidos por Beven e Germann (1982):

- Estágio 1: a precipitação (P) é menor do que a infiltração (I) na matriz superficial de solo: a água precipitada é absorvida pelos macroporos.
- Estágio 2: a precipitação é maior do que I e menor do que a soma da infiltração na matriz de poros e a infiltração nos macroporos junto à superfície (S). Nesse período, pode ocorrer o escoamento superficial em pequena escala.
- Estágio 3: O alagamento da superfície ocorre quando P é maior do que a soma da infiltração nos macroporos e na matriz de solo.

3.1 Beven, K. and P. Germann, 1981. Water flow in soil macropores II . A combined flow model . J. Soil Sci.. 32: 15 29 apud Merz, B. and A. Bárdossy, 1998. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment. Journal of Hydrology 212-213: 304 317.

Os autores (op.cit.) apresentaram ainda a classificação dos tipos de macroporos assim como a descrição da natureza dos escoamentos na matriz de solo, nos macroporos e interação entre esses dois domínios. Concluíram que a dificuldade não é exprimir teoricamente a união entre os processos de escoamento e infiltração, escoamentos subsuperficiais e movimento de poluentes mas sim a obtenção dessas informações em campo.

O controle experimental dos escoamentos em macroporos e fendas nas camadas de solo tem sido possível através de novas técnicas de medição das taxas de infiltração. Essas técnicas também têm propiciado quantificar as alterações nas propriedades do solo decorrentes das práticas de manejo e de fatores ambientais.

O projeto de infiltrômetro de pressão negativa de Perroux e White (1988) insere-se nesse propósito através da aplicação de água no solo com potenciais de sucção menor que zero.

O projeto é mostrado na figura 3.3. A altura de água na torre de borbulhamento é usada para selecionar e controlar a pressão de sucção, que é dada pela diferença entre a distância da saída de ar até a membrana, Z_2 , e a altura de água na torre de borbulhamento, Z_1 . A membrana deve ter uma porosidade que não permita a passagem do ar do solo para o infiltrômetro durante o experimento.

Esse infiltrômetro é abastecido colocando-o na água e tirando o ar da torre de borbulhamento e do reservatório. O nível de água na torre é ajustado para dar a pressão desejada. O infiltrômetro é colocado no local do ensaio e a infiltração tem início abrindo-se a válvula da torre de borbulhamento. O volume de água infiltrado é registrado pela queda no nível de água no reservatório para tempos conhecidos.

Figura 3.3: Projeto do infiltrômetro de pressão negativa de Perroux e White (1988).

O comportamento da infiltração sob o infiltrômetro de disco foi analisado por Smetten et al (1994), Haverkamp et al (1994) e Smetten et al (1995) que apresentaram uma série de trabalhos nos quais foram desenvolvidas as equações de infiltração tridimensional e unidimensional e estabelecidas uma relação entre elas. Desta forma, os efeitos das bordas do

disco podem ser corrigidos a fim de possibilitar a utilização de equações nas quais se considera a infiltração unidimensional.

3.3 Dados Hidrológicos em Bacias Urbanas

A aquisição das informações relativas não somente à infiltração mas, também, à precipitação e umidade do solo em bacias urbanas tem um tratamento diferenciado daquela em áreas rurais uma vez que deve ser levado em consideração o tempo de resposta mais rápido dessas áreas, tornando necessário a obtenção dos dados chuva-vazão em curtos intervalos de tempo. A variabilidade espacial dos processos hidrológicos nessas áreas é igual ou maior do que em bacias naturais em decorrência das alterações provocadas pelas atividades antrópicas (Aron, 1993).

Terstriep et al (1988) apresentaram uma breve discussão sobre os métodos para registros de dados hidrológicos em áreas urbanas assim como as diretrizes para a seleção dos locais de instalação dos equipamentos.

O estudo do autores (op.cit) foi limitado à descrição das técnicas de medição da precipitação, infiltração e escoamento superficial em bacias urbanas, enfocando a transmissão em tempo real e armazenamento automático em dataloggers. Concluíram que o elevado custo dos equipamentos necessários para monitoramento dessas áreas acaba priorizando características como segurança dos equipamentos e a disponibilidade de serviços elétricos e telefônicos.

3.4 Sistema de Informação Geográfica aplicado à Modelagem Hidrológica de Bacias Hidrográficas

Em áreas urbanas, a modelagem distribuída da transformação chuva-vazão é ainda mais complexa do que em bacias naturais, uma vez que o

escoamento das águas pluviais ocorre em dois planos: um referente aos escoamentos em sarjeta e superficiais, ou plano superior, e outro referente à rede de galerias pluviais, referido normalmente como plano inferior.

Os modelos hidrológicos distribuídos vêm alcançando uma maior aceitação em consequência dos recursos computacionais disponíveis e de recentes tecnologias que possibilitam a aquisição, armazenamento e análise de uma grande quantidade de informações necessárias a esses modelos.

Um sistema de informação geográfica (SIG) é a união entre hardware e software que possibilita a realização das referidas ações graças a sua capacidade em integrar tecnologias, tais como: cartografia digital, gerenciamento de banco de dados e processamento digital de imagens. É possível, também, converter os mapas digitais de escalas e projeções diferentes para um formato padronizado (georreferenciamento). Conforme o tipo de armazenamento das informações, tem-se a seguinte classificação para os sistemas de informação geográfica: raster, rede triangular irregular e linhas de contorno.

A possibilidade de realizar operações matemáticas com imagens chamou a atenção dos hidrólogos quanto ao uso do SIG na modelagem dos escoamentos em superfícies. As mudanças quanto ao uso e ocupação do solo são facilmente interpretadas pelo SIG, tornando-se uma ferramenta poderosa na previsão dos impactos causados pelas várias estratégias de gestão da bacia hidrográfica. Portanto, a aplicação conjunta de modelos hidrológicos e um SIG pode servir à previsão de cheias, delimitação de áreas inundáveis e à implementação de obras de drenagem.

Na literatura, têm-se diversos modelos hidrológicos integrados a sistema de informação geográfica (Bhaskar et al – 1992; DeVantier e Feldman – 1993; Julien et al – 1995; Jeton e Smith –1993; Oliveira e Maidment-1999; Palacios Velez e Cuevas Renaud – 1992; Ross e Tara – 1993; Shamsi – 1996; Schea et al – 1993; Schuman – 1994; Warnick e Haness – 1994)

Ross e Tara (1993) ressaltaram que a incorporação de um SIG na modelagem hidrológica aumenta o nível de detalhamento, minimiza a subjetividade do usuário na escolha dos parâmetros hidrológicos e reduz os custos das análises com o modelo devida à significativa economia de tempo.

Inicialmente, a aplicação típica dos modelos hidrológicos ligados a SIG's consistiu em adquirir os dados na forma digital, realizar operações no sistema de informação geográfica, processar os dados de entrada do modelo, realizar simulações e exibir as imagens resultantes. (DeVantier e Feldman-1993; Meyer et al - 1993)

DeVantier e Feldman (1993) resumiram as diretrizes para a utilização de modelo numérico de terreno, que é um módulo do SIG para interpolação da superfície do terreno, em análise hidrológica utilizando-se modelos distribuídos, concentrados e híbridos.

Atualmente, a definição da direção dos escoamentos e mapas de declividade a partir do modelo numérico de terreno tem sido de grande interesse na modelagem hidrológica: as diversas layers, ou mapas de características espaciais, são sobrepostos fim de obter isócronas e unidades de resposta hidrológica entre outras informações espaciais.

Julien et al (1995) apresentaram estudo de modelagem hidrológica bidimensional integrada a um SIG raster. Como os demais modelos desse tipo, a bacia hidrográfica foi representada por uma malha regular, ou matriz. Em cada elemento dessa matriz, ou pixel, obteve-se a chuva efetiva pela equação de Green e Ampt e propagaram-se os escoamentos pelo método difusivo bidimensional. Nesse modelo, o comprimento do segmento de canal entre duas células de drenagem sucessivas pôde ser especificado como um comprimento maior do que a resolução espacial do pixel a fim de levar em conta a sinuosidade do canal (entrada lateral). A conectividade entre a rede de canal e o escoamento superficial é identificado pelo usuário como um mapa raster. É interessante, neste trabalho, o fato de que somente o

coeficiente de rugosidade de Manning tenha sido usado como parâmetro de calibração.

Com relação à modelagem hidrológica de bacias urbanas, são necessárias as layers referentes à cobertura vegetal, tipo e uso do solo, topografia, elementos de drenagem (canais, rios, depressões, lagos) e divisores de água.

Smith (1993) e Smith e Vidmar (1994) apresentaram estudos hidrológicos sobre uma área urbana de poucos hectares, na qual os escoamentos foram gerados através das informações de layers obtidas de um SIG raster. Ainda que a aplicação desse modelo tenha sido restrita a uma pequena área urbana, o modelo destaca-se pela simplicidade e realismo na consideração do balanço hídrico e escoamentos em cada célula da bacia. Os autores encontraram certa dificuldade em unir as células do tipo rua. O procedimento manual utilizado pelos autores não é árduo tendo-se em vista o tamanho da bacia. No entanto, tal procedimento parece inviável para bacias urbanas complexas.

Warwick e Haness (1994) ressaltaram a adequação da capacidade do SIG para análise ambiental, citando trabalhos aplicados com tecnologia SIG raster para prever a poluição difusa de terras agrícolas e a quantidade de sedimentos carregados para os sistemas de drenagem.

Os autores (op. cit) utilizaram uma bacia hipotética a fim de avaliar as potencialidades do **SIG ARC/INFO** para gerar as informações espaciais necessárias ao modelo hidrológico **HEC-1**. Foram obtidas as informações referentes à topografia, hidrografia, uso e ocupação do solo, divisor de água da bacia e os dados relativos à precipitação. A manipulação das informações foi realizada com sucesso, no entanto, os autores encontraram problemas na estimativa da intensidade de chuva média sobre a bacia.

Greene e Cruise (1996) desenvolveram um modelo hidrológico no qual o sistema de informação geográfica tornou-se parte integrante no processo de modelagem. O SIG foi utilizado para atribuir identificadores às

características superficiais e às propriedades do solo. A partir de então, essas layers passaram a estar associadas a um banco de dados contendo os valores de rugosidade, da condutividade hidráulica e da capacidade de armazenamento. As áreas de contribuição foram determinadas através da função de sobreposição do SIG entre as layers topográfica, do tipo de solo, das áreas impermeáveis e de drenagem.

No modelo hidrológico, Greene e Cruise consideraram cada lote da bacia urbana como unidade de contribuição, sendo representado por um polígono (figura 3.4). A direção do escoamento foi estabelecida através de algoritmos que levaram em conta as informações planialtimétricas do modelo digital de terreno.

Figura 3.4: Representação da bacia urbana por lotes. Greene e Cruise (1996)

A topologia do modelo é mostrada na figura 3.5: considerando-se uma boca de lobo, determinam-se quais são as suas respectivas unidades contribuintes. A seguir, com base no banco de dados do SIG, que contém as coordenadas x e y de cada entrada e de cada polígono (lote), pode-se calcular o comprimento do escoamento até o ponto desejado. Depois de aplicado o mesmo procedimento para todos os pontos de entrada, os escoamentos nas ruas e galerias foram calculados utilizando o modelo de onda cinemática.

O modelo de Greene e Cruise foi capaz de simular os escoamentos nas ruas e galerias, obtendo-se bons resultados. Entretanto, o escoamento superficial interior ao lote não foi realizado.

Figura 3.5: Topologia do modelo de Greene e Cruise.

Queiroz (1996) utilizou o modelo de Barbassa (1991) acoplando-o a um sistema de informação geográfica de forma a realizar simulações de cheia em função do desenvolvimento e ocupação da bacia. O modelo é baseado nos escoamentos cinemáticos em sarjetas, galerias e canais. As áreas de contribuição associadas aos nós da rede coletora são modeladas hidrológicamente considerando-se o balanço hídrico nos lotes das quadras urbanizadas, através do agrupamento de lotes similares e fixação de alguns padrões de drenagem nos lotes. No balanço hídrico, são considerados as intensidades de precipitação, a taxa de infiltração, a retenção superficial e o deflúvio superficial. Como o modelo foi concebido para contemplar os escoamentos em galerias, os nós da rede de drenagem foram selecionados de forma a permitir a identificação de áreas de contribuição homogêneas.

As funções principais do SIG na metodologia foram:

- Compilação de todas as características físicas da bacia hidrográfica.
- Processador dos dados de entrada para a modelagem hidrológica.
- Formação de novos cenários para simulação de medidas mitigadoras da urbanização da área de estudo.

A transferência dos dados entre esse modelo e o SIG exigiu muita interação com o usuário. Nesse trabalho, não foi possível representar de forma adequada a direção principal do fluxo na bacia, além de não permitir a consideração dos escoamentos em galerias. Torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de uma interface mais eficiente entre o usuário e o modelo.

Silveira e Desbordes (1999) desenvolveram um modelo chuva-vazão distribuído no qual foram utilizados os dados sobre a ocupação do solo, sistema de drenagem e variação espacial da precipitação. Os planos ou *layers* para entrada no modelo foram estabelecidos como: planos de drenagem, topográfico, ocupação do solo e taxas de impermeabilização. A bacia hidrográfica foi representada como uma malha formada por células

quadradas, sendo que para as áreas urbanas foram levadas em conta as taxas de impermeabilização. Para as áreas rurais, considerou-se a capacidade de infiltração do solo. A determinação do escoamento de célula a célula foi realizada através de um algoritmo que pesquisa oito possíveis entradas e apenas uma saída para a propagação do escoamento. Através do modelo é possível gerar automaticamente um histograma tempo-área.

Collischonn et al (1999) descreveram uma metodologia para obtenção do hidrograma unitário através do histograma tempo-área obtido do modelo numérico de terreno. Inicialmente, os autores determinaram a direção dos escoamentos em cada célula através de algoritmo de comparação das declividades das oito células vizinhas àquela que está sendo analisada. Os passos para remover depressões no terreno que possam impedir o escoamento real na bacia hidrográfica também foram apresentados. A partir de relações de velocidade estabelecidas, Collischonn et al (1999) determinaram o mapa de tempo de viagem até a saída da bacia de estudo que foi a base para obtenção do mapa de isócronas. Obtiveram bons resultados na aplicação do modelo em uma bacia de 1 km² mas ressaltaram que a metodologia apresentada deve ser automatizada e que devem ser implantados pontos de observação das variáveis envolvidas. Além disso, devem ser consideradas as incertezas nas variáveis e estrutura do modelo.

Valeo e Moin (2000) apresentaram uma modificação interessante do **TOPMODEL** de forma que a parte urbanizada de uma bacia hidrográfica pudesse ser considerada. Nessa nova versão do modelo, destaca-se a propagação simultânea dos escoamentos superficiais e subsuperficiais também sobre as áreas pavimentadas, fornecendo indícios da umidade no subsolo urbano.

Apesar de não estar ligado a um SIG, o modelo de Miguez e Mascarenhas (1999) apresenta concepções interessantes quanto à modelação diferenciada dos escoamentos entre as sub-áreas da região estudada.

Os autores modelaram o movimento de cheias em áreas urbanas através da concepção de células de escoamento. A representação espacial da área urbana foi definida considerando-se estruturas hidráulicas distintas tais como, trechos de canal, galerias, quadras e praças. Esses “compartimentos” de características homogêneas foram chamados de células de escoamento. Os escoamentos de cheias foram modelados pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento unidimensionais. Os autores consideraram o escoamento em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, estabelecendo uma ligação entre elas.

Cada célula do modelo de Miguez e Mascarenhas pode representar um lago ou galeria, e um conjunto pode formar uma estrutura como a de um longo canal. Portanto, foram definidos tipos de células diferentes (figura 3.6) a fim de representar a drenagem urbana.

A variação do volume em cada célula do modelo é dada pelo balanço entre as vazões de entrada (precipitação) e de troca entre células vizinhas.

Os autores ressaltaram a grande vantagem do modelo que possibilita introduzir leis hidráulicas diferentes conforme a descarga da célula, tornando-se mais realística a modelagem dos escoamentos.

Figura 3.6: representação da bacia por células de escoamento (Miguez e Mascarenhas, 1999)

As ligações entre as células do modelo são:

- Ligação tipo - rio: a equação de escoamento à superfície livre é utilizada para definir o escoamento entre trechos de rios e células de planície.
- Ligação tipo - transição canal/galeria: equação de escoamento com superfície livre. Essa ligação é utilizada nas transições do escoamento para rios e canais. O modelo considera o limite superior do escoamento definido pelo teto da galeria e a perda de carga localizada devido ao alargamento ou estreitamento da seção.
- Ligação tipo - vertedouro de soleira espessa: representa o transbordamento do rio para a planície, ou entre células de planície se houverem barreiras ao escoamento.

Os resultados da aplicação do modelo de Miguez e Mascarenhas evidenciaram a sua capacidade em modelar a complexidade dos escoamentos em áreas urbanas.

Miguez et al (2001) apresentaram uma nova versão do modelo de células bidimensionais descrito anteriormente. Os autores aprimoraram o embasamento matemático e físico do modelo, incluindo as equações completas de Saint-Venant para escoamentos em células do tipo rio e modelagem do escoamento sob pressão no sistema de galerias pluviais, aproximando ainda mais a representação do sistema à situação real. A aplicação do modelo na bacia do canal do Mangue no Rio de Janeiro demonstrou a capacidade do modelo em reproduzir os escoamentos e alagamentos gerados nessa área urbana.

Silva (1998) desenvolveu um modelo distribuído para bacias urbanas que possibilita registrar o escoamento em sarjetas e galerias. As informações sobre a elevação do terreno foram adquiridas através de operações realizadas em um sistema de informação geográfica. Considerou-se, para a construção do modelo distribuído, os escoamentos em superfície, microcanais, sarjetas, galerias e canais como sendo cinemáticos. O cálculo dos escoamentos foi realizado pela geração aleatória de microcanais em cada faceta da rede triangular. Os microcanais foram representados por um comprimento médio e o método das diferenças finitas utilizado para realizar a propagação dos escoamentos. Embora a autora tenha usado de artifícios para representar graficamente as características com formato vetor em um SIG raster, a rotina de conectividade dos elementos triangulares pôde ser facilmente adequada a um modelo numérico de terreno do tipo rede triangular irregular. O trabalho de Silva (1998) pode ser adequado ao equacionamento apresentado por Franco (1997) para bacias naturais: o autor (op. cit.) utiliza o método de elementos finitos para cálculo bidimensional dos escoamentos em cada face triangular subdividindo-a em 16 triângulos coplanares. Infelizmente, no trabalho de Silva (1998) não foi realizada a comparação das simulações frente a resultados de vazões e precipitações observadas.

4. BACIA EXPERIMENTAL DO CÓRREGO DO GREGÓRIO

4.1 Caracterização física do Município de São Carlos, São Paulo

O Município de São Carlos, no interior do Estado de São Paulo, está situado na bacia do Rio Jacaré-Guaçu principal afluente do Médio Tietê, sobre a formação geológica Sistema Aquífero Serra Geral (formação Serra Geral) e, também, sobre o Sistema Aquífero Bauru (formação Marília). (Oliveira, 1999)

A formação Serra Geral ocorre nas regiões leste e oeste do município em relevo montanhoso com declividades superiores a 20%, nas quais são predominantes os arbustos e árvores de médio porte. Destaca-se nessa região o tipo de solo Latossolo Vermelho Escuro-Eutrófico (Oliveira, 1999).

Na região central de São Carlos predomina a classe de solo descrita como Latossolo Vermelho Amarelo; ao sul, encontram-se algumas áreas inseridas na classe das Areias Quartzosas, em relevo suave e boa capacidade de drenagem (Oliveira, 1999).

A declividade varia entre baixa (2%) a alta (20%), encontrando-se inclusive valores maiores que 30% nas áreas mais íngremes. Estas áreas são fortemente sujeitas aos processos de erosão em decorrência da densidade de drenagem ser relativamente alta na região (Oliveira, 1999).

Quanto aos seus aspectos climáticos, a região apresenta duas estações bem definidas: a estação chuvosa que vai de outubro a março, durante a qual ocorrem as chuvas de verão caracterizadas pela alta intensidade e curta duração, com clima super-úmido e tropical; a estação seca está compreendida entre os meses de abril a setembro, com clima sub-úmido e temperado. A precipitação média anual da região é aproximadamente 1200 mm.

4.2 Histórico do crescimento urbano do Município de São Carlos, São Paulo

Assim como em outras cidades do Brasil, São Carlos sofreu um processo de crescimento urbano desordenado, o que acarretou em sérios problemas de enchentes urbanas periodicamente enfrentadas pela população, principalmente na sua região central.

A primeira formação urbana do município teve início na segunda metade do século XIX em resposta às atividades relacionadas ao cultivo do café na região e, posteriormente, intensificada pela industrialização ocorrida entre 1920 e 1940, com a conseqüente migração da população do campo para a cidade em busca de melhores condições de vida (Oliveira, 1999).

A partir deste momento, o crescimento da cidade iniciou-se ao longo do eixo norte-sul, definido pela Avenida São Carlos, seguindo o padrão de ocupação urbana tipo malha quadrada.

Ao norte do município, a densidade populacional tornou-se elevada junto às rodovias, em torno das quais foram instaladas as primeiras indústrias; ao sul, o crescimento aconteceu próximo à estação ferroviária; na porção central da cidade formaram-se vazios que só começaram a ser ocupados a partir das diretrizes definidas na elaboração do Plano Diretor do Município.

O zoneamento urbano de São Carlos realizado em 1979 passou a considerar a faixa central da cidade, definida hidrograficamente pela Bacia

do Córrego do Gregório, como primeira linha de expansão urbana (Oliveira, 1999).

A partir de então, a referida bacia, já densamente ocupada à oeste por estabelecimentos comerciais e industriais, apresentou um processo acelerado de urbanização que tem avançado no sentido leste do setor central de São Carlos, com loteamentos próximos à rodovia Washington Luís e às nascentes do córrego do Gregório, principal curso d'água que drena a região.

4.3 A Bacia do Córrego do Gregório

A bacia do córrego do Gregório localiza-se na porção central do município de São Carlos, SP, abrangendo uma área de 19 km².

A parte urbanizada da bacia localiza-se à oeste da Avenida São Carlos altamente impermeabilizada pela pavimentação asfáltica das ruas e pela alta ocupação do solo destinada a fins residenciais/comerciais.

A parte rural, situada à leste da bacia, abrange a área das nascentes dos córregos de drenagem, apresentando vegetação de gramíneas (pastagens), plantações de produtos hortigranjeiros e algumas áreas de reflorestamento.

A forma de ocupação urbana da bacia do Gregório desencadeada pelo processo de industrialização do município é a causa principal das freqüentes inundações na área próxima ao Mercado Municipal durante o período de chuvas.

O problema das enchentes urbanas em São Carlos poderá vir a se agravar uma vez que a parte rural da bacia do Gregório que fica a montante dos locais mais atingidos pelas cheias vem se mostrando como área de maior tendência para o crescimento urbano da cidade. A impermeabilização desses setores pelos telhados e pavimentação asfáltica aumentará o volume escoado com conseqüências ainda piores para as áreas de jusante.

Neste contexto, a bacia do Córrego do Gregório passou a ser objeto de estudo dos centros de pesquisas do município de São Carlos, e diversos trabalhos tem sido desenvolvidos sobre a hidrologia urbana da área, com considerações sobre a sua ocupação atual e futura, assim como trabalhos de caracterização física e antrópica do município a fim de fornecer bases para a compreensão da situação atual da referida bacia.

A Escola de Engenharia de São Carlos vem desenvolvendo, desde a década de 80, estudos voltados para a obtenção de dados hidrológicos, tais como, chuva, vazão e infiltração, e modelagem dos processos físicos dos escoamentos na bacia do Córrego do Gregório.

Machado (1980) desenvolveu e aplicou um modelo hidrológico determinístico e distribuído para bacias urbanas com considerações sobre a micro e macrodrenagem da Bacia do Gregório, realizando levantamento das seções transversais dos canais de drenagem, coleta de dados chuva-vazão e sua aplicação na determinação de parâmetros físicos nas equações de escoamento e dos hidrogramas de cheias para eventos de chuva intensos.

Barbassa (1991) aprimorou o modelo desenvolvido por Machado (1980), com a consideração da variação espacial da chuva. No trabalho, o autor analisou os efeitos da urbanização considerando os dados hidrológicos obtidos durante o estudo e informações relativas à ocupação da bacia.

A continuidade dos estudos dos efeitos da urbanização sobre o comportamento hidrológico da Bacia do Gregório deu-se com o trabalho de Queiroz (1996), no qual o modelo hidrológico de Barbassa (1991) foi associado a um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilitando uma otimização do modelo hidrológico distribuído como ferramenta de auxílio ao planejamento urbano da bacia. Simulações foram realizadas considerando-se diversas formas de ocupação da área, incluindo medidas mitigadoras dos impactos causados pelo crescimento urbano.

Ainda que o trabalho de Silva (1998) não tenha sido aplicado à Bacia do Gregório, ressalta-se o desenvolvimento de um modelo hidrológico

distribuído estocástico para bacias parcialmente urbanas com consideração de todas as estruturas hidráulicas do meio urbano visando a aplicação futura em uma bacia experimental. A elaboração de um modelo estocástico veio satisfazer as necessidades de incorporar as incertezas inerentes dos fenômenos naturais que não podem ser representados por equações determinísticas simples.

A autora (op. cit.) também promoveu uma otimização da ligação SIG-modelo hidrológico evitando a utilização de softwares intermediários quando da utilização das informações obtidas pelo SIG e que alimentam o modelo.

As considerações sobre a adoção de medidas não-estruturais visando a atenuação de cheias na bacia do Córrego do Gregório foram apresentadas por Oliveira (1999). O trabalho apresentado traz a caracterização de todos os aspectos físicos e antrópicos da Bacia do Gregório e a discussão sobre a viabilidade para se implementar as medidas mitigadoras sugeridas por Queiroz (1996).

Por ser uma área que apresenta graves problemas quanto a hidrologia urbana e já ter sido alvo de pesquisas, o presente trabalho visa a integração de todos os estudos teóricos realizados na bacia do Córrego do Gregório e, principalmente, a realização de trabalhos experimentais a fim de dar suporte a análise dos processos de geração dos escoamentos em áreas urbanas.

4.4 Características da área de estudo

A área de estudo abrange uma sub-bacia do Córrego do Gregório, com 10,21 km², dos quais 6,15 km² correspondem à área rural da Bacia do Córrego do Gregório e 4,06 km² correspondem à área urbanizada da sub-bacia que tem seu exutório no cruzamento da rua São Paulo com a Avenida Dr. Alfredo Maffei.

A sub-bacia do Gregório encontra-se geograficamente situada entre as coordenadas, UTM, 202000 a 208000 W e 7560000 a 7564000 S. A área encontra-se inserida nas seguintes cartas topográficas do IBGE, escala 1:10000:

1. São Carlos I : folha SF-23-Y-A-I-1-NO-B
2. São Carlos II: folha SF-23-Y-A-I-1-NE-A

Essas cartas foram digitalizadas no *software CartaLinx* compatível com o Sistema de Informação Geográfica **IDRISIW32**.

A altitude da sub-bacia varia entre 810 e 944 metros.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as curvas topográficas e a hidrografia do setor da Bacia do Córrego do Gregório considerado como área de estudo.

O alto e médio curso do Córrego do Gregório recebem afluentes apenas pela sua margem direita, sendo os principais o Córrego Invernada e o Córrego do Lazarini, caracterizando uma baixa densidade de drenagem da área de estudo ($Dd = 1,37 \text{ km/km}^2$) e alta declividade dos principais córregos (tabela 4.1).

A figura 4.2 mostra dois pontos de concentração de águas definidos a partir da carta topográfica (Oliveira,1999) .

Figura 4.1: Curvas planialtimétricas da sub-bacia do córrego do Gregório.

Fonte: Carta topográfica 1:10000 do município de São Carlos – IBGE (1971).

Figura 4.2: Rede de drenagem da sub-bacia do Córrego do Gregório.

Tabela 4.1: Declividade média dos cursos d'água da sub-bacia do Gregório.

Córrego do Gregório	0,015 m/m
Córrego Invernada	0,034 m/m
Córrego do Lazarini	0,036 m/m

Barbassa (1991) realizou levantamento das seções transversais de toda a rede de micro e macrodrenagem da Bacia do Córrego do Gregório a fim de estimar os parâmetros geométricos e de rugosidade dos canais segundo o estado natural das calhas.

Após visitas em campo e com base nos estudos de caracterização dos trechos fluviais pelo autor (op. cit.), fez-se a caracterização do sistema drenante da sub-bacia a partir da atribuição dos respectivos valores do coeficiente de rugosidade de Manning. (Figura 4.3 e tabela 4.2).

Figura 4.3: Coeficiente de Manning como indicativo das características do sistema de drenagem.

Tabela 4.2: Características do estado natural do trecho. Valores de rugosidade foram atribuídos a partir de visitas no campo e adaptado de Barbassa (1991).

Elemento	Coef. rugosidade de Manning
Canal em terra, sinuoso, com vegetação natural densa e áreas de amortecimento.	0,100
Canal em terra com vegetação natural densa.	0,080
Canal em terra, sinuoso, com vegetação de médio porte.	0,050
Canal em terra, sinuoso, com gramíneas e pedras.	0,045

O Córrego do Gregório pode ser considerado de baixa sinuosidade apresentando índice da relação extensão total do curso d'água pela extensão de canal reto igual a 1,47.

Quanto aos aspectos pedológicos, Lorandi *apud* Oliveira (1999) desenvolveu trabalho sobre caracterização do tipo de solo de São Carlos que mostra a formação Serra Geral ocupando a área de fundo de vale da Bacia do Córrego do Gregório e a formação Marília abrangendo quase toda a área. (figura 4.4).

Figura 4.4: Feições geológicas e pedológicas da área de estudo.

Fonte: Lorandi *apud* Oliveira (1999).

A propriedade de boa drenagem inerente a esses solos de textura arenosa conjuntamente com declividade média alta da região, aproximadamente 0,08 m/m, favorece o fluxo de escoamento subsuperficial e conseqüentemente o processo de erosão laminar que tem sido verificado no trabalho de Gonçalves apud Oliveira (1999).

Em decorrência desses fatores é comum, durante o período de chuvas, a queda de taludes ao longo do córrego do Gregório. O material empregado na contenção da calha somado àquele carregado pelo curso d'água contribui para acelerar o assoreamento do córrego.

As características de uso e ocupação do solo foram obtidas de fotografias aéreas, escala 1:8000, geradas pelo levantamento aerofotogramétrico da porção urbanizada do município pela Secretaria de Abastecimento de Água e Esgoto de São Carlos, em 1998.

De posse dessas informações, fez-se o mosaico das fotos que englobam a área de estudo utilizando software gráfico **CorelDraw** (Figura 4.5).

A comparação da foto aérea de 1998 e os estudos concluídos por Queiroz em 1996 (figura 4.6) mostra o aparecimento de novos loteamentos no setor leste da sub-bacia.

Figura 4.5: Fotografia aérea da área de estudo correspondente ao alto e médio curso do Córrego do Gregório. A moldura refere-se às coordenadas UTM (sentido horário a partir do canto inferior esquerdo): (202;7560),(202;7564),(208;7564) e (208;7560). Unidade: km.

Figura 4.6: Uso e ocupação do solo da subbacia do Gregório. Adaptado de Queiroz (1996). Destaca-se, na figura, o traçado da rodovia Washington Luiz cortando a área rural à leste.

A partir de trabalhos de campo e fotoleitura de Oliveira (1999), considerara-se 2,38 km² da área rural como zona de expansão urbana, sendo 70% relativo a pasto degradado.

5. ESTUDO EXPERIMENTAL

5.1 Descrição do estudo

O presente trabalho subdivide-se em dois estudos segundo a natureza das atividades realizadas a fim de alcançar os objetivos da pesquisa:

1. Estudo experimental da subbacia do Gregório a partir da investigação da estrutura espacial da condutividade hidráulica do solo e precipitação convectiva.
2. Estudo teórico de modelagem distribuída da transformação chuva-vazão suportada pelos resultados da pesquisa referente ao estudo anterior.

O trabalho apresentado neste capítulo diz respeito ao estudo experimental do setor da Bacia do Gregório.

Os estudos hidrológicos na área de estudo foram conduzidos de forma a permitirem conhecimento detalhado do processo de geração dos escoamentos na bacia.

A condutividade hidráulica saturada foi analisada considerando-se duas escalas de medição distintas: a primeira, em maior escala, relativa à área total da bacia ($\cong 10 \text{ km}^2$) e a segunda, em menor escala, relativa a uma área de aproximadamente 1 ha.

Os dados de chuva foram analisados considerando-se resoluções espaciais distintas. Para tal fim, procedeu-se à aquisição e instalação de 5 (cinco) pluviógrafos semi-automáticos da Campbell Scientific, abrangendo toda a área da pesquisa, o que resultou numa densidade elevada de medição (1 pluviógrafo para cada 2 km²).

A alta densidade de pluviógrafos foi requerida a fim de permitir o traçado das isoietas de chuva e desta forma, uma análise da movimentação de distribuição espacial das chuvas convectivas que ocorrem na região.

As isoietas foram geradas a partir da implementação do algoritmo multiquadrático para interpolação superficial com arquivo de saída compatível com o formato das imagens exibidas pelo software Idrisi32.

Os escoamentos resultantes das precipitações ocorridas durante o período de monitoramento foram obtidos a partir da instalação de dois linígrafos junto a dois postos de medição de chuva, os quais se encontraram inseridos na porção urbanizada da sub-bacia próxima ao exutório.

Em menor escala, os dois linígrafos e um pluviógrafo foram utilizados para investigar a altura dos escoamentos em sarjeta e altura d'água precipitada cobrindo uma área de uso residencial.

Quanto à determinação da condutividade hidráulica saturada, 76 ensaios foram realizados utilizando-se infiltrômetro de pressão positiva. Do conjunto de 76 pontos, 30 corresponderam a ensaios sobre uma pequena área, aproximadamente 1 ha, e os demais foram distribuídos de forma a cobrir toda a sub-bacia.

A determinação de outros parâmetros tais como, umidade inicial do solo, distribuição granulométrica das amostras ensaiadas no campo e levantamento da curva-chave foram realizadas a fim de suportar as análises das variáveis de estudo.

No capítulo 6, apresenta-se o embasamento teórico do modelo de simulação hidrológica desenvolvido, assim como a análise da variabilidade

espacial da chuva e da condutividade hidráulica saturada do solo e sua influência sobre o comportamento hidrológico da bacia do Gregório.

5.2 Infiltração

Os experimentos de infiltração foram conduzidos de forma a cobrir toda a área de estudo.

Numa primeira visita ao campo, foram definidos aleatoriamente os locais para realização dos ensaios científicos. A maioria dos pontos de medição foi distribuída na área rural da bacia uma vez que, na parte urbana, o solo encontra-se altamente impermeabilizado. No entanto, foi necessário rearranjar os locais de medição uma vez que não se obteve a autorização para conduzir os ensaios em algumas áreas. Este fator acabou prejudicando a configuração espacial dos pontos de ensaio. A distribuição final dos locais é mostrada na figura 5.1.

Figura 5.1: Localização dos experimentos de infiltração realizados no período de junho a agosto dos anos de 1999 e 2000. O detalhe azul representa a localização do segundo conjunto de experimentos realizados na estiagem de 2001.

Em cada ponto da figura 5.1 foram previstos 2 ensaios distanciados cerca de 2 metros, resultando num total de 42 ensaios. Esses experimentos foram divididos em duas campanhas de medição ocorridas no período de junho a agosto dos anos de 1999 e 2000.

O número total de experimentos desta fase foi aumentado em decorrência da realização de 3 ensaios em cada local quando os valores da condutividade hidráulica saturada mostraram-se alterados por fatores ambientais e antrópicos.

Uma terceira campanha de medição foi realizada no período de junho a agosto de 2000, na qual 30 amostras foram distribuídas regularmente sobre uma área de aproximadamente 1,2 ha.

A figura 5.2 mostra a disposição das amostras sobre a área inserida no Sítio São Rafael.

Figura 5.2: Amostras regularmente espaçadas cobrindo a área de 1,3 ha localizada no Sítio São Rafael.

A utilização de dois conjuntos de amostras teve como objetivo a comparação das respectivas análises estatísticas considerando-se duas densidades diferentes de pontos.

Essa comparação tornou-se possível em razão dos conjuntos das amostras situarem-se sobre um mesmo tipo de solo (Latossolo Vermelho Amarelo).

5.2.1 Procedimento experimental

O estudo da variabilidade espacial da infiltração foi direcionado no sentido de quantificar a condutividade hidráulica saturada em pontos da

sub-bacia do Gregório e dar indícios da influência das práticas de uso e ocupação do solo sobre essa variável.

Construiu-se um infiltrômetro de disco (figura 5.3) semelhante ao apresentado por Perroux e White (1988) que tem sido utilizado para obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo.

O projeto do infiltrômetro é mostrado na figura 5.4. As dimensões do equipamento são: $\phi_{\text{externo do disco}} = 33 \text{ cm}$; $\phi_{\text{interno do disco}} = 30 \text{ cm}$; altura do reservatório = 100 cm; altura da torre lateral = 30 cm; $\phi_{\text{interno do reservatório}} = 7 \text{ cm}$; $\phi_{\text{diâmetro interno da torre lateral}} = 5 \text{ cm}$; $\phi_{\text{do tubo de entrada de ar da torre lateral ao reservatório}} = 0,5 \text{ cm}$.

Figura 5.3: Infiltrômetro de disco utilizado para a determinação da curva da capacidade de infiltração de água no solo.

Figura 5.4: Projeto do infiltrômetro de disco (Perroux e White, 1988) utilizado nos experimentos de campo.

Esse tipo de infiltrômetro é chamado, também, de infiltrômetro ou permeâmetro de pressão positiva porque opera com valor de pressão, φ_0 , maior do que zero, sendo obtido pela diferença entre a altura da entrada de ar da torre lateral para o reservatório até a superfície do solo. Essa altura de alagamento sobre o solo é regulada através dos parafusos que estão conectados ao cilindro de aço e que suportam o infiltrômetro.

As dimensões do infiltrômetro foram definidas tendo-se em vista a praticidade quanto ao transporte de água e manejo do equipamento para os locais dos ensaios.

Sendo assim, fixou-se a pressão positiva, ϕ_0 , em 1,5 cm o que implica em uma altura aproximada de 1,0 cm entre a base do infiltrômetro e a superfície do solo.

Desses valores foram estimados as dimensões da torre lateral de forma a satisfazer a premissa de operação do aparelho que estabelece a igualdade aproximada entre o volume de água sobre a superfície do solo e o volume da torre lateral.

O infiltrômetro foi confeccionado em acrílico transparente e uma escala graduada em milímetros foi colada junto à torre maior.

Os procedimentos adotados na instalação do infiltrômetro no solo diferiram, na maior parte dos experimentos, daqueles descritos por Perroux e White uma vez que o relevo da região é acidentado, apresentando, ainda, irregularidades na superfície natural causada pelo trânsito de maquinário pesado.

Assim, a fim de garantir a altura da lâmina d'água sob o infiltrômetro, foi preciso aparar a vegetação ao nível do solo e quando necessário efetuar o seu nivelamento tomando-se o cuidado de não arrancar as raízes da vegetação, evitando perturbações na estrutura do solo.

Tal procedimento parece satisfatório tendo-se em mente que a variável investigada é a condutividade hidráulica saturada e que o volume de água destinado ao suprimento da vegetação não é considerado nesta pesquisa.

Estando pronto o local de ensaio, foi feito um sulco, seguindo a circunferência do anel de aço do infiltrômetro, pouco maior que a espessura desse anel até a profundidade de 2 centímetros a partir da superfície do solo. Para isto, utilizou-se uma barra cilíndrica de ferro de pequeno diâmetro.

O enchimento do infiltrômetro foi feito colocando-se o equipamento em um tambor contendo água que foi succionada para o interior das duas

torres com a utilização de uma bomba de bicicleta cuja válvula foi invertida. A saída do ar das duas torres se dá através do registro instalado no topo de cada uma delas.

Durante o deslocamento do infiltrômetro do tambor até o local de ensaio, a saída de água pela base do disco foi impedida pela colocação de um geotêxtil cobrindo as aberturas na base das duas torres. A escolha do material geotêxtil (G150) deveu-se à sua alta permeabilidade (4.10^{-1} cm/s) e resistência o que não comprometeu a passagem da água durante o processo de infiltração.

Uma vez colocado no solo, utilizou-se argila para impedir a passagem da água pelo sulco onde o anel de aço foi inserido.

O processo de infiltração teve início abrindo-se o registro da torre lateral.

Os ensaios foram monitorados até que dois valores da taxa de infiltração na superfície do solo convergissem dentro de uma tolerância aceita. Alguns experimentos foram monitorados por mais tempo conforme a necessidade sentida de continuar a observação do fenômeno.

O último valor medido nos ensaios foi considerado como sendo representativo da condutividade hidráulica saturada.

Todos os experimentos de campo foram realizados entre os meses de junho a agosto o que significou a sua inserção no período de estiagem da região.

As figuras 5.5 a 5.8 mostram as fotos durante a realização de um dos experimentos.

Figura 5.5: Paisagem predominante na área rural da subbacia do Gregório. O vale corresponde ao córrego cujas nascentes encontram-se no Sítio São Rafael.

Figura 5.6: Enchimento do infiltrômetro de disco durante ensaio realizado no Sítio Cachimbo. A superfície aparentemente uniforme apresenta grandes desníveis devido trânsito de maquinário pesado e pastagem do gado.

Figura 5.7: Colocação do infiltrômetro no local de ensaio referido na figura 11. Utilização do nível para garantir a mesma altura da lâmina d'água sobre o solo.

Figura 5.8: Colocação de argila para selar a passagem da água pelo sulco onde o infiltrômetro foi inserido.

5.2.2 Ensaios realizados

Os resultados obtidos pela realização dos experimentos de infiltração confirmaram a variabilidade espacial da variável e uma dependência relativa às práticas de manejo do solo.

Os valores mais altos da capacidade de infiltração foram obtidos nas áreas vizinhas aos córregos, principalmente naquelas em que não foram verificadas as alterações antrópicas.

Em alguns locais, a curva da capacidade de infiltração medida não pôde ser considerada para refletir os escoamentos na matriz do solo uma vez que o volume infiltrado no tempo mostrou-se totalmente instável. Os vazios, ou macroporos, resultantes da decomposição de raízes ou da fauna do solo podem ter sido causadores do fato observado.

Os pontos de ensaio são mostrados na figura 5.9.

A configuração das amostras ensaiadas no Sítio São Rafael tem como origem o ponto 22 mostrado na figura 5.9, o qual foi identificado como primeira amostra da primeira linha (P_1L_1) do traçado regular em que foram distribuídos os pontos. As outras linhas foram dispostas no sentido Leste-Oeste e os demais pontos no sentido Norte-Sul com afastamento aproximado igual a 25 metros.

Figura 5.9: Localização dos pontos dos ensaios de infiltração: pontos pretos. Os pontos vermelhos representam as estações de Medição chuva-vazão.

As figuras 5.10 a 5.13 apresentam alguns resultados das taxas de infiltração obtidas em campo.

Os resultados obtidos do monitoramento da infiltração de água no solo são apresentados no Anexo A.

Figura 5.10: Curva da capacidade de infiltração obtida no primeiro ensaio localizado próximo ao ponto 1. Bacia do Gregório. Data:04/06/99.

Figura 5.11: Curva capacidade de infiltração obtida no segundo ensaio próximo ao ponto 1. Bacia do Gregório. Data: 18/06/99

Figura 5.12: Curva capacidade de infiltração obtida para o primeiro experimento de infiltração realizado próximo ao local 2. Bacia do Gregório. Data:26/07/99.

Figura 5.13: Curva capacidade de infiltração obtida no segundo ensaio realizado próximo ao local 2. Bacia do Gregório. Data: 26/07/99

Durante a terceira campanha de medição, realizada entre os meses de junho e agosto de 2001, os valores obtidos da condutividade hidráulica saturada deram indícios de um solo bem mais compacto.

A interrupção abrupta da infiltração como ocorrido durante alguns experimentos pode significar um possível afloramento da camada de rocha,

uma vez que o córrego do Gregório escoia sobre a formação Serra Geral constituída de basalto. Notou-se, também, a existência de fendas ou, então, camadas menos compactas que provocaram uma mudança no comportamento da capacidade de infiltração elevando-a subitamente.

Conforme relato do proprietário do Sítio São Rafael, as curvas de nível contornando as cabeceiras do primeiro afluente do córrego do Gregório pela sua margem direita são necessárias para reter os escoamentos das águas pluviais. Esse fato foi comprovado pelas baixas taxas de infiltração obtidas nessa área; em alguns experimentos, anotou-se apenas uma leitura durante os 60 minutos de monitoramento.

Além dos ensaios de infiltração, foram coletadas amostras para análise granulométrica e classificação textural do solo, sendo consideradas representativas para toda a sub-bacia do Gregório.

A tabela 5.1 mostra o resumo das análises granulométricas realizadas.

Tabela 5.1: Classificação granulométrica do solo

Total de amostras	% areia	% silte	% argila
27	66,92 ± 5,64	7,17 ± 2,32	25,90 ± 6,09

A classificação dos tamanhos das partículas de solo foi realizada com base na escala de Atterberg.

Segundo o diagrama de repartição de classes generalizadas de textura da EMBRAPA o solo foi incluído na classe textural média.

Apresenta-se na figura 5.14 um dos experimentos de infiltração monitorado no Sítio São Rafael. Os demais resultados de infiltração de água no solo podem ser encontrados no Anexo A, assim como curvas granulométricas das amostras de solo ensaiadas.

Figura 5.14: Curva capacidade de infiltração e granulométrica obtidas para a primeira amostra da primeira linha. Local: Sítio São Rafael. Junho/2001

A descontinuidade da curva granulométrica próxima ao diâmetro 0,1mm é devida à diferença quanto aos métodos adotados no ensaio: peneiramento (porção mais grosseira da amostra de solo) e sedimentação (diâmetros mais finos dos grãos). Em geral, a curva é interpolada manualmente a partir das leituras realizadas nos ensaios granulométricos.

A consideração da condutividade hidráulica saturada como sendo igual ao valor da infiltração em estado permanente acaba superestimando esse parâmetro em decorrência dos efeitos de forças capilares e da pressão hidrostática relativa à altura d'água na câmara de alagamento do infiltrômetro.

A fim de estimar o comportamento unidimensional sob o infiltrômetro de disco e, assim, possibilitar a utilização da equação de infiltração semi-empírica de Green e Ampt, realizou-se um ajuste a partir da análise tridimensional dos escoamentos sob infiltrômetros de disco apresentada por Smetten et al (1995).

Para tanto, estimou-se o parâmetro de absortividade do solo através da equação expressa por:

$$I_{3D} = S_0 t^{1/2} + \left[K_n + \frac{(2-\beta)}{3} \cdot (K_0 - K_n) + \frac{\gamma \cdot S_0^2}{rd(\theta_0 - \theta_n)} \right] \cdot t \quad 5.1$$

Em que I_{3D} é a infiltração acumulada tridimensional; S_0 é o parâmetro do solo; r_d é o raio do disco; γ é um coeficiente de proporcionalidade tal que $0.6 < \gamma < 0.8$; e $\theta_0 - \theta_n$ é a diferença do conteúdo de água no solo; K_n é a condutividade hidráulica no início do experimento; K_0 é a condutividade hidráulica do solo; t é o parâmetro temporal e β é um fator de forma entre 0 e 1.

Os valores obtidos para o parâmetro S_0 foram substituídos na equação de infiltração unidimensional:

$$I_{1D} = S_0 t^{1/2} + \left[K_n + \frac{(2-\beta)}{3} \cdot (K_0 - K_n) \right] \cdot t \quad 5.2$$

Em que I_{1D} é a infiltração acumulada unidimensional.

Esses novos valores foram utilizados para o cálculo da taxa de infiltração unidimensional em estado permanente e são mostrados nas tabelas 5.2 e 5.3. Nessas tabelas, os índices a e b correspondem, respectivamente, ao penúltimo e último valor referente à taxa de infiltração medidos nos experimentos.

O ajuste das equações 5.1 e 5.2 foi realizado considerando-se o parâmetro β igual a 1 devido aos elevados valores obtidos para S_0 ; γ assumiu o valor igual a 0,6 tirado da literatura; o conteúdo de água do solo foi estimado em 0,33. Os valores de umidade inicial das amostras ficaram entre $0,07 \pm 0,04$.

Os ensaios que não representaram o comportamento esperado para o decaimento da curva de infiltração não foram considerados nos cálculos das tabelas 5.2 e 5.3 nem nas análises estatísticas da condutividade hidráulica saturada.

Tabela 5.2: Ajuste da infiltração unidimensional em estado permanente pelas equações de escoamento tridimensional sob infiltrômetro de disco (Amostra 1).

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
1a	2,92	5,76	27,22	0,000	10,40	23,39	4,32
1a	3,16	5,63	28,58	0,000	10,40	24,44	
1b	0,84	12,25	21,78	0,000	16,86	18,88	9,99
1b	0,95	12,25	23,14	0,000	16,52	19,99	
2a	1,41	5,77	17,69	0,000	10,92	15,66	4,98
2a	1,64	5,88	19,06	0,000	10,63	16,81	
2b	0,88	14,33	25,86	0,000	18,94	22,02	10,19
2b	0,98	13,61	27,22	0,000	18,73	23,04	
3a	0,92	22,58	40,83	0,000	26,92	32,75	12,50
3a	0,99	20,94	42,19	0,000	26,88	33,56	
3b	0,39	77,78	44,92	0,000	42,01	36,51	53,01
3b	0,41	76,56	46,28	0,000	42,10	37,46	
3c	0,60	40,50	47,64	0,000	37,85	37,28	29,24
3c	0,63	40,50	49,00	0,000	37,49	38,26	

Tabela 5.2: continuação.

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
4a	1,54	5,24	21,78	0,000	12,89	18,68	3,80
4a	1,82	4,90	23,14	0,000	12,43	19,73	
4b*							
4b*							
4c	0,72	28,65	28,58	0,000	21,14	24,71	26,21
4c	0,76	30,06	29,94	0,000	20,96	25,90	
5a	0,64	22,17	50,36	0,000	40,81	37,42	13,08
5a	0,77	20,42	53,08	0,000	38,51	39,16	
5b	1,47	63,64	49,00	0,000	12,38	46,26	70,85
5b	1,49	66,22	50,36	0,000	12,08	47,72	
5c	0,19	163,33	51,72	0,000	70,60	40,51	67,66
5c	0,21	140,00	54,44	0,000	71,25	41,83	
6a	0,98	19,84	32,67	0,000	21,18	27,36	14,78
6a	1,04	19,60	34,03	0,000	21,10	28,39	
6b	0,94	23,56	42,19	0,000	27,28	33,75	22,94
6b	0,99	25,39	43,56	0,000	26,74	34,98	

Tabela 5.2: continuação

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0.5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
6c	0,46	77,78	49,00	0,000	40,65	39,71	42,15
6c	0,54	68,53	54,44	0,000	41,58	43,06	
7a	0,85	13,61	24,50	0,000	18,57	20,95	10,55
7a	0,95	13,39	25,86	0,000	18,25	22,03	
7b	0,64	52,69	47,64	0,000	34,28	38,56	41,34
7b	0,76	54,81	54,44	0,000	34,13	43,69	
8b	0,84	6,03	31,31	0,000	25,32	24,82	4,51
8b	1,06	5,98	32,67	0,000	23,01	25,84	
9a	1,07	27,37	47,64	0,000	27,31	37,98	22,25
9a	1,12	28,00	49,00	0,000	27,10	39,06	
9b	0,78	51,04	49,00	0,000	30,37	40,23	40,05
9b	0,81	51,58	50,36	0,000	30,38	41,29	
10a*	1,01	7,31	38,11	0,000	26,78	29,35	4,99
10a*	1,20	7,04	39,47	0,000	25,08	30,31	
10b	1,00	14,94	24,50	0,000	16,35	21,27	10,52
10b	1,09	14,08	25,86	0,000	16,42	22,29	

Tabela 5.2: continuação

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
11a	1,12	11,78	27,22	0,000	17,62	23,02	8,91
11a	1,24	11,56	28,58	0,000	17,37	24,07	
11b*							
11b*							
12a	0,92	28,32	36,75	0,000	23,03	30,82	22,18
12a	0,97	28,49	38,11	0,000	23,02	31,88	
12b	0,91	33,56	31,31	0,000	18,27	27,62	26,13
12b	0,95	33,33	32,67	0,000	18,57	28,69	
13a	1,09	6,06	39,47	0,000	26,66	30,07	4,10
13a	1,33	5,83	40,83	0,000	24,71	31,02	
13b	1,42	4,59	27,22	0,000	16,92	22,31	2,97
13b	1,75	4,11	28,58	0,000	15,81	23,29	
14a	0,83	20,50	24,50	0,000	17,34	21,47	16,83
14a	0,90	20,59	25,86	0,000	17,36	22,59	
14b	0,79	9,04	25,86	0,000	21,44	21,45	6,77
14b	0,95	8,78	27,22	0,000	20,29	22,50	

Tabela 5.2: continuação

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
15a	1,16	9,44	28,58	0,000	18,66	23,70	4,19
15a	1,34	7,29	29,94	0,000	18,31	24,49	
15b	0,92	27,53	36,75	0,000	23,30	30,72	20,13
15b	0,97	27,22	38,11	0,000	23,35	31,72	
16a	0,49	5,03	10,89	0,000	12,94	9,89	3,67
16a	0,81	4,27	12,25	0,000	11,01	11,06	
16b	0,52	5,59	9,53	0,000	10,79	8,79	4,32
16b	0,80	4,93	10,89	0,000	9,69	9,98	
17a	0,71	14,00	38,11	0,000	31,39	29,68	8,76
17a	0,81	13,03	39,47	0,000	30,06	30,59	
17b	0,66	5,34	14,97	0,000	14,76	13,22	4,32
17b	0,93	5,15	16,33	0,000	13,24	14,36	
18a	1,17	4,18	13,61	0,000	9,83	12,24	3,27
18a	1,52	3,89	14,97	0,000	9,28	13,39	
18b	1,12	2,98	12,25	0,000	9,41	11,05	2,15
18b	1,65	2,55	13,61	0,000	8,40	12,20	

Tabela 5.2: continuação

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
19a	0,86	4,04	8,17	0,000	7,01	7,65	2,83
19a	1,28	3,22	9,53	0,000	6,60	8,85	
19b	1,01	3,88	19,06	0,000	14,93	16,32	3,34
19b	1,35	4,02	20,42	0,000	13,46	17,45	
20a	0,70	11,42	29,94	0,000	25,88	24,28	7,70
20a	0,83	10,65	31,31	0,000	24,57	25,26	
20b	0,92	4,55	20,42	0,000	16,64	17,34	3,44
20b	1,23	4,32	21,78	0,000	14,99	18,42	
21a	0,62	9,11	27,22	0,000	25,72	22,22	6,13
21a	0,79	8,32	28,58	0,000	23,70	23,22	
21b	1,05	8,35	38,11	0,000	25,92	29,53	4,44
21b	1,24	7,18	39,47	0,000	24,57	30,37	

Tabela 5.3: Ajuste da infiltração unidimensional em estado permanente pelas equações de escoamento tridimensional sob infiltrômetro de disco (Amostra 2).

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
Linha1							
1	1,56	2,91	19,06	0,000	11,90	16,38	1,91
	2,11	2,47	20,42	0,000	10,80	17,43	
2	0,84	11,67	13,61	0,000	10,17	12,56	9,72
	0,96	11,32	14,97	0,000	10,34	13,73	
3	1,34	3,06	5,44	0,000	3,36	5,26	2,88
	1,78	3,07	6,81	0,000	3,53	6,54	
4	0,85	8,64	13,61	0,000	10,77	12,41	7,22
	1,02	8,42	14,97	0,000	10,65	13,58	
5	1,67	0,18	17,26	0,000	11,30	14,68	0,19
	1,93	0,21	17,31	0,000	10,51	14,73	
6	0,89	4,95	8,17	0,000	6,62	7,70	4,28
	1,00	4,77	8,71	0,000	6,59	8,18	
7							
8	0,67	1,31	5,99	0,000	6,55	5,64	0,71
	1,00	0,81	6,26	0,000	5,60	5,88	
9	0,69	3,08	3,27	0,000	2,99	3,19	2,85
	0,87	2,97	3,81	0,000	3,05	3,71	
10	0,70	2,58	2,72	0,000	2,47	2,67	2,12
	0,82	2,23	2,99	0,000	2,56	2,93	

Tabela 5.3: continuação

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0,5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
Linha2							
1	1,56	2,91	19,06	0,000	11,90	16,38	1,91
	2,11	2,47	20,42	0,000	10,80	17,43	
2	0,82	9,48	16,33	0,000	13,29	14,59	7,51
	0,97	9,07	17,69	0,000	13,01	15,71	
3	0,77	11,84	10,89	0,000	8,25	10,26	10,12
	0,89	11,45	12,25	0,000	8,58	11,46	
4	0,75	3,29	4,08	0,000	3,62	3,96	3,04
	1,18	3,21	5,44	0,000	3,68	5,25	
5							
6	1,18	1,01	2,99	0,000	2,32	2,92	1,11
	1,41	1,14	3,27	0,000	2,22	3,18	
7	0,20	25,45	15,79	0,000	27,16	13,97	17,90
	0,23	23,06	16,33	0,000	26,55	14,39	
8	0,95	17,19	26,68	0,000	17,94	22,96	12,11
	0,98	16,75	27,22	0,000	18,00	23,36	
9	1,13	16,07	40,83	0,000	24,83	32,41	11,22
	1,21	15,81	42,19	0,000	24,49	33,37	
10	0,82	2,25	2,72	0,000	2,28	2,67	2,33
	0,93	2,39	2,99	0,000	2,28	2,94	

Tabela 5.3: continuação.

Amostras	Tempo h	Ksat mm/h	Inf. Acumulada mm	resultado do ajuste	Sorptividade mm/h ^{0.5}	Infiltração unidimensional mm	Ksat 1D mm/h
Linha3							
1	1,05	2,68	13,61	0,000	10,88	12,10	2,33
	1,55	2,72	14,97	0,000	9,52	13,27	
2	0,73	2,78	8,17	0,000	8,07	7,59	2,28
	1,27	2,55	9,53	0,000	6,86	8,80	
3							
4							
5	0,63	0,57	1,52	0,000	1,75	1,50	0,59
	0,80	0,61	1,63	0,000	1,61	1,61	
6	0,85	1,53	2,72	0,000	2,41	2,66	1,34
	1,05	1,40	2,99	0,000	2,38	2,92	
7	0,83	13,07	14,16	0,000	10,41	13,07	11,24
	0,87	12,98	14,70	0,000	10,49	13,54	
8	0,86	8,83	9,26	0,000	6,73	8,78	8,04
	0,92	8,83	9,80	0,000	6,83	9,28	
9	0,78	2,03	2,99	0,000	2,71	2,92	1,91
	0,92	1,99	3,27	0,000	2,69	3,19	
10	0,78	12,65	18,51	0,000	14,82	16,42	9,36
	0,83	12,10	19,06	0,000	14,83	16,85	

As análises estatísticas foram realizadas com os dados relativos à condutividade hidráulica saturada unidimensional do solo (tabelas 5.2 e 5.3).

As amostras com espaçamentos irregulares e regulares foram analisadas separada e conjuntamente, ajustando-se os valores observados à distribuições normal e lognormal obtendo-se as estatísticas, com nível de significância de 95% para verificação do ajuste.

A descrição estatística das observações realizadas em 1999 e 2000 é mostrada na tabela 5.4 e o histograma do parâmetro é exibido na tabela 5.5 e figura 5.15.

Tabela 5.4: Estatística descritiva das observações referentes às campanhas de medição realizadas nos anos de 1999 e 2000. Unidade da condutividade hidráulica em mm/h.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	43
Valor Mínimo	2,15
Valor Máximo	70,85
Medidas de Tendência Central	
Média	15,96
Mediana	8,91
Medidas de Dispersão	
Variância	297,59
Desvio Padrão	17,25
Coeficiente de Variação	1,08

Tabela 5.5: Análise preliminar do histograma do parâmetro observado durante a primeira e segunda campanha de medição.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	43
Valor Mínimo	2,15
Valor Máximo	70,85
Intervalo	68,70
Número de classes	6
Amplitude das classes	11,45

Tabela 5.6: Valores das frequências relativas e absolutas da condutividade hidráulica observada nos anos de 1999 e 2000. Unidade do parâmetro em mm/h.

Limites	Tabelas de Frequências		
	Absolutas	Relativas	Acumuladas
Superiores			
13,70	28	65,12%	65,12%
25,15	6	13,95%	79,07%
36,60	3	6,98%	86,05%
48,05	3	6,98%	93,02%
59,50	1	2,33%	95,35%
70,95	2	4,65%	100,00%

As análises anteriores são representadas no histograma da figura 5.15.

Figura 5.15: Histograma de frequência relativa da condutividade hidráulica saturada obtida durante a primeira e segunda campanha de medição. Unidade em mm/h.

O mesmo estudo foi aplicado aos valores observados para a terceira campanha de medição. As estatísticas são mostradas nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, e figura 5.16.

Tabela 5.7: Estatística descritiva das observações referentes à campanha de medição realizada em 2001. Unidade em mm/h.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	26
Valor Mínimo	0,19
Valor Máximo	17,90
Medidas de Tendência Central	
Média	5,24
Mediana	2,86
Medidas de Dispersão	
Variância	21,71
Desvio Padrão	4,66
Coeficiente de Variação	0,89

Tabela 5.8: Análise preliminar do histograma da condutividade hidráulica observada entre os meses de junho a agosto de 2001.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	26
Valor Mínimo	0,19
Valor Máximo	17,90
Intervalo	17,71
Número de classes	5
Amplitude das classes	3,54

Tabela 5.9: Valores de frequência relativa e absoluta da condutividade hidráulica observada em 2001. Unidade em mm/min.

Limites	Tabelas de Frequências		
	Superiores	Absolutas	Relativas Acumuladas
3,83		15	57,69%
7,37		2	7,69%
10,92		5	19,23%
14,46		3	11,54%
18,00		1	3,85%
		0	100,00%

Figura 5.16: Histograma obtido através dos experimentos de campo realizados em 2001. Unidade em mm/h.

As primeiras análises estatísticas foram finalizadas ajustando-se as distribuições normal e lognormal ao conjunto de todas as observações conforme tabelas 5.10 a 5.12 e figura 5.17.

Tabela 5.10: Estatística descritiva de todas as observações da condutividade hidráulica saturada. Unidade em mm/h.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	69
Valor Mínimo	0,19
Valor Máximo	70,85
Medidas de Tendência Central	
Média	11,92
Mediana	6,77
Medidas de Dispersão	
Variância	219,20
Desvio Padrão	14,81
Coeficiente de Variação	1,24

Tabela 5.11: Análise preliminar do histograma da condutividade hidráulica observada para as três campanhas de medição.

Análise da amostra	
Quantidade de valores	69
Valor Mínimo	0,19
Valor Máximo	70,85
Intervalo	70,66
Número de classes	8
Amplitude das classes	8,83

Tabela 5.12: Valores de frequência relativa e absoluta da condutividade hidráulica observada nas três campanhas de medição. Unidade em mm/h.

Limites	Tabelas de Frequências		
	Absolutas	Relativas	Acumuladas
Superiores			
9,12	41	59,42%	59,42%
17,96	15	21,74%	81,16%
26,79	6	8,70%	89,86%
35,62	1	1,45%	91,30%
44,45	3	4,35%	95,65%
53,29	1	1,45%	97,10%
62,12	0	0,00%	97,10%
70,95	2	2,90%	100,00%
	0

Figura 5.17: Histograma dos valores observados da condutividade hidráulica saturada.

Os ajustes da distribuição normal e lognormal são mostrados nas figuras 5.18 a 5.22.

Figura 5.18: Função densidade de probabilidade normal ajustada às observações da condutividade hidráulica saturada.

Figura 5.19: função densidade de probabilidade lognormal ajustada aos valores da condutividade hidráulica saturada observados na 1ª e 2ª campanhas de medição (Amostra 2). Ano: 1999 e 2000.

Figura 5.20: Função densidade de probabilidade lognormal ajustada aos valores da condutividade hidráulica saturada observados na terceira campanha de medição (Amostra 2). Ano: 2001.

Figura 5.21: Função densidade de probabilidade normal considerando-se os valores da condutividade hidráulica saturada observados nas três campanhas de medição.

Figura 5.22: Função de densidade lognormal para os valores da condutividade hidráulica saturada observados nas três campanhas de medição.

Realizados todos os ajustes, procedeu-se a realização do teste χ^2 para verificar se as hipóteses de normalidade e lognormalidade dos dados são verdadeiras. A condutividade hidráulica foi considerada seguir a distribuição ajustada se χ^2 fosse menor ou igual ao valor de $\chi^2_{0,05}$. A Tabela 5.13 apresenta o resumo do teste de hipótese realizado.

Tabela 5.13: Estatísticas χ^2 da condutividade hidráulica saturada para o teste de ajuste da distribuição normal de lognormal

	Distribuição	χ^2	Grau de liberdade	$\chi^2_{0,05}$	hipótese
Amostra 1: n=43	Normal	42,83	5	11,07	Rejeitada
	Lognormal	6,95	5	11,07	Aceita
Amostra 2: n= 26	Normal	15,89	4	9,49	Rejeitada
	Lognormal	6,80	4	9,49	Aceita
Amostra 3: n=69	Normal	244,67	7	14,07	Rejeitada
	Lognormal	17,05	7	14,07	Rejeitada

O resultado do teste de hipóteses era esperado uma vez que a condutividade hidráulica saturada tem mostrado ser, em diversas pesquisas, lognormalmente distribuída.

Embora as duas amostras tenham distribuição lognormal, o conjunto de todas as observações não segue a mesma distribuição.

Sendo assim, a consideração de resultados obtidos numa pequena área como representativo da condutividade hidráulica para uma região com mesmo tipo de solo pode levar a resultados muito distintos.

O parâmetro mostrou ser influenciado pela sua distribuição espacial, ou seja, os resultados mostram que a condutividade hidráulica saturada está relacionada às práticas de manejo e à estrutura dos horizontes do solo, que variam espacialmente.

Tal fato vem confirmar a necessidade de um número cada vez maior de experimentos, abrangendo homogeneamente toda a região, a fim de estimar uma distribuição espacial da variável observada.

Tomando-se as amostras lognormalmente distribuídas, foram estimados intervalos de confiança a 95% no qual a média μ da população estaria inserida:

- Amostra 1: (7,58;16,34)
- Amostra 2: (7,03;3,45)

O intervalo obtido a partir da amostra 1 contém a média do conjunto total de observações o que reforça a influência do uso do solo sobre o processo de infiltração.

A partir das análises anteriores, considerou-se a amostra 1 como a melhor representação da condutividade hidráulica saturada para a bacia urbana do córrego do Gregório. Ressalta-se que essa consideração inclui diversas fontes de incertezas, tais como mudanças de manejo do solo e

umidade antecedente que devem ser abordadas em trabalhos futuros conjuntamente com a espacialização da condutividade hidráulica saturada.

5.2.3 Distribuição espacial

A princípio, pensou-se em se utilizar técnicas geoestatísticas para modelar a estrutura espacial da condutividade hidráulica saturada. No entanto, a expectativa de que os valores obtidos fossem similares às observações mais próximas geograficamente não foi verificada nos experimentos de campo.

Ainda assim, utilizou-se o módulo de geoestatística do Idrisiw32 suportado pelo programa de domínio público Gstat, o qual possibilita a determinação dos variogramas experimentais, ajuste a funções teóricas e Krigagem.

O programa é auto-explicativo e trabalha com os formatos de imagens geradas no Idrisiw32.

Nos ajustes realizados, verificou-se que os semi-variogramas experimentais não apresentavam uma forma simples e o ajuste de uma função teórica tornou-se inviável.

As figuras 5.23 a 5.25 e a tabela 5.14 mostram os resultados da análise variográfica. Foram considerados semi-variogramas omnidirecionais a fim de obter um número de pares de amostras entre 30 e 50 para cálculo dos pontos do variograma.

Figura 5.23: Semi-variograma experimental da condutividade hidráulica saturada na Bacia do córrego do Gregório. Lag = 100 m

Tabela 5.14: Estatística para a amostra obtida durante a 1ª e 2ª campanha de medição. Lag igual a 100 e 120 metros.

Número de amostras	43
Média	15,86
Desvio Padrão	17,30
Mínimo X	202000
Máximo X	208000
Mínimo Y	7560000
Máximo Y	7564000
Variância	299,50
Distância Cutoff	2403,68
Tolerância Angular	180

Figura 5.24: Semi-variograma experimental da condutividade hidráulica saturada na Bacia do córrego do Gregório. Lag = 120 m

Lag = 120 metros			Lag = 100 metros		
lag	pares	distância média	lag	pares	distância média
1	25	5.68841	1	25	5.68841
2	20	196.99	2	10	165.359
3	41	299.934	3	34	259.931
4	33	413.28	4	28	358.066
5	46	540.865	5	26	441.772
6	32	675.362	6	42	545.047
7	25	793.273	7	18	649.951
8	42	887.902	8	25	733.41
9	55	1026.93	9	46	860.032
10	63	1139.8	10	24	958.098
11	74	1254.28	11	52	1050.45
12	73	1385.56	12	52	1150.19
13	41	1499.99	13	64	1245.83
14	48	1618.87	14	55	1355.08
15	27	1765.97	15	46	1435.68
16	32	1863.61	16	37	1549.13
17	26	1970.49	17	37	1637.6
18	23	2101.11	18	24	1776.52
19	41	2220.24	19	24	1848.24
20	21	2350.3	20	25	1928.91

Figura 5.25: Estatística para o valor do *lag* igual a 100 e 120 metros.

Assim, considerou-se que a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada mais bem representada pela geração aleatória de valores lognormalmente distribuídos com média e desvio padrão obtidos da amostra 1.

Com o intuito de gerar várias configurações espaciais da condutividade hidráulica saturada, utilizou-se a função estatística Random do Idrisi32. Desta forma, é possível fornecer ao modelo hidrológico distribuído variações espaciais diferentes da condutividade hidráulica saturada como apresentado no capítulo 6.

5.3 Precipitação

As informações relativas ao total precipitado e à sua variação no espaço foram obtidas pela instalação de cinco pluviógrafos semi-automáticos da Campbell Scientific, sendo cada posto dotado de 1 DataLogger CR10-X. O pluviógrafo utilizado é um medidor do tipo basculante e está ligado ao data logger através de um canal de pulso. Cada basculada do medidor corresponde a uma altura precipitada de 0,1 mm. Logo que bascula, fecha-se um contato que produz um impulso elétrico que é interpretado pelo logger e a informação é registrada.

Os locais para instalação dos postos foram selecionados de forma a cobrir toda a porção urbanizada da bacia.

A figura 5.26 mostra geograficamente os locais de medição de chuva.

Figura 5.26: Localização geográfica dos postos de medição de chuva.

As localizações dos postos na bacia do Gregório foram:

1. Estação 1 instalada ao sul da porção central da sub-bacia, interior ao sítio Bom Retiro.
2. Estação 2 instalada ao norte da porção central em área próxima à Faculdade de Direito de São Carlos.
3. Estação 3 instalada ao centro da sub-bacia em área pertencente ao posto de Saúde próximo à E.M.E.I João Batista Paim.
4. Estação 4 instalada no cruzamento da rua Major Manoel Antônio e Avenida Doutor Alfredo Maffei
5. Estação 5 instalada no cruzamento da rua Campos Sales e Avenida Doutor Alfredo Maffei.

Os postos 4 e 5 foram dotados de linígrafos no sentido de registrar as descargas em duas seções de controle. O sensor do nível de água é um transdutor de pressão. Pode-se dizer que é, essencialmente, uma saída de voltagem variável e proporcional à pressão da água no canal de drenagem. O transdutor de pressão contém dois elementos principais:

- A cápsula de pressão: consiste de um sensor diafragmas e de um sensor do tipo ponte gerando voltagens elétricas diferentes em resposta à pressão de água aplicada.
- Condutor de sinal: consiste em regular e amplificar as voltagens diferenciais.

Os postos pluviográficos e linigráficos entraram em operação no dia 7 de janeiro de 2000 e postos 1, 2 e 3 em 21 de janeiro de 2000. Todos os postos permaneceram em funcionamento até o início de abril de 2000.

Semanalmente, a coleta das informações foi realizada através da conexão do módulo de armazenamento ao logger. No laboratório, a transferência e visualização dos dados foram realizadas pelo software de interface PC208W da Campbell Scientific. O programa permite acessar os data loggers, recuperar e monitorar dados em tempo real.

As figuras 5.27 a 5.30 mostram os postos quando em funcionamento.

Figura 5.27: Posto pluviográfico instalado interior ao sítio Bom Retiro. Fonte: da autora.

Figura 5.28: Posto pluviográfico próximo a Faculdade de Direito de São Carlos. Fonte: da autora.

Figura 5.29: Posto pluviográfico próximo a E.M.E.I João Batista Paim. Fonte: da autora

Os postos pluviográficos e linigráficos tiveram a instalação do equipamento para medição de chuva cerca de 2.5 metros acima do solo a fim de evitar os inconvenientes atos de vandalismo.

Os totais precipitados durante o período de chuvas ficaram abaixo da média mensal no período entre 1981 e 1999 conforme mostra a tabela 5.13.

Figura 5.30: Postos pluviográficos e linigráficos ao longo do Córrego do Gregório: posto 4 à esquerda e posto 5 à direita.

Tabela 5.15: Total precipitado nos meses de janeiro a março de 2000.

Meses	Média entre 1981 e 1999 (Oliveira - 1999)	Total precipitado no ano de 2000
Janeiro	266	255
Fevereiro	214	170
Março	182	152

5.3.1 Eventos: variabilidade espacial pelo método multiquadrático

Durante o período de monitoramento, dez eventos foram considerados significativos e registraram altura média precipitada igual a 15 mm e duração aproximadamente igual a 60 minutos. Verificou-se, no ano de coleta que as chuvas foram caracterizadas por baixa intensidade e maior duração do que em outros anos.

Deste total de eventos, três são apresentados através de isoietas de chuva com resolução de 5 (cinco) minutos.

O método multiquadrático foi utilizado para interpolar as superfícies de chuva em virtude dos bons resultados encontrados para esse método nesse tipo de aplicação. (Kaviski e Krüger, 1993)

Implementou-se um algoritmo em FORTRAN tal que a estimativa no ponto foi obtida por:

$$Z_{estimado} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot d_{0i}$$

em que c_i é o coeficiente multiquadrático para cada posto i e d_{0i} é a distância euclidiana entre os postos de medição e o ponto estimado.

A partir de então foram geradas as superfícies com base nos pontos amostrais (posto 1,...5) e as isolinhas realçadas no Idrisi32.

As isoietas foram geradas para os eventos chuvosos ocorridos em 08/02/00, 11/02/00 e 08/03/00 e são mostradas nas figuras 5.31 a 5.66.

É interessante notar que durante o tempo de maior intensidade de precipitação, a variação da chuva é menor, o que pode ser visto nos gráficos das figuras 5.42, 5.54 e 5.66.

Figura 5.31. Isoietas no instante $t = 10$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.34. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.32. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.35. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.33. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.36. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.37. Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.40. Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.38. Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.41. Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.39. Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.42. Alturas pluviométricas médias observadas e $[Pm(t)/Pmm]$ e coeficientes de variação $.[Cv(t)/Cvm]$, em intervalos de 5min; $Pmm=1,96mm$ e $Cvm=0,38$.

Figura 5.43. Isoietas no instante $t = 10$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.44. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.45. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.46. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.47. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.48. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.49. Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.50. Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.51. Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.52. Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.53. Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 11/2/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.54. Alturas pluviométricas médias observadas e $[Pm(t)/Pmm]$ e coeficientes de variação $[Cv(t)/Cvm]$, em intervalos de 5 min; $Pmm=0,89mm$ e $Cvm=0,40$.

Figura 5.55. Isoietas no instante $t = 10$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.58. Isoietas no instante $t = 25$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.56. Isoietas no instante $t = 15$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.59. Isoietas no instante $t = 30$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.57. Isoietas no instante $t = 20$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.60. Isoietas no instante $t = 35$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.61: Isoietas no instante $t = 40$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.62: Isoietas no instante $t = 45$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.63: Isoietas no instante $t = 50$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.64: Isoietas no instante $t = 55$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.65: Isoietas no instante $t = 60$ min após o início da chuva ocorrida no dia 8/3/2000. Valores em décimos de mm.

Figura 5.66: Alturas pluviométricas médias observadas e $[Pm(t)/Pmm]$ e coeficientes de variação $[Cv(t)/Cvm]$, em intervalos de 5 min; $Pmm=1,17mm$ e $Cvm=0,54$

5.4 Medição de Vazão

Os pontos de medição do nível d'água estão localizados a uma distância entre si de cerca de 550 metros ao longo do córrego do Gregório.

A área de drenagem do posto de medição no exutório da sub-bacia corresponde aos já referidos 10,21 km².

A estação logo a montante drena uma área de aproximadamente 9 km² dos quais 3 km² referem-se à área urbana da sub-bacia.

A obtenção dos hidrogramas de cheia previu o levantamento da curva-chave das seções de controle referentes aos postos de medição 4 e 5.

Sendo assim, realizou-se a medição direta de vazão na seção 5 com a utilização de molinete de eixo horizontal e lastro de 50 kg. Durante as medições procurou-se obter valores de vazão para níveis d'água mais altos a fim de se evitar as dificuldades na extrapolação da curva.

Não foi possível efetuar, neste trabalho, o levantamento da curva-chave para a seção correspondente ao posto 4.

A figura 5.67 mostra os pontos obtidos e a linha de tendência da curva. As medições de velocidade encontram-se no Anexo D.

Figura 5.67: Curva-chave no exutório da sub-bacia do córrego do Gregório.

As figuras 5.68 a 5.70 mostram alguns dos hidrogramas observados.

Figura 5.68: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 08/02/00 (ver figura 5.9 p.63).

Tabela 5.16: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 08/02/00 (ver figura 5.9 p.63).

h (mm)	Posto 1	Posto 2	Posto 3	Posto 4	Posto 5
no tempo considerado	25.70	39.40	28.00	27.20	25.40
no tempo de pico	17.30	31.60	19.90	19.50	17.40
Descarga máxima (m3/s)	51

Figura 5.69: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 11/02/00 (ver figura 5.9 p.63).

Tabela 5.17: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 11/02/00 (ver figura 5.9 p.63).

h (mm)	Posto 1	Posto 2	Posto 3	Posto 4	Posto 5
no tempo considerado	16.6	17.5	14.3	11.6	10.9
no tempo de pico	11.1	11.4	7.8	6.2	5.7
Descarga máxima	(m3/s) 15.06

Figura 5.70: Hidrograma de cheia observado para o evento ocorrido em 8/03/00 (ver figura 5.9 p.63).

Tabela 5.18: Total precipitado nos postos de medição para o evento de 08/03/00 (ver figura 5.9 p.63).

h (mm)	Posto 1	Posto 2	Posto 3	posto 4
no tempo considerado	37.00	41.30	38.90	35.70
no tempo de pico	9.60	0.00	10.40	12.90
Descarga máxima	(m ³ /s)	28.00		

Após o período de monitoramento, os linígrafos foram empregados de forma a registrar o nível d'água em duas vias públicas com declividades distintas.

O projeto executado constou de uma caixa aberta na guia da calçada com profundidade igual a 50 cm. Instalou-se o sensor de nível d'água nesse abrigo aproximadamente 25 cm acima do fundo da caixa.

O pequeno reservatório formado abaixo do linígrafo teve como finalidade guardar os sedimentos carreados pela águas pluviais permitindo que o aparelho funcionasse corretamente.

O fato do terreno do Fórum abranger duas vias (Avenida Alfredo Maffei e Rua São Paulo) com declividades bem diferentes, além de oferecer segurança aos equipamentos, o fez melhor local para efetuar-se as referidas medições.

No período de novembro de 2001 a janeiro de 2002 foram monitorados os escoamentos em sarjeta nas vias que ladeiam o Fórum.

As figuras 5.71 a 5.75 mostram o projeto executado e os locais de instalação dos equipamentos.

A definição da área de contribuição de cada um dos pontos monitorados não foi muito simples. O volume d'água escoado que chega até esses locais de medição depende muito da capacidade das bocas de lobo situadas a montante.

Considerou-se para estimativa da área de contribuição que todo o volume de água propagado até as bocas de lobo seria escoado pelas galerias. Assim, a área de contribuição para o ponto 2 foi estimada em 6,22 ha.

As figuras 5.76 a 5.78 mostram a variação do perfil d'água com a precipitação.

Figura 5.71 : Primeiro local de medição dos escoamentos em sarjeta situado em frente ao Fórum de São Carlos. Do lado esquerdo da foto vê-se o córrego do Gregório. Dez/2001 Foto: da autora.

Figura 5.72: Segundo local de medição dos escoamentos em sarjeta localizado no lado esquerdo da via pública em frente à entrada lateral do fórum. Dez/2001. Foto da autora.

Figura 5.73 : Instalação do linígrafo com cabeamento sob a calçada. Na foto, pode-se notar o acúmulo de sedimentos no reservatório projetado. Foto: da autora.

Figura 5.74: Local de medição na encosta que dá acesso ao fórum pela Rua São Paulo. Na foto, nota-se a medição à montante da boca de lobo. Foto da autora.

Figura 5.75: Instalação dos dataloggers e pluviógrafo no terreno do fórum de São Carlos. Nota-se a instalação do pluviógrafo no alto da torre metálica. Foto: da autora.

O cálculo da vazão máxima escoada na sarjeta foi realizado com base na equação de Manning modificada por Izzard, considerando-se o seguinte perfil transversal levantado em campo: largura da rua = 8 metros; largura do passeio = 1.20 metros; declividade transversal = 9,5 %; declividade longitudinal = 0,06 m/m; altura da guia igual a 0,15 cm. O coeficiente de Manning adotado foi igual a 0,016.

A vazão máxima conduzida pela sarjeta sem transbordamento foi estimada em $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$.

As vazões foram estimadas somente para o ponto 2 uma vez que foram mais significativas e, também, pela alteração do funcionamento normal do linígrafo no ponto 1 durante um evento chuvoso.

Figura 5.76: Variação do nível d'água na entrada do Fórum pela Rua São Paulo. Evento chuvoso em 22/11/01. Vazão = $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.77: Registro da variação do nível d'água nos dois pontos de medição. Vazão = $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$.

Infelizmente não foram registrados eventos que pudessem dar boas estimativas do coeficiente de escoamento superficial. Numa tentativa de se efetuar esse cálculo, foi considerada uma altura média de chuva para o evento complexo de 22/11/2001, obtendo-se um coeficiente de escoamento irreal maior do que a unidade.

Em pesquisas futuras, seria interessante prolongar o período de monitoramento e aumentar o número de pluviógrafos a fim de se estudar os coeficientes de escoamento em pequenas áreas urbanas.

Figura 5.78: Variação da altura do escoamento na sarjeta obtida para o ponto 2. Data:19/12/01. Vazão = 0,62 m³/s (descontando-se a lâmina d'água de 6cm que não é devido à precipitação ocorrida como verificado em dias não chuvosos).

6. ESTUDO TEÓRICO

Neste trabalho, apresentam-se o desenvolvimento de um modelo hidrológico distribuído e análises de incerteza dos hidrogramas de cheia quanto à distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada do solo e da precipitação. A concepção do modelo parte da premissa de que toda a área da bacia possa ser representada por células derivadas de um Modelo Numérico de Terreno (MNT). Em cada célula é especificado o equacionamento hidráulico - hidrológico e são propagados os escoamentos para as células de jusante.

Os estudos das heterogeneidades espaciais dos parâmetros do solo e da precipitação foram realizados através da simulação de diferentes distribuições espaciais com consideração da resolução do MNT.

6.1 Formulação matemática do modelo de simulação hidrológica

A premissa básica do modelo de simulação hidrológica considera que a bacia hidrográfica é representada por células regulares derivadas de um modelo numérico de terreno (MNT) nas quais o balanço hídrico é realizado.

A figura 6.1 mostra uma bacia hipotética aproximada por duas malhas regulares conforme a concepção do modelo de simulação hidrológica. Os tamanhos diferentes das células mostram que o modelo pode operar com qualquer grau de resolução desejada. A resolução adotada deve ser compatível com a complexidade

da área e, desta forma, facilitar a caracterização de elementos estruturais que influenciam o processo de drenagem em áreas urbanas.

Figura 6.1: Bacia hipotética aproximada por malhas regulares com resoluções distintas.

Para cada elemento da malha, a equação da continuidade é utilizada e expressa por:

$$(Q_a - Q_e) + q_{ch} - q_{inf} = (\Delta V / \Delta t) \quad 6.1$$

Sendo V o volume armazenado; Q_a a vazão afluyente média no intervalo Δt ; Q_e a vazão efluente; q_{ch} a vazão de entrada devido à precipitação direta no intervalo Δt ; q_{inf} a vazão média infiltrada.

Conforme a classificação do tipo da célula, relaciona-se a vazão efluente com o volume de água armazenado na célula por meio de uma relação funcional, que pode ser composta por uma equação ou por um sistema de equações.

Para as células independentes das condições de jusante (condição cinemática), os escoamentos são considerados de forma que a vazão efluente em cada elemento seja função apenas do volume armazenado neste elemento, ou seja:

$$Q_e = f[V] \quad 6.2$$

Em que Q_c e V têm os mesmos significados já mencionados.

Admite-se que os escoamentos na parte urbanizada da bacia ocorrem em dois planos, um superior e outro inferior, com mesma resolução da malha, nos quais se efetua, respectivamente, a modelagem dos escoamentos em sarjetas e galerias pluviais. Cada um desses planos é entendido pelo modelo como uma matriz de valores referentes às características espaciais representadas na bacia hidrográfica.

A figura 6.2 mostra esquematicamente a representação da área urbana conforme o modelo de simulação.

Figura 6.2: Configuração da área urbana conforme padrão de representação do sistema hidrológico.

Para o plano superior (PS), considera-se que os escoamentos provenientes de superfícies permeáveis (praças, quintais e jardins) e impermeáveis (telhados, estacionamentos) contribuem para as ruas, seguindo o caminho definido pela maior declividade do terreno. Quando os escoamentos alcançam uma célula de rua com bueiro(s), a propagação da vazão passa para o plano inferior (PI) de escoamento. Na rede pluvial, a vazão é propagada para jusante, recebendo contribuições de todas as células com bueiro(s) ao longo do sistema de galerias pluviais.

O modelo é estruturado de forma a se considerar os processos de retenção superficial, infiltração, escoamentos de superfície e galerias pluviais, os quais são propagados até alcançarem os canais de drenagem. A figura 6.3 mostra graficamente a consideração do balanço hídrico em cada célula do modelo.

Figura 6.3: Representação gráfica do balanço hídrico em cada célula do modelo. As direções da vazão afluyente e efluente são explicativas, sendo que a primeira pode ocorrer em até sete direções e a segunda em apenas uma. (Adaptado de Smith – 1993).

Em cada intervalo de tempo, determinam-se os volumes de água armazenados superficialmente, infiltrado e escoado para as células vizinhas ou para as células correspondentes ao sistema de galerias pluviais.

6.1.1 Sub-Modelo de Detenção Superficial

A detenção superficial é modelada através da equação de decaimento exponencial de LINSLEY (1949) :

$$V = A_d \left(1 - \exp \left(- \frac{P - F}{A_d} \right) \right) \quad 6.3$$

Em que 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 (MACHADO - 1981), tem-se:

$$(i - f_r) - \tau = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{A_c} \quad 6.4$$

onde: i é a intensidade de precipitação (L/T); f_r é a taxa de infiltração (L/T); τ é a taxa de suprimento de escoamento de superfície (L/T) e dV/dt corresponde à variação do volume armazenado em relação ao tempo (L³/T); A_c é área da célula (L²).

Tomando-se transformações matemáticas envolvendo as duas equações anteriores, a equação de retenção superficial em função da altura d'água disponível para escoamento pode ser expressa por:

$$y_2^{n+1} = y_1^{n+1} \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{P - F}{A_d} \right) \right) \quad 6.5$$

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 :

$$y_1^{n+1} = (i - f_r)^{n+1} \cdot \Delta t \quad 6.6$$

6.1.2 Sub-Modelo de Infiltração

O processo de infiltração é modelado segundo a equação de Green e Ampt e expressa por :

$$f_t = K \times \left(\frac{\phi_f \times \Delta \theta}{F_t} + 1 \right) \quad 6.7$$

em que f_t é a taxa de infiltração (L/T) para o tempo t , K é condutividade hidráulica saturada (L/T), ϕ_f é o potencial da frente de sucção (L), $\Delta \theta$ é o déficit de umidade do solo (porosidade efetiva menos o teor de umidade inicial), e F_t é a infiltração acumulada (L). Para a equação de infiltração, K é multiplicado por um parâmetro α afim de levar em conta o aprisionamento de ar no solo.

Durante a modelagem temporal da infiltração, considera-se o cálculo de dois parâmetros, C_{si} e C_{ci} , que especificam a condição de encharcamento da superfície do solo a partir dessa informação obtida no tempo anterior (Righetto -1998).

A altura d'água disponível para infiltração, $H(t)$, no instante de tempo t é expressa por:

$$H(t) = i \cdot \Delta t + \frac{\sum Vazões_{entrada}}{área_{célula}} \cdot \Delta t + H(t-1) \quad 6.8$$

Tem-se as seguintes condições para o cálculo da taxa de infiltração no intervalo compreendido entre $t-1$ e t :

- Quando $H(t-1)=0$ então,

$$C_{si} = P(t) - V_e(t-1) - \frac{K \cdot \varphi_f \cdot \Delta\theta}{i(t) - K} \quad 6.9$$

em que $P(t)$ é a precipitação acumulada no tempo t ; $V_e(t-1)$ é o volume acumulado escoado no instante $t-1$ e $i(t)$ é a intensidade de precipitação no instante t ; K , φ_f e $\Delta\theta$ têm os mesmos significados descritos anteriormente.

Para a condição de inundação da superfície, o valor de C_{si} é maior do que zero.

- Quando $H(t-1) > 0$ então,

$$C_{ci} = P(t) - V_e(t-1) - F_{ci}(t) \quad 6.10$$

Sendo F_{ci} calculado pela equação:

$$F_{ci}(t) - \varphi_f \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left[1 + \frac{F_{ci}(t)}{\varphi_f \cdot \Delta\theta} \right] = K \cdot (t - t_{in} + t_t) \quad 6.11$$

em que t_{in} é o tempo de inundação calculado através da análise dos parâmetros C_{si} e C_{ci} após a subdivisão do passo de tempo estabelecido; t_t é o tempo de translado, calculado pela expressão:

$$t_t = \left\{ P(t_{in}) - V_e(t_{in}) - \varphi_f \cdot \Delta\theta \ln \left[1 + \frac{P(t_{in}) - V_e(t_{in})}{\varphi_f \cdot \Delta\theta} \right] \right\} / K \quad 6.12$$

Verificado o estado da superfície, o cálculo da infiltração acumulada é realizado por $F(t) = F(t-1) + i(t) \cdot \Delta t + \frac{\sum vazões_{entrada}}{área_{célula}} \cdot \Delta t + H(t-1)$, para a condição da superfície sem encharcamento; no caso de alagamento da superfície, a infiltração acumulada é calculada por $F(t) = F_{ci}(t)$.

No tempo inicial, considera-se que o valor da infiltração acumulada é zero; para um instante t , obtém-se F_t , e em seguida a taxa de infiltração f_t .

6.1.3 Sub-Modelo de Precipitação

A precipitação é a informação hidrológica conhecida em todos os instantes de tempo.

O modelo considera a variabilidade espacial da chuva através dos métodos de interpolação multiquadrática e inverso da distância. Para a área da bacia hidrográfica abrangida pelos postos de medição de chuva, o cálculo da altura precipitada dá-se pela superfície multiquadrática; aplica-se o método do inverso da distância para o restante da área de estudo.

Os métodos multiquadrático e inverso da distância são expressos, respectivamente, pelas equações 6.13 e 6.14 (Kaviski e Krüger, 1993):

$$p_0 = \sum_{i=1}^n c_i \cdot r_{0i} \quad 6.13$$

em que n é o número de estações; c_i é o coeficiente multiquadrático do ponto amostral (x_i, y_i, h_i) , r_{0j} é a distância entre os pontos (x_0, y_0, h_0) e (x_i, y_i, h_i) ; p_0 é a estimativa da altura precipitada. Os pesos c_i são calculados através da resolução do sistema linear obtido da substituição dos pontos observados na equação 6.13.

$$p_0 = \sum_{i=1}^n c_i \cdot p_i \quad 6.14$$

sendo os pesos c_i aplicados aos pontos observados e calculados pela expressão:

$$c_i = \frac{1}{r_{0i}^2} \bigg/ \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{oj}^2} \quad 6.15$$

Levando-se em consideração que a obtenção destas informações são bastante esparsas, o modelo possibilita a entrada de chuva constante no espaço e tempo.

6.1.4 Sub-Modelo Escoamento superficial

O mecanismo de geração dos escoamentos superficiais considera que:

- A chuva efetiva em uma célula impermeável corresponde à altura da chuva menos as perdas por armazenamento em depressões.
- As células permeáveis geram escoamentos se a intensidade da chuva for maior do que a capacidade de infiltração do solo.

A fim de considerar vários de padrões de escoamentos e tornar mais realística a representação do sistema, o modelo é formulado para os seguintes tipos de células:

6.1.4.1 Células de encosta

Esse tipo de célula não considera os efeitos de jusante e atua como elemento de propagação dos escoamentos gerados na célula e provenientes das áreas de montante. Dependendo da resolução do modelo, pode-se encontrar células de

encosta com padrões de escoamento para superfícies permeáveis e impermeáveis (telhados, estacionamentos e ruas pavimentadas).

A modelagem de geração e propagação dos escoamentos em superfícies impermeáveis e permeáveis é realizada a partir das equações de conservação da massa e quantidade de movimento (equação de *Manning* para canais largos). Esse equacionamento é similar ao apresentado por Smith (1993) que, por sua vez, é fundamentado no módulo de escoamento do *Storm Water Management Model* e expresso por:

$$h_2 = h_1 + (p - f)\Delta t + \left(\frac{\sum Q_{\text{afluente}}}{A_{\text{célula}}} - \frac{Q_{\text{efluente}}}{A_{\text{célula}}} \right) \cdot \Delta t \quad 6.16$$

em que h_2 e h_1 são as alturas d'água na célula no final e no início do passo de tempo, respectivamente; p é a intensidade de precipitação; f é a taxa de infiltração; $\sum Q_{\text{afluente}}$ é a contribuição das células vizinhas de montante; $A_{\text{célula}}$ é a área da célula e Δt é o intervalo de tempo. Para superfícies impermeáveis a taxa de infiltração é igual a zero em todos os passos de tempo.

A equação utilizada para cálculo da vazão efluente é expressa por:

$$Q_{\text{efluente}} = (h_2 - d)^{5/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \text{resolução} \quad 6.17$$

em que d é a altura da retenção superficial; S_0 é a declividade superficial da célula; η é o coeficiente de rugosidade de Manning; *resolução* é a largura da célula.

A introdução da expressão de Q_{efluente} na equação da continuidade resulta numa equação não-linear que é resolvida pelo método de Newton. Assim, tem-se:

$$F(h_2) = -h_2 + h_1 + (p - f) \cdot \Delta t + \frac{\sum Q_{afluente}}{A_{celula}} \cdot \Delta t - \frac{b^{5/3} \cdot S_0^{1/2}}{\eta \cdot resolução} \cdot \Delta t \quad 6.18$$

Em que $F(h_2)$ é o nome a função; b é igual a $\frac{h_2 + h_1}{2} - d$.

Para as células pertencentes à rede de drenagem, a equação para o cálculo da vazão efluente é expressa por:

$$Q_{efluente} = \frac{((h_2 - d) \cdot resolução)^{5/3}}{(2 \cdot (h_2 - d) + resolução)^{2/3}} \cdot S_0^{1/2} \cdot \frac{1}{\eta} \quad 6.19$$

6.1.4.2 Células tipo Galeria:

A propagação dos escoamentos nas galerias pluviais é realizada por um esquema simples de propagação para as células de jusante: considera-se o deslocamento da massa líquida no intervalo de tempo, Δt , estimado a partir dos dados de velocidade à seção plena, V_{plena} , sem efeitos de jusante.

Dessa forma, a vazão é propagada para uma célula de galeria de jusante até que deslocamento seja cumprido. No entanto, se a contribuição de vazão alcançar a rede de drenagem antes do passo de tempo ter sido atingido, a contribuição de vazão é computada para a célula de canal no instante de tempo seguinte.

No modelo, não são considerados os escoamentos sob pressão. Desta forma, excedida a capacidade de engolimento da boca de lobo, apenas a vazão correspondente à capacidade da galeria é conduzida e o restante esco superficialmente.

As declividades das células de galerias são consideradas iguais às declividades do terreno. Entretanto, tendo-se em vista que nos projetos de drenagem a declividade mínima é aproximadamente igual a 1%, não se admite declividade menor do que esse valor.

6.1.4.3. Células tipo boca de lobo.

A ligação dos escoamentos em superfície à rede de galerias pluviais se dá através das células identificadas como bueiros. A vazão de entrada para o sistema de galerias é calculada considerando-se as equações para as condições de funcionamento como vertedor e orifício para as lâminas d'água de até 12 cm e maior do que 12 cm, respectivamente (Miguez e Mascarenhas, 1999). Os coeficientes usados nessas equações foram retirados da literatura.

➤ Funcionamento como vertedor:

$$Q = N_{\text{bueiro}} \cdot 1,71 \cdot L \cdot h_2^{3/2} \quad 6.20$$

sendo N_{bueiro} o número de bueiros na célula; L comprimento da soleira;

➤ Funcionamento como orifício:

$$Q = N_{\text{bueiro}} \cdot 0,7 \cdot A_{\text{bueiro}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \quad 6.21$$

sendo $A_{\text{bueiro}} = L \cdot l_g$ a área do orifício (l_g : altura da abertura na guia da calçada); g a aceleração da gravidade.

6.1.4.4. Equacionamento para grupos de células de rio situadas abaixo da cota de inundação.

O esquema adotado é fundamentado no trabalho de Miguez e Mascarenhas (1999). Para as células do tipo rio situadas abaixo da cota de inundação da área de estudo, a equação 6.16 é reescrita. Alterando-se o último termo passa a ser expressa por:

$$z_{2,i} = z_{1,i} + (p - f) \Delta t + \frac{\sum Q_{encosta}}{Area_{celula}} \cdot \Delta t + \frac{\sum_k Q_{i,k}}{Area_{celula}} \cdot \Delta t \quad 6.22$$

em que $z_{j,i}$ é a cota do nível d'água da célula i ; $Q_{i,k}$ é a vazão de transferência entre a célula i e uma célula k adjacente à célula i , considerada positiva da célula k para a célula i ; $Q_{encosta}$ é a vazão, no tempo de cálculo, que entra na célula i quando esta tem interface com áreas de montante do tipo encosta.

A equação é resolvida considerando-se $Q_{i,k}$ escrita no tempo de cálculo, o que resulta em um esquema implícito e incondicionalmente estável. A fim de evitar resolver um sistema de equações não lineares, a vazão de troca entre as células para o instante de cálculo, $Q_{i,k,2}$, é desenvolvida em série de Taylor desprezando-se os termos de maior ordem (Miguez e Mascarenhas, 1999).

Assim,

$$\begin{aligned} z_{2,i} = z_{1,i} + (p - f) \Delta t + \frac{\sum Q_{encosta}}{Area_{celula}} \cdot \Delta t + \frac{\sum_k Q_{i,k,1}}{Area_{celula}} \cdot \Delta t + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k,1}}{\partial z_i} \cdot (z_{2,i} - z_{1,i}) \cdot \frac{\Delta t}{Area_{celula}} + \dots \\ \dots + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k,1}}{\partial z_k} \cdot (z_{2,k} - z_{1,k}) \cdot \frac{\Delta t}{Area_{celula}} \end{aligned} \quad 6.23$$

O valor de $Q_{i,k}$ é calculado pela equação 6.19, modificada de forma a considerar como aproximação da declividade da linha de energia a seguinte expressão:

$$S_f = \frac{\Delta h + \Delta Z_f}{\Delta x} \quad 6.24$$

em que Δh é a diferença de profundidade d'água entre os centros das células; ΔZ_f é a diferença entre as cotas de fundo das células e Δx é a distância entre os centros das células.

Segundo Miguez e Mascarenhas (1999), a equação 6.19 é aplicada considerando-se o valor de b como uma ponderação entre os valores nas células i e k e substituindo S_0 por $(|z_k - z_i|)^{1/2} / \Delta x^{1/2}$. O termo que indica se $Q_{i,k}$ entra na célula i (vazão positiva) ou sai da célula (vazão negativa) é obtido multiplicando-se a vazão pelo termo $(z_k - z_i) / (|z_k - z_i|)$.

O equacionamento das células abaixo da cota de inundação resulta em um sistema cuja matriz é esparsa e resolvido através de algoritmo iterativo para solução de sistemas lineares.

6.2 Esquema topológico do modelo

A representação do sistema hidrológico por uma malha regular leva à utilização de modelo numérico de terreno em formato matricial para definição dos escoamentos conforme a topografia da área.

O modelo hidrológico deste trabalho, escrito em linguagem FORTRAN, é vinculado ao *software* comercial Idrisi32, desenvolvido pela Clark University, no sentido de tornar compatível o banco de dados do modelo com o formato das imagens geradas e editadas pelo Sistema de Informação Geográfica. O *software* do SIG é utilizado para associar valores de atributos correspondentes às estruturas hidráulicas e parâmetros hidráulicos – hidrológicos. Por exemplo, para a imagem

gerada a partir da rede de galerias pluviais, os identificadores de cada célula, ou *pixel*, são relacionados aos diâmetros das galerias.

A tabela 6.1 mostra as imagens em formato raster e vector necessárias à execução do modelo de simulação hidrológica. Embora possa parecer uma tarefa difícil a obtenção desse banco de dados, as imagens são geradas com relativa facilidade no sistema de informação geográfica.

Tabela 6.1: Entrada de dados para o modelo distribuído

	Resolução da imagem ≤ 10 metros	Resolução da imagem > 10 metros
1) Hidrografia (vetor e raster)	Sim	Sim
2) Rede de galerias (vetor e raster), bocas de lobo (vetor)	Sim	Não
3) Uso e ocupação do solo (raster)	Sim	Sim
4) Modelo numérico de terreno (raster)	Sim	Sim
5) Sistema viário (raster)	Sim	Não
6) Estações pluviográficas (vetor)	Sim	Sim
7) Locais em que se deseja obter os hidrogramas (vetor)	Sim	Sim
8) Imagem auxiliar para interpolação da chuva (raster) e limite da bacia hidrográfica (raster)	Sim	Sim

Inicialmente, o modelo verifica as contribuições entre as células com a consideração de até oito possíveis direções de escoamento. Nesta etapa, verifica-se a existência de células de acúmulo de água que podem surgir devido aos erros de

interpolação do modelo numérico de terreno. A correção é realizada atribuindo-se o valor da célula que apresenta menor desnível em relação à célula que será modificada. O procedimento é semelhante ao apresentado por Collischonn et al (2001). Uma vez que o modelo simula os escoamentos em áreas urbanas, a formulação desse algoritmo incluiu condições que priorizam a direção dos escoamentos no sentido dos lotes para as ruas.

A partir de então, o sistema de drenagem é verificado, tanto no formato vetor quanto no formato de células, e uma correspondência espacial é realizada entre esses formatos, determinando-se a partir da posição geográfica no formato vetor qual o respectivo elemento matricial. Por exemplo, um ponto com abscissa igual a x_p localiza-se na coluna obtida pela divisão inteira entre x_p e $x_{\min}$ pela resolução do modelo, sendo $x_{\min}$ o valor mínimo do eixo das abscissas. O mesmo é feito para as ordenadas dos pontos e, desta forma, têm-se a sua localização na imagem.

Os trechos de canais com formato vetor são ordenados de montante para jusante e através da respectiva imagem raster é produzido um novo vetor de células de drenagem conectadas segundo a topografia. Nesse passo do modelo, são conhecidas as células inicial e final de cada trecho, obtidas através de correspondência semelhante a que foi descrita, e, desta forma é executado um algoritmo de busca até que a célula final seja alcançada.

Verificação semelhante à acumulação de água é conduzida automaticamente pelo modelo numa área de buffer do sistema de drenagem a fim de solucionar problemas devido aos erros RMS (root-mean-squar error) diferentes que podem surgir da digitalização das cartas topográficas e da rede de drenagem. Mesmo que os valores RMS para as duas imagens sejam menores do que o valor máximo recomendado, pode haver pequenas distorções e, conseqüentemente, a rede de drenagem não se sobrepõe exatamente às células com as menores altitudes do fundo de vale do MNT. O algoritmo evita que as áreas acumuladas que contribuem para cada célula da rede de drenagem sejam determinadas erroneamente. Ressalta-

se que essa correção torna-se necessária quando a resolução do modelo é alta (maior número de pixels por imagem).

O próximo passo do modelo é estabelecer a conectividade entre as células da bacia que tem início com o vetor das células de canal já ordenadas. A partir da primeira célula de canal, $C_{r,1}$, e através da direção de fluxo estabelecida, procura-se a primeira célula que não tem contribuição de montante especificada por $C_{m,1}$, em que o índice 1 refere-se a $C_{r,1}$. $C_{m,1}$ é a primeira célula armazenada num vetor seqüencial para o cálculo do balanço hídrico.

A figura 6.4 mostra uma primeira célula de rio hipotética e as células que podem contribuir para essa célula dependendo da direção de fluxo.

Figura 6.4: Área de contribuição para célula inicial de canal fictício. O cálculo dos escoamentos superficiais é efetuado a partir das células de montante até alcançar a célula de rio.

A segunda célula do vetor seqüencial é encontrada fazendo-se o caminho de volta, ou seja, a célula a jusante de $C_{m,1}$, definida por $C_{j,m1}$, passa a ser a célula analisada. Procede-se para essa célula como descrito para a primeira célula de rio, $C_{r,1}$: procura-se uma célula sem contribuição de montante e cujos escoamentos alcançam $C_{j,m1}$. Esta célula pode ser definida por $C_{m,jm1}$ e passa a ser a segunda célula computada. A partir de então se analisa a célula jusante de $C_{m,jm1}$. Esse loop é mantido até que a célula de jusante da célula de rio, $C_{r,1}$, seja encontrada. Esse passo é repetido para todas as células de rio.

6.3 Aplicação

Apresentam-se os resultados referentes a cada etapa de simulação do modelo e aos procedimentos de calibração.

Para ajuste do modelo foram considerados os eventos registrados no período de janeiro a março de 2000 na bacia urbana do Córrego do Gregório (capítulo 5 e Anexo B).

As primeiras imagens geradas pelo modelo evidenciaram o bom desempenho do algoritmo utilizado na determinação da direção dos escoamentos da bacia hidrográfica. Os resultados para a resolução igual a 10, 50 e 100 metros são mostrados nas figuras 6.5 a 6.11.

A comparação das figuras 6.5 e 6.7 evidencia a capacidade do modelo em integrar as informações derivadas do modelo numérico de terreno e sistema viário. Para as resoluções maiores do que 10 metros, os resultados inserem-se na condição mais simples, na qual não é considerada a influência da área urbana. Também nesses casos, a rotina computacional mostrou definir bem a direção dos escoamentos.

Figura 6.5: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 10 metros. O detalhe mostra a concentração dos escoamentos nas vias urbanas.

A área localizada à sudoeste da bacia hidrográfica mostra que os escoamentos nas vias urbanas não são expressivos: o escoamento ocorre nessas vias mas em quantidade menor que em outros pontos da área. Oliveira (1999) apresenta duas áreas de concentração de águas nessa região que coincidem com os fluxos dos escoamentos estabelecidos pelo modelo (ver detalhe figura 6.7). Desta forma, pode-se dizer que a rotina computacional opera de forma eficiente. A tabela 6.2 resume os locais de concentração de águas (Oliveira, 1999).

Tabela 6.2: Regiões de concentração de águas segundo Oliveira (1999)

Área de concentração 1	Baixo curso posicionado ao lado direito da Av. Gregório Aversa
Área de concentração 2	Área próxima à rua Pedro Bianck atravessando a rua Germiniano Fher Junior
Área de concentração 3	Início na rua Enéas Camargo, entre as ruas Marcolino Lopes Barreto e Major Manoel Antonio Matos

Figura 6.6: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 10 metros)

Figura 6.7: Sistema de vias urbanas referente à sub-bacia do Córrego do Gregório, São Carlos, SP. As áreas selecionadas indicam as regiões próximas aos locais de concentração de águas conforme Oliveira (1999)

Figura 6.8: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 50 metros.

Figura 6.9: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 50 metros)

Figura 6.10: Drenagem da área de estudo gerada pelo modelo de simulação hidrológica, considerando-se a resolução igual a 100 metros.

Figura 6.11: sub-bacias geradas pelo modelo de simulação hidrológica. (resolução igual a 100 metros)

6.3.1 Ajuste do modelo de simulação

Uma vez que as equações que representam os processos físicos são desenvolvidas em escala menor do que a escala de simulação, há necessidade de calibrar os modelos ajustando-se os valores dos parâmetros presentes nessas equações.

Considera-se o processo de calibração manual pelo método de tentativa e erro. A cada especificação do conjunto de parâmetros, são analisados os seguintes indicadores de qualidade de calibração:

- ❑ Correlação: admitiu-se que os dados observados e simulados são bem correlacionados quando o valor encontrado na equação 6.25 for igual ou maior que 0,7. Quanto mais próximo da unidade melhor o ajuste (Almeida, 2002).

$$R = \frac{n \cdot \sum_1^n Q_{obs} \cdot Q_{sim} - \sum_1^n Q_{obs} \cdot \sum_1^n Q_{sim}}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_1^n Q_{obs}^2 - \left(\sum_1^n Q_{obs} \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_1^n Q_{sim}^2 - \left(\sum_1^n Q_{sim} \right)^2 \right]}} \quad 6.25$$

- Função ISE (*Integral Square Error*): procura-se minimizar a diferença entre os valores observados e calculados (equação 6.26) e avaliada pelos valores da tabela 11 (Smith e Vidmar, 1993):

$$ISE = \frac{\left[\sum_1^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2 \right]^{1/2}}{\sum_1^n Q_{obs}} \cdot 100 \quad 6.26$$

Para as duas equações anteriores, n significa o número de passos de tempo de simulação; Q_{obs} e Q_{sim} , as vazões observadas e simuladas para cada intervalo de tempo.

Tabela 6.3 : Indicador de qualidade do ajuste na calibração em função do valor ISE.

ISE (Percentual)				Classificação
0 <	ISE	≤	3,0	Excelente
3,0 <	ISE	≤	6,0	Muito boa
6,0 <	ISE	≤	10,0	Boa
10,0 <	ISE	≤	25,0	Satisfatória
25 <	ISE			Fraca

A fim de analisar o comportamento do modelo, foram considerados três tamanhos diferentes para a malha e iguais a 10, 50 e 100 metros, obtendo-se as

imagens descritas na tabela 6.1. A tabela 6.4 mostra o número de compartimentos regulares em que se efetua o balanço hídrico para cada resolução da malha.

Tabela 6.4: Total de células da bacia e rede de drenagem.

Resolução	Número de células da bacia	Número de células do tipo rio
10 metros	102141	1277
50 metros	4091	304
100 metros	1016	164

Os primeiros testes com o modelo foram realizados considerando-se intensidades de chuva constantes e condição de impermeabilização da sub-bacia do Gregório. Essas simulações apresentaram bons resultados quanto à vazão de pico esperada. Para a resolução igual a 10 metros, o modelo mostrou-se eficiente em vincular os escoamentos entre sub-bacias através da rede pluvial: a galeria situada junto à rua Raimundo Correia realiza essa função, conduzindo os fluxos de água gerados à montante da galeria para jusante da sub-bacia do córrego do Gregório.

A fase de calibração do modelo consistiu na especificação dos parâmetros de umidade inicial do solo e rugosidade da rede de drenagem e de superfície, de forma a obter um bom ajuste aos dados observados. Essa etapa foi realizada a partir das imagens obtidas para a resolução mais alta do modelo, 10 metros, na qual são consideradas todas as estruturas de microdrenagem existentes na sub-bacia (bocas de lobo, rede pluvial, sarjetas).

A condutividade hidráulica do solo é um valor conhecido para toda a área, obtida através de campanhas de medições em campo realizadas durante a fase experimental deste trabalho.

A tabela 6.5 apresenta uma comparação simples dos eventos que foram utilizados na calibração do modelo. Inicialmente, o total precipitado foi calculado considerando-se a uniformidade da chuva sobre a área de estudo.

Comparando-se os volumes precipitados e escoados, apresentados na tabela 6.5, fica evidenciada a não linearidade do processo de transformação chuva-vazão. Estas diferenças foram atribuídas às condições antecedentes de umidade do solo e à variabilidade espacial da precipitação.

Tabela 6.5: Comparação dos eventos ocorridos no período chuvoso de 2000 e estimativa do coeficiente de escoamento superficial.

Data	Hietograma		Volume	Hidrograma		Coef. Escoamento Superficial
	Altura (mm)	Imax (mm/h)		Vazão max (m3/s)	Volume m3	
.31/01/2000	20.80	60.00	212368	21.49	44470	0.21
.01/02/2000	12.60	64.80	128646	21.29	30023	0.23
.08/02/2000	20.60	81.60	210326	49.22	136409	0.65
.11/02/2000	10.50	31.20	107205	14.76	52022	0.48
.12/02/2000	7.70	27.60	78618	14.04	38146	0.48
.13/02/2000	10.40	26.40	106184	9.09	26825	0.25
.19/02/2000	10.60	43.20	108226	6.34	9146	0.08
.01/03/2000	27.40	62.40	264493	32.90	126755	0.45
.08/03/2000	16.90	60.00	172549	28.11	79830	0.46
.11/03/2000	16.40	38.40	167444	20.79	52145	0.31

Uma análise do total precipitado em cada uma das cinco estações pluviográficas instaladas na sub-bacia do Gregório mostra uma tendência da célula de chuva em movimentar-se no sentido oeste-leste. Na maioria das vezes, a precipitação teve início na região sudoeste da área de estudo.

Sendo assim, a primeira avaliação do modelo foi realizada para o evento ocorrido em 19 de fevereiro de 2000. Essa escolha foi proposital uma vez que a contribuição para essa chuva foi unicamente da porção urbanizada da sub-bacia servindo à verificação dos parâmetros de rugosidade da área urbana. Adotou-se uma rugosidade para o asfalto e superfícies impermeáveis igual a 0,013 e o produto $\phi_f \cdot \Delta\theta$ igual a 3 cm correspondente ao valor de K (Righetto, 1998). O parâmetro α , que leva em conta o aprisionamento de ar no solo, foi tomado igual a 0,5. Os dados

referentes à distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada foram obtidos através da geração de imagens de valores aleatórios a partir dos dados observados em campo.

Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos a partir da justaposição em meio digital das fotografias aéreas derivadas do levantamento realizado em 1998 pelo SAAE.

A Área referente à sub-bacia de estudo foi selecionada, tratada e exportada para formato compatível com o Idrisi32 e derivadas as imagens de uso do solo para cada uma das três resoluções adotadas para a malha (figuras 6.12 a 6. 14).

As figuras 6.12 a 6.23 formam o banco de dados do modelo de simulação hidrológica para as resoluções igual a 10, 50 e 100 metros.

Figura 6.12: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 10 metros.

Figura 6.13: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 50 metros.

Figura 6.14: Imagem reclassificada do uso do solo a partir das informações do levantamento aerofotogramétrico de 1998. Resolução igual a 100 metros.

Figura 6.15: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 10 metros.

Figura 6.16: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 50 metros.

Figura 6.17: Modelo numérico de terreno da sub-bacia do Gregório. Resolução igual a 100 metros.

Figura 6.18: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 10 metros.

Figura 6.19: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 50 metros.

Figura 6.20: Rede de drenagem da sub-bacia do córrego do Gregório. Resolução igual a 100 metros.

Figura 6.21: Rede de galerias pluviais na sub-bacia do Gregório. Resolução 10 metros.

Figura 6.22: Localização das bocas de lobo da sub-bacia do Gregório (imagem vetor).

Figura 6.23: área de influência de cada posto definida a partir do polígono que abrange as células nas quais se aplicam o método de interpolação multiquadrático.

A figura 6.24 apresenta o resultado da primeira simulação. O gráfico mostra um atraso no hidrograma simulado. Uma vez que a rede de galerias pluviais drena a porção abrangida pela célula de chuva e que o tempo de pico não sofreu alterações significativas para coeficientes de rugosidade diferentes, é provável que o esquema de propagação em galerias seja o responsável pelo atraso no hidrograma de cheia simulado. O coeficiente de correlação para esse evento foi igual a 0,61 (ruim) e o índice ISE igual a 11,09 (satisfatório), calculados pelas equações 6.26 e 6.27, respectivamente.

Neste primeiro caso, fica evidenciada a variabilidade espacial da precipitação uma vez que entre as cinco estações, três registram altura de chuva igual a zero, ou seja, choveu apenas próximo ao exutório da área de estudo.

Apresentam-se os hidrogramas referentes às condições de uniformidade espacial da altura máxima precipitada e às resoluções mais grosseiras (figuras 6.25 e 6.26). A condição de uniformidade da chuva produz diferenças em mais de 100% do valor da vazão de pico registrada (figura 6.25).

Figura 6.24: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 19 de fevereiro de 2000.

Figura 6.25: Hidrograma simulado para a uniformidade espacial da chuva registrada pela estação 5, próxima ao exutório, para o evento do dia 19/02/2000.

Figura 6.26: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 19 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Os hidrogramas para resoluções iguais a 50 e 100 metros parecem ter sido obtidos pelo amortecimento dos escoamentos gerados na área urbana. Esse resultado parece estar de acordo com Wood et al (1988) que reconhece, qualitativamente, "... que quando a escala espacial aumenta, a bacia tende a atenuar a complexidade e padrões locais de geração dos escoamentos e fluxos de água". Lembra-se que os parâmetros de rugosidade para essas simulações foram definidos para a resolução da malha igual a 10 metros, ou seja, acredita-se que a calibração desses modelos "grosseiros" para determinados valores de rugosidade possa dar bom ajuste ao hidrograma observado ainda que esses valores não apresentem nenhum significado físico.

O segundo evento analisado corresponde à chuva precipitada no dia 13 de fevereiro de 2000. Procurou-se novamente selecionar o evento que pudesse auxiliar na determinação do conjunto de parâmetros a ser utilizado para todos os eventos: a chuva ocorrida no dia 13/02/2000 gera pico de vazão, no instante de tempo próximo a vinte minutos, conforme observado para a chuva anterior (19/02/2000).

Esse fato ajuda o entendimento dos hidrogramas simulados. Em decorrência dos escoamentos oriundos da área urbana próxima ao exutório encontrarem-se defasados em relação aos dados reais, não há como reproduzir rigorosamente a forma dos hidrogramas observados. Procurou-se, então, simplificar o processo de ajuste e facilitar a compreensão dos resultados obtidos pelo modelo de simulação hidrológica.

Considerara-se alterações quanto aos valores de rugosidade das células permeáveis e daquelas pertencentes à rede de drenagem. Foram mantidos os demais parâmetros estabelecidos no ajuste do evento de 19/02/2000.

Em relação ao parâmetro de umidade inicial do solo, considerou-se o mesmo valor para toda a área da bacia. Assim, após a obtenção do ajuste resultante da atribuição do melhor conjunto de valores para rugosidade superficial, o déficit de umidade pode ser alterado no sentido de melhorar a calibração.

A partir da segunda simulação, puderam ser avaliados os valores de rugosidade estabelecidos por Machado (1980) e Barbassa (1991). Estimou-se, com base nos trabalhos desses autores, o valor igual a 0,3 para as superfícies relativas às áreas verdes mais densas ou matas ciliares.

As informações sobre uso do solo foram obtidas a partir de fotografias aéreas digitais (SAAE – 1998) sendo essas imagens reclassificadas segundo três tipos predominantes de ocupação na sub-bacia do Gregório: áreas impermeáveis, áreas de vegetação densa (ou mata ciliar) e pastagens (figuras 6.12, 6.13 e 6.14). Definiu-se para o tipo “pastagens” o valor de rugosidade igual a 0,2. Para as células tipo rio, a rugosidade foi estimada pelos valores definidos no trabalho de Barbassa (1991).

As simulações realizadas a partir dos valores mencionados para a rugosidade não apresentaram bons resultados.

Verificou-se que a consideração da rugosidade superficial igual a 0,2 não representa bem as áreas relativas aos loteamentos junto à rodovia Washington Luis, sendo essas áreas significativamente extensas. Através de visitas em campo realizadas durante a fase experimental deste trabalho, verificou-se que a superfície

pode ser inserida na classificação tipo “chão batido” cujo valor para a rugosidade é igual a 0,015 (Tucci,1987) . Esse tipo de solo encontra-se também em pequenas áreas difusas na sub-bacia do Gregório.

A revisão de Oliveira (1999) sobre escoamentos em áreas cobertas por gramíneas constata que esse tipo de cobertura do solo não oferece grande resistência aos escoamentos provenientes das áreas de montante, contendo apenas a água que precipita sobre ela. O fato da cobertura tipo gramíneas da área de pesquisa constituir-se de nítidos tufo rasteiros parece favorecer os escoamentos entre as camadas dessa vegetação.

Baptista e Lara (2002) apresentam um resumo dos parâmetros de rugosidade para canais a partir de várias publicações sobre o assunto, considerando-se canais em montanhas e planícies com largura do escoamento menor do que 30 metros.

Com base no que foi exposto, adotou-se para a classe “pasto degradado” o valor de rugosidade igual a 0,025 e para as células de drenagem situadas à jusante da rodovia Washington Luís atribuiu-se o valor de 0,02. Os baixos valores de rugosidade foram devidos ao problema de convergência ocorrido nas simulações considerando-se o intervalo de tempo igual a 5 minutos. Esse intervalo foi adotado tendo-se em vista que os dados hidrológicos de chuva-vazão em áreas urbanas são geralmente disponíveis para esse tempo. A fim de verificar esses valores de rugosidade para intervalo temporal igual a 1 minuto, simulou-se o evento ocorrido em 8 de fevereiro de 2000 e obteve-se valores desse parâmetro para a classe “pastagens” igual a 0,100. Nessa simulação, os valores de rugosidade para a rede de drenagem a jusante da abscissa 205000 m foram iguais a 0,025.

Deve-se levar em conta que a substituição das seções naturais da rede de drenagem por seções regulares pode causar uma diminuição da velocidade de escoamento no canal, o que também pode explicar os baixos valores de rugosidade tanto para os intervalos de tempo de 1 e 5 minutos.

É importante ressaltar que as simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas com intervalos de tempo igual a 5 minutos e valores de rugosidade como descrito anteriormente.

As figuras 6.27 a 6.29 referem-se ao evento ocorrido no dia 13 de fevereiro de 2000. Chama-se novamente a atenção para o primeiro pico do hidrograma observado que é semelhante ao registrado para o evento do dia 19/02/2000.

As alterações da umidade inicial do solo podem melhorar o ajuste dos hidrogramas simulado e observado como obtido para o evento de 08/02/2000. No entanto, parece interessante mostrar a adequação do modelo em relação aos parâmetros não-monitorados como é o caso da umidade do solo.

Figura 6.27: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 13 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0,8 e ISE = 6,01.

Figura 6.28: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 13/02/2000.

Figura 6.29: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 13 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Apresentam-se nas figuras 6.30 a 6.41 os resultados da simulação para outros eventos registrados na bacia do Gregório, considerando-se os mesmos valores dos parâmetros definidos pelas duas simulações anteriores.

Figura 6.30: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 11 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0,87 e ISE = 5,82.

Figura 6.31: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 11/02/2000.

Figura 6.32: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 11 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Figura 6.33: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 12 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0,95 e ISE = 4,58.

Figura 6.34: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 12/02/2000.

Figura 6.35: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 12 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Figura 6.36: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000. Coeficiente de correlação igual a 0,89 e ISE = 8,19.

Figura 6.37: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000 considerando-se pequeno déficit de umidade do solo.

Figura 6.38: Hidrograma simulado considerando-se a uniformidade espacial da chuva máxima e mínima registrada para o evento do dia 08/02/2000.

Figura 6.39: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 08 de fevereiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Figura 6.40: Hidrogramas de cheia observado e simulado para o evento ocorrido em 31 de janeiro de 2000.

Figura 6.41: Hidrogramas de cheia simulados para o evento ocorrido em 31 de janeiro de 2000 considerando-se resoluções grosseiras da malha.

Com relação aos resultados das simulações para o evento de 31 de janeiro de 2000, a diferença entre a vazão de pico simulada e observada pode ser devida à ocorrência de fatores externos que impediram o funcionamento normal do sensor de nível d'água. Essa constatação foi baseada na análise do hidrograma de cheia para esse evento com intervalo de tempo igual a 1 minuto (Anexo B).

Os eventos registrados em 01/03/2000, 08/03/2000 e 11/03/2000 não foram adequados à simulação. A estação 2 apresentou problemas técnicos, como ocorrido no início do monitoramento em janeiro 2000. Portanto, não foi possível avaliar corretamente os resultados uma vez que a variabilidade espacial da chuva influencia muito os hidrogramas simulados.

As figuras 6.42 e 6.43 mostram a capacidade do modelo em simular diferentes cenários de acordo com o que se deseja obter.

Figura 6.42: Separação do escoamento da área urbana para o evento de 8 de fevereiro de 2000.

Figura 6.43: Consideração de impermeabilização da área de estudo. Os valores de rugosidade foram mantidos das simulações anteriores.

Para a análise do modelo frente à distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, foram considerados trinta cenários referentes à distribuição desse parâmetro para cada uma das três resoluções da malha, totalizando noventa cenários.

A construção desses cenários não é realizada diretamente, uma vez que o módulo de geração de valores aleatórios do Idrisi32 não limita o intervalo admissível da condutividade hidráulica do solo e gera valores irreais a partir da média e desvio padrão da sua distribuição lognormal.

No módulo RANDOM do Idrisi32, os valores aleatórios são gerados de forma a cobrir uma área quadrada ou retangular na qual está inserida a área de estudo. Pela análise do histograma dessa imagem verifica-se que cerca de 1/3 do número de pixels encontra-se fora do intervalo admissível da variável, o qual foi determinado experimentalmente em campo.

Desta forma, utilizou-se os recursos do SIG para contagem do número de pixels ou células que constituem a bacia e, posteriormente, uma imagem foi gerada com números de linhas e colunas tais que o seu produto fosse igual, ou muito

próximo, a $1,3 \cdot N_{\text{bacia}}$ sendo N_{bacia} o número de células da bacia hidrográfica. Dessa forma, descarta-se aproximadamente $1/3$ de valores gerados, considerados irrealis.

Um programa simples, em FORTRAN, foi desenvolvido de forma a varrer a imagem e armazenar somente os valores contidos no intervalo da variável. Outra varredura é realizada na imagem que contém a área de estudo (atributo igual a um). O programa em FORTRAN gera uma nova imagem na qual os valores da variável substituem o atributo um da bacia.

Os resultados obtidos para essas simulações não tiveram influência significativa sobre o hidrograma simulado; no entanto, averiguou-se que para o aumento da malha houve maior diferença entre os cenários, alcançando até 10 % da vazão de pico para resolução igual a 100 metros.

Alterações significativas foram obtidas considerando-se um valor médio da condutividade hidráulica saturada para todas as células da bacia com diferenças em até 24% da vazão de pico. A figura 6.44 mostra o hidrograma observado e simulado para o evento 08/02/2000, considerando-se o valor da condutividade hidráulica saturada do solo igual a 15,8 mm/h.

Figura 6.44: Hidrograma de cheia simulado para valor médio da condutividade hidráulica saturada do solo.

7. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES

A realização de modelagem hidrológica e levantamentos experimentais na bacia hidrográfica urbana do córrego do Gregório alcançou o principal objetivo deste trabalho que consistiu na análise da distribuição espacial da precipitação e da condutividade hidráulica do solo.

Na primeira fase do estudo experimental, foi monitorado o período chuvoso de janeiro a março de 2000. A partir dos dados de chuva obtidos foram traçadas as isoietas de precipitações observadas na bacia urbana do córrego do Gregório. Nessa primeira análise, constatou-se que há uma incerteza na interpolação das superfícies de chuva em decorrência da concentração dos equipamentos na parte urbana da bacia. Nessa área, a distribuição foi limitada pelo atendimento às normas para instalação dos pluviógrafos uma vez que a parte urbana é intensamente ocupada. Durante esse monitoramento foram também registradas as alturas de escoamento no exutório da bacia e, posteriormente, através da determinação de curva-chave foram obtidos os hidrogramas de cheias resultantes.

A segunda fase do estudo experimental foi dedicada à obtenção das taxas de infiltração de água no solo. Para tanto, executou-se o projeto de infiltrômetro de disco de Perroux e White (1988) o qual se mostrou muito eficiente na obtenção dos dados, permitindo a experimentação em locais de difícil acesso.

A aquisição dos dados de infiltração foi dividida em duas campanhas de medição: na primeira, os experimentos foram distribuídos aleatoriamente de forma a abranger toda a área de estudo; na segunda, a experimentação foi conduzida em

uma área pouco maior do que 1 ha em locais regularmente espaçados. Constatou-se que essas duas amostras são lognormalmente distribuídas o que está em conformidade com os resultados encontrados na literatura.

Durante os ensaios com o infiltrômetro, verificou-se para alguns locais um comportamento irregular da infiltração ao qual foi atribuído à ação erosiva do escoamento sub-superficial e às práticas de manejo do solo, uma vez que estas alteram as características naturais do terreno e influem diretamente sobre o tempo de alagamento e infiltração.

A partir de análise estatística dos experimentos realizados, constatou-se, também, que a condutividade hidráulica saturada não é facilmente ajustada às técnicas de interpolação superficial e que o aumento do número de experimentos pode ser decisivo para o ajuste de distribuições de probabilidade.

Com relação ao estudo teórico, a primeira fase foi dedicada à calibração do modelo. Durante essa etapa, determinou-se apenas a alteração do parâmetro de rugosidade superficial.

A partir do método de tentativas e erros e com base nos valores de rugosidade encontrados na literatura, foram estabelecidos valores desse parâmetro que permitiram um bom ajuste do modelo para a resolução igual a 10 metros, resultando em hidrogramas próximos àqueles observados em campo.

Durante a segunda fase do estudo teórico, a influência da resolução espacial da chuva sobre os hidrogramas de cheias foi avaliada através de simulações do modelo para dois tipos de informações:

- Consideração de uniformidade espacial para as alturas de chuva máxima e mínima registradas durante o evento.
- Consideração da distribuição espacial da chuva através de métodos de interpolação superficial.

A consideração somente dos dados de uma estação resultou em diferenças acima de 100% da vazão de pico observada, o que permite reafirmar o consenso de que a escassez quanto às informações sobre precipitação pode introduzir incertezas de grande magnitude nos hidrogramas simulados.

Num terceiro momento, verificou-se que o aumento do tamanho da malha do modelo resultou em vazões muito inferiores aos obtidos para a resolução mais alta. Constatou-se que é possível reproduzir os hidrogramas observados adotando-se valores irrealistas de rugosidade; no entanto, isso teria sentido apenas para o caso de bacias monitoradas.

Na quarta fase do estudo teórico, foram gerados, através do módulo estatístico do Idrisi32, 30 cenários da condutividade hidráulica saturada para cada uma das três resoluções do modelo (10, 50 e 100 metros), considerando-se distribuição lognormal a partir da média e desvio padrão obtidos em campo. Os resultados mostraram que a resolução mais alta não é influenciada pela distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada, enquanto que para a resolução igual a 100 metros, as diferenças chegaram a 10% da vazão de pico.

As simulações do modelo de alta resolução para o valor médio da condutividade hidráulica saturada obtido na primeira campanha de medição resultaram em hidrogramas de cheia muito diferentes dos observados. No entanto, as simulações realizadas considerando-se o valor médio obtido na segunda campanha de medição não foram significativamente diferentes daquelas obtidas pela consideração da distribuição espacial da condutividade hidráulica.

Dentre os levantamentos experimentais de deflúvios realizados, destacou-se a obtenção de lâminas d'água em sarjeta com a finalidade de melhor entender os escoamentos em área urbana. A comparação das informações de campo com os resultados simulados mostrou que o modelo serve à delimitação de áreas nas quais a altura do escoamento exceda a altura da guia. Além disso, possibilita o dimensionamento de galerias pluviais uma vez que o modelo indica os locais de concentração de águas e respectivas áreas de contribuição.

Com relação ao funcionamento do modelo, os algoritmos computacionais foram eficazes na determinação da direção dos fluxos d'água em uma área urbana complexa. A integração dos algoritmos de escoamento em superfície e em sistema de galerias pluviais também foi realizada com sucesso. No entanto, há necessidade de melhorar o esquema de propagação na rede pluvial que pode ser o maior

responsável pelo atraso das vazões geradas na parte urbana da bacia do Gregório. É, também, conveniente introduzir os termos de inércia na modelagem das células de rio abaixo da cota de inundação de forma a representar o sistema mais próximo da realidade.

A integração do modelo hidrológico e Sistema de Informação Geográfica (SIG) reduziu a complexidade de elaboração dos arquivos de entrada do modelo, restringindo-os a um conjunto de imagens dos tipos vetor e raster, cuja obtenção foi relativamente simples, ainda que as operações realizadas para tal fim tenham despendido tempo considerável.

Outra vantagem da utilização das imagens do SIG como arquivos de entrada foi a rapidez na simulação de cenários que permite ao modelo servir como sistema de suporte à decisão para fins de planejamento. Para tanto, é necessário apenas alterar a imagem relativa ao uso e ocupação do solo da bacia.

Finalmente, concluiu-se que os trabalhos de experimentação são fundamentais para aplicação de modelos hidrológicos distribuídos e que deve ser cogitada o aumento da resolução e complexidade do modelo através da incorporação das equações tridimensionais de escoamento e infiltração, uma vez que, atualmente, a capacidade dos circuitos digitais disponíveis é muito elevada.

Recomenda-se que seja dada continuidade à coleta de dados na bacia experimental do córrego do Gregório no sentido de alcançar uma investigação intensiva da variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da precipitação. Sugere-se, também, que sejam realizados trabalhos experimentais para a determinação da rugosidade em superfícies permeáveis e sistema de drenagem no sentido de possibilitar uma avaliação mais rigorosa do comportamento do modelo.

Outros trabalhos práticos destinados ao monitoramento da umidade do solo e dos dados chuva-vazão, considerando-se maior e melhor distribuição dos equipamentos de medição da chuva, devem ser realizados. A instalação de linígrafos em sub-áreas da sub-bacia do Gregório seria fundamental para confirmar a eficiência do modelo em simular os escoamentos tanto nas áreas rurais quanto nas áreas urbanas.

Trabalhos de modelagem dos processos relacionados à erosão e qualidade da água urbana, assim como o impacto gerado pela construção de reservatórios, interiores aos lotes urbanos ou em sistema de macrodrenagem, podem ser realizados com relativa simplicidade em consequência do padrão regular de representação da bacia hidrográfica. Desta forma, poder-se-ia avaliar os impactos de obras destinadas à atenuação de enchentes urbanas, auxiliando o gerenciamento das águas pluviais.