Juliana Pontes Machado de Andrade

**Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias
em bacias urbanas.**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiando

São Carlos
2006

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA PONTES MACHADO DE ANDRADE**

Dissertação defendida e julgada em 13-09-2006 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. EDUARDO MARIO MENDIONDO (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Dr. JAVIER TOMASELLA
(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE) APROVADO

Prof. Dr. MAURÍCIO DE AGOSTINHO ANTONIO
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Campus de Bauru) APROVADO

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

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Mario, professor Eduardo Mario Menciondo, pela orientação, apoio, paciência e violão.

Aos colegas do NIBH (Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas): Fred, Helô, Paulino, Melissa, Cris, Ignazio, Tati, Flavia, Pedro, Ju Taguti, Rodolfo e, em especial, a Celso, Thiago, Anaí e Diogo pela colaboração direta para o desenvolvimento desta pesquisa.

À professora Ticiane Studart, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, por sua orientação na minha iniciação científica.

Ao Dr. Maurício de Agostinho Antonio e Dr. Javier Tomasella por terem composto a banca de defesa desta dissertação e por suas colaborações com a versão final do trabalho.

Ao professor Jackson Roehrig e demais pessoas no *Institut für Technologie in den Tropen (Fachhochschule Köln)*, Colônia, Alemanha, pela colaboração com esta pesquisa e por terem me recebido bem durante os meses de intercâmbio.

Aos amigos que, de perto ou de longe, deram apoio moral e sentimental desde o começo: Amanda, Andréa, Cla, Eveline, George, Jaci, Lia, Manu, Marcelo, Othavio, Paulo, Sasha, Wal.

Aos que tornaram a estadia em São Carlos mais agradável: Marcelo, Luiz Sérgio, Eugênio e galera da Rapadura, Lucas, Noemi, Othavio, Dani, Sylvinha, SESC e CDCC.

A minha mãe, David e tia Cláudia pela presença na defesa desta dissertação. Ao David, mais uma vez, por tantas horas gastas na preparação do layout da apresentação da defesa.

A toda minha família: mãe, pais, irmã, irmãos, vovô, vovó, tias, tio, primas e primos.

Duas vezes ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela concessão de bolsa de mestrado e bolsa DTI.

“Se as formigas se assanham,
o mandacaru floresce,
ou o periquito fura o cupim:
vem chuva.”

Profetas do Sertão.

RESUMO

ANDRADE, J.P.M. (2006) *Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Freqüentemente, a população das áreas metropolitanas é surpreendida pela ocorrência de inundações muito rápidas que causam danos diversos. O sistema de alerta antecipado contra inundações é uma ferramenta que visa minimizar tais impactos. O componente de previsão do sistema será abordado neste trabalho. Tal previsão é feita através de um modelo conceitual de previsão hidrometeorológica de precipitação baseado em equações termodinâmicas e modelo simplificado de física das nuvens seguido de um modelo chuva-vazão. A antecedência proporcionada pelo modelo hidrometeorológico aplicado é de 30 minutos para variáveis de entrada observadas. Este tempo pode ser estendido com a inclusão de estimativas futuras das variáveis de entrada. A calibração do modelo foi feita manualmente com o uso de duas medidas de desempenho, esta etapa pode ser aprimorada em pesquisas futuras. Apesar da simplicidade do modelo hidrometeorológico apresentou-se satisfatório em algumas simulações, conseguindo prever o início das precipitações.

Palavras – chave: previsão hidrometeorológica, sistema de alerta antecipado, inundações.

ABSTRACT

ANDRADE, J.P.M. (2006) *Hidrometeorological precipitation forecast for flood early warning systems in urban areas*. M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006 (in Portuguese).

Urban population are often surprised by flash floods which cause several kinds of damages. An early warning system is a tool which aims to minimize such impacts. This work will approach the forecast component of this system. A conceptual hydrometeorological precipitation forecasting model, based on thermodynamics equations and simplified cloud physics, will be used to perform the forecast. Model lead time is 30 minutes for measured inputs, this time can be extended by the use of estimated inputs instead of the measured ones. Calibration was performed manually based on conservation of precipitation volume and its distribution in time. This step can be improved on future researches. In spite of model's simplicity, some simulations presented satisfactory results, being able to forecast precipitation's beginning.

Key-words: hydrometeorological precipitation forecast, early warning system, flood.

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 INUNDAÇÕES	6
3.2 GERENCIAMENTO DE DESASTRES NATURAIS	10
3.3 SISTEMA DE ALERTA ANTECIPADO	13
3.3.1 <i>Alguns Sistemas de Alerta contra inundações no Brasil</i>	14
3.4 PREVISÕES EM TEMPO REAL	18
3.5 PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO	21
3.6 TRANSFORMAÇÃO CHUVA- VAZÃO.....	26
3.6.1 <i>Separação do escoamento</i>	26
3.6.2 <i>Determinação do hidrograma de cheia</i>	27
3.7 SÍNTESE.....	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 MODELO CONCEITUAL DE PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA	31
4.1.1 <i>Estrutura da programação</i>	32
4.1.2 <i>Entrada de umidade I</i>	34
4.1.3 <i>Perda de umidade pelo topo da nuvem (Ot)</i>	37
4.1.4 <i>Perda de umidade pela base da nuvem (Ob)</i>	39
4.1.5 <i>Precipitação</i>	40
4.1.6 <i>Re-Parametrização do modelo</i>	42
4.1.7 <i>Geração sintética das variáveis de entrada</i>	44
4.2 PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO	44
4.3 TRANSFORMAÇÃO CHUVA -VAZÃO.....	45
4.3.1 <i>Separação do escoamento</i>	45
4.3.2 <i>Determinação do hidrograma de cheia</i>	47
4.4 CALIBRAÇÃO.....	47
5 ESTUDO DE CASO	50
6 RESULTADOS	52
6.1 DADOS UTILIZADOS.....	52
6.2 MODELO CONCEITUAL HIDROMETEOROLÓGICO	54
6.2.1 <i>Calibração</i>	54
6.2.2 <i>Validação</i>	68
6.2.3 <i>Exploração</i>	71
6.3 COMPARAÇÕES COM O MODELO NUMÉRICO DE PREVISÃO DE TEMPO ETA.....	76
6.4 TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO	78
7 CONCLUSÕES.....	86
8 RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS	97

ANEXO 1. ROTINA DO MODELO DE PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA	97
ANEXO 2. ROTINA DO MODELO DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO	101
ANEXO 3. ROTINA DO MODELO DE CHUVA-VAZÃO	103
ANEXO 4. GRÁFICOS DAS PRECIPITAÇÕES OBSERVADAS E MODELADAS NA ETAPA DE VALIDAÇÃO.	105
ANEXO 5. MODELO EMPÍRICO DE PREVISÃO HIDROMETEOROLÓGICA	107

Lista de Tabelas

Tabela 6.1. Características dos eventos (Em que: s.d. significa sem dados)	53
Tabela 6.2. Valores adotados para os parâmetros ε_l e ε_d	57

Lista de Figuras

Figura 1.1. Municípios afetados por enchentes ou inundações 1998 - 2000 (IBGE, 2000).....	1
Figura 2.1. Protocolo do sistema de alerta antecipado contra inundações.....	5
Figura 3.1. Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas e situação de alagamento. Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005) e Mendes (2005 P. 4)	7
Figura 3.2. Ilustração de redução da magnitude	8
Figura 3.3. Ilustração de redução da vulnerabilidade.....	9
Figura 3.4. Triângulo do risco (Fonte: Crichton, 1999).	10
Figura 3.5. Etapas do gerenciamento de desastres naturais.....	12
Figura 3.6. Etapas cronológicas da gestão de risco. Adaptado de Mendiondo (2005).....	13
Figura 3.7. Esquema dos tipos de previsão de vazão em tempo atual. a) previsão com base na precipitação. b) previsão com base em medidas de vazão ou nível a montante. c) previsão combinada. em que $p(t)$ é a precipitação, $q(t)$ é a vazão, $h(t)$ é o nível d'água. Fonte: Tucci (1998, p. 375)	19
Figura 3.8. Tempo disponível para ação antes da inundação.	20
Figura 3.9. Hipótese chuva nula.	20
Figura 3.10. Hipótese persistência.....	21
Figura 3.11. Hipótese tendência.	21
Figura 4.1. Modelo de previsão hidrometeorológica (Georgakakos e Bras, 1984a)	32
Figura 4.2. Fluxograma da programação da entrada de umidade I do modelo de previsão hidrometeorológica.....	33
Figura 4.3. Fluxograma do cálculo das saídas (O_t e O_b).	34
Figura 5.1. Bacia do córrego do Gergório com a localização das estações (Fonte: NIBH, 2003).....	51
Figura 5.2. Vazão específica <i>versus</i> probabilidade de excedência (Fonte: Mendiondo, 2005).	51
Figura 6.1. Precipitação observada (colunas cinzas com barra de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_3 . Evento do dia 06/02/2004.	55
Figura 6.2. Precipitação observada média (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_2 . Evento do dia 06/02/2004.	56
Figura 6.3. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_4 . Evento do dia 06/02/2004.....	58
Figura 6.4. Precipitação observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_4 . Evento do dia 04/01/2005.....	59
Figura 6.5. Precipitação observada média (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_4 . Evento do dia 06/11/2005.	60
Figura 6.6. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_7 . Evento do dia 06/02/2004.....	61
Figura 6.7. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_7 . Evento do dia 04/01/2005.....	62
Figura 6.8. Precipitação observada média (colunas cinzas com barra de erros) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_7 . Evento do dia 06/11/2005.	63
Figura 6.9. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 06/02/2004.....	64
Figura 6.10. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 04/01/2005.	65

Figura 6.11. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 06/11/2005.	65
Figura 6.12. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 06/02/2004.	66
Figura 6.13. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 04/01/2005.	67
Figura 6.14. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 06/11/2005.	68
Figura 6.15. Precipitação média observada (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 18/11/2004.	69
Figura 6.16. Precipitação média observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 19/12/2004.	70
Figura 6.17. Precipitação média observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 30/01/2004.	71
Figura 6.18. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos para evento do dia 18/11/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.	73
Figura 6.19. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 17:30 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.	74
Figura 6.20. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 18:00 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.	74
Figura 6.21. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 18:30 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.	75
Figura 6.22. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 19:00 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.	75
Figura 6.23. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo eta (colunas pretas) e resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 06/02/2004.	76
Figura 6.24. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo eta (colunas pretas) e resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 04/01/2005.	77
Figura 6.25. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo eta (colunas pretas), resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 06/11/2005.	77
Figura 6.26. Hidrograma observado, hidrograma simulado com precipitação observada, e hidrogramas simulados com precipitações modeladas. Dia: 04/01/2005.	80
Figura 6.27. Previsão de vazão: hidrograma observado, transformação chuva-vazão para precipitação observada, e para precipitações modeladas. A partir das 16:30h (04/01/2005).	81
Figura 6.28. Comparação entre hidrograma observado, hidrograma simulado com chuva combinada entre observações e resultados do modelo com parâmetros com dois conjuntos de parâmetros diferentes ($\varepsilon_1 = 0,002$; $\varepsilon_4 = 30\mu\text{m}$ e $\varepsilon_1 = 0,003$; $\varepsilon_4 = 45\mu\text{m}$). As barras cinzas representam a precipitação observada. Evento do dia 04/01/2005.	82
Figura 6.29. Exemplo de previsões contínuas de hietogramas (barras) e hidrogramas (linhas) simulados para diferentes estágios temporais comparados com dados observados.	84
Figura 6.30. Exemplo de previsões contínuas de hietogramas (barras) obtidos através da combinação de precipitações observadas e modeladas e hidrogramas (linhas) simulados para diferentes estágios temporais comparados com dados observados.	84
Figura A1. Hietogramas de precipitação observada e precipitação gerada para evento do dia 6/11/2003.	111

Figura A2. Hidrogramas resultantes da chuva observada e chuva gerada para o evento do dia 6/11/2003.....	111
Figura A3. Hietogramas de precipitação observada e precipitação gerada para evento do dia 17/11/2003.....	112
Figura A4. Hidrogramas resultantes da chuva observada e chuva gerada para o evento do dia 17/11/2003.....	112

Lista de Símbolos

dA	a área unitária [m^2]
c	parâmetro que corresponde ao inverso do diâmetro médio das partículas [m^{-1}]
c_b	inverso do diâmetro médio na base da nuvem [m^{-1}]
c_p	calor específico à pressão constante ($c_p = 1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$)
c_t	inverso do diâmetro médio no topo da nuvem [m^{-1}]
D	diâmetro [m]
D_c	diâmetro crítico [m]
D^*	difusividade do vapor de água no ar [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
e_s	pressão parcial de vapor de saturação [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
I	entrada de umidade na nuvem [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
k	parâmetro adimensional constante
L	calor latente de condensação [J.kg^{-1}]
n_0	número de gotículas cujo diâmetro tende a zero
$nt(D)$	distribuição de tamanho das partículas no topo da nuvem
N_d	adimensional que indica a força do processo de difusividade
N_v	adimensional que indica a força da velocidade de ascensão na base da nuvem
Ob	perda de umidade pela base nuvem [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
O_t	perda de umidade pela base nuvem [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
P	intensidade de precipitação [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
p'	nível de pressão no qual a velocidade atinge o valor médio [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
p_0	pressão na superfície [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
p_l	menor valor que p_t pode alcançar [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
p_{ref}	pressão de referência [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]

p_s	pressão no nível de saturação [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
R	constante de gás do ar ($R = 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$)
R_v	constante de gás do vapor de água ($R_v = 461 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$)
T_0	temperatura na superfície [°K]
T_d	temperatura de ponto de orvalho na superfície [°K]
T_m	temperatura da nuvem em um certo nível de pressão p' [°K]
T_{ref}	temperatura de referência [°K]
T_s	temperatura no nível de saturação [°K]
T_s'	temperatura do ar no nível p' [°K]
T_w	temperatura de bulbo úmido [°K]
v	velocidade média de ascensão do ar úmido [m.s^{-1}]
v_β	velocidade de ascensão no topo da nuvem [m.s^{-1}]
v_p	adimensional que corresponde às partículas de diâmetro $4/c$
$v_t(D)$	velocidade de descida no topo da nuvem [m.s^{-1}]
w	razão de mistura
X	quantidade de água na nuvem [kg.m^{-2}]
Z_b	nível de condensação [m]
Z_c	altura da nuvem, desde a base ao topo [m]
Z_t	nível do topo da nuvem [m]
ε_1	parâmetro adimensional constante
ε_2	parâmetro constante [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]
ε_3	parâmetro constante [s.m^{-1}]
ε_4	parâmetro constante [$\text{s}^k.\text{m}^{(1-k)}$]
$\zeta(D)$	função que reduz o diâmetro das partículas
θ	temperatura potencial adiabática [°K]

θ_e	temperatura potencial pseudo-adiabática [°K]
ρ_a	densidade da água [kg.m ⁻³]
ρ_{ar}	massa específica média do ar [kg.m ⁻³]

Separação do Escoamento e Chuva-vazão

A	a área da bacia [km ²]
CN	parâmetro constante
d	volume infiltrado por unidade de área [mm]
Ia	perdas iniciais de chuva [mm]
Pe	precipitação efetiva [mm]
P _{total}	precipitação total [mm]
Qp	vazão pico do hidrograma unitário [m ³ .s ⁻¹]
S	capacidade máxima de armazenamento [mm]
t	intervalo de tempo de cálculo [h]
tb	tempo base do hidrograma unitário [h]
tc	tempo de concentração da bacia [h]
tp	tempo de pico do hidrograma unitário [h]

1 Introdução

De acordo com a ONU (2003), durante o período de 1997 a 2002 ocorreram 240 inundações na América do Sul, ao passo que foram registrados 35 episódios de secas e 48 ventanias. Em relação às perdas, as inundações são responsáveis por cerca de 50% do total de prejuízos ocasionados por desastres (Kron, 2003).

No Brasil, estas inundações causam prejuízos de mais de U\$ 1 bilhão a cada ano (MCT/CGE,2001).

No Estado de São Paulo, entre os anos de 1998-2000, mais de 30% dos municípios foram afetados por enchentes ou inundações. A situação é semelhante em vários outros estados, chegando a atingir um percentual ainda maior no Rio de Janeiro (IBGE, 2000) (Figura 1.1).

Figura 1.1. Municípios afetados por enchentes ou inundações 1998 - 2000 (IBGE, 2000).

Em entrevista a comerciantes do centro de São Carlos, Righetto (2005) estimou prejuízos de aproximadamente R\$536.000,00 devido à inundação ocorrida em janeiro de 2004 numa das bacias urbanas do município.

Considerando que esses prejuízos são funções de dois fatores, a magnitude do evento e a vulnerabilidade da área (Samuels, 2000), diminuir os seus impactos não implica necessariamente atenuar a onda de cheia. Pode-se atuar na tentativa de minimizar a vulnerabilidade da área exposta e com isso diminuir os prejuízos sócio-econômicos associados a estes desastres naturais.

Pode-se conseguir a redução da vulnerabilidade através de zoneamentos ecológico-econômicos. Nestes casos, procura-se identificar quais as áreas propícias para cada atividade, de modo a restringir o uso das áreas de risco. Outro exemplo de medidas que podem diminuir a vulnerabilidade são as construções contra inundação. Tais construções, levando em consideração o risco de serem atingidas por inundações, possuem certos dispositivos que dificultam a entrada de água no prédio. O sistema de alerta antecipado também é uma ferramenta que atua nesse âmbito, de modo a permitir a retirada da população e proteção de algum bem de valor econômico que eventualmente possa estar na área.

O objetivo dos sistemas de alerta antecipado é informar a população, bem como aos órgãos competentes, da ocorrência de inundações em tempo hábil para evacuar a região. Especialmente em áreas urbanas, há uma intensificação do uso do solo às margens dos rios, seja devido à existência de vias, residências, comércios, etc. Além disso, as bacias hidrográficas são geralmente pequenas e possuem uma cobertura bastante impermeabilizada resultando em tempo de concentração reduzido, e conseqüente formação rápida de inundações (*flash floods*).

Nestas áreas, a previsão de inundações por meio de monitoramento do nível à montante é de pouca valia. Como a onda de cheia se propaga rapidamente, o tempo de antecedência que se tem para emitir o alerta é escasso.

Para que se possa ter um tempo maior de antecedência do alerta, faz-se necessário o uso de previsões das precipitações.

Devido à dificuldade em obter informações de radar na grande maioria das cidades brasileiras, objetiva-se prever a ocorrência de precipitação utilizando medições corriqueiras de estações meteorológicas de superfície situadas em bacias hidrográficas urbanas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

- Implementar um protocolo conceitual de previsão de cheias para sistema de alerta antecipado de inundações como suporte a planos diretores de bacias urbanas (Figura 2.1).

2.2 Objetivos Específicos

- Revisar e propor modelos, conceituais e empíricos, de previsão antecipada de chuva em curto prazo de tempo com base hidrometeorológica;
- Programar um algoritmo de previsão quantitativa de chuvas, seguido de um modelo chuva-vazão, apto de ser utilizado em um sistema de alerta antecipado contra inundações, em bacias urbanas;
- Calibrar, validar e explorar o algoritmo, comparando os resultados das cheias simuladas com eventos monitorados.

Figura 2.1. Protocolo do sistema de alerta antecipado contra inundações.

3 Revisão Bibliográfica

Este capítulo começa com uma breve introdução sobre conceitos usados na área de inundações. Em seguida, tratará de gestão de risco seguido por definições de sistema de alerta.

Na seqüência será feita uma revisão sobre metodologias e modelos de previsão ou estimativa de precipitação em diferentes escalas temporais. Continuando com o tema de transformação precipitação – vazão.

Para finalizar, será apresentada uma síntese do capítulo.

3.1 Inundações

O extravasamento da calha de um rio é um fenômeno natural, no entanto, quando a água atinge áreas ocupadas caracteriza-se o desastre.

A terminologia usada para a caracterização deste fenômeno é bastante variada e, freqüentemente, termos como enchente, cheia, inundação e alagamento são usados (erroneamente) como sinônimos. Contudo, deve-se ter cautela ao empregá-los, uma vez que cada um deles diz respeito a um determinado acontecimento (Figura 3.1). Goerl e Kobiyama (2005) esclarecem a diferença entre alguns desses termos:

- Enchente: água escoar no leito do rio com vazão máxima, porém sem extravasamento;
- Inundação: há o extravasamento da água para as áreas marginais ao curso d'água;

Mendes (2005) traz ainda a definição de mais um termo correlato:

- Alagamento: acúmulo de água pluvial na superfície devido a problemas de drenagem.

Figura 3.1. Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas e situação de alagamento. Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005) e Mendes (2005 p. 4)

Alterações antrópicas das características das bacias hidrográficas têm sido consideradas como agravantes da ocorrência de inundações. O aumento da impermeabilização devido à urbanização diminui a capacidade de armazenamento do solo e a rugosidade, permitindo que mais água escoe em um tempo menor. A canalização de

córregos e a ocupação de suas margens por empreendimentos ou vias públicas, também são fatores que agravam a problemática das inundações em áreas urbanizadas.

Para que a inundação cause impactos à sociedade é necessário que a água extravasada do curso d'água atinja uma área ocupada. Daí percebe-se, pelo menos duas frentes nas quais se pode atuar para diminuir os danos sofridos pela população potencialmente atingida pelas águas:

- diminuir a magnitude do evento: desta forma um menor volume d'água extravasará do canal atingindo uma área também menor (Figura 3.2);
- reduzir a vulnerabilidade e exposição da área: ocupar a área de risco com construções apropriadas (através de zoneamento ambiental ou métodos construtivos com mecanismos contra inundações) ou retirar da área a ser atingida pessoas e bens antes que a inundação aconteça (Figura 3.3).

Figura 3.2. Ilustração de redução da magnitude

Figura 3.3. Ilustração de redução da vulnerabilidade

No entanto, a classificação mais comum divide as medidas de combate a inundações em:

- Medidas estruturais: realizações de obras que alteram fisicamente a bacia. Como exemplos, podem ser citados: a canalização do leito dos rios, bacias de retenção, bacias de retenção, trincheiras de infiltração, micro-reservatórios no lote, aproveitamento de água da chuva, etc.
- Medidas não-estruturais: práticas que não alteram o meio. Exemplos: zoneamento, sistema de alerta antecipado, manutenção e limpeza da rede de drenagem, integração de gerenciamento dos setores de saneamento, drenagem urbana e resíduos sólidos, etc.

O sistema de alerta antecipado pode ser caracterizado como uma medida não-estrutural que visa reduzir a exposição da área aos impactos provenientes das inundações.

As medidas não estruturais, geralmente, possuem custos menores quando comparadas com as estruturais e seus resultados se apresentam em um prazo mais curto que os das outras. Recomenda-se, no entanto, a adoção combinada dos dois tipos de medida para obtenção de melhores resultados.

3.2 Gerenciamento de desastres naturais

Levando-se em consideração que não há como evitar totalmente que desastres ocorram, entre eles as inundações, é fundamental que se tente conviver com as possíveis adversidades trazidas por eles.

O que se chama de gerenciamento de desastres naturais é um conjunto de ações que tem como objetivo mitigar os efeitos negativos destes eventos extremos.

Para a compreensão do que pode ser feito visando minimizar os danos causados pela ameaça, deve-se ter claro o que se entende por risco. Kron (2003) traz o conceito de risco e define seus componentes. Segundo o autor, cientificamente, risco é um fator resultante do produto entre: a ameaça, a exposição e a vulnerabilidade (Figura 3.4).

Figura 3.4. Triângulo do risco (Fonte: Crichton, 1999).

A ameaça é o fenômeno natural que atinge a região. Características como magnitude, probabilidade de ocorrência e possibilidade de previsão, contribuem para a avaliação do grau de risco. Medidas estruturais que atenuem a magnitude diminuem a parcela da ameaça na estimativa do risco.

A exposição diz respeito à quantidade de pessoas e bens econômicos situados na área atingida pelo desastre. O zoneamento econômico-ambiental pode ser considerado um meio de reduzir a exposição da região.

A vulnerabilidade indica quão bem preparada está a área para receber a ameaça. Por exemplo, medidas como construções “a prova” de inundações e sistema de alerta proporcionam menor vulnerabilidade.

No aspecto cronológico, as medidas de mitigação de risco podem ser divididas em: prévia-, simultânea- e posteriormente ao desastre.

Maheshwari (1997)¹ apresenta um modelo de gerenciamento de desastres naturais dividido em quatro etapas (Figura 3.5):

- Preparação: atividades de planejamento bem anteriores à ocorrência do evento, incluindo planos de emergência, monitoramento e até medidas estruturais para prevenir o desastre.
- Resposta: coordenação dos recursos disponíveis imediatamente antes, durante e após a emergência, visando reduzir os danos. Tais como: monitoramento, aviso, supressão ou controle do perigo, avaliação das necessidades emergenciais imediatas, avaliação e mobilização dos recursos disponíveis, evacuação e atendimento de vítimas, treinamento de voluntários.
- Restabelecimento: reestruturação dos sistemas afetados pelo desastre. As ações podem ser de curto ou longo prazo em relação à época do evento, desde a procura por vítimas, provisão de suprimentos até a reestruturação de serviços públicos.
- Mitigação: adoção de medidas cujo objetivo seja reduzir a exposição e/ou a vulnerabilidade ao perigo, minimizar riscos futuros e propiciar comunidades mais seguras. Tais medidas são de longo prazo. Algumas das ações correspondentes a esta etapa são: realocação de atividades, evacuações,

¹ Maheshwari, S. (1997) Gis from a disaster management perspective: an overview. **In: Conference on GIS and Applications of Remote Sensing to Disaster Management**, Maryland, Estados Unidos. Citado por Neto (2000).

políticas de zoneamento para controle e uso do solo, regulamentação de construções, programas educacionais.

Figura 3.5. Etapas do Gerenciamento de Desastres Naturais.

A Organização Meteorológica Mundial recomenda planos nacionais que contemplem essas mesmas quatro fases de ação para o gerenciamento dos desastres (WMO, 2006).

Neste contexto, o sistema de alerta antecipado se enquadra nas etapas de preparação, resposta e até mesmo mitigação. Uma vez que ele compreende ações de monitoramento (preparação) e alerta (resposta) que contribuem para a diminuição da exposição (mitigação).

Mendiondo (2005) apresenta uma proposta de gestão de risco na qual é mostrada a divisão entre atividades técnicas e políticas (tomadores de decisão). Nesta proposta, a gestão do risco de inundações está sub-dividida entre ações antes, durante e depois do evento (Figura 3.6).

Figura 3.6. Etapas cronológicas da gestão de risco. Adaptado de Menciondo (2005).

Seguindo essa divisão, o sistema de alerta estaria situado na interseção entre as elipses *antes* e *durante*.

Portanto, percebe-se que, seja antes ou durante; como uma preparação, resposta ou mitigação do risco; o sistema de alerta antecipado está sempre presente nas propostas de gestão de risco de desastres naturais.

3.3 Sistema de alerta antecipado

Sistemas de alerta antecipado têm como objetivo básico prever e informar à comunidade a possibilidade de ocorrência de um desastre natural (tempestades, deslizamentos, terremotos, inundações, furacões, entre outros).

Krzystofowicz e Davis (1983) tratam a problemática dos sistemas de alerta referentes a inundações. Segundo sua definição, tal sistema está baseado em três elementos principais:

1. Monitoramento
2. Previsão
3. Decisão

No monitoramento, além da coleta, estão presentes o tratamento, armazenamento e distribuição dos dados hidrometeorológicos. Estes dados são usados para a previsão do hidrograma na seção de interesse.

Uma vez de posse desse hidrograma, cabe ao componente de decisão que ações precisam ser tomadas. No modelo de Krzystofowicz e Davis (1983), esta componente é representada por uma organização de gerenciamento da emergência, por um gerente de planícies de inundações ou pelos habitantes da área. Tais organizações poderiam corresponder à Defesa Civil, à Prefeitura Municipal ou ao Comitê de Bacia.

Diferentemente de um plano de gestão de risco, o sistema de alerta não contempla ações de recuperação pós-inundação.

Atualmente, a idéia de um sistema de alerta voltado exclusivamente para um tipo de desastre vêm sendo criticada pela comunidade científica, a tendência seria sistemas capazes de identificar ameaças múltiplas (ISDR, 2006). Deste modo, haveria uma gestão integrada do risco. Porém, nem sempre se têm recursos, tecnologia e pessoal disponíveis para o estabelecimento de um sistema de tal grandiosidade.

Em muitos lugares sequer há qualquer sistema de alerta, nestas condições pode ser válida a implementação de um sistema desastre-orientado.

3.3.1 Alguns Sistemas de Alerta contra inundações no Brasil

Atualmente, no Brasil, estão em operação sistemas de alerta antecipado contra inundações fundamentados em previsões com base em dados de radar e outros menos sofisticados como correlações baseadas em séries históricas. Os diferentes métodos usados resultam em tempos de alerta distintos.

Bacia do Itajaí

Na região da bacia do Itajaí (Santa Catarina), há desde a década de 1920 algum tipo de mecanismo de informação sobre inundações até que, progressivamente, se instalou o

CEOPS – Centro de Operações do Sistema de Alerta da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu (Frank et al, 2000).

O CEOPS, vinculado ao Instituto de Pesquisas Ambientais da Universidade de Regional de Blumenau, atualmente é responsável pelo sistema de alerta desta bacia. A previsão é realizada com base na infra-estrutura de monitoramento hidrometeorológico, mantido pela ANA - Agência Nacional de Água - e pela EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Fistarol et al, 2004).

As informações da rede de telemétrica de pluviômetros são usadas para prever os níveis do rio em duas seções. São gerados boletins a cada hora e a antecedência da previsão pode chegar a até 8 horas (IPA, 2006).

Cidade de Manaus

Na cidade de Manaus, a previsão de cheias é feita com base na correlação do nível d'água atingido em um determinado dia e o pico da cheia daquele ano, que ocorre geralmente em junho. Portanto, o sistema procura prever apenas o nível máximo atingido anualmente. São realizadas previsões apenas nos dias 31 de março, 30 de abril e 31 de maio de cada ano. A cada previsão, emite-se um boletim que informa a cota do dia de referência, o nível previsto para a cheia do ano (com intervalo de confiança) e uma tabela com informações sobre cheias anteriores. (CPRM, 2005b.) O horizonte de previsão neste caso é de ordem diária. As cheias da região apresentam um longo tempo de percurso, devido ao gigantesco tamanho da bacia hidrográfica e à pequena declividade observada nos leitos dos seus principais corpos d'água. Isto facilita a sua previsibilidade com vários dias de antecedência.

Pantanal

Para a região do Pantanal, as previsões de cheias são realizadas semanalmente também com base em correlações de cota da série histórica. Inferem-se as tendências dos níveis em diversas estações, para as quatro semanas seguintes, reavaliando-se continuamente os valores previstos a cada semana, à medida que novos dados são observados. Os valores previstos são enviados por fax ou correio eletrônico a diversas entidades da região e disponibilizados na Internet na página eletrônica da CPRM (CPRM, 2005a).

Bacia do Rio Doce

O “Sistema de Alerta contra Cheias da Bacia do Rio Doce” é operado em conjunto com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Este sistema consiste na coleta e análise de dados de diversas entidades, elaboração de previsão hidrológica e transmissão de informações para Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, Polícia Militar e Prefeituras de 16 municípios localizados às margens dos rios Piranga, Piracicaba e Doce (CPRM, 2005c.).

A previsão hidrológica é feita por meio de correlações de vazões a partir dos dados coletados nos períodos chuvosos anteriores, a partir de 1997/1998. Estes modelos não quantificam o incremento de vazão devido a uma chuva localizada. O *lead-time* varia entre 3 e 24h. O sistema só entra em funcionamento durante o período chuvoso. (Castilho, 2002).

O que a CPRM considera um sistema de alerta, se enquadraria apenas no monitoramento e previsão do evento. O órgão produz boletins e os repassa a outras entidades, não propõe ações de preparação e tampouco de restauração após o evento. Também é desconhecida a área atingida pela provável cheia.

Os três “sistemas de alerta” operam com base em equações empíricas, porém suas escalas temporais são bem distintas, de horas, semanas e dias para a Bacia do Doce, Pantanal e Manaus respectivamente.

SAISP

O Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP), operado pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), gera a cada cinco minutos boletins sobre as chuvas e suas conseqüências na cidade de São Paulo. O monitoramento hidrológico do SAISP é feito pela Rede Telemétrica de Hidrologia do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e pelo Radar Meteorológico de São Paulo. Os principais produtos do SAISP são:

- Mapas de chuva observada na área do Radar de Ponte Nova;
- Leituras de postos das Redes Telemétricas do Alto Tietê, Cubatão, Registro e Piracicaba;
- Mapas com previsões de inundações na cidade de São Paulo (FCTH, 2005).

Alerta Rio

O Sistema de Alerta de Chuvas Intensas e de Deslizamentos em Encostas da Cidade do Rio de Janeiro foi criado em 25 de setembro de 1996 com o objetivo de emitir boletins de alerta à população (via estações de rádio e TV) sempre que houver previsão de chuvas intensas que possam gerar inundações de vias públicas e/ou acidentes geotécnicos em encostas (deslizamentos).

O Sistema utiliza informações, em tempo real, de 32 estações pluviométricas automáticas instaladas no Município do Rio de Janeiro, imagens de radares meteorológicos (Convênio Prefeitura do Rio de Janeiro e Comando da Aeronáutica), detector de raios, dados climáticos de duas estações meteorológicas, imagens de satélite e informações disponíveis na WEB. Os dados são analisados numa estação central computadorizada

situada na sede da Geo-Rio por geotécnicos e meteorologistas, em esquema de plantão 24 horas por dia (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2003).

Os dados das estações são enviados para a central a cada 15 minutos. O procedimento para a previsão de chuva e do tempo não é informado.

Além disso, a prefeitura também incentiva os moradores a terem em suas residências recipientes que funcionem como pluviômetro para acompanhar o desenvolvimento da chuva.

3.4 Previsões em tempo real

A estimativa do valor de uma variável no tempo futuro, tendo informações no tempo presente das condicionantes desta variável é o princípio das previsões de curto prazo, também conhecidas por tempo real ou tempo atual (Pedrollo e Lanna 2003).

Para um sistema de alerta antecipado contra inundações, a variável de interesse é a vazão ou ainda o nível do rio em uma determinada seção. Esta estimativa pode ser realizada a partir dos seguintes procedimentos (Tucci 1998, p. 372) (Figura 3.7):

- Previsão meteorológica da precipitação integrada a um modelo chuva-vazão;
- Estimativa da precipitação com base em radar e rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo chuva-vazão;
- Estimativa da precipitação com base em rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo hidrológico;
- Previsão de vazão com base em níveis ou vazões do rio a montante e de seus afluentes;
- Previsão de vazão com base em níveis ou vazões do rio a montante e com estimativa da precipitação para bacia de contribuição lateral.

Figura 3.7. Esquema dos tipos de previsão de vazão em tempo atual. A) Previsão com base na precipitação. B) Previsão com base em medidas de vazão ou nível a montante. C) Previsão combinada. Em que $P(t)$ é a precipitação, $Q(t)$ é a vazão, $H(t)$ é o nível d'água. Fonte: Tucci (1998, p. 375)

As previsões baseadas em observações de nível ou vazão a montante são mais precisas. Entretanto, proporcionam um horizonte de previsão menor e por isso sua utilização é mais observada em rios de médio ou grande porte, cujo tempo de deslocamento da onda é maior.

Já para bacias hidrográficas pequenas, onde as inundações se formam mais rapidamente, é mais apropriado o uso de previsão ou estimativa de chuva. Mesmo que o resultado seja menos preciso, sua utilização pode ser justificada pelo aumento do horizonte de previsão (Figura 3.8).

Figura 3.8. Tempo disponível para ação antes da inundação.

Quando não há modelos para previsão de chuva, algumas hipóteses clássicas são adotadas para estimar sua intensidade no decorrer do evento (Toth et al 2000):

- Hipótese 1 - chuva nula: considera-se que não haverá chuva no intervalo seguinte à última observação (Figura 3.9);

Figura 3.9. Hipótese chuva nula.

- Hipótese 2 – persistência: a precipitação observada se manterá constante no intervalo subsequente (Figura 3.10);

Figura 3.10. Hipótese persistência.

- Hipótese 3 - tendência: no próximo intervalo a precipitação seguirá a tendência dos dois últimos valores observados (Figura 3.11).

Figura 3.11. Hipótese tendência.

3.5 Previsão de precipitação

Prever quantitativamente a ocorrência de chuva tem sido uma tarefa que aglutina esforços de diversos pesquisadores, sejam eles físicos, meteorologistas, engenheiros, etc. O propósito de cada qual faz com que as previsões realizadas sejam em escalas diferentes, temporal e espacialmente.

Previsões anuais e mensais são úteis para operação de reservatórios do setor elétrico (Cataldi & Machado, 2004). Porém, estas previsões não são úteis para um sistema de alerta antecipado, pois este necessita de informações em tempo real, ou tempo atual, e com horizonte de até poucas horas para bacias pequenas.

Foufula-Georgiou e Krajewski (1995) fazem uma extensa revisão de modelos para estimativa e previsão de precipitação desde o fim da década de 80 ao início da década seguinte. Especificamente os modelos de previsão a curto prazo são de relevância para esta

pesquisa. Islam e colaboradores (1993)² concluíram preliminarmente que, para escala temporal de 2h e espacial de 2 a 100 km², o tempo de antecedência da previsão seria de no máximo 3h.

A junção de modelos hidrológicos e meteorológicos, feita por Foufoula-Georgiou e Georgakakos (1991)³ e Georgakakos e Foufoula-Georgiou (1991)⁴ resulta em melhorias na previsão de vazões. A partir dos resultados obtidos, percebe-se a importância de dados meteorológicos para este tipo de previsão.

Georgakakos e Krajewski (1991) propuseram a combinação de observações de refletividade obtidas através de radar com modelos conceituais de chuva e estudaram a relevância desse tipo de observação para a previsão de precipitações por meio de modelos não-advectivos. Os autores conseguiram, com uso dos dados do radar, uma redução de 5% a 15% na variância dos erros na vazão obtida.

Seo e Smith (1992) e French e Krajewski (1994) usaram tal combinação para propor um modelo de previsão de chuva em tempo real.

Seo e Smith (1991)⁵ chamaram atenção para a importância da quantidade de água líquida verticalmente integrada (VIL) para a previsão quantitativa de precipitações. Posteriormente, Gomes e Held (2004) avaliaram a variabilidade da quantidade (VIL) baseada nas características de ar atuantes. Visando realizar uma normalização, eles dividiram-na pelo topo dos ecos e a nova variável foi chamada de densidade de VIL. Esses

² Islam, S.; Bras, R; Emanuel, K (1993) Predictability of mesoscale rainfall in the tropics, **J. Appl. Meteor.**, 30(11), pp. 297-310. Citado por Foufoula-Georgiou e Krajewski (1995).

³ Foufoula-Georgiou, E.; Georgakakos, K. P. (1991) **Recent advances in space-time precipitation modeling and forecasting**, in **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**, D.S. Bowles and P. E. O'Connell (eds), D. Reidel Publishing Company, Boston, MA. Citado por Foufoula-Georgiou e Krajewski (1995).

⁴ Georgakakos, K. P. ; Foufoula-Georgiou, E. (1991) **Real Time coupling of hydrological with meteorological models for flood forecasting**, in **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**, D.S. Bowles and P. E. O'Connell (eds), D. Reidel Publishing Company, Boston, MA. Citado por Foufoula-Georgiou e Krajewski (1995).

⁵ Seo, D.J; Smith, J. A. (1991) Rainfall estimation using rain-gages and radar – A Bayesian approach:2. An application. **Stoc. Hydr. Hydraul.**, 5. Citado por Foufoula-Georgiou e Krajewski (1995)

autores estudaram eventos convectivos ocorridos durante o mês de fevereiro e encontraram uma relação entre a severidade da tormenta e faixas de valores assumidos pela densidade de VIL. Tal classificação pode ser implementada para avaliar o grau do alerta a ser emitido na iminência da chuva. No entanto, ela não fornece informações quantitativas sobre o evento chuvoso.

O GPS (Global Positioning System) também pode ser usado como um instrumento meteorológico. O sinal emitido sofre um atraso ao se propagar na atmosfera neutra (troposfera). Esse atraso é, de certa forma, proporcional à quantidade de água presente na troposfera. Desta forma é possível inferir o vapor d'água integrado, ou água precipitável. (Monico e Sapucci, 2003).

Em 2003, Kanda estudou a relação entre a variação temporal do conteúdo de vapor de água precipitável obtido através de GPS e a precipitação estimada por radar para 6 eventos convectivos ocorridos no verão em Tóquio. O autor concluiu que o conteúdo de vapor d'água atinge um valor máximo 1h ou 2h antes do pico de chuva. Além, disso afirma que a observação do incremento de vapor d'água como previsor do aumento da intensidade da chuva na hora seguinte apresenta uma eficiência de 60%. Apesar da eficiência reduzida, esta observação pode ser usada como indício do aumento de chuva a curto prazo.

Informações oriundas de radar são bastante utilizadas para a estimativa de chuva a curto prazo (p. ex. Bellon e Austin, 1984; Grecu e Krajewsk, 2000; Li e Lai, 2004; Begkhuntod e Oki, 2005). Gonçalves e colaboradores (2004) compararam estimativas de chuva por radar com medidas de pluviômetros e verificaram divergência entre os resultados. Para os eventos analisados, o radar subestimou as medidas realizadas pelos pluviômetros. Os autores apontaram como possível causa da divergência a natureza da origem da chuva e concluíram que tempestades convectivas são mais bem representadas pelo radar.

Embora o uso de dados de radares meteorológicos seja de grande valia para sistemas de alerta antecipado, não há muitos radares instalados no Brasil. Dentre os quais podem ser citados: três em São Paulo (em Presidente Prudente, Bauru e Biritiba Mirim - barragem Ponte Nova), um no Paraná (em Teixeira Soares), um em Alagoas (Maceió), um no Ceará (Fortaleza) (Kaiser, 2006 p.55). Devido a esta limitação, ressalta-se a importância da pesquisa por modelos de previsão que não utilizem esta tecnologia.

Georgakakos e Bras (1984a, 1984b) desenvolveram um modelo de previsão hidrometeorológica baseado na conservação da massa de água no interior da nuvem. Os dados de entrada são obtidos por estações meteorológicas na superfície, o que facilita o seu uso. Outra vantagem é a fácil implementação computacional do modelo. São feitas aplicações em duas localidades distintas com resultados satisfatórios em ambos os casos. Os autores propuseram dois tipos de formulações: uma determinística e outra estocástica, sendo que os resultados do segundo tipo são superiores ao primeiro.

Além das formulações com embasamento físico, outros tipos de modelos também são usados para a previsão de chuva em tempo real. Ao comparar o desempenho da utilização de modelo linear auto-regressivo do tipo média móvel (ARMA), técnicas de redes neurais artificiais (RNA) e o método de regressão não-paramétrica dos *k*-vizinhos, Toth e colaboradores (2000) concluíram que diferentes técnicas deram melhores resultados para diferentes eventos. No entanto, o modelo de redes neurais se mostrou mais adequado se comparados todos os eventos chuvosos. Apesar das diferentes eficiências, todos esses modelos se mostraram melhores do que as hipóteses de chuva nula, persistência ou tendência.

Ao usar os resultados dessas previsões como entrada em modelo de transformação chuva-vazão, os autores verificaram que as eficiências de cada um dos métodos eram muito próximas para as primeiras previsões. Entretanto, a diferença se acentuava à medida

que o horizonte de previsão aumentava. Mais uma vez, os melhores resultados, para este estudo de caso, foram obtidos com RNA. É importante ressaltar que as análises foram feitas para precipitações médias espaciais na bacia o que, segundo Burlando e colaboradores (1993), "produz um amaciamento das flutuações e não-estacionaridades ao mesmo tempo em que preserva o padrão geral do evento sobre a bacia".

A aplicação destas metodologias (ARMA, RNA e k -vizinhos) requer uma longa série de dados observados distribuídos espacialmente na bacia hidrográfica e são mais adequadas a eventos chuvosos de longa duração, cujas características de persistência são diferentes das apresentadas pelas chuvas convectivas.

Os diversos trabalhos citados anteriormente indicam o uso de modelos estocásticos sobre os determinísticos. Outro senso comum diz respeito a previsões probabilísticas.

O Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realiza estimativas de precipitação baseadas em imagens de satélite. As imagens fornecidas pelo satélite GOES são analisadas automaticamente através de um algoritmo denominado Hidroestimador. A cada 30 minutos são geradas taxas de precipitação instantânea e acumulada nas últimas 24 horas. Esse intervalo de tempo pode variar, visto que pode haver falhas na obtenção das imagens do satélite (CPTEC, 2006).

O CPTEC também realiza operacionalmente previsões numéricas de tempo, através de rodadas de modelos numéricos de previsão regionais e globais (p. ex. Regional ETA, Global T126L28, Global T213L42, Ensemble, CATT-BRAMS). Uma das saídas desses modelos é a precipitação. Há outras saídas, como, por exemplo, o vento, que servem de dados para outros modelos de previsão.

Quatro produtos são disponibilizados, graficamente, via Internet através de meteogramas. Esses meteogramas, no entanto, são gerados apenas para algumas cidades. As previsões são feitas com 5 a 30 dias de antecedência.

3.6 Transformação chuva- vazão

Uma vez de posse dos valores de precipitação, sejam eles medidos ou estimados, parte-se para a simulação hidrológica da bacia em questão. Este procedimento é muito usado por hidrólogos, visto que dados de precipitação são de mais fácil obtenção que dados fluviométricos.

Do ponto de vista científico, a transformação da chuva em vazão envolve os processos de interceptação, armazenamento local, evapo-transpiração, infiltração e escoamento. Atualmente se dispõe de técnicas para a representação bastante precisa destes fenômenos. No entanto, devido ao conflito entre essa tecnologia e a eficiência, praticidade e precisão requeridas, estes processos vêm sendo representados de forma simplificada nos modelos de cálculo de vazão utilizados rotineiramente.

3.6.1 Separação do escoamento

Tucci (1993) apresenta diversas metodologias de determinação da precipitação efetiva, dentre elas:

- O uso de equações de infiltração (ex Horton, Green Ampt) para calcular as perdas iniciais e então a precipitação efetiva é a observada subtraída essas perdas. O autor aponta a dificuldade de estimativa dos parâmetros das equações como a principal dificuldade de aplicação da metodologia.
- Índice Φ : representa um valor de infiltração constante durante a cheia. Seu cálculo é feito pelo quociente entre o total de chuva e o número dos intervalos de tempo. A precipitação efetiva é calculada da mesma maneira que nas equações de infiltração, ou seja, é igual à diferença entre o precipitado e o infiltrado. Nos intervalos em que Φ for

maior que a precipitação em algum intervalo, deve-se distribuir a diferença nos demais intervalos para que o volume da precipitação efetiva seja igual ao escoado.

- Índice W: da mesma maneira que o índice Φ , estima-se uma infiltração média no intervalo, porém apenas é deduzido das precipitações que superem a taxa de infiltração.
- Relações Funcionais: estes tipos de modelos propõem uma forma relação entre a precipitação total e a efetiva. Um exemplo desta metodologia é o Método do SCS (Soil Conservation Service), bastante utilizado nos cálculos hidrológicos. A relação proposta é a razão entre a precipitação efetiva e a precipitação total é igual ao quociente do volume infiltrado pela capacidade máxima de armazenamento do solo.

No Brasil, para o cálculo da infiltração e posterior determinação da chuva excedente, tem sido de uso corrente a metodologia proposta pelo SCS. Os profissionais que atuam na área têm uma maior sensibilidade na estimativa da infiltração através da escolha do CN (*Curve Number*), parâmetro usado na metodologia do SCS. Apesar de ser uma metodologia determinística e concentrada, produz resultados satisfatórios.

3.6.2 Determinação do hidrograma de cheia

O desenvolvimento científico na determinação das vazões teve início no final do século XIX e vem evoluindo desde então. DER (2004) traz um pequeno histórico do desenvolvimento desse tipo de modelos.

No final do século XIX, a determinação das vazões era feita a partir equações que a relacionavam com a área da bacia hidrográfica, e, posteriormente levando-se em conta também sua declividade e forma. Estas relações foram propostas principalmente para áreas rurais, não são de uso corrente, tendo sido superadas por outras técnicas.

Posteriormente, a partir de 1910, as vazões eram determinadas utilizando-se as mesmas características das bacias acima mencionadas, incluindo-se a chuva como fator

gerador e tratando a bacia como uma caixa preta. A Fórmula Racional é um exemplo desta técnica, sendo ainda hoje utilizada na rotina da drenagem de estradas e urbana.

A partir de 1950, ainda utilizando um sistema do tipo caixa-preta, começou-se a empregar a técnica do Hidrograma Unitário. São exemplos da técnica do hidrograma unitário os procedimentos do “Soil Conservation Service” (SCS), do Colorado Urban Hydrograph Procedure, do método de Snyder, etc.

A partir de 1940, passou-se a empregar a técnica do Modelo Hidrológico Distribuído, tentando simular o escoamento superficial, empregando os princípios físicos envolvidos no processo, com diferentes graus de detalhamento. Essa técnica teve grande desenvolvimento a partir de 1960, com o advento dos computadores. São exemplos no Brasil os modelos hidrológicos distribuídos IPH-II, o Modelo Hidrológico Determinístico para Bacias Urbanas (M.HD.BU).

Há diversos modelos através dos quais pode-se obter a estimativa da vazão: conceituais ou empíricos, concentrados ou distribuídos, determinísticos ou estocásticos. A escolha do modelo deve estar de acordo com as características da bacia, com a disponibilidade de dados capazes de alimentar o modelo e medições que viabilizem a calibração do mesmo (Tucci, 1998).

3.7 Síntese

Os desastres naturais, nos quais estão incluídos as inundações vêm sendo encarados como ameaças com as quais se deve aprender a conviver. Ao invés de simplesmente tentar evitar sua ocorrência, a tendência é minimizar os prejuízos causados por eles. Dentro desse contexto se destacam: gerenciamento de desastres naturais, gerenciamento de risco, e sistema de alerta antecipado.

Uma das maneiras de realizar o alerta é através de previsões de chuva, seguido por transformação chuva-vazão. O tipo de previsão requerida é previsão quantitativa de chuva,

há estudos que usam dados de sensoriamento, há técnicas de análise de séries temporais, técnicas de redes neurais artificiais, modelos numéricos de previsão de tempo e modelos físicos simplificados. A escassez de fonte de dados mais sofisticados, por vezes conduz o técnico a utilizar o que se tem disponível no momento.

4 Materiais e Métodos

A previsão de vazão proposta é o acoplamento de um modelo de previsão hidrometeorológica seguido de um módulo chuva-vazão.

Para a calibração e posterior validação do esquema, este operará de modo *off line*, isto é, os dados utilizados foram anteriormente coletados das estações. No entanto, para colocar em funcionamento tal proposta, é necessário que o modo de operação passe a ser *on line*, o que implica um sistema de transmissão de dados da(s) estação(ções) ao computador que roda o modelo.

Os dados da estação meteorológica servem de entrada para o modelo de previsão hidrometeorológica. Esta estimativa se torna dado de entrada para o modelo de transformação chuva-vazão. Faz-se então uma outra avaliação de resultado; desta vez, a vazão é a variável de interesse. Identifica-se a possibilidade de ocorrência de inundações e posterior transmissão aos órgãos competentes, que então devem tomar uma decisão sobre o que fazer com essa informação.

Este capítulo será dividido em quatro partes.

No item 4.1 será descrito o modelo de previsão de precipitação utilizado. Dentro desta parte haverá uma seção com a descrição de como são calculados os fatores de *input* e *output* do modelo. Além disso, haverá uma seção especial para o caso da re-parametrização do modelo. Para finalizar esta parte, será mostrado, finalmente, o cálculo da estimativa de precipitação.

Modelo numérico de previsão de tempo será abordado no item 4.2.

O item 4.3 traz a metodologia referente à transformação chuva-vazão.

Para finalizar o capítulo, serão mencionadas, no item 4.4, as medidas de desempenho usadas na fase de calibração.

4.1 Modelo conceitual de previsão hidrometeorológica

Dentre os modelos de previsão de precipitação citados anteriormente, optou-se pelo proposto por Georgakakos e Bras (1984a) devido ao seu embasamento físico aliado à facilidade de obtenção dos dados de entrada e a possibilidade de implementação computacional.

A base teórica do modelo proposto por Georgakakos e Bras (1984a, 1984b) utiliza o conceito de reservatório hidrológico, neste caso a nuvem é considerada como um reservatório de água condensada.

A Figura 4.1 esquematiza o movimento de ar com umidade e água em uma coluna retangular de área elementar, dA , com seu centro localizado na coordenada (x,y) . Nessa coluna ocorre a ascensão de ar com umidade específica, q , sendo conhecidos os valores de temperatura, T_0 , e pressão, p_0 , e temperatura de ponto de orvalho, T_d , na superfície.

Na camada situada entre o nível de condensação, Z_b , e o topo da nuvem, Z_t , a variação temporal da massa de água no estado líquido X é expressa pela equação da continuidade:

$$\frac{dX(t)}{dt} = I(t) - O_t(t) - O_b(t) \quad (4.1)$$

em que: I é a entrada de água devido à condensação do vapor contido no ar ascendente [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]; O_t é a saída de umidade pelo topo da nuvem [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]; O_b é a saída de umidade pela base da nuvem [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$].

Figura 4.1. Modelo de previsão hidrometeorológica (Georgakakos e Bras, 1984a)

4.1.1 Estrutura da programação

Inicia-se a programação com o cálculo da entrada de umidade I (Figura 4.2). Este fator é função das variáveis de entrada (T_o , p_o , UR) e dos parâmetros v e p_t . Estes últimos são obtidos indiretamente através de outros parâmetros (ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , p_l). Esta etapa será mostrada no item 4.1.2.

Figura 4.2. Fluxograma da programação da entrada de umidade *I* do modelo de previsão hidrometeorológica.

Em seguida, nos itens 4.1.3 e 4.1.4, serão mostradas as seqüências de cálculo para a obtenção das saídas do sistema (*O_t* e *O_b*). Estas parcelas também são funções das variáveis de entrada e dos mesmos parâmetros que a entrada de umidade, porém com acréscimo de mais um parâmetro (*c*) (Figura 4.3).

Figura 4.3. Fluxograma do cálculo das saídas (O_t e O_b).

Uma vez calculadas as parcelas do balanço de massa (Equação 4.1), é possível estimar o valor da variável de estado X no próximo intervalo de tempo.

Em seguida, procede-se o cálculo do valor da taxa de precipitação correspondente aos dados de entrada. Esta etapa está descrita no item 4.1.5.

4.1.2 Entrada de umidade I

Considera-se que há conservação de calor à medida que o ar sobe, de modo que não há trocas de calor entre a parcela ascendente e o ar ambiente. Portanto, o ar contendo vapor de água ascenderá com taxa adiabática de decaimento da temperatura até atingir o nível de condensação, Z_b .

Este nível equivale ao nível máximo de elevação que uma massa de ar contendo vapor de água pode alcançar antes de atingir a condição de saturação. Durante a ascensão

da massa de ar, a razão de mistura w e a temperatura potencial θ permanecem constantes mas a razão de mistura de saturação w_s decresce até se igualar a w .

A temperatura potencial θ é definida como a temperatura à qual uma massa de ar estaria caso fosse expandida, ou comprimida, adiabaticamente a partir de suas condições iniciais de temperatura e pressão para uma pressão de referência p_{ref} (p_{ref} equivale a $1,0 \cdot 10^5 \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$).

$$\theta = f(p, T, p_{ref}) = T \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p} \right)^{R/C_p} \quad (4.2)$$

em que: θ [°K], p [$\text{Kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$]; T [°K]; R é constante do ar ($R = 287 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1}$) e c_p é o calor específico à pressão constante ($c_p = 1004 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1}$).

A razão de mistura w é a relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco existente num volume de ar. Esta razão também pode ser escrita em função da pressão e da pressão parcial de vapor de saturação $e_s(T)$. Quando o ar está na superfície, não saturado, sua razão de mistura w_0 pode ser obtida em função da razão de mistura de saturação w_s da temperatura ponto de orvalho T_d e pressão p_0 .

$$w_0 = w_s(T_d, p_0) \cong 0,622 \cdot \frac{e_s(T_d)}{p_0} \quad (4.3)$$

em que: w [kg.kg^{-1}], e_s [$\text{kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$].

A pressão de saturação e_s é uma função não-linear convexa da temperatura. Esta pressão pode ser aproximada por uma equação empírica:

$$e_s(T) = A_1 \cdot (T - 223,15)^{3,5} \quad (4.4)$$

em que: A_1 é uma constante que vale $8,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{°K}^{-3,5}$.

No nível de condensação, a razão de mistura é mesma que o ar teria se estivesse saturado na superfície (Equação 4.5) e a temperatura potencial θ se mantém constante (Equação 4.6).

$$0,622 \cdot \frac{A_1 \cdot (T_s - 223,15)^{3,5}}{p_s} = 0,622 \cdot \frac{A_1 \cdot (T_0 - 223,15)^{3,5}}{p_0} \quad (4.5)$$

$$\theta = T_0 \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_0} \right)^{R/C_p} = T_s \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p_s} \right)^{R/C_p} \quad (4.6)$$

No sistema de equações composto pelas equações 4.5 e 4.6, as únicas incógnitas são T_s e p_s . A resolução do mesmo leva a:

$$p_s = \frac{1}{\left(\frac{T_0 - T_d}{223,15} + 1 \right)^{3,5}} \cdot p_0 \quad (4.7)$$

$$T_s = \frac{1}{\left(\frac{T_0 - T_d}{223,15} + 1 \right)} \cdot T_0 \quad (4.8)$$

A partir deste nível, há liberação de calor latente e conseqüente aquecimento do ar, que agora contém não somente vapor mas também gotículas de água. A taxa de decaimento da temperatura torna-se pseudo-adiabática. Admite-se que os processos de condensação e de precipitação se estendem até o topo das nuvens, correspondente a altitude Z_t . Porém, caso o ar na superfície já esteja saturado, todo o processo se dará segundo a taxa pseudo-adiabática de decaimento da temperatura.

A temperatura potencial da ascensão pseudo-adiabática, θ_e [°K], é dada por:

$$\theta_e = \theta \cdot \exp \left[\frac{L(T_s) \cdot w_s(T_s, p_s)}{c_p \cdot T_s} \right] \quad (4.9)$$

em que: $L(T)$ é o calor latente de condensação para a temperatura T [J.kg⁻¹].

O calor latente de condensação é aproximado por uma função linear da temperatura, conforme equação:

$$L(T) = A - B \cdot (T - 273,15) \quad (4.10)$$

em que: A e B são constantes. $A = 2,5 \cdot 10^6$ [J.kg⁻¹] e $B = 2,38 \cdot 10^3$ [J.kg⁻¹.°K⁻¹].

Substituindo θ na equação 4.9 por sua expressão dada em 4.6, para um T e p qualquer, tem-se:

$$\theta_e = T \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p} \right)^{R/C_p} \cdot \exp \left[\frac{L(T) \cdot w_s(T, p)}{c_p \cdot T} \right] \quad (4.11)$$

Igualando a equação 4.11 com o valor de θ_e obtido em 4.9 e conhecendo-se a pressão no topo a nuvem, p_t , encontra-se o valor de temperatura correspondente T_t por meio de um método iterativo.

Uma vez obtidos os valores de p_t e T_t , calcula-se a razão de mistura $w_s(T_t, p_t)$ em Z_t , nível correspondente ao topo da nuvem.

A entrada de umidade I [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] é estimada através da variação da umidade específica q entre a base e o topo da nuvem. No entanto o valor de q pode ser aproximado pelo valor de w .

$$I = \rho_{ar} \cdot (w_0 - w_s(T_t, p_t)) \cdot v \cdot dA \quad (4.12)$$

Em que ρ_{ar} é a massa específica média do ar [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; v é a velocidade média de ascensão do ar úmido [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] e dA é a área unitária [m^2].

4.1.3 Perda de umidade pelo topo da nuvem (Ot)

Os fluxos de água líquida nas elevações Z_b e Z_t dependem da dinâmica de formação das gotículas das nuvens, envolvendo fenômenos complexos como a coalescência de partículas de água. A abordagem apresentada será simplificada, visto que a proposta do modelo é operar com dados escassos.

As gotículas que saem da nuvem por seu topo são aquelas que a velocidade vertical ascendente consegue arrastar. Portanto, seus diâmetros devem ser tais que sua massa seja pequena o suficiente para ser levada para fora do limite superior da nuvem.

$$Ot(D) \cdot dD = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_a \cdot D^3 \cdot (v_\beta - v_t(D)) \cdot n_t(D) \cdot dD \quad (4.13)$$

em que: $Ot(D)$ é a taxa de saída de massa por unidade de área [$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$], ρ_a é a densidade da água [kg.m^{-3}], $nt(D)$ é a distribuição de tamanho das partículas no topo da nuvem, v_β é a velocidade de ascensão no topo da nuvem [m.s^{-1}], $v_t(D)$ é a velocidade de descida no topo da nuvem [m.s^{-1}].

Para que haja fluxo ascendente, v_β deve ser maior que v_t , portanto os limites da integral da equação devem ser $(0, D')$, sendo D' o diâmetro máximo que satisfaz a condição $v_\beta \geq v_t$. Então, D' depende da distribuição de velocidade e da distribuição do tamanho das partículas na nuvem.

Admite-se que a camada de formação das nuvens seja bem misturada através de movimentações turbulentas do ar e que o número de gotículas, $n(D)$, de diâmetro equivalente, D , possa ser expresso por uma função exponencial do tipo:

$$n(D) = n_0 \cdot e^{-c \cdot D} \quad (4.14)$$

em que: n_0 é o número de gotículas cujo diâmetro tende a zero, c é um parâmetro que corresponde ao inverso do diâmetro médio das partículas [m^{-1}], D [m].

Com essa caracterização das partículas, relaciona-se a massa de água líquida, X , à soma das massas de todas as gotículas em um determinado nível conforme:

$$X(D) = \rho_a \cdot n_0 \cdot e^{-cD} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D^3 \quad (4.15)$$

em que: X é a massa equivalente por unidade de volume [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], ρ_a é a densidade da água [kg.m^{-3}].

Assume-se que a velocidade terminal relaciona-se linearmente com D :

$$v_t(D) = \alpha \cdot D \quad (4.16)$$

em que: α é um coeficiente [$\alpha = 3500 \text{ s}^{-1}$].

Admite-se também que c varia linearmente com a altura:

$$c(Z) = c_t + \frac{Z}{Z_c} \cdot (c_b - c_t) \quad (4.17)$$

em que: c_t e c_b são o inverso do diâmetro médio no topo e base da nuvem, respectivamente [m^{-1}]; Z_c é a altura da nuvem, desde a base ao topo [m].

Como c é o inverso do diâmetro médio, D_{med} , pode-se reescrever 4.17 em função de D_{med} :

$$D_{med}(Z) = \frac{1}{\left(1 - \frac{Z}{Z_c}\right) \cdot \frac{1}{D_{med,b}} + \frac{1}{Z_c} \frac{1}{D_{med,t}}} \quad (4.18)$$

em que: $D_{med,b}$ e $D_{med,t}$ são os diâmetros médios na base e topo, respectivamente [m].

A massa equivalente de água, X , agora é dada por:

$$X = \int_0^{Z_c} \frac{1}{6} \cdot \rho_a \cdot n_0 \cdot \left\{ \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 \cdot e^{-D[c_b + (Z/Z_c)(c_t - c_b)]} \right\} \cdot dZ \quad (4.19)$$

Considerando uma distribuição uniforme de c com a altura, $D_{min} = 0$, $D_{max} = \infty$, a integração 4.19 de resulta em:

$$X = \pi \cdot \rho_a \cdot n_0 \cdot Z_c \cdot \frac{1}{c_b^4} \quad (4.20)$$

De 4.20 obtém-se expressão para n_0 , substituindo-a em 4.14, tem-se, para $n_t(D)$:

$$n_t(D) = \frac{c_b^4}{\pi \cdot \rho_a \cdot Z_c} \exp(-c_t \cdot D) \cdot X \quad (4.21)$$

A expressão de O_t assume a forma:

$$O_t = \int_0^{D'} \frac{\pi}{6} \cdot \rho_a \cdot n_0 \cdot D^3 (v_\beta - \alpha D) \cdot e^{-c_t \cdot D} dD \quad (4.22)$$

4.1.4 Perda de umidade pela base da nuvem (Ob)

Analogamente a O_t , O_b é obtido através de:

$$O_b = \int_D^{\infty} \frac{\pi}{6} \cdot \rho_a \cdot n_0 \cdot D^3 (\alpha D - v_\beta) \cdot e^{-c_b \cdot D} dD \quad (4.23)$$

4.1.5 Precipitação

A taxa de precipitação por unidade de área, P , que atinge o solo é uma porção de O_b , visto que nem toda a água que sai da nuvem chega à superfície.

$$P = \int_{Dl}^{+\infty} \frac{\pi}{6} \cdot \rho_a \cdot D^3 \cdot \zeta(D) \cdot (v_t(D) - v_\beta) \cdot n(D) \cdot dD \quad (4.24)$$

em que: P [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$]; Dl é o máximo valor entre D_c e (v_β/α) [m]; $\zeta(D)$ é uma função que reduz o diâmetro das partículas.

Considerando as perdas por evaporação, define-se o diâmetro crítico, D_c , como o diâmetro abaixo do qual todas as partículas são evaporadas completamente antes de atingir o solo.

$$D_c = \left[\frac{1}{C_1} \cdot \frac{4D^*}{R_v} \cdot \left(\frac{es(T_w)}{T_w} - \frac{es(T_d)}{T_0} \right) \cdot Z_b \right]^{1/3} \quad (4.25)$$

em que: D^* é a difusividade do vapor de água no ar [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], R_v é a constante de gás do vapor de água ($R_v = 461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$), T_w é a temperatura de bulbo úmido [$^\circ\text{K}$].

A difusividade, por sua vez, é dada por:

$$D^* = 2,11 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T_0}{T^*} \right) \cdot \left(\frac{p^*}{p_0} \right) \quad (4.26)$$

em que: $T^* = 273,15^\circ\text{K}$ e $p^* = 101,325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

São definidos números adimensionais para o cálculo das parcelas e capacidade de comparação entre elas.

O número N_v é um indicativo da força da velocidade de ascensão na base da nuvem, quanto maior a velocidade, maior será esse número.

$$N_v = \frac{v_\beta \cdot C}{\alpha} \quad (4.27)$$

A medida da influência do processo de difusividade é expressa pelo adimensional Nd . Maiores perdas são representadas por maiores valores de Nd .

$$Nd = c \cdot Dc \quad (4.28)$$

Já o número v_p corresponde às partículas de diâmetro $4/c$, que são os que mais contribuem com a taxa de precipitação.

$$v_p = 4\alpha \cdot c^{-1} \quad (4.29)$$

Integrando as equações 4.22, 4.23 e 4.24 e, usando os números adimensionais expressos em 4.27, 4.28 e 4.29, tem-se:

$$Ot = \frac{X}{\delta \cdot Zc} v_p \left[\frac{1 + \frac{3}{4} Nv + \frac{Nv^2}{4} + \frac{Nv^3}{24}}{e^{Nv}} + \frac{Nv}{4} - 1 \right] \quad (4.30)$$

$$Ob = \frac{X}{\delta \cdot Zc} v_p \left[\frac{1 + \frac{3}{4} Nv + \frac{Nv^2}{4} + \frac{Nv^3}{24}}{e^{Nv}} \right] \quad (4.31)$$

Para $Nd \geq Nv$:

$$P = \frac{X}{\delta Zc} v_p \left[\frac{\left(1 - \frac{Nv}{4}\right) \cdot \left(1 + Nd + \frac{Nd^2}{2}\right) + \frac{Nd^3}{8}}{e^{Nd}} \right] \quad (4.32)$$

Para $Nd < Nv$:

$$P = \frac{X}{\delta Zc} v_p \left[\frac{1 + \frac{3}{4} \cdot Nv + \frac{Nv^2}{4} + \frac{Nv^3}{24} - \frac{Nd^3}{24}}{e^{Nv}} \right] \quad (4.33)$$

Uma vez calculada a taxa de entrada I e as saídas Ob e Ot (em função de X), aplica-se a equação de conservação de massa 4.1 para encontrar o valor da variável X . De posse desse valor calcula-se, então, a taxa de massa precipitada por unidade de área P .

4.1.6 Re-Parametrização do modelo

A formulação apresentada tem como parâmetros: 1) a pressão no topo da nuvem p_t , 2) a velocidade de ascensão v e 3) o inverso do diâmetro médio das partículas na base da nuvem c .

Os mesmos autores apresentam uma alternativa para a re-parametrização em termos de parâmetros mais robustos (Georgakakos e Bras, 1984b).

4.1.6.1 Velocidade v e Pressão p_t

Sulakvelidze (1969)⁶ sugere que a velocidade v obedece uma lei do tipo:

$$v = \varepsilon_1 \cdot (c_p \cdot \Delta T)^{1/2} \quad (4.34)$$

em que: ε_1 é um parâmetro constante [adimensional]; c_p é a constante de calor específico do ar seco sob pressão constante [$\text{J.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1}$]; e :

$$\Delta T = T_m - T_s' \quad (4.35)$$

em que: T_m é a temperatura da nuvem [°K] em um certo nível de pressão p' , assumindo ascensão pseudo-adiabática; T_s' é a temperatura do ar [°K] no mesmo nível.

A quantidade ε_1 é semelhante à razão entre a energia cinética e a térmica por unidade de massa ascendente no nível p' .

Devido à dificuldade de obtenção de radiosondagem em tempo real, T_s' é tido como a temperatura no nível p' resultante de uma ascensão adiabática seca. O nível de pressão p' corresponde àquele no qual a velocidade v atinge o valor médio. No perfil de velocidade assumido pelos autores, o nível p' corresponde a:

⁶ Sulakvelidze, G.K. (1969) **Rainstorms and Hail**, traduzido do russo pelo Programa Israelense de Traduções Científicas, Jerusalém. Citado por Georgakakos e Bras (1984b).

$$p' = p_s - \left(\frac{p_s - p_t}{4} \right) \quad (4.36)$$

A temperatura T_s' obedece à equação de resfriamento adiabático, por isso tem seu valor calculado por:

$$T_s' = \frac{T_0}{p_0^{0.286}} \cdot \left(\frac{3}{4} p_s + \frac{1}{4} p_t \right)^{0.286} \quad (4.37)$$

A temperatura T_m é obtida iterativamente substituindo o valor de p' na equação da temperatura potencial pseudo-adiabática:

$$\theta_e = T_m \cdot \left(\frac{p_{ref}}{p'} \right)^{R/C_p} \cdot \exp \left[\frac{L(T_m) \cdot w_s(T_m, p')}{c_p \cdot T_m} \right] \quad (4.38)$$

Percebe-se, nas equações de 4.34 a 4.38, uma relação implícita entre v e p_t .

Outra relação é sugerida baseada em observações de nuvens de chuva. Quanto mais forte a velocidade vertical ascendente, maior o desenvolvimento da nuvem e, conseqüentemente, menor o nível correspondente a p_t . Por outro lado, p_t também depende do histórico da tormenta, visto que quando a chuva dura por muitas horas, mesmo para baixas velocidades, espera-se que p_t seja baixo. Como não se tem informações do sistema antes de atingir a bacia hidrográfica, a outra relação entre v e p_t é:

$$\frac{p_t - p_l}{\varepsilon_2 - p_l} = \frac{1}{1 + \varepsilon_3 \cdot v} \quad (4.39)$$

em que: p_l é o menor valor que p_t pode assumir [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$]; ε_2 [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$] e ε_3 [s.m^{-1}] são parâmetros constantes.

O parâmetro p_l pode ser considerado igual à pressão no limite da troposfera ($p_l = 200$ mbar ou $20000 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$); ε_2 depende do passado da tormenta antes de atingir o domínio da bacia e ε_3 controla a relação entre v e p_t .

4.1.6.2 Inverso do diâmetro médio na base da nuvem c

Processos como condensação, colisão-coalescência são muito importantes para a determinação do parâmetro c . No entanto, os autores fazem uso de uma relação simples entre c e v .

$$\frac{1}{c} = \varepsilon_4 \cdot v^k \quad (4.40)$$

em que: ε_4 [$s^k \cdot m^{(1-k)}$] e k [adimensional] são parâmetros constantes.

4.1.7 Geração sintética das variáveis de entrada

Quando o modelo é usado tendo como entrada as variáveis medidas, o resultado obtido corresponde à estimativa de precipitação no intervalo de tempo seguinte. Para que se tenha um horizonte de previsão mais amplo é necessário realizar previsões das variáveis climatológicas.

Georgakakos e Bras (1984b) sugerem relacionar as variáveis entre si através de uma regressão multi-variável de *lag* 1. De forma simplificada, nesta pesquisa, foram usadas equações de auto-regressão de *lag* 1. (Equação 4.41)

$$Y_t - \bar{Y} = (Y_{t-1} - \bar{Y}) \cdot \rho + \xi_t \quad (4.41)$$

em que: Y_t é a variável (temperatura do ar, umidade ou pressão atmosférica) no instante t , ρ é o coeficiente de autocorrelação de *lag* 1 e ξ_t é um número aleatório.

Desta maneira foram produzidos os dados de entrada sintéticos para o modelo.

4.2 Previsão numérica de tempo

Outra tentativa de previsão de precipitação foi usar os resultados do modelo regional de previsão numérica de tempo disponibilizado pelo CPTEC.

Apesar de São Carlos – SP (22,02°S ; 47,89°W) não ser uma das cidades para as quais são disponibilizados os meteogramas do modelo regional, buscou-se avaliar a possibilidade de se usar tais informações referentes a Ribeirão Preto - SP (21,18°S ;

47,81°W), situada a aproximadamente 100km de São Carlos, quando comparadas com os outros modelos propostos.

O ETA, modelo numérico em questão, é um modelo de mesoscala, em ponto de grade, de equações primitivas. A versão do modelo ETA que roda operacionalmente no CPTEC é hidrostático e cobre a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. A resolução horizontal atual é de 40 km e a vertical de 38 camadas. As previsões são fornecidas duas vezes ao dia, uma com condição inicial às 0000 UTC (que corresponde normalmente às 21:00h de Brasília do dia anterior) e outra às 1200 UTC (correspondendo às 09:00h, horário de Brasília).

A condição inicial é proveniente da análise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e as condições de contorno lateral são provenientes das previsões do modelo global do CPTEC e atualizadas a cada 6 horas. O prazo de integração é de 72 horas (CPTEC, 2006).

Vale ressaltar a diferença de escala entre a resolução do modelo e o tamanho da bacia, a estimativa feita para uma área grande tende a subestimar os valores correspondentes a uma área menor.

4.3 Transformação chuva -vazão

4.3.1 Separação do escoamento

Para a separação do escoamento, utilizou-se o método do *curve number* (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS). Tal metodologia é amplamente utilizada em projetos e pesquisas hidrológicas (exemplos em São Carlos: Lira, 2003; Alves, 2005; Boldrin, 2005; Ohnuma Jr, 2005) e tem seus procedimentos detalhados em diversas fontes (ex. Ponce, 1989; Tucci, 1993; Righetto, 1998). Neste item serão apresentadas as equações básicas do mesmo.

O princípio do método é a igualdade entre: 1) a razão da precipitação efetiva, Q , pela precipitação total, P , e 2) a razão entre o volume infiltrado, d , e a capacidade máxima de armazenamento, S .

$$\frac{d}{S} = \frac{Pe}{P} \quad (4.42)$$

em que: d [mm]; S [mm]; Pe [mm]; P [mm].

Introduzindo em 4.42 as perdas iniciais, Ia , e substituindo d por $P - Q$ tem-se:

$$\frac{P - Pe - Ia}{S - Ia} = \frac{Pe}{P} \quad (4.43)$$

em que: Ia [mm].

É sugerida a aproximação de Ia por 20% da capacidade máxima, ou seja, $Ia = 0,2S$.

Dai é obtida a equação para a determinação da precipitação efetiva, Pe .

$$Pe = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (4.44)$$

O valor de S é parametrizado em função de uma variável adimensional denominada *curve number*, CN , através da relação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.45)$$

Substituindo o valor de S da equação 4.45 em 4.44, obtém-se a equação para o cálculo de Pe .

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50,8 \right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203,2} \quad (4.46)$$

Com o total precipitado em cada intervalo de cálculo, calculam-se os módulos da chuva excedente, Pe , que se transformam em escoamento direto.

O CN é um parâmetro que varia na faixa entre 1 – 100, quanto maior o CN menos escoamento é gerado. Para a determinação deste parâmetro, devem ser levados em

consideração: a cobertura superficial do terreno, o tipo de formação geológica e a umidade antecedente do solo; pois estes fatores influenciam na capacidade de armazenamento do solo.

Há tabelas indicam valores para *CN* baseado nessas características. (p. ex Tucci, 1993 p. 405)

4.3.2 Determinação do hidrograma de cheia

Uma vez obtidos os valores de precipitação efetiva, *Pe*, o hidrograma de cheia foi obtido através do método do Hidrograma Unitário (HU) Triangular.

Este método baseia-se nas seguintes equações:

$$Qp = \frac{2,08 \cdot A}{(0,5 \cdot t + 0,6 \cdot tc)} \quad (4.47)$$

$$tp = 0,5 \cdot t + 0,6 \cdot tc \quad (4.48)$$

$$tb = tp + tr = 2,67 \cdot tp \quad (4.49)$$

em que: *Qp* é a vazão pico do hidrograma unitário [$m^3 \cdot s^{-1}$]; *A* é a área da bacia [km^2]; *t* é o intervalo de tempo de cálculo [h], *tc* é o tempo de concentração da bacia [h]; *tb* é o tempo base do HU [h]; *tp* é o tempo de pico do HU [h].

4.4 Calibração

Na calibração, busca-se obter os valores dos parâmetros capazes de reproduzir melhor a quantidade que se quer modelar. Define-se uma ou mais funções para realizar as comparações entre os diferentes resultados.

A avaliação do desempenho de modelos não é um assunto consolidado da hidrologia. Muitos critérios foram propostos e discutidos mas nenhum deles satisfaz a todos os usuários. Então são definidos novos critérios e outros, remodelados de modo que seus valores reflitam melhor a qualidade do modelo (Węglarczyk, 1998).

Uma característica importante da precipitação é o total precipitado. A conservação do volume é importante para que se tenha uma boa modelagem. Visando comparar a

capacidade do modelo em prever a magnitude do evento chuvoso, escolheu-se como um dos critérios de desempenho a comparação entre os volumes modelados e simulados.

- Razão Volumétrica: valor da razão entre o total precipitado obtido através do modelo (Pmod) e através das observações (Pobs). Faz uma comparação entre os volumes observados simulados. Na situação ideal $\Delta V = 1$.

- $$\Delta V = \frac{\sum (P_{mod,i})}{\sum (P_{obs,i})} \quad (4.50)$$

Uma vez preservada a quantidade precipitada, a distribuição espacial deste volume deve ser levada em consideração. Para tanto, decidiu-se adicionar o critério de correlação cruzada para avaliar o desempenho do modelo e escolher os parâmetros “ótimos”.

- Coeficiente de correlação: coeficiente de correlação cruzada entre os resultados do modelo (Pmod) e observações (Pobs). O coeficiente de correlação está situado na faixa entre -1 e 1. Na situação ideal, $Correl = 1$.

$$Correl = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - \overline{P_{mod}}) \cdot (P_{obs,i} - \overline{P_{obs}})}{\sigma_{obs} \cdot \sigma_{mod}} \quad (4.51)$$

Neste estudo, a calibração do modelo foi feita de forma manual. A escolha foi feita comparando os coeficientes de desempenho obtidos em cada uma das simulações, sem o uso de otimização.

4.5 Medidas de desempenho do modelo chuva-vazão

Após avaliar o desempenho do modelo de previsão de chuva, deve-se ainda calcular alguns índices referentes à vazão. Tais índices serão usados apenas para fins de comparação das vazões obtidas e não com a finalidade de calibração do modelo.

Foram escolhidas funções que dão maior peso às vazões máximas, pois estas são as de maior interesse para sistemas de alerta antecipado contra inundações. Dentre as

encontradas na literatura, optou-se por usar três das utilizadas por Kaiser (2006), Tucci (1998) e Collischonn e Tucci (2003).

- Comparação entre volumes

$$\Delta V = \frac{\Sigma(Q_{\text{mod},t}) - \Sigma(Q_{\text{obs},t})}{\Sigma(Q_{\text{obs},t})} \quad (4.52)$$

- RMSE – *root mean square error* (erro médio quadrático): mais sensível na vazão máxima.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(Q_{\text{obs},t} - Q_{\text{mod},t})^2}{n}} \quad (4.53)$$

- Coeficiente de Nash-Sutcliffe: verifica o ajuste dos picos de vazão, também conhecida por eficiência.

$$NS = 1 - \frac{\Sigma(Q_{\text{obs},t} - Q_{\text{mod},t})^2}{\Sigma(Q_{\text{obs},t} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (4.54)$$

em que: $Q_{\text{obs},t}$ é a vazão observada [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] no tempo t ; $Q_{\text{mod},t}$ é a vazão modelada [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] no tempo t ; n é o total de intervalos de tempo considerados.

5 Estudo de caso

O estudo de caso foi feito em uma bacia urbana do Município de São Carlos – SP (Figura 5.1). A bacia do Gregório possui uma área de 9,92 km², comprimento de talvegue de 5,8 km e declividade média de 0,023 m/m. A ocupação do solo é 40% residencial e 60% de espaços abertos com vegetação (Almeida Neto et al, 2003). O tempo de concentração da bacia, calculado por diversas formas, é de 45min ± 17 min (Esteves e Mendiondo, 2003).

Vários episódios de inundações foram relatados nesta bacia desde a década de 1940 (Mendes, 2005).

Atualmente, duas estações automáticas estão em funcionamento na bacia do córrego do Gregório:

- PCD01

Esta estação pluvio-fluviométrica está situada na seção do Fórum Municipal (22°01'16"S e 47°53'06"W), exatamente no exutório da bacia considerada. É uma estação Campbell Scientific® CR10X programada para realizar medidas de nível e precipitação acumulada a cada minuto.

- PCD02

Ao norte da bacia, próximo ao divisor de águas, nas dependências da Faculdade de Direito de São Carlos (22°01'07"S e 47°51'40"W), há uma estação climatológica Campbell Scientific® CR21X que registra precipitação a cada 10min e variáveis climatológicas (temperatura do ar, umidade e pressão atmosférica) a cada 30min.

Figura 5.1. Bacia do córrego do Gergório com a localização das estações (Fonte: NIBH, 2003).

A Figura 5.2 mostra um estudo sobre as curvas de permanência para eventos de cheias na bacia do córrego do Gregório (São Carlos – SP) para dar suporte a sistemas de alerta (Mendiondo, 2005). Esses valores servem de comparação para os eventos a serem discutidos no Capítulo 6.

Figura 5.2. Vazão específica *versus* probabilidade de excedência (Fonte: Mendiondo, 2005).

6 Resultados

Este capítulo tem início com a apresentação dos dados utilizados, eventos selecionados e que serão usados para a calibragem, validação e uso.

Em seguida serão apresentados os resultados provenientes da calibragem, juntamente com as medidas de desempenho do modelo hidrometeorológico conceitual.

Uma vez calibrado o modelo, serão mostrados os resultados obtidos para os demais eventos.

Prossegue-se com o uso do modelo chuva-vazão e apresentação dos resultados obtidos com o uso deste modelo.

6.1 Dados utilizados

As variáveis de entrada no modelo foram obtidas através da estação climatológica PCD 02. O intervalo de medição da temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica foi 30min. Foram encontrados valores de umidade relativa superiores a 100%, indicando uma má calibração do sensor da estação. Para que estes dados não fossem descartados, atribuiu-se o valor de 100% aos mesmos.

Em relação aos dados de precipitação, buscou-se usar medidas das duas estações, no entanto havia falhas na série de precipitação. Nestas situações, foram considerados apenas os dados da estação em funcionamento.

As medidas de níveis e, conseqüentemente, vazão, foram coletados na estação PCD 01.

A série histórica analisada se estende de janeiro de 2004 a dezembro de 2005. Dentro desse período, foram selecionados eventos cujo nível do córrego atingiu, ou ultrapassou, aproximadamente 1,50m. Tendo em vista que se pretende prever com antecipação a ocorrência de inundações, deu-se preferência a essa variável ao invés da precipitação (Tabela 6.1).

Tabela 6.1. Características dos eventos (em que s.d. significa sem dados).

Evento	Data	Estação	Vazão					Precipitação					Deslocamento	
			Nível [m]	Q _{max} [m³/s]	Horário Q _{max}	Horário Início	Horário Fim	Q _{esp} [m³/s/km²]	P _{total} [mm]	i _{max} [mm/h]	Horário Início	Horário Fim		Duração
1	30/01/2004	PCD 01	2,77	57,14	17:10	16:20	18:20	5,8	41,1	16,0	16:10	17:10	01:00	N → S
		PCD 02						45,2	14,6	16:30	17:30	01:00		
2	06/02/2004	PCD 01	1,95	20,08	18:30	17:50	22:00	2,0	31,7	12,7	17:50	20:20	2:30	S → N
		PCD 02						46,5	34,9	18:20	20:40	2:20		
3	18/11/2004	PCD 01	1,52	9,10	13:40	13:10	15:20	0,9	10,5	8,8	13:00	13:40	00:40	NO → SE
		PCD 02						14,6	6,6	13:40	14:20	00:40		
4	19/12/2004	PCD 01	2,63	48,92	19:00	18:20	20:20	4,9	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	Convectiva
		PCD 02						48,7	11,5	18:10	20:20	02:10		
5	04/01/2005	PCD 01	2,06	23,68	17:00	16:30	19:20	2,4	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	NO → SE
		PCD 02						43,3	10,0	15:50	20:10	04:20		
6	16/01/2005	PCD 01	2,10	25,32	18:40	18:10	20:20	2,6	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	Convectiva
		PCD 02						33,4	6,3	17:40	20:10	02:30		
7	27/01/2005	PCD 01	1,69	12,80	12:00	10:00	13:40	1,3	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	NO → SE
		PCD 02						37,2	8,2	09:50	12:10	02:20		
8	26/02/2005	PCD 01	1,42	9,46	14:40	14:20	15:10	1,0	13,3	4,6	14:00	15:10	01:10	NO → SE
		PCD 02						19,0	9,3	14:20	15:30	01:10		
9	06/11/2005	PCD 01	1,50	8,79	20:50	20:30	21:50	0,9	17,7	10,0	20:10	20:50	00:40	Convectiva
		PCD 02						22,3	10,0	20:30	21:50	01:20		

Fonte do deslocamento: Antonio, 2006, comunicação pessoal.

Observa-se que os dias selecionados situam-se entre novembro e março, como era de se esperar já que a maioria das ocorrências de inundações e alagamentos é registrada durante o verão.

A partir das vazões específicas de cada evento, pode-se situá-los nos níveis de alerta apresentados na Figura 5.2. Há eventos entre o azul e amarelo (eventos 3 e 9) e situações de alerta vermelho (eventos 1 e 4).

Sabendo-se que a bacia está orientada no sentido Leste – Oeste (Figura 5.1.), o deslocamento mais favorável à ocorrência de inundações seria uma frente que se deslocasse nesse sentido. No entanto, não foram observadas ocorrências de tais frentes.

6.2 Modelo conceitual hidrometeorológico

Este subitem é composto pelas seções:

6.2.1. Calibração;

6.2.2. Validação;

6.2.3. Exploração.

6.2.1 Calibração

Nesta seção será conceituado cada um dos parâmetros usados bem como a faixa de variação e uma breve explanação sobre sua influência no resultado final.

Serão apresentadas também as curvas resultantes do cálculo dos coeficientes desempenho.

6.2.1.1 Parâmetros ε_3 e ε_2 .

O parâmetro ε_3 , que multiplica v em sua relação com p_t , possui dimensão inversa a da velocidade mas é aconselhado que eles sejam da mesma ordem de grandeza (Georgakakos e Bras, 1984b). São encontrados na literatura valores de velocidade de ascensão para nuvens quentes entre $0,1\text{m.s}^{-1}$ e 2m.s^{-1} (Eagleson 1970, p. 175). Mantendo-se

os demais parâmetros constantes, fez-se variar ε_3 entre $0,1 \text{ s.m}^{-1}$; 1 s.m^{-1} e 2 s.m^{-1} (Figura 6.1).

Figura 6.1. Precipitação observada (colunas cinzas com barra de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_3 . Evento do dia 06/02/2004.

Pela Figura 6.1 não se percebe qualquer mudança na precipitação modelada devido à variação de ε_3 . Pode-se inferir que esse parâmetro, dentro da faixa avaliada, não influencia consideravelmente na precipitação obtida. Os totais precipitados, bem como a intensidade máxima, variaram apenas na 1ª casa decimal para as diferentes simulações. Optou-se por fixá-lo no valor $1,0 \text{ s.m}^{-1}$ conforme sugerido pelos autores do modelo.

O outro parâmetro que possui dimensão de pressão, p_l , é o menor nível de pressão que p_t pode alcançar. Este nível foi situado próximo ao limite da troposfera, $p_l = 250.000 \text{ Pa}$ (Righetto 1998, p. 44).

Mantendo-se os demais constantes, foram atribuídos ao parâmetro ε_2 os valores de 40.000 Pa , 50.000 Pa e 70.000 Pa (Figura 6.2).

Figura 6.2. Precipitação observada média (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ϵ_2 . Evento do dia 06/02/2004.

O comportamento temporal das precipitações modeladas foi o mesmo para os três valores avaliados. Porém, para ϵ_2 igual a 70.000Pa as precipitações máximas foram subestimadas. Deste modo, optou-se por prosseguir a calibração mantendo ϵ_2 em 40.000Pa.

Dos parâmetros que controlam v e p_t , resta apenas ϵ_1 para ser avaliado. A razão entre a energia cinética e a térmica é representada por este parâmetro. Quanto maior o valor de ϵ_1 , maior será a velocidade de ascensão e menor o nível de pressão.

A parametrização do diâmetro médio é determinada por ϵ_4 . Encontra-se na literatura diversos valores possíveis para o diâmetro das gotículas de água na nuvem, desde 10 μm (Fletcher 1962, p. 138) a 400 μm (Fletcher 1962, p. 146)

Ao atribuir a k o valor zero, desconsiderou-se a dependência de c em relação a v . Deste modo, apenas o valor de ϵ_4 influencia o diâmetro médio das partículas na base da nuvem (Equação 4.40).

No total foram realizadas 36 combinações de parâmetros (Tabela 6.2).

Tabela 6.1. Valores adotados para os parâmetros ε_1 e ε_4 .

ε_1 [adim.]	0,0001	0,002	0,003	0,006	0,009	0,015
ε_4 [m]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

6.2.1.2 Parâmetro ε_4

Para avaliar a sensibilidade do modelo exclusivamente em relação ao parâmetro ε_4 , serão apresentados os resultados obtidos com os demais parâmetros fixos ($\varepsilon_1 = 0,002$; $\varepsilon_2 = 40.000\text{Pa}$; $\varepsilon_3 = 1 \text{ s.m}^{-1}$). As figuras 6.3, 6.4 e 6.5 mostram as respostas do modelo para os 3 eventos escolhidos pra a calibração.

Para o primeiro evento avaliado (Figura 6.3), o valor de ε_4 10 μm não provoca a ocorrência de precipitações, isso pode ser devido à pequena massa das partículas que não consegue vencer a velocidade de ascensão ou ainda à evaporação e perda por difusividade após a saída da nuvem.

Quando ε_4 assume valores maiores, desde 30 μm a 100 μm , o modelo consegue prever a existência de precipitação. O pico menor, em 16:30, pôde ser previsto para valores do diâmetro médio superiores a 65 μm .

O valor de ε_4 30 μm não acusa as primeiras observações da precipitação, porém em seguida acompanha bem a tendência de aumento, pico e diminuição da chuva até 20:00. Após esse instante, a precipitação obtida pelo modelo mantém-se constante enquanto que a observada diminui até parar.

Figura 6.3. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ϵ_4 . Evento do dia 06/02/2004.

Aumentando-se o valor do parâmetro para $45\mu\text{m}$, mesmo que a magnitude esteja subestimada, é possível prever o início da precipitação em 16:30. Por outro lado, com o decorrer do tempo, os resultados obtidos se apresentam superiores às observações. Observa-se ainda que há uma diferença entre o “formato” das precipitações em torno do pico. O modelo sugere que há um máximo, seguido de um valor um pouco inferior com posterior aumento precipitação acumulada para o intervalo seguinte. Já na precipitação observada, aparece um valor intermediário, acompanhado de um máximo central seguido por outro intervalo de grande precipitação. Essa configuração é semelhante àquelas obtidas com valores de ϵ_4 $65\mu\text{m}$ e $80\mu\text{m}$.

Ao atribuir $100\mu\text{m}$ ao parâmetro, apesar da previsão do primeiro pico, o modelo não conseguiu acompanhar bem o comportamento da precipitação no decorrer do evento.

Para todos os valores, a precipitação prevista ao final do evento se mantém constante em um patamar em torno de 6mm para todos os parâmetros avaliados.

Figura 6.4. Precipitação observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_4 . Evento do dia 04/01/2005.

Assim como para o evento anterior, assumir ε_4 como 10 μ m não resulta em previsão de chuva pelo modelo (Figura 6.4).

Para ε_4 igual a 30 μ m, a precipitação é baixa no início mas consegue prever o aumento da chuva no seu pico. No próximo intervalo é captada a tendência de queda, porém o intervalo seguinte é subestimado e, na sequência, há uma superestimação dos intervalos finais do evento. O mesmo comportamento é observado para ε_4 igual a 45 μ m, porém ao assumir esse valor, as precipitações previstas são sempre superiores às obtidas com o parâmetro anterior. Na situação em que ε_4 é tido como 65 μ m, o comportamento das previsões se assemelha aos dos parâmetros anteriores, com a diferença que, neste caso, já se inicia com um valor de precipitação bastante alto, aproximadamente igual ao pico.

Depois do pico, são previstas aproximadamente sempre as mesmas precipitações para os intervalos seguintes para cada um dos parâmetros.

Já para os diâmetros maiores (80 μ m e 100 μ m), o máximo valor da precipitação se dá um intervalo de tempo antes do qual ocorre o máximo observado. Para esses dois valores, a precipitação se inicia alta, ocorre o pico e o decaimento em dois intervalos para só então se estabilizar conforme observado para os outros parâmetros.

Figura 6.5. Precipitação observada média (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ϵ_4 . Evento do dia 06/11/2005.

Para os três eventos (figuras 6.3, 6.4, 6.5), observou-se que ao se atribuir ao diâmetro médio o valor 10 μ m, a previsão é de ausência de chuva, ou chuva praticamente insignificante. Os valores compreendidos entre 30 μ m e 65 μ m resultam numa mesma tendência de comportamento, porém com valores individuais distintos. Os outros dois valores testados (80 μ m e 100 μ m) distinguem-se dos anteriores mas se assemelham entre si, apresentando mesmo comportamento mas com precipitações diferentes.

6.2.1.3 Parâmetro ε_1

Esta seção apresentará os resultados do teste de sensibilidade do modelo ao parâmetro ε_1 , considerando os seguintes valores aos outros parâmetros: ($\varepsilon_2 = 40.000\text{Pa}$; $\varepsilon_3 = 1 \text{ s.m}^{-1}$; $\varepsilon_4 = 30\mu\text{m}$) (figuras 6.6, 6.7 e 6.8).

Figura 6.6. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_1 . Evento do dia 06/02/2004.

Da Figura 6.6, observa-se que tanto os valores maiores quanto os valores menores resultam em previsão de pouca (ou quase nenhuma) precipitação. Ao se adotar valor de 0,006 para ε_1 , é notada uma variação nas precipitações previstas, porém não correspondem bem às observadas. Os valores que melhor representam a precipitação observada são 0,002 e 0,003. Nos dois casos, a tendência das previsões é a mesma. Por outro lado, apesar da pouca variação no valor do parâmetro, percebe-se claramente a diferença na magnitude dos

resultados nos momentos de maior intensidade. Nestas situações, maior valor de ε_I corresponde a um maior valor de chuva.

Figura 6.7. Precipitação observada média (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_I . Evento do dia 04/01/2005.

Assim como no caso anterior, ao se adotar os valores limites inferior e superior da faixa na qual se fez variar ε_I não é observada a ocorrência de precipitação (Figura 6.7).

Mais uma vez, os parâmetros capazes de prever o pico da chuva foram $\varepsilon_I = 0,002$ e $\varepsilon_I = 0,003$.

Figura 6.8. Precipitação observada média (colunas cinzas com barra de erros) e precipitações modeladas para diferentes valores do parâmetro ε_l . Evento do dia 06/11/2005.

Para o terceiro evento (Figura 6.8), são válidas as mesmas considerações quanto aos valores máximos e mínimos feitas para os dois eventos anteriores. No entanto, observa-se, pela Figura 6.8, que a utilização do valor 0,006 conduz a resultados semelhantes ao uso de 0,002 e 0,003 para o parâmetro ε_l .

6.2.1.4 Coeficientes de desempenho

Para cada uma das simulações foram calculadas duas medidas para proceder a calibração dos parâmetros.

Serão apresentados os gráficos de superfície obtidos para cada um dos eventos. Os valores foram calculados para os pontos apresentados na tabela 6.2, as curvas foram traçadas com o *software* Surfer e o método de interpolação adotado foi o método da Curvatura Mínima.

As figuras 6.9, 6.10 e 6.11 mostram as razões entre volumes gerados através de simulações e os observados (Equação 4.50). Quando este coeficiente assume o valor unitário, significa que o modelo conseguiu prever bem o total precipitado. Deve-se atentar ao fato que não são levados em consideração os valores individuais de cada intervalo, apenas o total do evento completo.

As curvas se apresentam praticamente verticais a partir de ε_1 igual a 0,003. Isso significa que, a partir desse patamar, o modelo não é muito sensível a esse parâmetro.

Figura 6.9. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 06/02/2004.

Em algumas situações conseguiu-se modelar a precipitação com volume aproximadamente igual ao observado. Salienta-se que, uma eventual chuva prevista antes, ou após o evento, não foi levada em consideração para o cálculo desse coeficiente.

Figura 6.10. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 04/01/2005.

Figura 6.11. Isolinhas de razão volumétrica entre precipitação modelada e observada para evento do dia 06/11/2005.

Baseando-se nessas superfícies, observa-se que valores de ε_4 entre $30\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$ apresentam os melhores resultados em relação ao volume para valores mais baixos de ε_1 .

O coeficiente de correlação (Equação 4.51) diz respeito à capacidade do modelo de prever os valores precipitados a cada intervalo de tempo, ou seja, a distribuição temporal da chuva. A situação ideal se dá no caso de coeficiente de correlação igual a 1. As superfícies para esses coeficientes são graficados nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14.

Para o primeiro evento avaliado (Figura 6.12), o melhor valor desse coeficiente ficou em torno de 0,6 correspondendo a ε_1 aproximadamente 0,003 e ε_4 entre 10 μ m e 50 μ m. No entanto, esta área é bastante instável, uma vez que as linhas estão muito próximas entre si. Isto demonstra que uma pequena variação nos parâmetros pode significar mudanças no desempenho do modelo, principalmente no que diz respeito ao parâmetro ε_1 . Há regiões nas quais o valor da correlação chega a ser negativo (altos valores de ε_1 juntamente com altos valores de ε_4).

Figura 6.12. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 06/02/2004.

No segundo evento não foi possível atingir os 60% de determinação, o coeficiente máximo foi cerca de 0,3. Porém a faixa correspondente aos melhores resultados situa-se em torno de $\varepsilon_I = 0,003$, o mesmo ocorreu para o primeiro evento (Figura 6.13).

Figura 6.13. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 04/01/2005.

O terceiro evento também apresentou coeficiente de correlação aproximadamente 0,6. Sendo que neste caso, a faixa de parâmetros que conduzem a este resultado é bem mais ampla. Ao se tomar ε_I próximo de 0,002 a 0,0005 há uma melhoria no valor da correlação, para o parâmetro ε_4 de 10 μ m a 50 μ m (Figura 6.14).

Figura 6.14. Isolinhas de coeficiente de correlação entre precipitação observada e modelada para evento do dia 06/11/2005.

Ao levar em consideração os dois critérios de desempenho, optou-se pela escolha dos seguintes parâmetros:

- ε_4 entre $30\mu\text{m}$ e $45\mu\text{m}$.
- ε_1 entre 0,002 e 0,003.

Vale salientar a predominância do coeficiente relacionado à conservação de volume sobre o da distribuição temporal. Ao se ter uma estimativa mais precisa do volume, pode-se fazer a distribuição deste volume no tempo através de um hietograma sintético.

6.2.2 Validação

Com os parâmetros escolhidos a partir dos eventos da calibragem, procederam-se simulações para verificar o desempenho do modelo considerando tais parâmetros.

Figura 6.15. Precipitação média observada (colunas cinzas com barras de erro) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 18/11/2004.

O modelo conseguiu identificar o início da precipitação, porém as lâminas não acompanharam o comportamento das observadas (Figura 6.15). Os coeficientes de correlação foram negativos para os dois casos. Se tomarmos o evento completo, a modelagem correspondente à maior precipitação produz um volume 80% do total. Por outro lado, para a menor faixa praticamente não se observa precipitação. As tendências temporais de aumento e diminuição da precipitação também não foram acompanhadas.

Figura 6.16. Precipitação média observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 19/12/2004.

Observa-se, na Figura 6.16, um atraso tanto na previsão do início, quanto da intensidade máxima do evento do dia 19/12/2004. A variação de volume foi de 50% a menos, para um dos conjuntos de parâmetros e 50% a mais para o outro, quando comprando ambos com o observado.

Figura 6.17. Precipitação média observada (colunas cinzas) e precipitações modeladas para diferentes combinações de parâmetros. Evento do dia 30/01/2004.

No dia 30 de janeiro de 2004, houve uma chuva muito intensa que provocou inundação e alagamentos no centro de São Carlos. Este foi o único dos eventos avaliados no qual em nenhuma das simulações o volume da precipitação modelada superou o total precipitado observado (Figura 6.17). Este evento também foi o único, dentre os demais avaliados, que se deu devido a uma frente quente. Portanto sua parametrização pode ser diferente em relação a frentes frias e eventos convectivos. O que pode ter resultado na sub-estimativa da precipitação pelo modelo de previsão.

Pois, de um modo geral, as simulações apresentaram atraso na previsão da chuva e em relação ao volume, observou-se uma ampla faixa de variação.

Os resultados para os demais eventos encontram-se no Anexo 4.

6.2.3 Exploração

Para aumentar o horizonte de previsão, o modelo foi rodado com as variáveis de entrada geradas através de equação de auto-regressão *lag* 1.

O início da geração das variáveis foi tido como sendo o instante a partir do qual o modelo de previsão dava indícios de ocorrência de precipitação no intervalo seguinte. As séries foram geradas para 2 intervalos de tempo futuros, resultando num horizonte de previsão total de 1h e 30min (aproximadamente 3 vezes o tempo de concentração da bacia hidrográfica em estudo).

No total foram avaliados seis eventos, sendo que deste total em apenas dois deles o modelo previu chuva antes que estas ocorressem.

Estes dois eventos foram simulados 11 vezes cada um para a avaliação da faixa de incerteza devido à componente aleatória da previsão.

A Figura 6.18 mostra as rodadas para o dia 18/11/2004, as precipitações modeladas variaram entre 0 mm e aproximadamente 10 mm para os dois intervalos da previsão. No entanto, a maioria dos resultados situou-se na mesma faixa de valores que os dos intervalos anteriores, entre 0 mm e 1 mm.

Ao utilizar a série obtida através da mediana destas precipitações como entrada no modelo chuva-vazão, não foi verificada a ocorrência de escoamento.

Figura 6.18. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos para evento do dia 18/11/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.

Um evento da calibração também se enquadrava nos requisitos para que as variáveis sintéticas fossem geradas. A primeira geração das variáveis se deu para o horário das 17:30, quando o modelo indicou a ocorrência de chuva às 18:00, então, a partir daí, foram geradas 11 rodadas com diferentes variáveis sintéticas (Figura 6.19).

Como no intervalo seguinte continuou a haver previsão de chuva, a geração sintética continuou no intervalo de tempo seguinte, ou seja, 18:00 (Figura 6.20). E assim sucessivamente até que cessasse a precipitação observada (figuras 6.21 e 6.22).

Essa sequência de previsões de chuva caracteriza um exemplo de aplicação do modelo de modo contínuo. A constante atualização destas previsões proporciona, juntamente com seus hidrogramas correspondentes, a obtenção de estimativas das vazões de pico possíveis de ocorrer num intervalo de tempo curto.

Figura 6.19. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 17:30 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.

Figura 6.20. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 18:00 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.

Figura 6.21. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 18:30 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.

Figura 6.22. Precipitação observada (barras cinzas) e precipitações modeladas (losangos) com dados de entrada sintéticos a partir das 19:00 para evento do dia 06/02/2004. Os losangos negros correspondem à mediana de cada intervalo.

6.3 Comparações com o modelo numérico de previsão de tempo ETA.

Em busca de comparar os resultados obtidos através do modelo conceitual usado nesta pesquisa com produtos atualmente disponíveis regularmente para consulta e utilização, esta seção mostrará as diferenças entre tal metodologia e as saídas do modelo Regional ETA para os eventos presentes na seção de calibração.

Ressalta-se o fato de que as previsões aqui usadas não são previsões realizadas para São Carlos e sim para o município de Ribeirão Preto, localizado a cerca de 100km.

A grade do modelo é de 40km x 40km (totalizando uma área de 1.600 km²), ao passo que a bacia em estudo possui apenas 10km². Devido a esta diferença entre as escalas espaciais, já é esperada uma sub-estimativa da precipitação pelo modelo regional em relação ao medido no pluviômetro. Visto que, ao se realizar uma média para áreas maiores, as regiões nas quais não há precipitação tendem a diminuir o valor da média.

Os três eventos usados para a calibração dos parâmetros foram usados nessa seção (Figuras 6.23, 6.24 e 6.25).

Figura 6.23. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo ETA (colunas pretas) e resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 06/02/2004.

Figura 6.24. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo ETA (colunas pretas) e resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 04/01/2005.

Figura 6.25. Hietogramas: observado (colunas cinzas), resultante do modelo ETA (colunas pretas), resultantes do modelo hidrometeorológico (círculos e losangos). Dia: 06/11/2005.

Observa-se que em todos os casos, o modelo numérico subestimou em muito o total precipitado. Por outro lado, foi possível prever a ocorrência de alguma precipitação para os dias (e horários) em questão.

Apenas para o evento do dia 6/11/2005 (Figura 6.25) houve um atraso no início da chuva. Dentre os 3 eventos avaliados, este foi o único caracterizado por chuva convectiva, portanto mais difícil de ser prevista por um modelo numérico do que eventos frontais.

Em relação ao horizonte de previsão, o ETA trabalha com valores de 1 a 5 dias de antecedência, enquanto que para o modelo conceitual a estimativa é feita 30min antes de cada intervalo.

Embora subestime bastante a chuva ocorrida, o modelo regional conseguiu prever bem o fato de haver alguma chuva para esses dias.

Outra utilização das saídas do modelo regional pode ser o uso das variáveis de entrada necessárias para rodar o modelo local (temperatura, umidade e pressão atmosférica em superfície).

6.4 Transformação chuva-vazão

Uma vez obtidos os valores de precipitação acumulada em cada intervalo, procedeu-se a transformação chuva-vazão através do método do SCS apresentado anteriormente no item 4.3.

A discretização temporal foi de 30 minutos, considerada grosseira para uma bacia hidrográfica com tempo de concentração em torno de 45 minutos. Sabe-se que seria mais apropriado o uso do modelo hidrológico com intervalos de tempo mais curtos, no entanto o objetivo foi de testar a metodologia conforme a disponibilidade dos dados da estação climatológica.

A discretização espacial usada foi a de uma bacia concentrada com $CN = 85$ e ausência de cursos d'água, ou seja, não houve a propagação do escoamento no rio. Mais uma vez, reconhece-se que a discretização adotada não é ideal. Sabe-se que é necessário subdividir a bacia, e que a abordagem desta maneira é uma das limitações da metodologia utilizada.

6.4.1 Evento 04/01/2005

A Figura 6.26 mostra o hidrograma observado (em linha preta contínua) e os resultados das transformações chuva-vazão obtidos para 3 chuvas diferentes correspondentes ao mesmo evento (dia 05/01/2004): a precipitação observada (Pobs) e precipitações modeladas com dois conjuntos de parâmetros distintos (Pmod,min e Pmod,max).

Tais hidrogramas foram obtidos com a utilização de todos os dados disponíveis, ou seja, depois de já decorrido todo o evento. Isso significaria uma situação *offline*. Apesar de não se caracterizar uma antecipação ao momento da cheia, essa comparação é válida para que se possa avaliar o quanto a diferença na precipitação modelada interfere na diferença encontrada no escoamento produzido.

Esta não é uma situação de alerta antecipado, pois as simulações foram feitas quando todo o evento já havia ocorrido. Para que se tenha uma antecipação, as simulações devem fazer uso apenas de dados observados até um determinado momento.

Figura 6.26. Hidrograma observado, hidrograma simulado com precipitação observada, e hidrogramas simulados com precipitações modeladas. Dia: 04/01/2005.

Já a Figura 6.27 mostra um exemplo do que seria a antecipação proporcionada pela chuva modelada. O instante “presente” considerado neste caso é 16:30h, ou seja, apenas dados observados até então foram usados nas simulações. Por esse motivo não é apresentada a precipitação observada ocorrida às 17:00h.

Figura 6.27. Previsão de vazão: hidrograma observado, transformação chuva-vazão para precipitação observada, e para precipitações modeladas. A partir das 16:30h (04/01/2005).

Ao usar informações apenas do pluviôgrafo, não haveria nenhum indício de vazão no córrego no intervalo seguinte. Por outro lado, fazendo uso dos dados medidos nas estações climatológicas tem-se a previsão de ocorrência de cheia com o pico ocorrendo no mesmo horário do observado, apesar de não estimar com precisão as vazões do hidrograma.

O intervalo de confiança das previsões é muito amplo, indicando uma grande incerteza. A vazão de pico prevista a partir da chuva modelada correspondeu a 18% do pico observado para o menor valor e mais de 300% para os parâmetros máximos. Este intervalo é muito amplo, indicando grande incerteza na determinação das vazões. Uma recalibração, poderia diminuir a amplitude desta faixa.

Quando são usados os valores superiores da precipitação modelada, se observa que a simulação chuva-vazão já acusa a ocorrência de cheia às 16:30h. Esta situação não corresponde à realidade, e pode ser comparada com observações no instante considerado.

Caso haja como substituir a precipitação modelada pela precipitação observada até o instante no qual será feita a previsão, tem-se uma nova situação. Neste caso, faz-se uso da modelagem apenas para o instante futuro (Figura 6.28).

Figura 6.28. Comparação entre hidrograma observado, hidrograma simulado com chuva combinada entre observações e resultados do modelo com parâmetros com dois conjuntos de parâmetros diferentes ($\epsilon_1 = 0,002$; $\epsilon_4 = 30\mu\text{m}$ e $\epsilon_1 = 0,003$; $\epsilon_4 = 45\mu\text{m}$). As barras cinzas representam a precipitação observada. Evento do dia 04/01/2005.

A precipitação combinada entre a observada até as 16:30h e a lâmina modelada para as 17:00h produz uma boa estimativa do hidrograma observado para os valores máximos da modelagem. No entanto, ao comparar as precipitações modeladas com as simuladas até as 16:30h, seria dada preferência ao conjunto de parâmetros que resulta nas menores lâminas, pois os resultados do modelo se aproximam das observações. Porém, a faixa de incerteza continua ampla.

6.4.2 Evento 06/02/2004

Para este evento, foi possível obter vazões a partir das precipitações modeladas com as variáveis de entrada sintéticas. No modelo chuva-vazão, foram usadas duas séries de precipitação para cada um dos intervalos.

Uma série, denominada chuva modelada, foi composta pelas precipitações modeladas até o início da geração e pela mediana daquelas obtidas pelas gerações sintéticas. A outra série, nomeada chuva combinada, continha as precipitações observadas até o instante atual e, assim como na série anterior, as medianas das chuvas modeladas com variáveis sintéticas.

As simulações foram feitas, continuamente, para as duas séries de precipitação para 4 intervalos de tempo consecutivos, sendo o primeiro intervalo às 17:30 e o último às 19:00.

Às 17:30, o modelo previu que haveria uma chuva de 12,2mm as 18:00 e, então, gerou dados de entrada sintéticos para 18:30, 19:00 e 19:30. Tais dados foram usados no modelo de previsão resultando em mais três precipitações modeladas. Essas quatro lâminas formaram a série de precipitações modeladas Pmod17:30.

Usando a série Pmod17:30 no modelo chuva-vazão, obteve-se o hidrograma Q(Pmod 17:30).

Ao passar do tempo, os mesmos procedimentos foram usados para os intervalos seguintes, o que caracterizou uma atualização do modelo. Os hietogramas e hidrogramas obtidos para todos os intervalos de tempo são mostrados nas Figuras 6.29 e 6.30.

Figura 6.29. Exemplo de previsões contínuas de hietogramas (barras) e hidrogramas (linhas) simulados para diferentes estágios temporais comparados com dados observados.

Figura 6.30. Exemplo de previsões contínuas de hietogramas (barras) obtidos através da combinação de precipitações observadas e modeladas e hidrogramas (linhas) simulados para diferentes estágios temporais comparados com dados observados.

A Tabela 6.3 resume os índices obtidos para a avaliação dos hidrogramas mostrados nas Figuras 6.25 e 6.26.

Tabela 6.2. Índices (Volume, RMSE, Nash-Sutcliffe) para a avaliação dos hidrogramas simulados com hidrogramas modelados e combinados entre observações e modelagem para diversos instantes. Em que: Mod corresponde à série de precipitação modelada e Comb, à série combinada.

Índice	17:30		18:00		18:30		19:00	
	Mod	Comb	Mod	Comb	Mod	Comb	Mod	Comb
1. Volume	-90%	-61%	-23%	-25%	59%	45%	156%	116%
2. RMSE	8,8	7,2	3,4	3,3	12,3	11,2	16,6	12,8
3. Nash-Sutcliffe	-0,9	-0,3	0,7	0,7	-2,7	-2,1	-5,8	-3,0

De modo geral, os hidrogramas obtidos com as séries combinadas apresentam melhores índices quando comparados com os das séries modeladas, para um mesmo instante. Apenas o instante 18:00 não resultou em diferença significativa entre os índices, tal fato era de se esperar, pois, para este horário, as precipitações modeladas não foram muito diferentes das precipitações observadas.

Esperava-se que com a redução do horizonte de simulação houvesse melhoria dos índices, tal fato não foi observado. A previsão atingiu um “ótimo” às 18:00 conseguindo prever bem o pico do hidrograma no tempo certo, porém com o passar do tempo houve superestimativa dos picos e atraso dos mesmos. Uma possível explicação seria que não foi considerada a variabilidade temporal dos parâmetros do modelo ao decorrer da tormenta.

Os coeficientes mostram que os hidrogramas simulados não estão bem ajustados com o hidrograma medido, conforme foi possível perceber também através das Figuras 6.29 e 6.30. Isso indica que o modelo precisa ser mais bem calibrado, no entanto a chuva usada já não estava bem ajustada à real. Portanto, deve-se investigar o modelo de previsão hidrometeorológica juntamente com o hidrológico.

7 Conclusões

As conclusões serão feitas com nos objetivos traçados no Capítulo 2.

Implementar um protocolo conceitual de previsão de cheias para sistema de alerta antecipado de inundações como suporte a planos diretores de bacias urbanas.

Entre os tipos de previsão de cheias encontrados na literatura (vazão ou nível a montante, medidas de precipitação da rede telemétrica, previsão de chuva), optou-se por avaliar a possibilidade de implementação de uma metodologia do terceiro tipo.

Para tanto, foi programada uma rotina de modelagem de precipitação acoplada a uma metodologia de transformação chuva x vazão. A leitura de dados é feita manualmente através de arquivos nos quais as informações necessárias devem estar segundo uma sequência predeterminada, não há outra maneira de recepção dos dados. O cálculo da previsão de chuva e a entrada no método do SCS também devem ser feitos pelo usuário.

Seu uso em um sistema de alerta antecipado está sujeito a mudanças na forma de alimentação do modelo. Deve-se excluir a necessidade de intervenção do usuário, proporcionando um modo de operação contínuo e atualizável a cada recepção de novos conjuntos de dados das estações automáticas.

Revisar e propor modelos, conceituais e empíricos, de previsão antecipada de chuva em curto prazo de tempo com base hidrometeorológica.

Diversos modelos de previsão foram abordados no Capítulo 3 Revisão Bibliográfica, porém não se entrou em detalhes mais específicos de cada uma das metodologias apresentadas.

Encontra-se na literatura desde modelos de análise de séries temporais (exemplos: autoregressivos, redes neurais artificiais), tais modelos são de maior aplicação para eventos de longa duração, uma vez que requerem uma série de dados medidos para serem relacionados com os demais intervalos seguintes.

Há modelos que usam dados observados por radar para prever o deslocamento da célula convectiva, outros já buscam prever não só o deslocamento, mas também o desenvolvimento de tais células.

Imagens de satélites possuem também aplicabilidade na estimativa de chuva a curto prazo, como exemplo o Hidroestimador.

A proposta de modelos foi feita com base em algum existente, não houve um modelo originalmente desenvolvido para esta pesquisa. Modelo este que deveria ser de aquisição de dados relativamente simples e que atuasse na escala da bacia. Realizou-se uma tentativa de modelo empírico relacionando a quantidade de água precipitável com características dos eventos reais (Anexo 5), contudo os resultados obtidos não justificam seu uso.

Atualmente, há muitas pesquisas que usam tecnologias de sensoriamento remoto para fins de previsão de chuva. A depender do uso final desta informação, a previsão deve ser feita em escalas (temporal e espacial) diferentes. A precisão da previsão quantitativa também varia muito com o uso final.

Programar um algoritmo de previsão quantitativa de chuvas, seguido de um modelo chuva-vazão, possível de ser utilizado em um sistema de alerta antecipado contra inundações, em bacias urbanas.

O modelo de previsão quantitativa foi programado bem como a sequência para sua transformação em vazão. Sua aplicabilidade não está restrita a bacias urbanas, sendo de uso geral. Deve-se salientar que o resultado da previsão de precipitação é obtido pontualmente, o que se torna um fator limitante para sua aplicação em grandes bacias. Em relação à transformação chuva-vazão, o método utilizado (SCS) também limita o tamanho da bacia.

Calibrar, validar e explorar o algoritmo, comparando os resultados das cheias simuladas com eventos monitorados.

A calibração de um modelo requer a predefinição de uma ou mais funções a serem otimizadas. Tais funções devem relacionar, de alguma forma, a variável modelada com a observada. Há diversas funções possíveis de serem otimizadas em um processo de calibração.

Não existe uma função que consiga comparar igualmente todos os aspectos (tempo, volume, máximos, mínimos), devido a isso geralmente lança-se mão de mais de uma função para a escolha dos parâmetros. A depender da finalidade da modelagem, deve-se escolher a função que melhor represente o aspecto principal que se quer detectar.

Outra escolha que influencia na escolha dos parâmetros “ótimos” é o método de busca utilizado para encontrá-los. Diferentes métodos podem levar a diferentes soluções, alguns são mais rápidos, outros mais eficientes, há os que são mais simples de serem programados, outros requerem que as funções-objetivo tenham determinadas características (deriváveis, contínuas). De modo que tudo isso deve ser levado em consideração quando se parte para a calibração do modelo.

Nesta pesquisa, as funções foram escolhidas de acordo com sugestões dos autores do modelo (Georgakakos e Bras, 1984a). A conservação do volume é uma característica fundamental para uma boa previsão de chuva para sua aplicação em hidrologia. Para proceder tal comparação usou-se uma razão simples entre o volume total previsto pelo modelo e o total precipitado para o mesmo intervalo.

Uma vez obtendo-se um volume aproximadamente igual ao realmente precipitado, é necessário se ter uma idéia da distribuição temporal da precipitação. Este aspecto foi contemplado através do coeficiente de correlação entre as lâminas precipitadas modeladas e as medidas nas estações.

A variação dos parâmetros se deu de forma manual, tendo sido escolhidos como valores para testes a mesma faixa apresentada no artigo original (Georgakakao e Bras, 1984b). Não houve, portanto, uma otimização no critério de valores iniciais de partida para a melhor solução, o espaço amostral foi varrido de forma pouco eficiente.

A calibração do modelo foi feita através de inspeção visual das curvas resultantes da interpolação dos coeficientes calculados para cada uma das simulações. Não foi aplicado qualquer método de otimização para a escolha dos parâmetros. Estas superfícies não apresentam claramente uma região na qual possa estar situado seu mínimo, de modo que a eleição de um parâmetro considerado ótimo pode estar comprometida.

A fase de validação, não apresentou resultados satisfatórios, desde a etapa de modelagem da chuva, propagando-se para a vazão. Todos os coeficientes de correlação cruzada apresentaram valores negativos nessa fase. Em relação à razão volumétrica, foi possível atingir um valor de 90% para uma situação (Evento dia 26/02/2005 para os parâmetros $\varepsilon_1 = 0,002$ e $\varepsilon_4 = 30\mu\text{m}$).

O tempo de antecipação da modelagem da chuva é de 30min, a comparação das vazões foi feita com base na modelagem do evento total, e não anterior à ocorrência da cheia. Para que o alerta seja antecipado, é necessário prever as variáveis de entrada do modelo de modo a se ter estimativas para tempo superiores aos 30min que caracterizam a discretização temporal da obtenção de tais variáveis. Usou-se modelo autoregressivo de ordem 1 (AR(1)) na tentativa de se prever a temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica na superfícies. Esta metodologia se mostrou incapaz de realizar boas previsões mesmo para apenas 2 intervalos de tempo futuro. Além disso, o critério adotado para o início da geração de variáveis só foi atingido em dois dos eventos.

8 Recomendações

Modelos são representações simplificadas das condições reais, é comum que sejam feitas considerações ao longo do processo de modelagem que não necessariamente são verdadeiras. Acredita-se que tais hipóteses não comprometem o desempenho do modelo, no entanto elas são pontos que devem ser revistos quando se quer aprimorar a modelagem.

No modelo de precipitação utilizado, assumiu-se que o diâmetro médio das partículas independe da velocidade de ascensão. Recomenda-se, portanto, investigar a alteração dos resultados ao se considerar tal dependência.

A calibração dos parâmetros feita através de otimização de funções pode contribuir com melhoria nos resultados. Pode-se também escolher outro(s) critério(s) para quantificar o desempenho do modelo.

Ainda em relação à calibração, um maior número de parâmetros pode fazer parte do conjunto a ser calibrado, visto que alguns dos parâmetros foram escolhidos baseados em suposições.

O uso de mais outras estações distribuídas pela bacia hidrográfica como tentativa de melhor representar espacialmente o fenômeno.

Para sistemas de alerta antecipado, recomenda-se o estudo mais aprofundado sobre o comportamento temporal das variáveis de entrada para que seja possível uma maior antecedência nas gerações sintéticas das mesmas.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA NETO, P.; ESTEVES, R.L.; BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. (2003) Análise dos componentes do balanço hídrico em uma bacia urbana experimental. *In: Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*, Goiânia – GO, ABRH..
- ALVES, E. M. (2005) **Medidas não-estruturais na prevenção de enchentes em bacias urbanas: cenários para a bacia do Gregório, São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- BEGKHUNTOD, P; OKI, T (2005) Derived Rainfall Estimates by Using Geostationary Meteorological Satellite and Spacebourne Radar for Disaster Monitoring Over Thailand. *In: International Conference on Monitoring, Prediction and Mitigation of Water-Related Disasters*, Kyoto, Japão, 12-15/01/2005, Proceedings.
- BELLON, A.; AUSTIN, G. L. (1984) The accuracy of short-term radar-rainfall forecasts. **Journal of Hydrology**, 70, pp. 35–49.
- BOLDRIN, R. S. (2005) **Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não-estruturais de controle: trecho da bacia do Córrego do Gregório, São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.
- BURLANDO, P.; ROSSO, R.; CADAVID, L.G.; SALAS, J.D. (1993) Forecasting of short-term rainfall using ARMA models. **Journal of Hydrology**, 144, pp. 193-211.
- CASTILHO, A. S. (2002) O Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce. *In: II Seminário de Água-Negócio*, SMEA. Governador Valadares. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/alerta/artigos/artigo2002.pdf>. Acessado em dezembro de 2005.
- CATALDI, M; MACHADO, C. O. (2004) Avaliação da previsão de precipitação utilizando a técnica de downscale do modelo ETA e suas aplicações no setor elétrico. *In: Anais eletrônicos do XIII Simpósio Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza-CE.
- COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M. (2003). Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39.

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2005 a) **Previsão de níveis d'água no Pantanal**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi/pantanal.htm>>. Último acesso: dezembro de 2005.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2005 b) **Previsão e Alerta das cheias de Manaus**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/rehi/manaus/prev_manaus.htm>. Último acesso: dezembro de 2005.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2005 c) **Sistema de Alerta contra cheias da bacia do Rio Doce**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/alerta/site/index.html>>. Último acesso: dezembro de 2005.
- CPTEC - Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos (2006) <<http://www.cptec.inpe.br>>. Último acesso: julho de 2006.
- CRICHTON, D. (1999) **The risk triangle**. In: Ingleton, J. (ed.) **Natural Disaster Management**. Tudor Rose Holdings Limited, Leicester, Inglaterra, pp. 102-103. CD-ROM
- DER – Departamento de Estradas de Rodagem (2004) Critérios e diretrizes para a elaboração dos estudos hidrológicos de vazões extremas. In: **Documentos Técnicos: Normas para Projetos de Drenagem**. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br>>. Último acesso: dezembro de 2004.
- EAGLESON, P. (1970) **Dynamic hydrology**. McGraw Hill, New York.
- ESTEVES, R. L.; MENDIONDO, E.M.(2003) Análise comparativa entre equações e observações do tempo de concentração em uma bacia urbana de São Carlos, SP. In: **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos**, Curitiba – PR.
- FISTAROL, O; FRANK, B; REFOSCO, J. C. (2004) **Sistema de Informações de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Florianópolis – SC. Disponível em: <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2004/106.pdf>. Último acesso: setembro de 2006.
- FLETCHER, N. H. (1962) **The Physics of Rainclouds**. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- FOUFOULA-GEORGIOU, E; KRAJEWSKI, W (1995) Recent advances in rainfall modeling, estimation and forecasting. **Reviews of Geophysics**, Supplement, pp. 1125-1137, July 1995.
- FRANK, B.; PINHEIRO, A.; BOHN, N. (2000) **Relação entre gestão de recursos hídricos e uso do solo: o caso da bacia do rio Itajaí – SC**. In: Interfaces da gestão

de recursos hídricos. Hector Munoz (org.). Brasília: Ministério de Meio Ambiente / Secretaria de Recursos Hídricos.

- FRENCH, M. N.; KRAJEWSKI, W. F. (1994) A model for real-time rainfall forecasting using remote sensing, 1. Formulation. **Water Resources Research**, v.30, n.4, pp. 1075-1083.
- GEORGAKAKOS, K.P.; BRAS, R. L. (1984a) A hydrologically useful station precipitation model, 1. Formulation. **Water Resources Research**, v. 20, n. 11, pp. 1585-1596.
- GEORGAKAKOS, K.P.; BRAS, R. L. (1984b) A hydrologically useful station precipitation model, 2. Case studies. **Water Resources Research**, v. 20, n. 11, pp. 1597-1610.
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRAJEWSKI, W. F. (1991) Worth of radar data in the real-time prediction of mean areal rainfall by nonadvetive physically based models. **Water Resources Research**, v. 27, n.2, pp. 185-197.
- GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. (2005) Considerações sobre as inundações no Brasil. *In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, João Pessoa – PB.
- GOMES, A. M; HELD, G (2004) Determinação e avaliação do parâmetro densidade VIL para alerta de tempestades. *In: Anais eletrônicos do XIII Simpósio Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza-CE.
- GONÇALVES, J.E.; CUNHA, L.K.; CALVETTI, L; DEPPE, F (2004) Estudo da viabilidade e utilização de estimativas de chuva efetuadas por radar na modelagem hidrológica. *In: Anais eletrônicos do XIII Simpósio Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza-CE.
- GRECU, M.; KRAJEWSKI, W. F. (2000) A large-sample investigation of statistical procedures for radarbased short-term quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology**, 239, pp. 69–84.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2000) Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. **Atlas de Saneamento**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Último acesso: outubro de 2005.
- IPA – Instituto de Pesquisas Ambientais (2006) **Centro de Operações do Sistema de Alerta da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu – CEOPS**. Disponível em: <<http://www.furb.br/2005/ipa.php?secao=1850>>. Último acesso: setembro de 2006.

- ISDR – International Strategy for Disaster Reduction (2006) **Platform for the promotion of Early Warning**. Newsletter. Disponível em: <<http://www.unisdr-earlywarning.org>>. Último acesso: junho de 2005.
- KAISER, I. M. (2006) **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.
- KANDA, M. (2003). Correlation Between Convective Heavy Rainfalls and GPS Precipitable Water. *In: International Workshop on GPS Meteorology: Ground based and space borne applications*, Tsukuba, Japão, 14-17/01/2003, Proceedings, MEXT-JISTEC.
- KRON, W. (2003) Flood Catastrophes: causes, losses and prevention from an international re-insurer's viewpoint. *In: International Workshop on Precautionary Flood Protection in Europe*, Bonn, Alemanha, 5 e 6 de fevereiro de 2003.
- KRZYSZTOFOWICZ, R.; DAVIS, D. (1983) A methodology for evaluation of flood forecast-response systems, 1, Analyses and Concepts. **Water Resources Research**, v 19, pp 1423-1429.
- KRZYSZTOFOWICZ, R (1993) A theory of flood warning systems **Water Resources Research**, v 29, n 12, pp. 3981-3994, December 1993.
- LI, P. W.; LAI, E. S. T. (2004) Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. **Journal of Hydrology**, 288, pp. 189-209.
- LIRA, A. M. (2003) **Avaliação das condições do sistema de macrodrenagem da cidade de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- MCT/CGE – Ministério de Ciência e Tecnologia / Centro de Estudos e Gestão Estratégica (2001) **Diretrizes estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico**, Brasília – DF.
- MENDES, H. C. (2005) **Urbanização e Impactos Ambientais: Histórico das Inundações e Alagamentos na Bacia do Gregório, São Carlos - SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- MENDIONDO, E.M. (2005) An overview on urban flood risk management. **Revista Minerva**, v. 2, n. 2, pp. 131-144.
- MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. (2003) O GPS como um sensor meteorológico: possibilidades de aplicações no Brasil. *In: Geoinfo Cuba VI Taller Internacional*

- “Informática y Geociencias”**. Disponível em: <<http://www.iga.cu>>. Último acesso: janeiro 2006.
- NETO, S. L. R. (2000) **Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.
- NIBH - Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas (2003) **Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos, SP**. FINEP – CT-Hidro / EESC-USP / DAEE-SP / FIPAI, 01.02.0086.00. Disponível em: <www.planodiretorbus.hpgvip.ig.com.br>. Último acesso: setembro de 2005.
- ONU – Organização das Nações Unidas (2003) United Nations; International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk: Turning the tide on disasters towards sustainable development** - World Disaster Reduction Campaign, Genebra.
- OLIVEIRA, L. C. K. (2003) **Papel do monitoramento e da previsão de vazões no gerenciamento de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.
- OHNUMA JÚNIOR, A. A. (2005) **Cenários de reuso de água pluvial e controle da drenagem visando a recuperação ambiental da micro-bacia do Alto Tijucu Preto, São Carlos/SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.
- PEDROLLO, O.C.; LANNA, A.E. (2003) Previsão de cheias em tempo atual com sistema especialista difuso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, pp.45-60.
- PONCE, V. M. (1989) **Engineering Hydrology: Principles and Practices**. Prentice-Hall, New Jersey, Estados Unidos, 640p.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO (2003) **Alerta Rio**. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br>>. Último acesso: janeiro de 2006.
- RIGHETTO, A. M. (1998) **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Publicação EESC-USP, São Carlos – SP, 840 p.
- RIGHETTO, J. M. (2005) **Modelo de seguro para riscos hidrológicos no contexto de manejo integrado de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

- FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (2005) **Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.saisp.br>>. Último acesso: dezembro de 2005.
- SAMUELS, P.G. (2000) **An Overview of Flood Estimation and Flood Prevention**, In: TOENSMANN, F. & KOCH, M (eds.) **River flood defense**, Herkules Vg, Kassel, Alemanha, v.2, pp.G1 – G9 (Kassel Reports of Hydraulic Eng. No. 9/2000).
- SEO, D.-J; SMITH, J. A. (1992) Radar-based short-term rainfall prediction. **Journal of Hydrology**, 131, pp. 341-367.
- TOTH, E.; BRATH, A; MONTANARI, A. (2000) Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. **Journal of Hydrology**, 239, pp.132-147.
- TUCCI, C.E.M. (1993) **Escoamento Superficial** In: TUCCI, C.E.M. (ed) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, Editora da Universidade/UFRGS, 3ª ed, 2002, pp.391-441.
- TUCCI, C.E.M. (1998) **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH. 1ª ed, 669 p.
- WĘGLARCZYK, S (1998) The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. **Journal of Hydrology**, 206, pp. 98-103.
- WMO – World Meteorological Organization (2006) **Preventing and mitigation natural disasters: Working together for a safer world**. WMO No 993. ISBN 92-63-10993-1.

Anexos

Anexo 1. Rotina do modelo de previsão hidrometeorológica

```
//-----
float TFPrincipal::NewtonRaphson(float T, float p, int atual)
{
    float x, x0, Epsilon, E, p1,p2;
    int Nmax,i=1;
    x0=T;
    Epsilon=0.001*tetaE1[atual];
    Nmax=1000;
    do
    {
        p1=f(x0,p,atual); //função
        // p2=fl(x0,p,atual); //derivada
        E=fabs(p1-tetaE1[atual]);
        i++;
        x0=x0-0.1;
    } while (E>Epsilon);
    return (x0);
}
//-----
void TFPrincipal::converte_dados(int data,int tempo, float temp_externa,float umidade_ar,
float pressao_atm, int n)
{
    int i;
    float aux, aux_tm, aux_l, aux_w, tolerancia, tolerancia_v, v2,v1,res, pressao;

    i=n;
    dia[i]=data;
    hora[i]=tempo;
    ToC[i]=temp_externa; //temp °C
    ur[i]=umidade_ar; //umid. relativa
    pommHg[i]=pressao_atm; //pressao mmHg

    //Dados de entrada do modelo
    // Temperatura em °K
    To[i]=(ToC[i]+273);
    // Pressão em Pa
    po[i]=PTRANSF*pommHg[i];
    //Pressão de Saturação Úmida [es umido]
    es[i]=(ur[i]/100)*(A1*(pow((To[i]-223.15),3.5)));
    //Temp. Ponto de orvalho [°K]
    Td[i]=(pow((es[i]/A1),(1/3.5)))+223.15;
```

```

//Pressão na base da nuvem
ps[i]=po[i]/(pow((((To[i]-Td[i])/223.15)+1),3.5));
Ts[i]=To[i]/((((To[i]-Td[i])/223.15)+1);
//Temperatura potencial (Θ) Teta
teta[i]=(pow((PN/ps[i]),0.286))*Ts[i];
//Calor latente de condensação
L[i]=A-B*(Ts[i]-273.15);
//Razão de mistura ws(To,po)
wss[i]=0.622*(A1*(pow((To[i]-223.15),3.5)))/po[i];
//Calcula wo = ws(Td,po)
wo[i]=0.622*(A1*(pow((Td[i]-223.15),3.5)))/po[i];
//Temperatura potencial pseudo-adiabática Θe tetaE1
tetaE1[i]=teta[i]*exp(L[i]*wss[i]/(CP*Ts[i]));

//Parametrização para encontrar v e pt.
v1 = StrToFloat(v_inicial->Text);

do{
    //substitui v1 e encontra pt
    pt1[i] = ((StrToFloat(e2->Text)-StrToFloat(pl->Text) )/(1+StrToFloat(e3->Text)*v1))+StrToFloat(pl->Text);
    //substitui pt1 e encontra p'
    plinha[i] = ps[i] - ((0.25)*(ps[i]-pt1[i]));
    //encontra Tm na através de tetaE1: substitui p' e 1a aprox Tm = Ts
    Tm[i]=NewtonRaphson(Ts[i],plinha[i],i);
    //substitui valor de pt e encontra ts'
    aux = ((0.75)*ps[i])+((0.25)*pt1[i]);
    tslinha[i] = (To[i]/pow(po[i],0.286))* pow(aux,0.286); //encontra tslinha
    //substitui Tm e Ts' na eq 14 e encontra deltat
    DELTAT[i]= Tm[i] - tslinha[i];
    //encontra v2
    v1 = StrToFloat(E1->Text)*pow((CP*DELTAT[i]),0.5); //eq 13
    //calcula pt novamente
    pt[i] = ((StrToFloat(e2->Text)-StrToFloat(pl->Text) )/(1+StrToFloat(e3->Text)*v1))+StrToFloat(pl->Text);
    // compara os dois valores de p
    res = pt1[i]-pt[i];
    tolerancia_v = pt1[i]*2/100;
    pt1[i]=pt[i];

} while (fabs(res) > tolerancia_v);

v[i] = v1;
pt[i]=pt1[i];

//Parâmetro c
c[i]=1/(StrToFloat(E4->Text)*pow(v[i],K));

//tetae eq. 16
Tt[i]=NewtonRaphson(Ts[i],pt[i],i);

```

```

teta17[i]=f(Tt[i],pt[i],i);

//Relacao entre Z e p
Zb[i] = 44308*(1-pow((ps[i]/101320),0.19));
Zt[i] = 44308*(1-pow((pt[i]/101320),0.19));
Zc[i] = Zt[i] - Zb[i];

//Razao de mistura ws(Tt,pt)
wst[i]=0.622*(A1*(pow((Tt[i]-223.15),3.5)))/pt1[i];

//Umidade I eq 2
I[i]=(wo[i]-wst[i])*ROM*v[i]*DA;
//D* eq 42
Dast[i]= 2.11*pow(10,-5)*pow((To[i]/Tast),1.94)*(past/po[i]);

//Diametro crítico Dc
Dc[i]=pow((4*(Dast[i]/(C1*RV))*Zb[i]*((A1*pow((To[i]-223.15),3.5)/To[i])-(A1*pow((Td[i]-223.15),3.5)/To[i]))),(0.333));

//Adimensionais
Nv[i]= v[i]*c[i]/ALFA;
Nd[i]=c[i]*Dc[i];
vp[i]=4*ALFA/c[i];
//DELTA
DELTA=(0.333)*((1/GAMA)+(1/(GAMA*GAMA))+(1/(GAMA*GAMA*GAMA)));
//Ob e Ot em funcao da massa, ou seja, nao esta multiplicado por X[i]
float F1, F2,F3;

F1 = (1+(3/4)*Nv[i]+pow(Nv[i],2)/4);
F2 = pow(Nv[i],3)/24;
F3=(F1+F2)/exp(Nv[i]);
Ob[i]= (vp[i]/(DELTA*Zc[i]))*F3;
//Ot
F1 = (1+((3/4)*(GAMA*Nv[i])) + pow(GAMA*Nv[i],2)/4
+ (pow(GAMA*Nv[i],3)/24)) / exp(GAMA*Nv[i]);
F2 = (GAMA*Nv[i]/4);
Ot[i]=(vp[i]/(DELTA*Zc[i]*pow(GAMA,5)))*( F1 + F2 - 1);

//calcula valor de x no intervalo seguinte
X[0]= StrToFloat(xinicial->Text);
X[i+1]=(I[i]-(Ob[i]+Ot[i]))*StrToFloat(dt->Text) + X[i];

//Precipitação: resultado em unidade de massa
if(Nd[i]>=Nv[i])
{
double pa = (X[i+1]/(DELTA*Zc[i]))*vp[i];
double pb = (1-Nv[i]/4) * (1 + Nd[i] + (pow(Nd[i],2)/2));
double pc = (pow(Nd[i],3)/8);
double pd = exp(Nd[i]);
double pe = (pb+pc)/pd;

```

```

        P[i] = pa*pe;
    }
else
    P[i]=(X[i+1]/(DELTA*Zc[i]))*vp[i]
        *(1+(3/4)*Nv[i]+pow(Nv[i],2)/4+pow(Nv[i],3)/24-pow(Nd[i],3)/24)
        /exp(Nv[i]);

    P[i] = P[i]*3600; //valor em mm/h

}

//-----

```

Anexo 2. Rotina do modelo de separação do escoamento

```
void __fastcall TF_Principal::BitBtn1Click(TObject *Sender)
{
    float SPe=0.0,p1,p2;
    for(int i=0;i<=FPrincipal->SG_final->RowCount+8;i++)
    {
        if (SG->Cells[0][i] == "")
            SG->Cells[0][i] = "0.00" ;

    }
    //Acumula as precipitacoes observadas
    for(int i=0;i<=FPrincipal->SG_final->RowCount;i++)
    {
        // SG->Cells[0][0] = ; //coluna linha
        //SG->Cells[1][i] = StrToInt(SG->Cells[1][i]) + StrToInt(SG->Cells[0][i]);
        if ((i==0) || (SG->Cells[0][i] == ""))
            SG->Cells[1][i] = (SG->Cells[0][0]) ;
        else {
            if (SG->Cells[0][i] == "0")
                SG->Cells[1][i] = "0";
            else {
                p1 = StrToFloat(SG->Cells[1][i-1]);
                p2 = StrToFloat(SG->Cells[0][i]);
                SG->Cells[1][i] = p1 + p2;
                SG->Cells[1][i] = FormatFloat("0.0", StrToFloat(SG->Cells[1][i]));
                qtde_hut++;
            }
        }
    }
    //calcula o armazenamento S [mm]
    S = (25400 / StrToFloat(e_cn->Text)) - 254; //Valores em milímetros

    //calcula Precipitacao efetiva acumulada (SPe)
    if (StrToFloat(SG->Cells[1][i]) <= 0.2*S)
        SG->Cells[2][i] = "0" ;
    else
    {
        SPe = pow((StrToFloat(SG->Cells[1][i]) - 0.2 * S),2) / (StrToFloat(SG->Cells[1][i])+0.8*S);
        SG->Cells[2][i] = (SPe);
        SG->Cells[2][i] =FormatFloat("0.0", StrToFloat(SG->Cells[2][i]));
    }
    //desacumula SPe
    if (i==0)
        SG->Cells[3][0] = (SG->Cells[2][0]) ;
    else {

        p1 = StrToFloat(SG->Cells[2][i]);
        p2 = StrToFloat(SG->Cells[2][i-1]);
```

```
SG->Cells[3][i] = p1 - p2;  
SG->Cells[3][i] =FormatFloat("0.0", StrToFloat(SG->Cells[3][i]));  
if (SG->Cells[2][i] == "0")  
    SG->Cells[3][i] = "0";  
  
}
```

Anexo 3. Rotina do modelo de chuva-vazão

```
void __fastcall TF_HUT::BitBtn3Click(TObject *Sender)
{
    F_HUT->Close();
}
//-----
void __fastcall TF_HUT::BitBtn1Click(TObject *Sender)
{
    float Tps, //Tempo de pico [s]
          Tp2, //Tempo de pico + (metade do intervalo de chuva) [h]
          qp, //vazao de pico do hidrograma unitario [m3/s]
          Tb, //tempo de base [h]
          Tb_1, //tempo de base [h]
          y[300]={0.00}, DeltaD[200]={0.00}, //DeltaD e y sao as coordenadas dos pontos
intermediários do HU ,
          incremento[300]={0.00},
          yHID[300][300]={0.00,0.00},
          yHID2[300][300]={0.00,0.00},
          HF[300]={0.00},
          qmax = 0, // maxima vazao do hidrograma resultante
          tmax = 0; //tempo correspondente a qmax

    int i=0, j = 0, qtde = 0;    //qtde quantidade de incremento

    //Parametros do HUT
    //Tempo de pico em função do tempo de concentração [s]
    Tps = (0.6*StrToFloat(e_tc->Text));
    //Vazão de pico
    qp = (2.08 * StrToFloat(e_a->Text)) / (0.5 * (StrToFloat (e_d->Text)/3600) +
(Tps/3600));
    //Tempo de pico [h], considerando a duração da chuva
    Tp2 =(Tps/3600) + (StrToFloat(e_d->Text)/3600)* .5;

    //Pontos intermediários
    Tb = 2.67 * (Tp2);
    Tb_1 = Tb / (StrToFloat(e_d->Text)/3600);
    for(i=0;i< Tb_1 ;i++)
    {
        incremento[i] = (StrToFloat(e_d->Text)/3600)*i;
        if (incremento[i]< Tp2)
            y[i]= (qp/(Tp2))*incremento[i];
        else
            y[i]= qp * ((Tb-incremento[i]) / (Tb - Tp2));

        qtde += 1;
    }
```

```

//convolução   ncolunas = ntriangulos
// for(i=0;i<= F_Principal->qtde_hut-3;i++) //colunas
for(i=0;i<= F_Principal->SG->RowCount;i++) //colunas
    for(j=0;j < qtde;j++) //linhas
        yHID[i][j]=(StrToFloat(F_Principal->SG->Cells[3][i])*y[j])*0.1;

//defasagem
nova_dimensao = qtde + F_Principal->qtde_hut;
for(i=0;i< F_Principal->qtde_hut;i++) //colunas
{
    for(j=0;j < nova_dimensao ;j++) //linhas
    {
        if (j<=i-1)
            yHID2[i][j] = 0.00;
        else yHID2[i][j]= yHID[i][j-i];
    }
}

//somatório
for(j=0;j < nova_dimensao; j++)
{
    HF[j]=0;
    DeltaD[j]=StrToFloat(e_d->Text)*j;
    for(i=0;i<F_Principal->qtde_hut;i++)
        HF[j]=HF[j]+yHID2[i][j];
}

//hidrograma resultante
for ( j=0;j< nova_dimensao;j++)
{
    //encontrar o valor de vazao de pico e o tempo correspondente
    if (HF[j]>qmax)
    {
        qmax=HF[j];
        tmax=DeltaD[j];
    }
    SG_Saida->Cells[1][j] = FormatFloat("0.00",HF[j]);
    SG_Saida->Cells[0][j] = FormatFloat("0.00",DeltaD[j]/3600); //em [h]
}

//Exibir na tela
e_tlinhap->Text = FormatFloat("0.00",tmax/3600); //em [h]
e_qp->Text = FormatFloat("0.00",qmax); //em [m3/s]

```


Anexo 4. Gráficos das precipitações observadas e modeladas na etapa de validação.

Encontram-se nesta seção os gráficos correspondentes aos eventos utilizados na fase de validação do modelo.

16/01/2005

27/01/2005

26/02/2005

Anexo 5. Modelo empírico de previsão hidrometeorológica

Buscou-se estabelecer correlações entre a quantidade de água precipitável e a precipitação observada. A seguir, será apresentada a seqüência de cálculos da estimativa da lâmina de água precipitável (LAP) conforme mostrado em Bertoni (1998)⁷:

Na atmosfera, a variação da temperatura com a altitude é expressa através da relação:

$$T_{z+\Delta z} = T_z - \alpha_1 \cdot \Delta z \quad (\text{A5.1})$$

Em que: z é o nível de altitude [km], T_i é a temperatura no nível de altitude z [°K], α_1 é o gradiente de temperatura com a altitude [°K.km⁻¹].

Partindo do valor da temperatura, determina-se a pressão de vapor de saturação e a partir da equação A.1:

$$e = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right) \quad (\text{A5.2})$$

Em que e é a pressão de vapor de saturação [Pa]; T é a temperatura [°C].

Assim como a temperatura, a pressão também varia com a altitude, sendo possível a obtenção de uma relação entre elas:

$$p_{z+\Delta z} = p_z \cdot \left(\frac{T_{z+\Delta z}}{T_z}\right)^{\frac{g}{\alpha_1 \cdot R_a}} \quad (\text{A5.3})$$

Em que: p_i é a pressão no nível de altitude i [Pa], g é a aceleração da gravidade [m.s⁻²], R_a é a constante de gás para o ar úmido [J.km⁻¹.K⁻¹].

Depois de calculados e e p , determina-se a umidade específica, q_v . Ela é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar úmido que a contém, podendo ser calculada também como quociente entre densidades ou ainda entre pressões dos dois gases.

⁷ BERTONI, J.C. (1998). **Elementos de Hidrometeorologia** In: Tucci, C. E. M. (org.): **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 1ª ed., Editora da Universidade, 53-78.

Adotando a constante universal dos gases como $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a umidade específica pode ser obtida da equação:

$$q_v = 0,622 \cdot \frac{e}{p} \quad (\text{A5.0.4})$$

Em que: q_v é a umidade específica [kg.kg^{-1}], e é a pressão de vapor de saturação [Pa], p é a pressão atmosférica [Pa].

Uma vez calculada a umidade específica para cada nível de altitude, pode-se estimar a quantidade de água precipitável integrando a equação A.5 na coluna de ar considerada.

$$m_p = \int_z^{z+\Delta z} q_v \cdot \rho_a \cdot A \cdot dz \quad (\text{A5.0.5})$$

Em que: m_p é a massa de vapor de água precipitável [kg], q_v é a umidade específica [kg.kg^{-1}], ρ_a é a densidade do ar [kg.m^{-3}], A é a área transversal da coluna d'água [m^2], z e $z+\Delta z$ são os limites, inferior e superior respectivamente, da altura da coluna d'água [m].

A transformação de massa para lâmina d'água é feita a partir da densidade da água.

$$h = \frac{m_p}{\rho_w \cdot A} \quad (\text{A5.0.6})$$

Em que: h é a lâmina d'água líquida equivalente [m], m_p é a massa de vapor de água precipitável [kg], ρ_w é a densidade da água [kg.m^{-3}], A é a área transversal da coluna d'água [m^2].

Para o cálculo da quantidade de água precipitável, foi considerada uma coluna de ar de 4 km de altura, com discretização de 1 km, e seção transversal de 1m^2 .

A lâmina d'água precipitável foi calculada desde 6h antes do início do evento chuvoso até seu fim, em intervalos de 30min.

Como se busca prever quando e quanto choverá, foram escolhidas variáveis que relacionassem os valores de LAP e precipitação observada (Pobs) como também alguma relação de tempo de ocorrência destes eventos.

LAP_0 é calculado 6h antes do início da precipitação. Este valor, assim como os demais relacionados com LAP, é dado em milímetros.

LAP_{max} é o ponto no qual a derivada de LAP em relação ao tempo passa de positiva a negativa. Em alguns casos, a curva pode atingir um máximo absoluto e, após um curto período decréscimo, voltar a crescer e só então passar por uma queda significativa. Nestas situações, este último pico é LAP_{max} .

Estes dois pontos (LAP_0 e LAP_{max}) serviram também para o cálculo de outras variáveis:

- ΔLAP é a diferença entre eles (mm);
- $\Delta LAP/\Delta t$ é a inclinação da curva entre estes dois pontos (mm/h);
- LAP_{med} é o valor médio do intervalo situado entre LAP_0 e LAP_{max} (mm)

Em relação a precipitação observada, as variáveis escolhidas foram:

- Pi_{max} : a lâmina máxima precipitada no intervalo de 10min;
- $\Sigma Pi/\Delta t$: a intensidade da precipitação, ou seja, a lâmina total precipitada dividida pelo tempo total da chuva

Quanto ao tempo, foram definidas duas variáveis:

- t_{LAG} é o intervalo de tempo entre a ocorrência de LAG_{max} e o início da precipitação;
- t_{PICO} é o intervalo de tempo entre LAG_{max} e LAG_{max} .

O tempo de retardo da ocorrência da precipitação em relação ao LAP_{max} varia entre 10 e 150 min. Os valores de LAP são computados apenas de 30 em 30min de modo que, em uma situação real, não seria possível a previsão de chuvas com lags inferiores a 30min. Pois a observação de LAP_{max} , se daria após a ocorrência da precipitação. Já para o

tempo até a pancada mais intensa tem-se, em todas as situações, um intervalo maior para o alerta.

Com objetivo de prever o instante de ocorrência da chuva e sua intensidade, buscou-se ajustar um modelo com base nas correlações entre as variáveis da Tabela 1. Para o ajuste, foi utilizado o software SYSTAT.

Tendo como variáveis dependentes (Y) ΣP_i ; $\Sigma P_i/\Delta t$; $P_{\text{máx}}$; T_{LAG} ; T_{PICO} e como variáveis independentes todas aquelas relacionadas com LAP, o modelo que melhor se ajustou foi do tipo:

$$Y = a.LAP_{\text{máx}}^2 + b.LAP_{\text{máx}} + c.\Delta LAP^2 + d.\Delta LAP + e.(\Delta LAP/\Delta t)^2 + f.\Delta LAP/\Delta t + g.LAP_{\text{med}}^2 + h.LAP_{\text{med}} + i$$

Para cada um dos modelos, os parâmetros obtidos e o coeficiente de regressão (r^2) corrigido são mostrados na Tabela A1

Tabela A.1. Coeficientes de regressão e parâmetros dos modelos

	ΣP_i [mm]	$\Sigma P_i/\Delta t$ [mm/h]	$P_i \text{ máx}$ [mm]	T_{LAG} [min]	T_{PICO} [min]
r^2	0,954	0,940	0,918	0,979	0,973
a	0,400	0,177	0,289	-	-
b	-77,421	-35,9	-56,191	-	-
c	0,953	0,503	0,7	0,647	0,282
d	-26,97	-18,879	-21,118	-41,176	-16,826
e	-22,86	-13,303	-17,141	-15,467	-
f	110,569	101,323	92,751	194,572	12,26
g	-0,452	-0,164	-0,316	-0,073	-
h	83,101	30,887	57,882	15,539	-
i	-13,036	361,79	107,61	-728,67	236,423

As Figuras A1 a A4 mostram o uso das equações do modelo empírico para 2 eventos.

FiguraA1. Hietogramas de precipitação observada e precipitação gerada para evento do dia 6/11/2003.

Figura A2. Hidrogramas resultantes da chuva observada e chuva gerada para o evento do dia 6/11/2003.

Figura A3. Hietogramas de precipitação observada e precipitação gerada para evento do dia 17/11/2003.

Figura A4. Hidrogramas resultantes da chuva observada e chuva gerada para o evento do dia 17/11/2003.