

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PREVISÃO DE VAZÃO EM TEMPO REAL NO RIO URUGUAI COM BASE NA  
PREVISÃO METEOROLÓGICA**

**IVANILTO ANDREOLLI**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.*

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci

Co-orientador: Dr. Walter Collichonn

**Banca examinadora**

Prof. Dr. André da Silveira

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Miriam R. M. Mine

Prof. Dr. Robin T. Clarke

UFRGS

UFPR

UFRGS

**Porto Alegre, Dezembro de 2003**

“O concreto é a parcela do abstrato que o uso tornou familiar”.

(Paul Langevin)

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul sob orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci e a co-orientação do Dr. Walter Collischonn.

Ao final desse trabalho, uma certeza eu tenho: um centro de excelência como o IPH só é possível quando financiado pelo setor público. Em nenhum momento esqueci que, o trabalhador mais humilde desse país contribui para manter centros de produção de conhecimento como o IPH. Assim, quero primeiramente agradecer ao povo brasileiro e ao governo brasileiro pela oportunidade que me foi concedida.

Muitas pessoas contribuíram para a concretização dessa pesquisa. Quero agradecer a todos que de alguma forma colaboraram com críticas e sugestões.

Em especial, agradeço ao Prof. Carlos Tucci e ao Walter Collischonn pela orientação, fundamental para a concretização desta pesquisa. Obrigado pela paciência e pela disponibilidade.

Agradeço ao Prof. Olavo Pedrollo pelas críticas e sugestões durante o Plano de Mestrado.

Aos colegas, amigos, funcionários e professores que tornaram o IPH um ambiente enriquecedor e familiar.

À Profª. Beatriz, pelo incentivo, pela amizade e pelas inúmeras caronas fazendo com que eu chegasse cedo nas aulas.

Aos colegas de convivência diária: Adolfo, Benedito, Bruno, Daniel, Marllus,

Nicolas, Rutinéia e Simone.

Ao Reinaldo Haas do LabPlan-UFSC pela disponibilização dos dados de previsão de chuva. À Vanderleia Schmitz do CLIMER-SC pela disponibilização dos dados climáticos e hidrológicos. Ao José Vicente Miranda da Tractebel Energia pela disponibilização dos dados de vazão afluente ao reservatório de Machadinho.

À Juliana Dalpian e Maciel Zortéa pela contribuição à revisão do texto e normatização.

## RESUMO

A operação de reservatórios para geração de energia, ou controle de cheias é definida em função dos volumes afluentes que são resultantes das chuvas que ocorrem sobre a bacia. Devido à aleatoriedade e às próprias incertezas envolvidas na ocorrência das precipitações e vazões; a produção de energia, a segurança das barragens e o controle das cheias à montante e jusante ficam comprometidas. Para que as incertezas sejam reduzidas é necessário o aprimoramento das previsões de vazões de afluência em tempo real. A previsão em tempo real pode ser realizada com base na vazão de postos de montante e jusante, na precipitação observada e, ou, na precipitação prevista. A previsão de precipitação é necessária para aumentar a antecipação da previsão e melhoria de resultados para tempos futuros além do tempo de concentração da bacia. Esta pesquisa tem como objetivo a avaliação do ganho da previsão de vazão com uso integrado de previsão de precipitação através de uso de um modelo meteorológico regional (meso-escala) com um modelo hidrológico distribuído. Os resultados do modelo meteorológico regional foram fornecidos pelo Laboratório de Planejamento Energético (LabPlan) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde está sendo utilizado, de forma operacional, o Modelo Numérico Regional ARPS (Advanced Regional Prediction System). O modelo hidrológico de transformação chuva-vazão utilizado é um modelo distribuído com discretização em módulos para grandes bacias - MGB (Modelo de Grandes Bacias).

O estudo de caso foi realizado na bacia do rio Uruguai até a Usina Hidrelétrica de Machadinho, cuja área de drenagem é de, aproximadamente, 32.000 km<sup>2</sup>. Diversos cenários de previsão foram simulados. Para o período de 2001 e 2002 foi feita a análise das previsões de eventos isolados, segundo a disponibilidade de dados de previsão meteorológica. Para o período de 2003, durante 6 meses, foi feita a análise das previsões contínuas. Para este período, através de algumas estatísticas, avaliou-se o ganho hidrológico obtido, em termos de vazão prevista com utilização do modelo hidrológico chuva-vazão considerando chuva futura zero e considerando a previsão da chuva com modelo

meteorológico regional. Para o período de 2001 a 2003 avaliou-se, também, a importância da rede de pluviógrafos para previsão em tempo real. Formas de atualização simples das variáveis de estado foram testadas e mostraram significativa melhora das previsões. Os resultados da previsão por eventos mostraram ganhos significativos na previsão de vazão quando a previsão de chuva foi incorporada. Já no período de previsão contínua o mesmo não foi observado, porém este período foi bastante seco com poucos eventos de cheia prejudicando a análise do uso das previsões de chuva no modelo hidrológico para previsão. A análise da importância da rede de pluviógrafos destacou a região sul da bacia como a região mais importante em termos de geração de escoamento rápido ao reservatório de Machadinho. Além disso, uma análise simplificada mostrou que uma rede de pluviógrafos distribuídos na bacia, segundo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM), poderia reduzir em aproximadamente 25% o erro padrão nas previsões de vazão com 12 horas de antecedências em Machadinho.

## ABSTRACT

Operation of reservoirs for energy generation or flood control is defined according to the entry water volumes which results from rain over the basin. Because of randomness and intrinsic uncertainties involved in the occurrence of precipitation and flow, the production of energy and the safety of the dams became compromised. To reduce the uncertainties is necessary to improve discharge real time forecasts. Real time forecast can be accomplished using measured flows upstream and/or observed precipitation. Precipitation forecast is necessary to increase the anticipation of the forecast and improve the results for a lead time beyond concentration time. The objective this research is to evaluate the gains in flow forecast using precipitation forecast, computed using a regional meteorological model (meso-scale), coupled with a distributed hydrologic model. The precipitation forecast was supplied by the Laboratory of Energy Planning (LabPlan) from the Universidade federal de Santa Catarina -Brazil (UFSC). In this university it is being used, in an operational way, the Regional Numeric Model - ARPS (Advanced Regional Prediction System). The rainfall - runoff model used is a distributed model with discretização in modules for great basins.

The case study is Upper Uruguay River basin till Hydroelectric Power Station of Machadinho - Brazil, with a drainage area of approximately 32.000 km<sup>2</sup>. Several forecast scenarios were simulated. For the 2001 and 2002 period it was made the analysis of isolated events, according to the availability of meteorological forecast data. For a period of 6 months, in 2003, it was made the analysis of continuous forecasts. For this period, through some statistics, was evaluated: the hydrologic gain in flows forecast using the rainfall - runoff model considering future rain as zero and the gains in flows forecast considering the rain forecast supplied by the regional meteorological model. For the period of 2001 and 2003 it was evaluated importance of net of pluviógrafos for forecast in real time. Simple updating schemas of the state variables were tested and showed significant improvements of the forecasts. The results of the events forecast showed significant gain when rain forecast was introduced. For the period of continuous forecast the same was not observed, however this period was quite dry with few flood events prejudicing rain forecasts analysis.

The analysis of pluviographs network showed that the South Area of the basin is more important for discharge generation. The study also showed that a pluviograph network distributed in the basin according to the recommendations of the World Meteorological Organization (WMO) would reduce in more than 25% the standard error in the flows in Machadinho.



## SUMÁRIO

EPÍGRAFE.....	ii
APRESENTAÇÃO.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Previsão de vazões.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.3 Justificativa.....	20
2. REVISÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO.....	21
2.1 Previsão de vazão em tempo real.....	21
2.1.1 Considerações gerais.....	21
2.1.2 Modelos de previsão em tempo real.....	22
2.2 Modelos de previsão da precipitação.....	27
2.3 Modelos integrados de previsão de precipitação e vazão.....	34
2.4 Estatísticas de avaliação da previsão.....	38
3. MODELO MATEMÁTICO DE PREVISÃO DE VAZÃO.....	42
3.1 Estrutura metodológica.....	42
3.2 Modelo climático meteorológico.....	45
3.3 Modelo hidrológico.....	49
3.3.1 Balanço de água no solo:.....	52
3.3.2 Evapotranspiração.....	53
3.3.3 Escoamento nas células.....	53
3.3.4 Propagação na rede de drenagem.....	53
3.4 Previsão de vazão.....	54
3.4.1 Ajuste off-line.....	54
3.4.2 Atualização em tempo real – ajuste on-line.....	55
3.4.3 Previsão de vazão com previsão de precipitação – tipos.....	58
3.5 Avaliação dos modelos de previsão.....	62
4. PREVISÃO DE VAZÕES NO RIO URUGUAI EM MACHADINHO.....	65
4.1 Bacia do rio Uruguai.....	65
4.1.1 Descrição.....	65
4.1.2 Características meteorológicas.....	66
4.1.3 Características hidrológicas.....	68
4.2 Dados hidrológicos.....	71
4.2.1 Base de dados.....	71
4.2.2 Telemetria.....	73
4.3 Discretização.....	78
4.3.1 Discretização temporal dos dados de chuva.....	78

4.3.2	Discretização espacial dos dados de chuva .....	79
4.4	Ajuste e verificação do modelo hidrológico .....	80
4.4.1	Ajuste do modelo hidrológico .....	80
4.4.2	Verificação do modelo hidrológico .....	86
4.5	Avaliação do efeito da atualização do modelo hidrológico .....	90
4.6	Previsão de eventos.....	93
4.6.1	Evento de setembro e outubro de 2001 .....	94
4.6.2	Evento de 10 a 13 de novembro de 2002 .....	102
4.6.3	Evento final de novembro de 2002.....	107
4.7	Previsão contínua .....	113
4.7.1	Análise estatística .....	114
4.7.2	Análise gráfica – evento 01/ 05/ 2003 .....	118
4.8	Avaliação da densidade da rede telemétrica .....	123
4.8.1	Retirada dos pluviômetros e retirada de postos por região .....	123
4.8.2	Retirada de postos semi-aleatória .....	128
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	132
5.1	Conclusões .....	132
5.2	Recomendações .....	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	137
	ANEXOS A: Hidrogramas dos eventos no período de simulação contínua .....	147
	ANEXOS B: Hidrogramas contínuos no período de simulação contínua .....	158
	ANEXOS C: Formulações, parâmetros e preparação dos dados de entrada do modelo de grandes bacias.....	161
	ANEXOS D: Valores dos parâmetros utilizados no modelo de grandes bacias.....	177
	ANEXOS E: Desempenho da atualização em termos de RD –todos os modelos.....	181

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Radar meteorológico do DAEE – SP	29
Figura 2.2. Abrangência dos modelos de previsão de tempo	31
Figura 2.3. Coeficiente de correlação de anomalia em determinado nível de pressão	32
Figura 3.1. Previsão de vazão considerando chuva futura zero e chuva futura prevista	43
Figura 3.2. Ajuste <i>off-line</i> do modelo hidrológico	45
Figura 3.3. Estrutura da previsão de vazão	45
Figura 3.4. Previsão pelo modelo global AVN do NCEP para 9/07/2003 às 12Z	46
Figura 3.5. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 40 km para 09/07/2003 as 12Z	48
Figura 3.6. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 10 km as 09/07/2003 as 12Z	48
Figura 3.7. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 04 km as 09/07/2003 as 12Z	49
Figura 3.8. Célula do modelo dividida em N blocos	50
Figura 3.9. Variabilidade de classes no interior das células do modelo	51
Figura 3.10. Determinação de escoamento de uma célula do modelo	51
Figura 3.11. Esquema do balanço de água no solo	53
Figura 3.12. Diagrama da previsão de vazão com previsão de chuva – ARPS 40	61
Figura 3.13. Exemplo de previsão por persistência para um evento	63
Figura 4.1. Situação da bacia do Uruguai	65
Figura 4.2. Bacia do Uruguai até Machadinho	66
Figura 4.3. Relevo da bacia	68
Figura 4.4. Uso do solo na bacia	70
Figura 4.5. Sazonalidade das vazões máximas para o posto 72300000	70
Figura 4.6. Distribuição espacial de pluviômetros e pluviógrafos na bacia	74
Figura 4.7. Distribuição espacial de fluviógrafos na bacia	75
Figura 4.8. Número de pluviógrafos em operação na região ao longo do tempo	75
Figura 4.9. Série de níveis no Passo do Socoro – Rio Pelotas	77
Figura 4.10. Série de níveis no Passo Caru – Rio Canoas	77
Figura 4.11. Discretização da bacia em células de 10 km	79
Figura 4.12. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho - calibração	82
Figura 4.13. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho, maior evento de 2001	83
Figura 4.14. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho - inverno de 2002	83
Figura 4.15. Hidrogramas observado e calibrado Passo Socorro, maior evento de 2001	84
Figura 4.16. Hidrogramas observado e calculado Passo Caru, maior evento de 2001	84
Figura 4.17. Hidrogramas observado e calibrado em Passo Socorro - inverno de 2002	85
Figura 4.18. Hidrogramas observado e calibrado em Passo Caru - inverno de 2002	85
Figura 4.19. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua - Machadinho	87
Figura 4.20. Detalhe da simulação do maior evento do período	88
Figura 4.21. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Socorro	89

Figura 4.22. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Caru	89
Figura 4.23. RD em função da antecedência da previsão, com e sem atualização	91
Figura 4.24. Benefícios com a atualização em termos de redução do erro no volume	91
Figura 4.25. Benefícios com a atualização em termos de redução do erro padrão	92
Figura 4.26. Previsão 30/09/01: 07:00h – antecedência máxima de 48 horas	99
Figura 4.27. Previsão 30/09/01: 12:00h – antecedência máxima de 43 horas	100
Figura 4.28. Previsão 30/09/01: 18:00h – antecedência máxima de 37 horas	100
Figura 4.29. Previsão 30/09/01: 24:00h – antecedência máxima de 31 horas	101
Figura 4.30. Previsão 31/09/01: 06:00h – antecedência máxima de 26 horas	101
Figura 4.31. Previsão 09/11/02: 09:00h – antecedência máxima de 60 h	105
Figura 4.32. Previsão 09/11/02: 19:00h – antecedência máxima de 49 h	105
Figura 4.33. Previsão 09/11/02: 24:00h – antecedência máxima de 43 h	106
Figura 4.34. Previsão 10/11/02: 06:00h – antecedência máxima de 37 h	106
Figura 4.35. Previsão 10/11/02: 12:00h – antecedência máxima de 31 h	107
Figura 4.36. Previsão 24/11/02: 21:00h	111
Figura 4.37. Previsão 25/12/02: 09:00h	111
Figura 4.38. Previsão 25/11/02: 21:00h	111
Figura 4.39. Previsão 26/11/02: 09:00h	111
Figura 4.40. Previsão 26/11/02: 21:00h	111
Figura 4.41. Previsão 27/11/02: 09:00h	111
Figura 4.42. Previsão 27/11/02: 21:00h	112
Figura 4.43. Previsão 28/11/02: 09:00h	112
Figura 4.44. Previsão 28/11/02: 21:00h	112
Figura 4.45. Previsão 29/11/02: 09:00h	112
Figura 4.46. Previsão 29/11/02: 21:00h	112
Figura 4.47. Previsão 30/11/02: 09:00h	112
Figura 4.48. Vazão observada em 01/04/2003 a 14/10/2003 em Machadinho	113
Figura 4.49. Fator RD em função da antecedência da previsão	115
Figura 4.50. Erro no volume em função da antecedência da previsão	116
Figura 4.51. Coeficiente de Nash em função da antecedência de previsão	117
Figura 4.52. Erro padrão em função da antecedência da previsão	118
Figura 4.53. Previsão com 12 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03	119
Figura 4.54. Previsão com 18 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03	120
Figura 4.55. Previsão com 24 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03	121
Figura 4.56. Previsão com 30 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03	122
Figura 4.57. Modelo ARPS 40 – antecedência de 6 em 6 horas até 30 horas	122
Figura 4.58. Divisão da bacia em regiões	124
Figura 4.59. Fator RD em função da antecedência para diversos cenários de previsão	125
Figura 4.60. Erro padrão em função da antecedência para diversos cenários de previsão	128
Figura 4.61. Erro padrão em função do número de pluviômetros na bacia	130
Figura 4.62. Extrapolação da curva erro padrão versus número de postos na bacia	131

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1. Informações sobre pluviômetros na bacia .....	72
Tabela 4.2. Rede fluviométrica na bacia operada pela CPRM .....	73
Tabela 4.3. Dados dos pluviógrafos na bacia .....	76
Tabela 4.4. Valores das funções objetivo obtidos durante a calibração. ....	81
Tabela 4.5. Estatísticas da verificação da simulação .....	88

**LISTA DE ABREVIATURAS**

$\Delta t$	intervalo de tempo
$\Delta V$	erro relativo de volume
$\tau$	horizonte de previsão
$\phi$	coeficiente de correlação de anomalia em determinado nível de pressão
$A_i$	área de drenagem à montante da célula considerada
ALADIN	aire limite adoption dynamique-joint international development
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
$A_p$	área de drenagem até a célula que contém o posto fluviográfico
ARIMAX	auto-regressivos integrados médias móveis
ARPS	advanced regional prediction system
AVN	numerical weather model aviation
$b$	parâmetro de separação de escoamento
BOLAM 3	bologna limited area model version 3
CAPS	Centro de Análise e Previsão de Tempestades
$C_B$	parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo
CEPAGRI	Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura
$C_I$	parâmetro de retardo do reservatório sub-superficial
CLIMER	Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
$C_S$	parâmetro de retardo do reservatório superficial

DAEE-SP	Departamento de Água e Energia do Estado de São Paulo
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasting
$E_m$	erro médio
$E_p$	erro padrão
ETA	modelo de área limitada
FCA	fator de correção de atualização
FTP	file transfer protocol
HMS	hydrologic model system
IAF	parâmetro de índice de área foliar
INMET	Instituto Nacional de Estudos Meteorológicos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MBAR	modelo brasileiro de alta resolução
MCG	modelo de circulação global
MC2	mesoscale compressible community model Canadá
Meso-NH	mesoscale non-hydrostatic model
MGB	modelo de grandes bacias
MM5	mesoscale meteorological model
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NS	coeficiente de Nash Sutcliffe
NWSRF	National Weather Service River Forecast
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PBAS <sub>i</sub>	parcela da vazão na célula $i$ oriunda do escoamento subterrâneo
$Q_{\text{atual}}$	vazão atualizada
$Q_{\text{cal}}$	vazão calculada

$Q_{INT}$	vazão sub-superficial das células do modelo hidrológico
$Q_m$	vazão média
$Q_{obs}$	vazão observada
$Q_{SUB}$	Vazão subterrânea das células do modelo hidrológico
$Q_{SUP}$	vazão superficial das células do modelo hidrológico
RAMS	regional atmospheric modeling system
RD	coeficiente de eficiência
RS	parâmetro de resistência superficial
SHE	sistema hidrológico europeu
SI	sistema internacional de unidades
SM	swiss model Switzerland
$T_0$	tempo inicial de simulação, ou tempo zero
UFRGS	Universidade Federal do rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
$VBAS_{atual}$	volume do reservatório subterrâneo atualizado
$VBAS_{cal}$	volume do reservatório subterrâneo calculado
$W_c$	parâmetro de armazenamento residual
$W_m$	parâmetro de capacidade de armazenamento
$X_L$	parâmetro de porosidade do solo
Z	parâmetro de altura da cobertura vegetal



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Previsão de vazões

A previsão de vazão pode ser de curto e longo prazo. A previsão de curto prazo, também denominada de previsão em tempo real, é utilizada para estimar a vazão numa seção da bacia com antecedência de horas ou poucos dias, acompanhando a ocorrência do fenômeno que está para atingir ou já atingiu a bacia. A previsão de longo prazo é a previsão com alguns meses de antecipação. A predição é a estimativa, geralmente estatística, da probabilidade de ocorrência de vazões num determinado local, como, por exemplo: a probabilidade de inundação numa seção de um rio, a probabilidade de períodos úmidos e secos, entre outros (Lettenmaier e Wood, 1993; Tucci et al., 2003).

A previsão é utilizada para minimizar os impactos de cheias e estiagens e a operação de obras hidráulicas. Num sistema de hidrelétricas, a previsão é essencial para aumentar a eficiência na gestão dos volumes disponíveis e a segurança na operação do reservatório.

A previsão de vazão é uma das técnicas utilizadas para minimizar as incertezas da variabilidade estocástica das séries hidrológicas. Assim o conhecimento prévio do hidrograma afluente a um determinado reservatório constitui uma poderosa ferramenta do mesmo. No caso de um evento de cheia, as manobras de comportas podem ser efetuadas horas antes da ascensão do hidrograma, realizando um rebaixamento do reservatório em tempo real. Dessa forma pode-se evitar a alocação de volumes de espera, ou rebaixamentos excessivos decorrentes de uma operação conservadora, os quais reduzem temporariamente a queda bruta do aproveitamento hidrelétrico, e conseqüentemente a capacidade de geração de energia.

A previsão de curto prazo, ou previsão em tempo real, é utilizada como alerta hidrológico para áreas ribeirinhas e para melhorar a operação de sistemas hidrelétricos. Essa previsão pode ser realizada com base em postos de vazão, com base na precipitação, ou então com ambos.

A previsão de vazão com base em postos de vazão apresenta menor antecedência e depende do tempo de deslocamento da onda de cheia no canal. Modelos dessa natureza podem ser utilizados em bacias em que a contribuição lateral é pouco significativa e onde a antecedência necessária é menor que o tempo de deslocamento da onda de cheia.

Quando a bacia de contribuição lateral é significativa na parcela de vazão, ou quando há necessidade de um horizonte de previsão maior, podem-se utilizar modelos chuva-vazão com chuva observada na bacia combinado com modelo de propagação em canal. Neste caso, as incertezas aumentam, mas no atual estado da arte, as incertezas residem mais sobre os dados de entrada do que no próprio modelo de previsão (Tucci, 1998). Se, então, os dados de entrada forem confiáveis, as previsões com modelo chuva-vazão podem contribuir para uma previsão com menores incertezas.

Quando existe a necessidade de um horizonte ainda maior de previsão pode-se utilizar um modelo de previsão quantitativa de chuva, integrado a um modelo hidrológico chuva-vazão. Neste caso, devido às incertezas envolvidas no modelo de previsão de chuva, a rede telemétrica na bacia não é dispensável. A chuva observada nos primeiros intervalos de tempo é incorporada ao modelo de previsão, e os dados de vazão observada devem ser utilizados para atualização do estado do sistema. Modelos de previsão chuva-vazão necessitam de um sistema de informação em tempo real para tornar o sistema de previsão operacional.

Ainda são poucos os estudos de previsão de vazão com base na precipitação prevista. Isso se deve, principalmente, às diferenças das escalas espaciais e temporais entre os modelos hidrológicos e meteorológicos. Até pouco tempo, os modelos meteorológicos utilizavam discretizações cujas células englobavam grandes bacias (modelos meteorológicos globais) mascarando as variações temporais e espaciais da chuva na bacia. Com a maior capacidade de processamento e armazenamento dos computadores atuais, está sendo possível discretizar os modelos meteorológicos, tornando-os compatíveis com os modelos hidrológicos e com as escalas dos processos hidrológicos envolvidos. Apesar das incertezas envolvidas na previsão de chuva, alguns estudos recentes já mostram ganhos na operação de reservatórios quando essas informações são incorporadas aos modelos chuva-vazão.

Esta Dissertação originou-se a partir de um projeto de pesquisa realizado em conjunto entre a empresa Tractebel Energia, LabPlan da UFSC e IPH-UFRGS, regularizado pela ANEEL. Parte dos resultados apresentados na dissertação foram obtidos durante este projeto. Correspondem ao projeto a calibração do modelo hidrológico e a previsão feita para eventos isolados (2001 a 2002).

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver e avaliar uma metodologia para realizar previsão de vazão em tempo real integrando a previsão de precipitação ao modelo hidrológico chuva-vazão. O modelo foi aplicado na Bacia do Rio Uruguai na seção de Machadinho, à jusante da confluência do Rio Pelotas e Rio Canoas, com área de drenagem de 32.000 km<sup>2</sup>.

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- Avaliar o aumento tanto da precisão quanto da antecipação das previsões obtidas pelo uso conjunto dos modelos de previsão de chuva e vazão. Utilizou-se na análise diversos cenários de previsão: previsão com hipótese de chuva zero no futuro, previsão utilizando dados de chuva observada e previsão com previsão numérica de chuva em diferentes resoluções espaciais.
- Avaliar o desempenho da previsão com atualização em tempo real de variáveis de estado do modelo hidrológico distribuído.
- Avaliar as regiões da bacia mais importantes em termos de geração de escoamento. Utilizou-se na análise a previsão de vazão em Machadinho, com chuva observada, feita quando postos de chuva foram retirados separadamente em regiões pré-definidas sobre a bacia.
- Avaliar a relação entre a qualidade das previsões e a densidade da rede de pluviógrafos utilizados na telemetria. Utilizou-se na análise a previsão de vazão em Machadinho quando postos foram retirados de maneira semi-

aleatória sobre a bacia e avaliando-se os erros na variável vazão prevista.

### **1.3 Justificativa**

A determinação da previsão de afluência aos reservatórios hidrelétricos é normalmente realizada por modelos estocásticos com base em dados de séries históricas de vazão. Considerando que estes modelos dependem da memória da bacia e geralmente não retratam os processos precipitação-vazão, os seus resultados apresentam grande desvio padrão de estimativa. O volume de espera é dimensionado com base nas séries do passado, o que também aumenta as incertezas operacionais.

A previsão determinística permite reduzir as incertezas de previsão e aumentar a eficiência na definição do volume de espera. Minimizar o volume de espera e ainda garantir a segurança estrutural da barragem permite tornar o sistema mais eficiente. O principal problema desta operação é que no Brasil nem todas as regiões têm um período úmido bem definido, ou seja, as cheias podem acontecer tanto no inverno como no verão. Uma região característica onde tal fato ocorre é na Região Sul, que possui um regime hidrológico bastante indefinido, podendo ocorrer cheias tanto no verão, como no inverno. Se os reservatórios do Sul criarem um volume de espera demasiadamente grande e a cheia não acontecer, então a geração de energia elétrica estará fortemente comprometida. Uma forma eficaz de tratar este problema é através de previsões dos volumes afluentes aos reservatórios, que permitam criar volumes de espera em tempo real, não rebaixando demasiadamente os reservatórios do Sul e, portanto, não penalizando a geração hidrelétrica, caso o período chuvoso não se concretize.

A previsão de vazão é um dos principais desafios relacionados com o conhecimento integrado de climatologia e hidrologia. Esta pesquisa foi desenvolvida visando o aumento do conhecimento antecipado das vazões para a utilização no desenvolvimento e controle dos recursos hídricos e, em especial, para aproveitamentos hidrelétricos.

## 2. REVISÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO

### 2.1 Previsão de vazão em tempo real

#### 2.1.1 Considerações gerais

Os modelos hidrológicos, desenvolvidos para aplicações no manejo de recursos hídricos, representam os fenômenos do ciclo hidrológico, no todo, ou em partes, dentro de um sistema. Essas aplicações podem ser divididas em dois modos em função dos seus objetivos (Pinheiro, 1990):

i) Modo de simulação: cujos objetivos principais são completar séries de vazões ocorridas no passado, avaliar modificações na bacia, entre outros. A calibração é realizada considerando séries de chuvas e vazões simultaneamente. Nesta situação os modelos são utilizados principalmente para estudos de planejamento dos recursos hídricos e projetos de obras hidráulicas.

ii) Modo de previsão em tempo real: neste caso o objetivo é prever o estado do sistema no instante  $t + \tau$ . Embora os parâmetros possam ser determinados de forma semelhante ao modo simulação, é possível efetuar ajustes durante o processo de previsão a partir da comparação entre valores observados (transmitidos em tempo real) e previstos.

Os modelos hidrológicos podem apresentar uma estrutura simplificada na qual parte dos fenômenos hidrológicos ou do sistema é representada, ou uma estrutura complexa, onde os fenômenos e o sistema são representados com maior detalhamento. Esses modelos podem possuir estrutura estocástica ou determinística. A estrutura dos modelos determinísticos é composta de dois módulos. O primeiro realiza a simulação dos processos do ciclo hidrológico de transformação da precipitação em vazão. O segundo módulo corresponde à propagação dos escoamentos em rios e reservatórios.

### **2.1.2 Modelos de previsão em tempo real**

As previsões de curto prazo são baseadas no princípio de que é possível obter-se, no presente (tempo atual), informações suficientes relacionadas às causas que condicionam um evento em um futuro próximo, para, com uso de modelos que relacionam as variáveis envolvidas, predizer, com precisão adequada, o estado de determinada variável que representa este evento (Pedrollo, 2000).

Estas previsões dependem do conhecimento do estado do sistema (umidade do solo, vazões observadas a montante do rio, e, ou das chuvas recentes, ou previstas). O uso de determinado modelo de previsão fica condicionado a essas informações.

#### **Tipos de modelos de previsão em tempo real**

As previsões em tempo real são, tradicionalmente, efetuadas por modelos matemáticos empíricos ou por modelos matemáticos conceituais.

Os modelos empíricos, descritos em Pedrollo, (2000) e Pedrollo e Lanna (1991), são funções de recorrência, as quais não são baseadas na natureza dos fenômenos, e podem ter probabilidades associadas às previsões, sob forma de intervalos de confiança. Esses modelos são comumente designados de modelos do tipo caixa preta por não representarem os processos físicos do sistema e, por isso não devem ser utilizados para extrapolação.

Os modelos matemáticos conceituais, teoricamente, possuem a vantagem de representar os fenômenos hidrológicos envolvidos, embora apresentem dificuldades com respeito à atualização contínua dos parâmetros para acompanhar evoluções em processo. Além disso, estes modelos possuem natureza determinística, porém operam dados parcialmente aleatórios e seus resultados, dificilmente coincidem com as observações (Pedrollo, 2000). A atualização em tempo real dos parâmetros e ou variáveis de estado visa melhorar as respostas futuras da previsão e reduzir o erro associado ao modelo.

### **Atualização em tempo real**

A atualização de um modelo pode ser realizada modificando os seus parâmetros ou então as variáveis de estado. Neste aspecto, os modelos empíricos apresentam vantagem sobre os modelos conceituais, pois devido a sua estrutura simples, facilmente seus parâmetros são atualizados (Pedrollo, 2000; Pinheiro, 1990).

Normalmente, nas aplicações de modelos conceituais para previsão de cheias em tempo real, não é utilizada atualização, ou são utilizadas formas de atualização bastante simples (Pinheiro, 1990).

Técnicas de atualização são descritas por diversos autores (Weisse et al., 2001; Mine, 1998; Tucci, 1998; Refsgaard, 1997; O'Connell e Clarke, 1981).

A atualização, como reportada por O'Connell e Clarke (1981) e mais recentemente por Weisse et al. (2001) é classificada em 3 grupos: i) correção sobre as variáveis de entrada, ii) correção no modelo de previsão, iii) correção sobre a variável de saída. Dentro desta classificação, o segundo grupo é o que caracteriza a atualização no modelo de previsão e é subdividida pelos autores em: atualização das variáveis de estado e atualização nos parâmetros.

A correção das variáveis de entrada é importante devido às incertezas envolvidas na estimativa e nas medições das mesmas. A incertezas envolvem a variabilidade espacial e temporal das variáveis e erros de medições (Tucci, 1998).

A atualização de estado consiste em atualizar os estados do sistema (entradas, saídas medidas, reservatórios virtuais, variáveis hidrológicas modeladas) com base em dados medidos em tempo real. O método apresenta algumas vantagens principalmente pela simplicidade e tem sido aplicado em modelos empíricos (Mine, 1984) e conceituais (Brun, 1999).

A atualização dos parâmetros do modelo é descrita em Mine (1998) e Tucci (1998) e se constitui na melhoria da calibração dos parâmetros do modelo de previsão de escoamento baseado nas informações mais recentes de vazões ou níveis. Tucci e Clarke (1980) ressaltam a importância de utilização das informações mais recentes de

precipitação e descargas para atualização de parâmetros de modelos chuva-vazão para previsão em tempo real. Esta forma de atualização não é conveniente para modelos conceituais devido à complexidade de recursos necessários, principalmente em “softwares” e qualificação de usuários. Porém, alguns trabalhos de previsão com modelos conceituais, com essa forma de atualização, foram desenvolvidos, em que apenas os parâmetros mais sensíveis, eram selecionados, mostrando aplicabilidade prática do método.

A atualização com base na correção sobre a variável de saída se constitui na incorporação de um modelo aos resíduos das previsões. Segundo Weisse (2001), a atualização com base na previsão do erro é particularmente interessante quando se utilizam modelos do tipo caixa preta, ajustado aos resíduos. A utilização de um modelo conceitual para previsão com os resíduos ajustados a um modelo empírico, constitui os chamados modelos híbridos, conforme é apresentado por Mine (1998) e Tucci (1998).

Os modelos híbridos constituem uma alternativa, para superação das deficiências dos modelos separadamente e são interessantes, principalmente para se obter intervalos de confiança para as previsões realizadas pelos modelos conceituais, bem como associar a estes a capacidade dos modelos empíricos lineares para a atualização contínua dos parâmetros (Pedrollo, 2000).

### **Modelos de previsão vazão-vazão**

De uma forma geral a previsão em tempo real pode incorporar a chuva (chuva-vazão) ou não (vazão-vazão). A previsão realizada com modelo vazão-vazão é feita com base em informação de níveis de posto à montante e jusante e pode ser utilizada em bacias maiores cuja contribuição lateral seja pouco significativa. A antecedência da previsão fica limitada ao tempo de traslado da onda de cheia no canal e as entradas de escoamento das contribuições laterais.

Na literatura são encontrados muitos modelos de previsão vazão-vazão que utilizam as mais variadas formulações. Alguns desses modelos, que são bastante utilizados, estão baseados em simplificações das equações de Saint Venant e adaptados para previsão, como: os lineares, de diferenças e o hidrodinâmico, apresentados em



Tucci (1998) e Zamanillo (1988).

O modelo linear, na forma apresentada por Tucci (1998), é originado a partir do modelo Muskingun e basicamente representa uma equação de regressão entre as vazões de montante e jusante com três parâmetros a serem ajustados e atualizados em tempo real.

Uma variante do modelo linear, é o modelo de diferenças apresentado em Tucci (1998). Este modelo considera a vazão do tempo anterior e a diferença entre a vazão do tempo atual e do tempo de previsão. Essa formulação permite eliminar um parâmetro em relação ao modelo linear.

Na bacia do Rio Doce, cuja área de drenagem é de 83.400 km<sup>2</sup>, existe operacionalmente um sistema de alerta de inundações para 14 municípios, com base no modelo de diferenças e no modelo linear. Castilho e Oliveira (2001) fizeram uma análise desse sistema de previsão, entre os anos de 1997 a 2000 para a cidade de Governador Valadares, cuja área de drenagem é de 40.000 km<sup>2</sup>. Nessa aplicação, foi utilizado o modelo de diferenças, com dois conjuntos de parâmetros contemplando vazões distintas de cheias. Os autores concluem que as previsões aceitáveis podem ser feitas até o horizonte de 12 horas de antecedência. Antecedências maiores necessitariam a incorporação de informações de chuva.

Um modelo hidrodinâmico foi adaptado por Zamanillo (1988) para previsão em tempo real o autor utilizou o modelo para prever níveis, no Rio Jacuí na extensão de 362 km (extensão navegável do rio) obtendo resultados satisfatórios para previsão de nível em até 7 dias em períodos de estiagem. Essas previsões ficaram limitadas ao horizonte de 3 dias quando ocorreram eventos de chuva nas bacias intermediárias o que de certa forma mostra a importância da incorporação da chuva na previsão.

A seleção do modelo a ser empregado em cada caso prático depende das condições de contorno e das hipóteses que podem ser feitas sobre o regime de escoamento. Existem critérios para definição ou escolha do modelo a ser utilizado, relacionado principalmente à disponibilidade de informações básicas. Em geral, quanto mais complexo o modelo, maior o volume de estimativas de parâmetros ou

levantamentos de campo a serem conduzidos, (Beven e Wood, 1993). Modelos de previsão originados das formulações do modelo Muskingun são largamente aplicados nas diversas partes do mundo devido principalmente à simplicidade e aos bons resultados obtidos.

### **Modelos de previsão chuva-vazão**

Os modelos de previsão dessa classe utilizam modelos chuva-vazão adaptados para previsão em tempo real. Esses modelos podem ser alimentados com chuva observada transmitida em tempo real, ou com chuva prevista, para aumentar o horizonte de previsão. Se o modelo de previsão utiliza apenas chuva observada, a previsão de vazão fica limitada ao tempo de concentração da bacia. A introdução da previsão de chuva no modelo, pode trazer benefícios em termos de antecedência e redução do erro das vazões (Lettenmaier e Wood 1992).

Brun (1999) utilizou o modelo conceitual IPH II (Tucci, et al., 1981), para previsão em tempo real adaptado para incluir atualização de estado, na bacia de Ernestina no Alto Jacuí, cuja área de drenagem é de 1.046 km<sup>2</sup>. A atualização incluiu formas distintas para estiagem e para períodos de cheia. Previsões com antecedência de 1 a 18 horas mostraram significativa melhora com a atualização.

Cruz et al. (1987) utilizando uma combinação do modelo IPH II, com parâmetros fixos e um modelo empírico ARIMAX - Auto-Regressivos Integrados Médias Móveis (Box e Jenkins, 1976) para previsão dos erros do primeiro, com parâmetros estimados recursivamente, realizou previsões em tempo real no Rio Ibirama, afluente do Rio Itajaí-Açu. A comparação do desempenho do modelo híbrido com as alternativas dos modelos empíricos (ARIMAX) e conceitual (IPH II) aplicados separadamente, revelou a superioridade do modelo conjugado.

No mesmo local, Cordero (1989) aplicou um modelo empírico chuva-vazão, baseado na teoria do hidrograma unitário (HU). O modelo foi também conjugado com o modelo ARIMAX (HU-ARIMAX) para atualização em tempo real. As previsões foram comparadas com os resultados do trabalho anterior (Cruz, et al., 1987). Os autores concluíram que: i) não se obteve ganhos evidentes ao utilizar o HU-ARIMAX frente ao

HU; ii) os resultados utilizando HU, foram equivalentes à utilização do IPH II sem atualização. iii) o conjugado IPH II com ARIMAX proposto por (Cruz, et al., 1987) foi o de melhor desempenho.

Até recentemente, foi dada maior importância aos modelos empíricos, ou conceituais com poucos parâmetros, para previsão em tempo real com chuva-vazão, devido às razões já abordadas anteriormente. Mas com o acréscimo da capacidade de processamento dos computadores e também no desenvolvimento dos modelos hidrológicos, um número maior de trabalhos com modelos conceituais com forte base física estão sendo desenvolvidos. Previsões em tempo real com base nesses modelos já estão sendo implementadas, mostrando resultados promissores como em Tucci, Collischonn e Andreolli (2003).

Um fato importante que deve ser levado em conta na escolha de um modelo de previsão é a habilidade do usuário com o modelo. Devido às incertezas que existem na estimativa de previsões, a experiência do usuário com o uso de determinado modelo pode valer mais do que a utilização de um modelo mais complexo (Tucci, 1998). A análise de estudos isolados, ou comparativos, de modelos de previsão como feito por Cordero (1999) falha nesse aspecto.

## **2.2 Modelos de previsão da precipitação**

As informações de chuva são de fundamental importância no gerenciamento de recursos hídricos, particularmente, na operação de reservatórios e controle de enchentes. Previsões de vazões em horizontes futuros acima do tempo de concentração da bacia são possíveis quando, de alguma forma, é feita previsão quantitativa de chuva.

No campo dos modelos meteorológicos distinguem-se previsões de clima de previsões de tempo. Previsões de clima são as previsões do comportamento de algumas variáveis da atmosfera em um longo prazo de antecedência. Esse prazo pode chegar a uma estação ou mais meses. Estas previsões vêm recebendo um impulso muito forte pelas conexões geofísicas entre valores de variáveis climáticas distantes no espaço e no tempo. Um exemplo dessas conexões é o efeito do El Niño, e La Niña (Diaz, et al. 1998). Tucci, et al. (2003), avaliaram as previsões de vazão a médio e longo prazo na

bacia do Uruguai com base na previsão climática, obtendo resultados satisfatórios perante os modelos estocásticos atualmente utilizados. Alguns trabalhos nessa linha também foram desenvolvidos nos Estados Unidos (Hamlet e Lettenmaier, 1999; Hamlet, et al., 2002; Wernstedt e Hersh, 2002).

Previsões de tempo são as previsões do comportamento de algumas variáveis da atmosfera em um curto prazo de antecedência, ou seja, do tempo atual até alguns poucos dias. Para fazer estas previsões os meteorologistas dispõem de técnicas como o uso de radar, imagens de satélites meteorológicos e modelos matemáticos (Haas, 2002; Yu, et al., 1999; Mao, et al., 2001).

O radar, associado a um *software* (programa de computador) de interpretação da radiação refletida, estima a precipitação que está ocorrendo em uma determinada região próxima ao emissor com base na intensidade da reflexão das ondas eletromagnéticas na massa de água que está precipitando.

Os fenômenos meteorológicos são tratados em escalas sinóticas e, portanto, são mais estáveis e comportados e passíveis de serem previstos com alto grau de acerto (qualitativamente) nas previsões com modelos meteorológicos, acima de 3 horas. Na previsão em curtíssimo prazo (abaixo de 3 horas), que é conhecido em meteorologia como *nowcasting* (previsão para o instante atual), há necessidade de lidar com os fenômenos meteorológicos em mesoescala, na qual o campo de precipitação é mais instável e apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Nesse caso o radar se torna interessante, pois pode fornecer informações pluviométricas em alta resolução espaço-temporal e monitorar o campo de precipitações em tempo real podendo melhorar as previsões de chuva (Golding, 2000).

Alguns testes de sistema de previsão com utilização de radar meteorológico têm sido feitos no Brasil, mostrando resultados promissores quando comparados com dados de chuva observada (Nakayama e Braga, 1997) ou com as previsões meteorológicas com até três horas de antecedência (Pereira Filho, 1997). As aplicações em território nacional se limitam, atualmente, às pequenas bacias, com ênfase no controle de inundações em áreas urbanas. Em bacias maiores, com aproveitamento hidroelétrico, por exemplo, a utilização do radar para previsão de chuva, conjugado a um modelo

chuva-vazão, poderia contribuir para uma operação mais eficiente do reservatório e no controle de cheias (Mao, et al., 1999).

O sistema de alerta a inundações da cidade de São Paulo utiliza o radar do Departamento de Águas e Energia do Estado de São Paulo (DAEE-SP). O sistema utiliza dados de chuva observada por uma rede telemétrica, dados de chuva obtidos com radar meteorológico e também previsões numéricas de chuva do Instituto Nacional de Estudos Meteorológicos (INEMET), Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e Centro de Ensino e Pesquisas em Agricultura (CEPAGRI) para alertas de inundação em uma região num círculo de raio 240 km, região de varredura do radar realizada de 5 em 5 minutos (<http://www.dae.sp.gov.br/>).



Figura 2.1. Radar meteorológico do DAEE – SP  
(<http://www.dae.sp.gov.br/>)

O Instituto Tecnológico SIMEPAR utiliza radar meteorológico como parte de um sistema de previsão de variáveis hidrometeorológicas. O radar fornece informações do campo de precipitação num raio de 480 km a cada 10 minutos. As informações são utilizadas principalmente para alerta de tempestades no Estado do Paraná, (<http://www.simepar.br/>).

O uso de radar meteorológico está mais difundido nos Estados Unidos e, em geral, na Europa. Uma série de estudos e aplicações nesses locais demonstram que esta tecnologia pode contribuir para previsões de chuva em curtíssimo prazo e conseqüentemente contribuir para previsões hidrológicas (Bedient et al., e Yates, et al., 2000; Johnson, et al., e Mao, et al., 1999; Borga, 2002; Giannoni et al., 2003).

As previsões por radar são úteis para curtíssimo intervalo de tempo (*nowcasting*). Quando existe necessidade de dados de chuva em horizontes maiores são utilizados os modelos de previsão de tempo que podem ser divididos em estatísticos ou numéricos (Smith e Austin, 2000; Golding, 2000).

Os modelos numéricos de previsão do tempo são constituídos de um conjunto de equações matemáticas que expressam simplificada o comportamento da atmosfera. Esses modelos são em geral complexos e exigem grande capacidade computacional. A exigência computacional se deve da necessidade de análise da atmosfera em escalas globais ou continentais decorrente das características da dinâmica da atmosfera, em que causas e efeitos podem estar distantes por milhares de quilômetros (Collier e Krzysztofowicz, 2000).

A consideração de todo o globo nos modelos de previsão de tempo também decorre da necessidade de previsões mais longas - até 10 dias de antecedência. Ao se considerar todo o globo as escalas espaciais e temporais, bem como as matrizes de dados observados sofrem simplificações devido às limitações computacionais. Essas simplificações resultam nos modelos globais executados rotineiramente em diversas partes do mundo: NCEP (National Centers for Environmental Prediction) nos EUA; ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting) na Europa; CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) no Brasil entre outros.

Muitos processos de circulação atmosférica ocorrem em escalas espaciais que não são resolvidas pela malha dos modelos globais de previsão de tempo devido à baixa resolução espacial. Fenômenos como a brisa marítima, que é da ordem de dezenas de km a poucas centenas de km, efetivamente não são bem resolvidos. Da mesma forma, os efeitos topográficos de serras em geral ficam bastante suavizados no modelo global (Carter, et al., 2000), os complexos convectivos são também suavizados no modelo global (Silva Dias, 1996). Devido às simplificações, a previsão quantitativa da chuva fica prejudicada. Uma forma encontrada de contornar as dificuldades de previsão quantitativa da chuva dos MCG, dentro dos limites computacionais de processamento, foi utilizar modelos regionais.

Os modelos regionais são utilizados para previsão quantitativa de chuva cujo

termo na literatura internacional é designado por *quantitative precipitation forecasts* – QPF. As QPF tiveram início em 1966 (Olson et al., 1995), mas somente na década de 90, com o grande desenvolvimento da capacidade de processamento dos sistemas computacionais, houve um número crescente de estudos sobre esses modelos com aperfeiçoamento dos mesmos (Damrath et al., 2000). Mais recentemente diversos trabalhos de previsões numéricas sobre QPF foram publicados (McBride e Ebert, 1999; Mueller e Juang, 1999; Carter, et al., 2000; Golding, 2000; Mullen e Buizza, 2000; Damrath et al., 2000) mostrando a evolução das previsões.

Para considerar as condicionantes climáticas os modelos de área limitada utilizam a técnica de modelos aninhados, isto é, um modelo de abrangência regional com resolução mais fina é utilizado (modelo regional) para previsão do tempo sobre uma região limitada, enquanto um modelo de resolução menor é utilizado para representar a circulação global (MCG). No contato entre os modelos, o modelo global fornece as condições de contorno externas ao modelo regional. Nessa abordagem, o MCG é usado para simular a resposta da circulação geral às forçantes de grande escala (em geral induzidas por anomalias de temperatura da superfície do mar), enquanto o modelo regional é usado para considerar, em bases físicas, às forçantes locais que não são bem representadas nos modelos globais como: relevo, brisas, chuvas convectivas (Yu, et al., 2001; Haas, 2002). A figura 2.2 mostra a abrangência do modelo global e dos modelos regionais: à esquerda superior, o globo todo é considerado (MCG), à direita superior o modelo de área limitada com média discretização espacial, aninhado ao MCG e na região inferior o modelo da área limitada com alta discretização espacial, aninhado com o modelo de média discretização espacial.

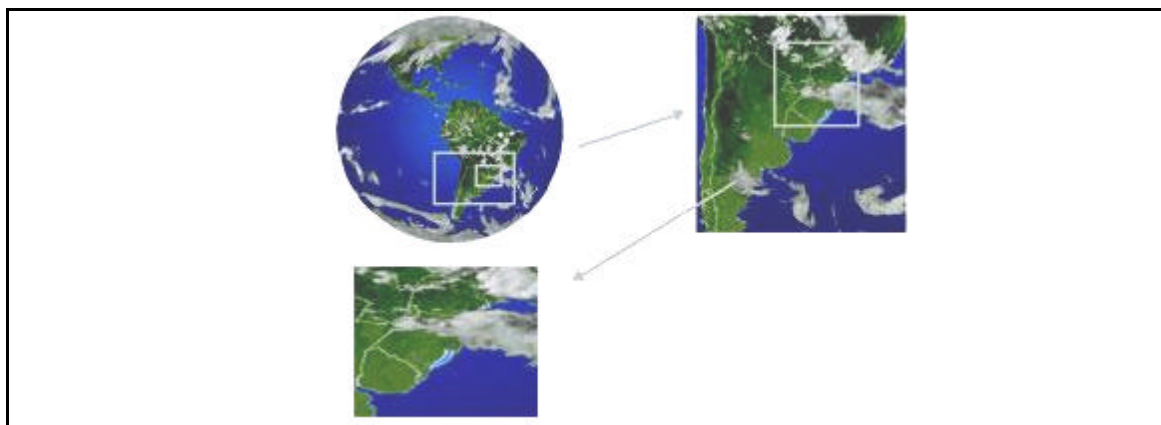


Figura 2.2. Abrangência dos modelos de previsão de tempo  
(<http://cluster.labplan.ufsc.br/>)

O aperfeiçoamento das equações que governam a atmosfera nos modelos de previsão de tempo, o aumento da resolução espaço-temporal e fundamentalmente os avanços na área de sensoriamento remoto e geoprocessamento ao longo do tempo, vem melhorando as previsões de tempo e os QPF, resultante desses modelos, já mostram resultados aplicáveis no gerenciamento dos recursos hídricos (Golding, 2000; Mao, et al., 1999).

Estudos realizados por Hollingsworth et al. (2003) sobre a evolução dos modelos numéricos de previsão de tempo mostram a melhora contínua das previsões ao longo do tempo. O autor apresenta um índice que é utilizado em meteorologia para avaliar a qualidade das previsões de tempo - coeficiente de correlação de anomalia em determinado nível de pressão ( $\phi$ ). Um valor positivo do coeficiente indica uma boa previsão. Entretanto, é geralmente aceito que, para a previsão ser eficiente, do ponto de vista meteorológico, a correlação deve ser maior que 0,6. Valores acima de 0,8 são indicativos de previsões muito boas (Hollingsworth et al, 2003). A figura 2.3 mostra, para um determinado nível da atmosfera (geopotencial de 500 hPa), o coeficiente como uma função do alcance da previsão para três épocas distintas. Primeiramente observa-se uma melhora seqüencial no tempo das previsões. Também se observa que previsões muito boas em 1972 se limitavam a dois dias passando para próximo de 4 dias em 1980 e para 6 dias em 2001.

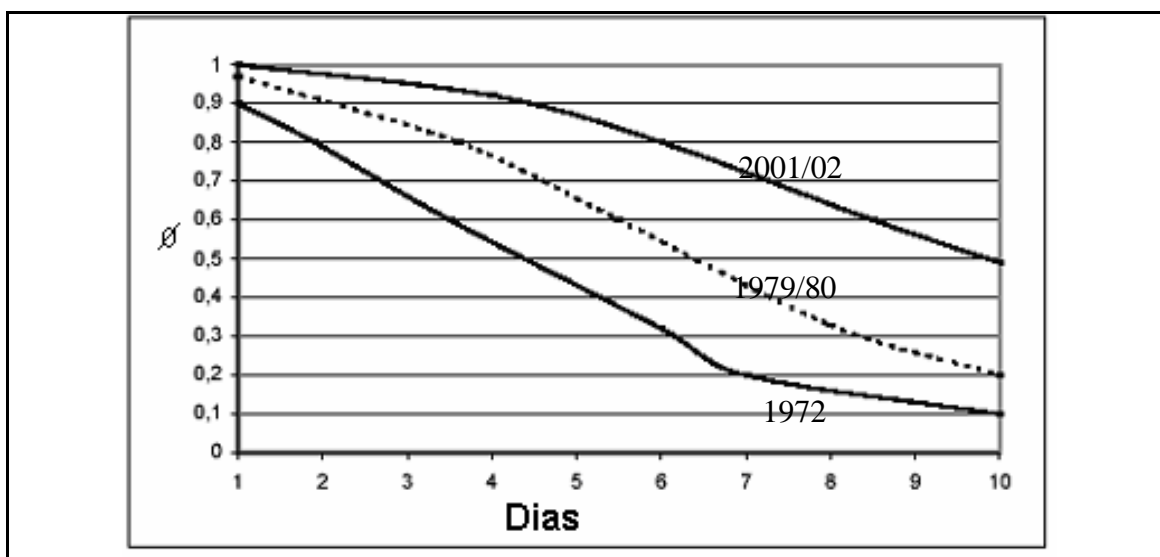


Figura 2.3. Coeficiente de correlação de anomalia em determinado nível de pressão (Adaptado de Hollingsworth et al, 2003)



Mesmo com a melhora significativa dos modelos em geral de previsão de tempo a previsibilidade ainda é questionável. Lorenz (1963, 1965 e 1969) já apontava a imprevisibilidade das variáveis meteorológicas. Uma técnica desenvolvida para lidar com a incerteza dos fenômenos meteorológicos é a previsão por *ensemble* (conjuntos). Em geral, supõe-se que os modelos sejam perfeitos e, assim, considerando apenas a incerteza na condição inicial, é gerado um conjunto de condições iniciais perturbadas. O conjunto de previsões é obtido integrando-se o modelo a partir de cada uma destas novas análises perturbadas e as informações finais são fornecidas associadas a probabilidades. Técnicas de filtragem buscam eliminar subconjuntos pouco sensíveis com objetivo de diminuir o tempo de processamento das previsões (Coutinho, 1999). Técnicas de previsão por conjuntos vêm sendo feitas pelos centros de previsão de tempo como (CPTEC-INPE) e aplicações na previsão de vazão de médio prazo, considerando os conceitos de incerteza, já mostram ganhos na previsão hidrológica como em Tucci, et al. (2003).

As dificuldades da previsão da precipitação também são apontadas em diversos estudos sobre QPF feitas por modelos regionais. A previsão de chuvas convectivas e orográficas, são apontadas como uma das principais dificuldades dos modelos regionais (McBride e Ebert, 1999; Mullen e Buizza 2000; Carter et al., 2000; Damrath, et al., 2000; Golding, 2000). As chuvas convectivas ocorrem predominantemente no verão, e a análise sobre os modelos regionais, apresentada pelos diversos autores, mostra que as previsões são melhores no inverno do que no verão. McBride e Ebert (1999) avaliaram alguns modelos para QPF na Austrália, mostrando melhor desempenho na região subtropical da Austrália do que na tropical, porque nesta ocorre maior frequência de chuvas convectivas.

As previsões do tipo “chove, não chove” são geralmente boas e apresentam alto nível de acerto para fracos eventos, menores que 10 mm acumulados em 24 horas. Essas previsões são boas em todos os horizontes de previsão dos modelos regionais, porém, o desempenho das previsões decresce com o aumento da intensidade da chuva. Os modelos são ruins principalmente para previsões de ocorrências de chuvas acima de 50 mm acumuladas em até 24 horas. A dificuldade reside na determinação da intensidade da precipitação e da sua distribuição espacial (McBride e Ebert, 1999; Mullen e Buizza 2000; Carter et al., 2000; Damrath, et al. 2000; Golding, 2000). Infelizmente essas

previsões são as mais importantes para aplicações hidrológicas. Essas limitações são mais críticas nas aplicações em pequenas bacias urbanas, em que o interesse maior está na vazão de pico onde o erro espacial da chuva é mais sensível (Golding, 2000). Nas aplicações na previsão de volume em grandes bacias, mesmo com essas limitações, existem ganhos em se introduzir as PQF (Damrath, et al., 2000).

### **2.3 Modelos integrados de previsão de precipitação e vazão**

A previsão de cheias em tempo real pode ser feita com base somente em chuvas observadas ou com base em chuvas observadas associadas a previsões de chuva de curto tempo. No primeiro caso, dentro de um contexto otimista de controle de cheias, supõe-se que a chuva cesse após o tempo  $t$ . Esta hipótese não é razoável por três razões (Mine, 1998): i) é pouco provável que a chuva cesse imediatamente após o tempo  $t$  quando ainda permanece intensa; ii) a hipótese não é conservadora, uma vez que sempre subestima a cheia real; iii) seria válida somente quando aplicada a bacias hidrográficas de resposta lenta.

Quando a previsão de cheias é feita incorporando a previsão de chuvas, assume-se que o hidrograma de cheia esteja baseado em medidas de chuva do início da mesma mais uma previsão de chuva para o instante  $t + \tau$  (Mine, 1998). Porém as previsões de chuva devem ser compatíveis com as escalas dos processos hidrológicos.

Recentemente observa-se um número crescente de estudos de previsão de vazão em tempo real em que se introduz nos modelos de previsão hidrológica a previsão de chuva feita por modelos meteorológicos de meso escala (Yu, et al. 1999; Damrath, et al., 2000; Ibbitt, et al., 2001; Jasper, et al., 2002; Anderson, et al., 2002; Koussis, et al., 2003; Tucci, et al., 2003; Haas, et al., 2003). Mesmo com o número crescente de estudos nessa área em termos mundiais, ainda não houve a integração desses modelos de tal forma que haja uma iteração de informações entre os mesmos (Yu, et al., 1999).

Nos EUA, Yu, et al. (1999) avaliaram o desempenho de um modelo hidrológico semi-acoplado a um modelo meteorológico regional. O estudo foi feito em uma bacia de 14.710 km<sup>2</sup> localizada ao norte da Pennsylvania (Susquehanna River Basin). Para análise, os autores selecionaram 3 eventos de cheia (abril de 1986, maio de 1984, maio

de 1988). O modelo hidrológico utilizado foi Hydrologic Model System (HMS) considerando três algoritmos de separação de escoamento: Método Green-Ampt (Chu, 1978) e dois métodos baseados na curvas Soil Conservation Survey (Moore, 1985). A bacia foi discretizada em células de 1 km<sup>2</sup>, considerando o método de onda cinemática para escoamento nas células e o modelo Muskingun-Cunge para propagação no canal. O modelo meteorológico regional utilizado foi Meso-scale Meteorological Model (MM5) com discretização de 36 km e 4 km, aninhado com MCG de 250 km, com previsões de chuva de 4 dias de antecedência. Os três eventos foram analisados com chuva observada em 2.000 estações e chuva prevista considerando os três métodos de separação de escoamento.

Os resultados mostraram que: i) utilizando o método Green-Ampt e chuva observada, as vazões foram fortemente subestimadas, ii) A utilização de chuva prevista gerou hidrogramas semelhantes à situação com chuva observada, mas com erros de pico. Segundo os autores, melhores resultados poderiam ser obtidos com maior resolução do MM5 e a modificação dos parâmetros de separação de escoamento do modelo hidrológico.

Ainda nos EUA, na Califórnia, Anderson, et al. (2002), avaliaram o desempenho de dois modelos de previsão de chuva. Os autores utilizaram o modelo ETA com discretização de 40 km e o modelo MM5 com resolução espacial de 4 km com previsões de 48 horas. Para prever o escoamento superficial foi utilizado um modelo hidrológico HMS. A bacia onde foi aplicado o estudo de caso está localizada nas montanhas de Serra Nevada e apresenta tempo de concentração de aproximadamente 5,5 horas. A análise foi feita apenas para um evento de cheia de 19 a 21 de janeiro de 1999. A utilização de chuva prevista pelo modelo de 40 km no modelo hidrológico resultou num hidrograma com forma de uma curva de recessão. Isso se deve à deficiência da distribuição espaço-temporal do modelo ETA frente à escala hidrológica nesta bacia ficando esta inclusa em apenas 3 células do modelo (Anderson et al., 2002). Quando utilizado o modelo MM5 o hidrograma toma a forma do hidrograma observado, porém os erros são ainda altos. Observaram-se erros de 67% na vazão de pico e atraso de 4 horas.

Na Itália, Jasper, et al., (2002) avaliaram o desempenho de diversos modelos

meteorológicos de área limitada e radar meteorológico, através da comparação de hidrogramas observados e previstos em tempo real na bacia “The Alpine Ticino Verzasca Maggia Basin” cuja área de drenagem é de 2627 km<sup>2</sup>. Os modelos de previsão de chuva utilizados foram discretizados em malhas entre 2 a 14 km. O radar meteorológico forneceu informações de chuva na discretização de 1 km. O modelo hidrológico utilizado foi um modelo distribuído por células de 500 m uniformemente distribuídas em todas as bacias. Foram avaliados 7 eventos de cheias de setembro de 1993 a outubro de 2000 para previsões de até 72 horas. Os modelos meteorológicos utilizados foram: SM (Swiss Model, Switzerland), Meso-NH (Meso-Scale Non-Hydrostatic Model, France), BOLAM3 (Bologna Limited Area Model Version 3, Italy) MC2 (Mesoscale Compressible Community Model, Canada) e ALADIN (Aire Limite Adaption Dynamique-Joint International Development). Os autores concluíram que mesmo sistemas que prevêem bem a chuva acumulada como o modelo ALADIN e o radar meteorológico, a variação no espaço, tempo e intensidade geraram, em alguns eventos, grande diferenças entre hidrogramas observados e simulados o que compromete a utilização dessas previsões de forma operacional.

Uma análise de incertezas feita pelos autores se baseou na movimentação de um espaço correspondente a uma célula do modelo (14 km) sobre a bacia, para previsões pelo SM, nas direções norte, sul, leste e oeste. Assim, foram gerados um feixe de 4 curvas (hidrogramas), uma para cada direção de deslocamento. Observou-se que houve significativa mudança no hidrograma. No pico, por exemplo, houve mudanças de até 30% na vazão. De alguma forma isso mostra as dificuldades da utilização de modelos de previsão de chuva como entrada nos modelos de previsão de vazão em tempo real, pois erros desse tipo são bastante comuns nos modelos meteorológicos (Jasper, et al., 2002).

Na Grécia, Koussis, et al., (2003) descrevem um sistema de previsão de vazão em tempo real em uma bacia urbana de 370 km<sup>2</sup> localizada em Atenas, cujo tempo de concentração foi estimado pelos autores em 3 horas. O modelo meteorológico utilizado foi o Bolam (Bologna Local Area Model). O modelo de circulação global utilizado foi o AVN (Numerical Weather Model Aviation) do NCEP com células de aproximadamente 125 km. O intervalo de previsão foi de 48 horas e a discretização espacial do modelo regional foi de 6 km. Para previsão do escoamento, foi utilizado um modelo distribuído.

Foram avaliados 2 eventos de cheia. Os resultados mostraram que a utilização de modelos hidrológicos e meteorológicos conjuntamente são promissores, porém, ainda não constituem de ferramenta de previsão devido às incertezas envolvidas na previsão quantitativa da chuva (Koussis, et al. 2003). Os erros foram bastante significativos, principalmente em um dos eventos avaliados em que se observaram erros no pico de mais de 300 %. A chuva foi superestimada na intensidade e subestimada na duração.

Na Nova Zelândia, Ibbitt, et al. (2001), utilizaram o modelo RAMS com resolução de 20 km para previsão quantitativa de chuva acumulada de 6 horas com horizonte de previsão de 48 horas. Os autores avaliaram um mês de previsão contínua com antecedência de 24 horas em 23 sub-bacias na região Sul dos Alpes. As bacias variaram de 12 a 3.830 km<sup>2</sup>. Nove das 23 bacias possuem área menor que a grade do modelo meteorológico utilizado o que constituem em sérias limitações de escalas (Ibbitt, et al., 2001). O modelo hidrológico utilizado foi baseado no modelo TOPMODEL com modificações para ser aplicado em bacias de médio e grande porte. Em geral, no mês de análise, observou-se dois picos consideráveis de cheia e a ênfase da análise foi sobre esses picos. Observou-se que no primeiro pico, de maior magnitude, em todas as sub-bacias a vazão foi subestimada, e em praticamente todas as sub-bacias do segundo pico a vazão também foi subestimada. Além disso, observou-se que, em uma bacia de aproximadamente 350 km<sup>2</sup>, os erros foram muito grandes, chegando a mais de 1000%. Quando desconsiderada esta sub-bacia os erros médios de subestimação do pico ficaram por volta de 30% e de superestimação por volta de 15% com razoável acerto na posição do pico.

Na Alemanha diversos Estados já utilizam as QPF, resultantes de modelos regionais, como entrada nos modelos hidrológicos para previsão de escoamento. Uma análise apresentada por Damrath, et al., (2000) sobre o desempenho das previsões hidrológicas mostram que existem ganhos quando são incorporadas as QPF. Os autores apresentam conjuntamente uma análise de 7 anos das QPF mostrando desempenho ruim dos modelos nas previsões no verão e em eventos extremos os quais ocorrem normalmente em pequenas áreas e exigem alta resolução espaço-temporal. Apesar disso, existem ganhos na previsão hidrológica com as QPF, principalmente em bacias maiores.

No Brasil, Haas et al. (2003) aplicaram o modelo determinístico IPH II conjugado

com um modelo estocástico ARIMAX, para fazer previsões na bacia do rio Iguaçu, até a usina hidrelétrica de Foz de areia com área de drenagem de 29.800 km<sup>2</sup> em horizontes até 48 horas. Os autores utilizaram o modelo ETA do CPTEC-INPE com discretização espacial de 40 km e o Modelo Brasileiro de Alta Resolução (MBAR) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com discretização de 25 km. O estudo de caso centrou-se em um período de 10 dias (10 set. a 9 out. de 2000), período com chuvas acima do normal. Os autores concluíram que as previsões de chuva de ambos os modelos são subestimadas, sendo que o modelo MBAR apresentou melhor desempenho. Apesar das subestimativas da chuva, os hidrogramas obtidos com a inclusão das previsões de chuva foram melhores do que os obtidos supondo que a chuva cesse no tempo de previsão.

Os estudo nas diferentes partes do mundo sobre a integração dos modelos hidrológicos com modelos regionais de previsão de chuva mostram resultados promissores, principalmente quando avaliados na forma de tendências. Com o advento da computação de alto desempenho está sendo possível discretizar os modelos regionais em malhas mais finas. Além disso, os modelos hidrológicos, mesmo em aplicações em grandes bacias (Yu, et al. 1999, Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003), estão sendo discretizados de maneira semelhante aos modelos regionais compatibilizando as diferenças de escalas entre os modelos. A integração dos modelos, de tal forma que haja um fluxo de informação entre os modelos hidrológicos e meteorológicos, é a tendência apontada por alguns autores como Yu, et al., (1999). É esperado que os resultados aceitáveis obtidos principalmente em bacias maiores, sejam melhorados com as pesquisas nessa área. Assim será possível estender as previsões em tempo real além do tempo de concentração da bacia.

#### **2.4 Estatísticas de avaliação da previsão**

Para avaliação do desempenho dos modelos de previsão de vazão, algumas estatísticas são empregadas, além da análise visual dos erros de previsão. A análise visual dos erros de previsão pode, por si própria, fornecer informações importantes sobre os resultados obtidos. As desvantagens da abordagem visual são o dispêndio de tempo e a falta de objetividade, a qual pode produzir discordância entre diferentes analistas. Por estas razões, tem-se preferido o uso de coeficientes numéricos para

avaliação da qualidade das previsões (Pedrollo, 2000). Além disso, a análise visual, quando feita sobre o hidrograma de previsão, pode apresentar falsas interpretações como apontadas por Tucci (1998):

i) Um modelo matemático é ajustado para a maioria dos usos com base na aproximação entre hidrograma observado e calculado. Na previsão em tempo real isto não basta, pois uma diferença muito grande entre estes valores num intervalo de tempo pode ficar mascarada pela aproximação dos gráficos. Na prática, esses valores são anunciados com antecedência e depois conferidos com os ocorridos pontualmente, portanto, o que graficamente parece bom, em cada intervalo de tempo é limitado e pode comprometer a confiabilidade da previsão. Este problema não é tão sério quando o objetivo é a previsão dos volumes de afluência a um reservatório;

ii) a parte do hidrograma de previsão, que envolve a subida do mesmo, é a parte que apresenta maior dificuldade e, normalmente a previsão não é tão boa. No entanto, é a parte mais importante, pois representa a real fase de antecipação da ocorrência da enchente. Segundo Tucci (1998), muitos usuários interpretam erroneamente a qualidade da previsão, pois utilizam muitos dados da curva de recessão do hidrograma mascarando a parte do hidrograma ruim e mais importante. Nesse caso, as estatísticas são boas, porém tendenciosas.

Lanna e Indurski (1983), relacionaram os testes analíticos para análise da qualidade da previsão de vazão em dois grupos. O primeiro grupo de testes procura verificar se, previsões sistemáticas das vazões que ocorrerem no futuro, são boas. O segundo tipo compara a qualidade das previsões do modelo com as que podem ser obtidas com um modelo alternativo simples, por exemplo, um modelo que considere a vazão atual.

Como exemplos do primeiro grupo, temos o erro médio de previsão:

$$E_m = \frac{1}{n} \sum |Q_{cal} - Q_{obs}| \quad 2.1$$

o erro padrão de previsão:

$$E_p = \left[ \frac{1}{n} \sum (Q_{cal} - Q_{obs})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.2$$

o coeficiente de Nash:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad 2.3$$

Onde:  $Q_{obs}$ , é a vazão observada;  $Q_{cal}$ , é a vazão calculada;  $\overline{Q_{obs}}$ , é a vazão média observada;  $n$  é o número de dados.

Segundo Pedrollo (2000) o erro médio verifica se o modelo utilizado subestima ou superestima, em média, os valores observados. O erro padrão mede a dispersão das previsões em torno das observações. O coeficiente de eficiência, introduzido por Nash e Sutcliffe (1970), é a proporção com que o modelo explica a variância das vazões observadas.

Os testes do segundo grupo envolvem a determinação do coeficiente de eficiência relativa entre dois modelos. O modelo alternativo pode ser um modelo que preveja a média, retornando ao coeficiente de eficiência, ou pode ser um modelo que preveja a vazão atual. Ou seja, em vez de utilizar a média como uma previsão alternativa, utiliza-se como previsão para os próximos instantes a vazão atual. Não faz sentido prever a média, pois na pior das hipóteses o modelo alternativo seria o de usar o valor atual (Tucci, 1998). Utilizando um modelo de vazão atual ( $Q_{obs}(t_0)$ ), então a equação fica:



$$RD = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs}(t_0))^2} \quad 2.4$$

Quando o valor de RD é positivo, então existe um ganho ao utilizar o modelo de previsão no lugar do modelo alternativo. O significado é que o modelo de previsão utilizado até então, supera o alternativo. Além disso, quando a função definida pelos valores calculados do coeficiente de eficiência relativa ao longo do tempo for crescente em dado período, independente de seu valor absoluto, pode-se concluir que durante aquele período o modelo testado foi superior ao alternativo, o contrário ocorrendo quando a função for decrescente (Pedrollo 2000).

### 3. MODELO MATEMÁTICO DE PREVISÃO DE VAZÃO

#### 3.1 Estrutura metodológica

A previsão de vazão foi simulada utilizando a combinação de um modelo de previsão quantitativa de precipitação e um modelo hidrológico distribuído. A previsão de vazão em tempo real quanto à previsão da precipitação é dividida nesta pesquisa em dois grupos:

i) previsão com base em precipitação futura nula;

A previsão com base na precipitação futura nula utiliza o modelo hidrológico e dados de chuva observada até o instante de início da previsão ( $t$ ). Os dados de chuva são coletados através de uma rede de observação em tempo real. A precipitação no intervalo  $t$  a  $t + \tau$  é considerada nula, sendo  $\tau$  a antecedência da previsão.

ii) previsão com base na precipitação futura prevista por modelo regional climático.

A previsão com base na precipitação futura prevista utiliza o modelo hidrológico, dados de chuva observada até o instante de início da previsão ( $t$ ) e dados de chuva prevista entre  $t$  e  $t + \tau$ .

A figura 3.1 apresenta graficamente um exemplo fictício da previsão de vazão realizada em um instante  $t + \tau$ , sendo  $\tau$  a antecedência, variando de zero até 42 horas. A chuva observada nos postos telemétricos está disponível até o instante  $t$  (0 horas), conforme separação do hietograma da figura 3.1 dada pela reta vertical pontilhada. A partir do instante  $t$  a precipitação na bacia não é conhecida. Neste caso, a previsão de vazão para  $t + \tau$ , utilizando um modelo precipitação-vazão, poderá ser realizada de acordo com as duas alternativas propostas anteriormente.

Se a previsão de vazão for realizada com base na hipótese de precipitação nula a partir de  $t$ , então existe a tendência que a vazão prevista seja fortemente subestimada,

após um período que corresponde ao tempo de concentração da bacia, como ocorre na figura 3.1 – curva em vermelho pontilhado. Pode-se dizer, inclusive, que o hidrograma previsto com base na hipótese de precipitação nula a partir de  $t$  representa uma estimativa do limite inferior das vazões futuras. Para antecedências relativamente curtas, entretanto, a previsão de vazão com base na precipitação nula pode ser muito boa, como pode se observar no exemplo da figura 3.1, para o caso de antecedência de 12 horas. O tempo de antecedência em que as previsões de vazão deste tipo podem ser consideradas de boa qualidade depende fortemente das características da bacia, especialmente do tempo de concentração das sub-bacias, e do tempo de propagação nos rios e reservatórios.

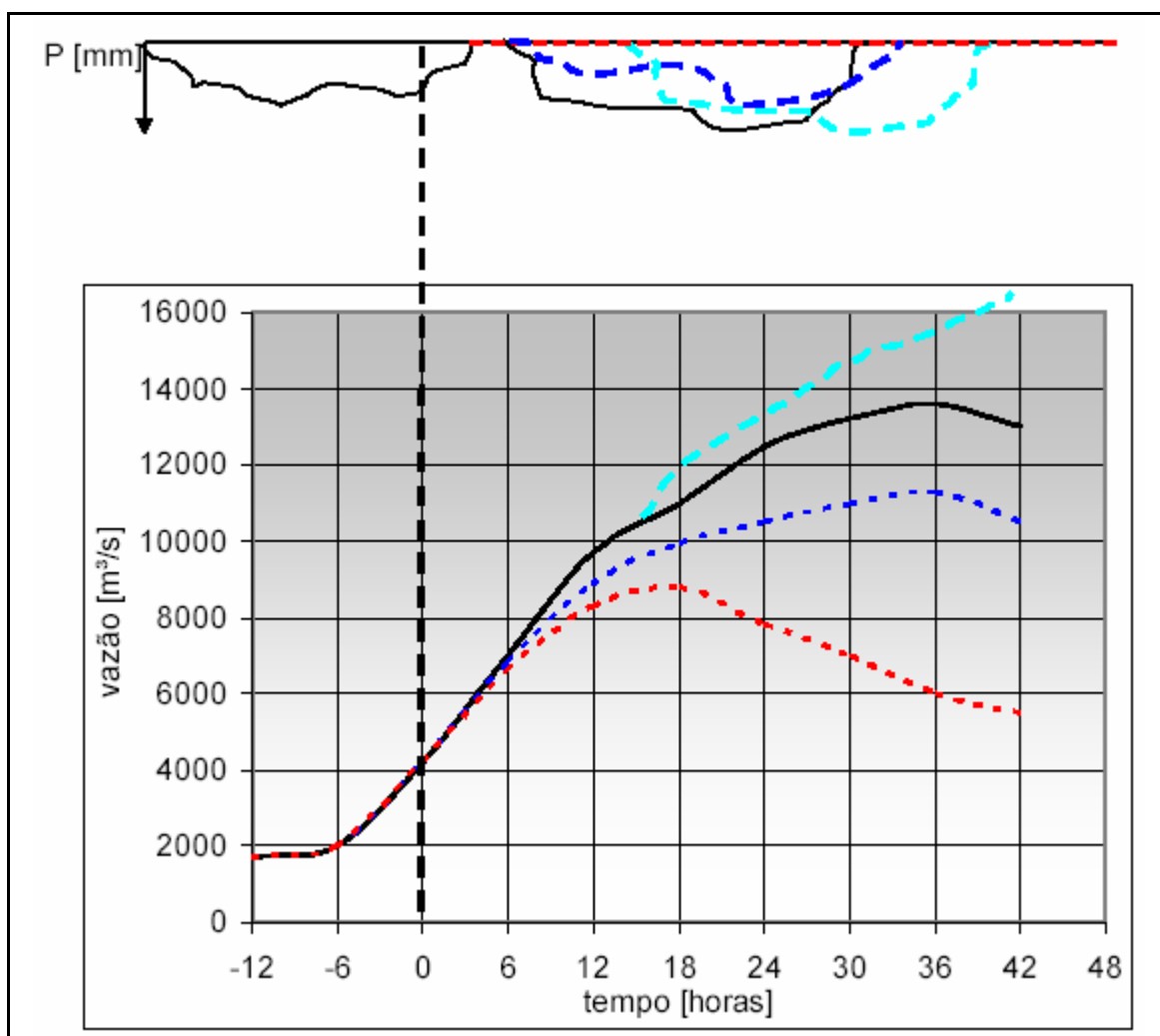


Figura 3.1. Previsão de vazão considerando chuva futura zero e chuva futura prevista

Existindo uma previsão quantitativa de precipitação para as próximas horas ( $t+\tau$ ), e esta previsão estando disponível no instante  $t$ , então a previsão de vazão pode ser feita

em horizontes acima do tempo de concentração da bacia podendo-se obter ganhos perante a hipótese de chuva nula, como pode se observar comparando as curvas da figura 3.1 (azul marinho, preta e vermelha). Ainda na figura 3.1 apresenta-se uma previsão de chuva – curva em azul claro, com erro temporal. Esta previsão gera um hidrograma superestimado, porque a chuva observada até o instante da previsão, entra no modelo hidrológico e a previsão de chuva com erro temporal é também incorporada no modelo hidrológico havendo dupla soma em parte do hidrograma.

A figuras 3.2 e 3.3 apresentam a estrutura da previsão desenvolvida nesta pesquisa. A fase de calibração do modelo hidrológico é apresentada na figura 3.2. Os parâmetros do modelo hidrológico são previamente determinados com base em séries históricas do passado de chuva ( $P_o$ ), vazão ( $Q_o$ ) e dados climáticos como evaporação ( $E_o$ ). Parte dessas séries históricas é utilizada para calibração dos parâmetros. Estes parâmetros são então verificados para outros períodos das séries históricas. Esse ajuste é classificado como ajuste *off-line*, porque é feito antes da utilização do modelo para previsão. A fase de previsão é apresentada na figura 3.3. Na alternativa onde a precipitação é prevista é utilizado inicialmente um modelo global que simula todo o globo, discretizando-o em uma malha mais grosseira. O modelo global fornece as condições de contorno para o modelo regional. Este modelo é então executado em uma malha mais fina, sobre uma região limitada de interesse e englobando a área da bacia conforme apresentado na figura 3.3. As previsões quantitativas de chuva do modelo regional podem então ser introduzidas no modelo hidrológico para previsão em tempo real. Os dados de chuva observada são coletados e transmitidos em tempo real em cada intervalo de tempo, através de rede telemétrica, substituindo as previsões de chuva ao longo do tempo. A rede telemétrica também transmite em tempo real os dados de vazão, ou níveis, nos postos de controle de afluência possibilitando comparar, em cada intervalo de previsão, as vazões observadas com as previstas para atualização do estado das variáveis do modelo hidrológico. O fluxo de informação segue a cada intervalo de previsão e o modelo proposto gera, como produto, hidrogramas previstos com antecedências variáveis entre  $\Delta t$  a  $n\Delta t$ , onde  $\Delta t$  representa o intervalo mínimo de tempo de previsão e  $n$  é variável conforme a antecedência desejada.

Com esta metodologia é possível gerar hidrogramas contínuos no tempo com previsões que vão de  $\Delta t$  a  $n\Delta t$ . O primeiro valor do hidrograma representa a vazão

prevista com antecedência de  $\Delta t$ , o segundo valor com antecedência  $2\Delta t$  e segue até  $n\Delta t$ .

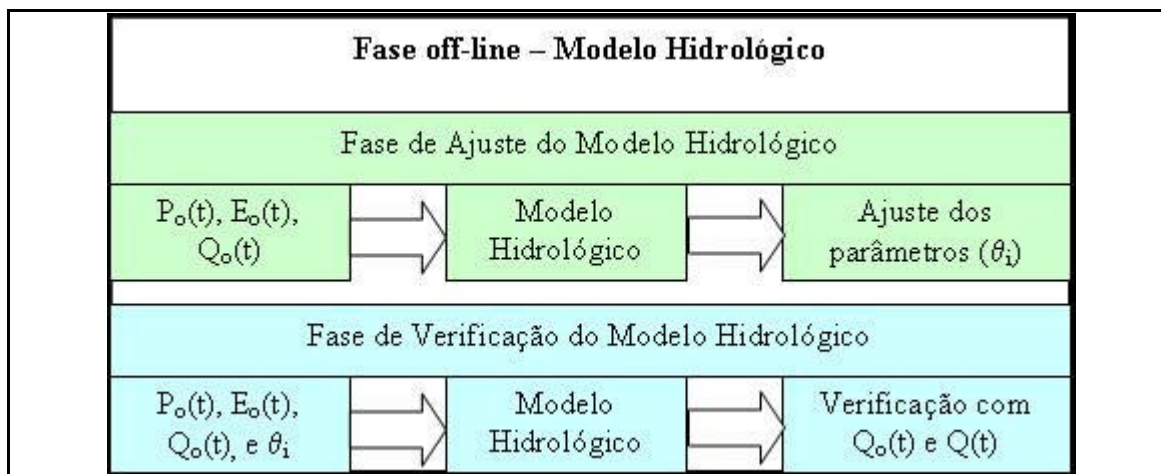


Figura 3.2. Ajuste *off-line* do modelo hidrológico

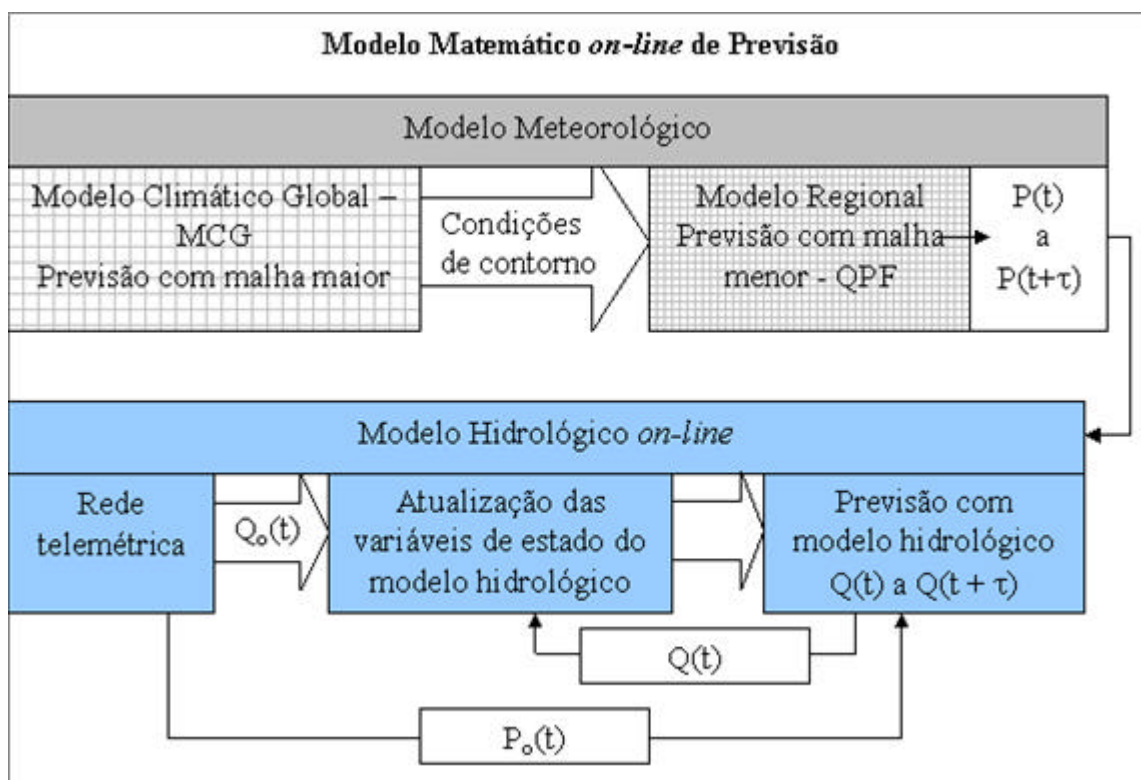


Figura 3.3. Estrutura da previsão de vazão

### 3.2 Modelo climático meteorológico

A previsão de precipitação futura entre  $t$  e  $t + \tau$  foi obtida de um modelo numérico de tempo que está sendo operado na UFSC. O modelo meteorológico regional recebe as

condições de contorno de um modelo global fornecendo previsões em discretizações espaciais e temporais variáveis.

O modelo global utilizado foi o AVN do NCEP (National Center for Environmental Prediction), operado nos EUA (Estados Unidos da América). Nos modelos globais os dados são coletados por estações meteorológicas em todo o globo no mesmo horário, baseado na Hora Zulu (horário de Greenwich). Esses dados são agrupados e interpolados numa grade horizontal uniforme. A seguir, as grades são sobrepostas em várias grades verticais, normalmente nos níveis de pressão, e integrados no tempo e no espaço por supercomputadores. O modelo global AVN é executado duas vezes ao dia, às 0 Z e 12 Z e fornece as condições de fronteira para o modelo regional. A figura 3.4 apresenta de forma gráfica uma previsão de 12 horas pelo modelo global fornecido pelo NCEP (AVN).

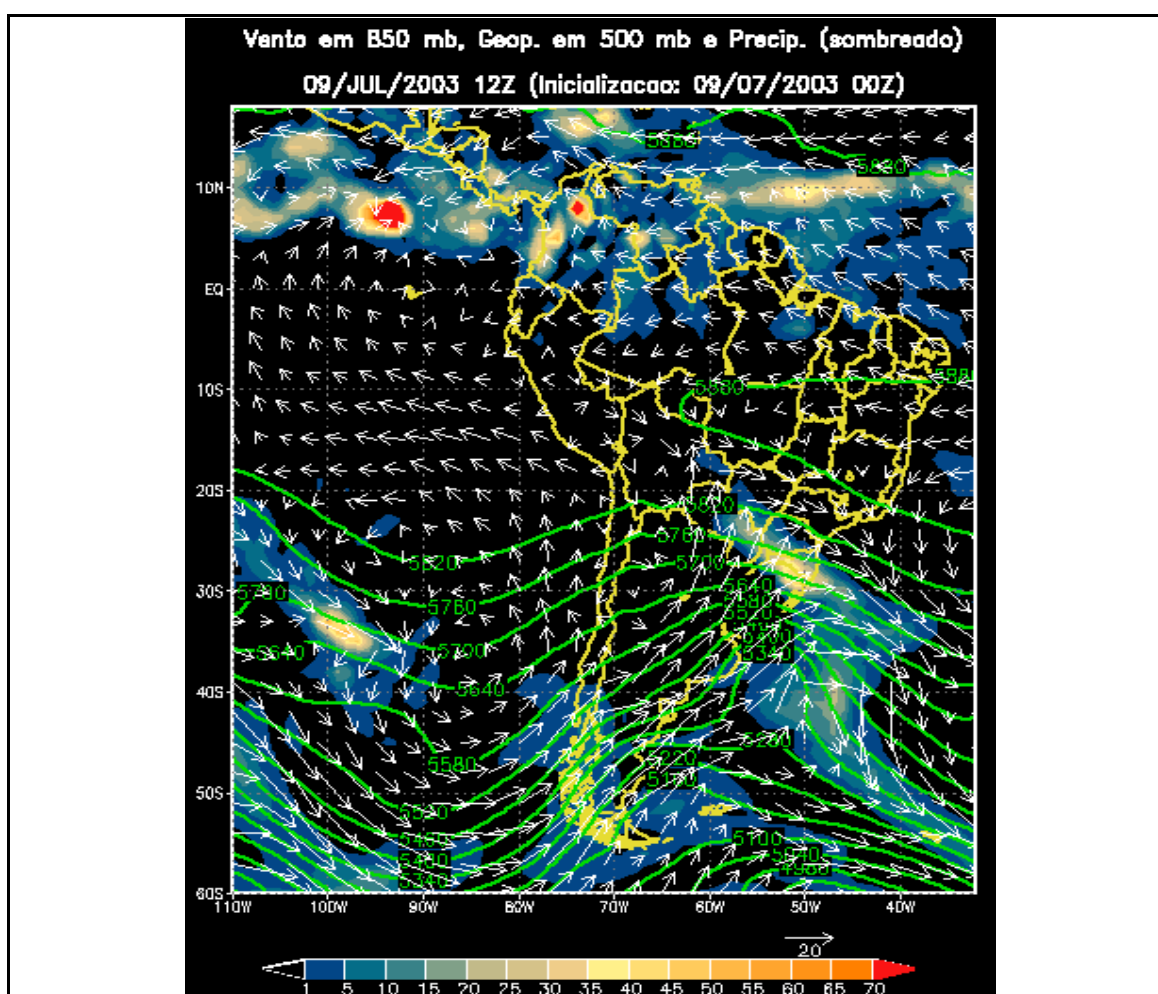


Figura 3.4. Previsão pelo modelo global AVN do NCEP para 9/07/2003 às 12Z  
(<http://www.master.iag.usp.br>)

O modelo regional utilizado foi o ARPS (Advanced Regional Prediction System), (Xue e Wong, 2000; Xue et al., 2001). O ARPS é um modelo numérico não hidrostático desenvolvido para prever e simular fenômenos atmosféricos de forma determinística. O sistema foi desenvolvido pelo Centro de Análise e Previsão de Tempestades (CAPS), da Universidade de Oklahoma dos EUA. Os fenômenos simulados podem variar em escalas que vão da ordem de uns poucos metros - um tornado, por exemplo, até centenas de quilômetros - um furacão, por exemplo. O modelo é baseado nas equações de Navier-Stokes compressíveis que descreve o escoamento atmosférico e utiliza um sistema de coordenadas generalizadas seguindo o terreno. Vários processos físicos (chuva, granizo, neve, entre outros) são também levados em conta no sistema.

As previsões de interesse nesta pesquisa correspondem à variável precipitação na superfície calculada pelo modelo meteorológico ARPS, em diferentes resoluções espaciais.

O ARPS foi configurado com três aninhamentos; 4, 10 e 40 km, com base nas saídas do modelo global AVN do NCEP. As previsões do modelo ARPS são realizadas rotineiramente duas vezes ao dia, uma correspondendo ao horário 00:00 Z e outra no horário 12:00 Z, o que corresponde respectivamente às 21:00 h e 09:00 h no horário local. As realizações das previsões meteorológicas com o modelo ARPS dependem de um fluxo de informações que inicia m pela obtenção dos dados de previsão do modelo global. A partir daí é executado o modelo ARPS de aninhamento de 40 km, que abrange uma área de 85° oeste até 35° oeste e de 15° sul até 48° sul, cobrindo todo o Sul da América do Sul, com uma resolução horizontal de 40 km. A figura 3.5 apresenta um exemplo de previsão de precipitação acumulada em 24 horas calculada pelo modelo ARPS de 40 km de resolução, e a região abrangida por este modelo.

O modelo ARPS de resolução de 40 km é executado por um período de 60 horas, e seus resultados fornecem as condições de contorno para o modelo ARPS de 10 km de resolução, cuja abrangência espacial é menor, cobrindo os três Estados do Sul do Brasil, o Uruguai, parte da Argentina e do Paraguai, e parte dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. A figura 3.6 apresenta um exemplo de previsão do modelo ARPS de 10 km de resolução.

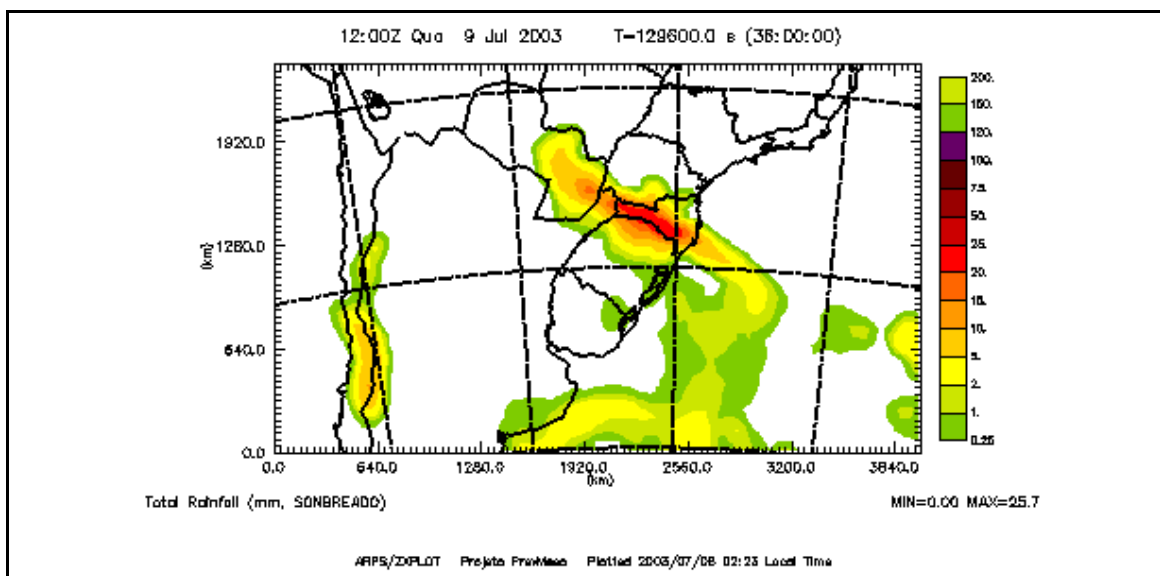


Figura 3.5. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 40 km para 09/07/2003 às 12Z (<http://cluster.labplan.ufsc.br/>)

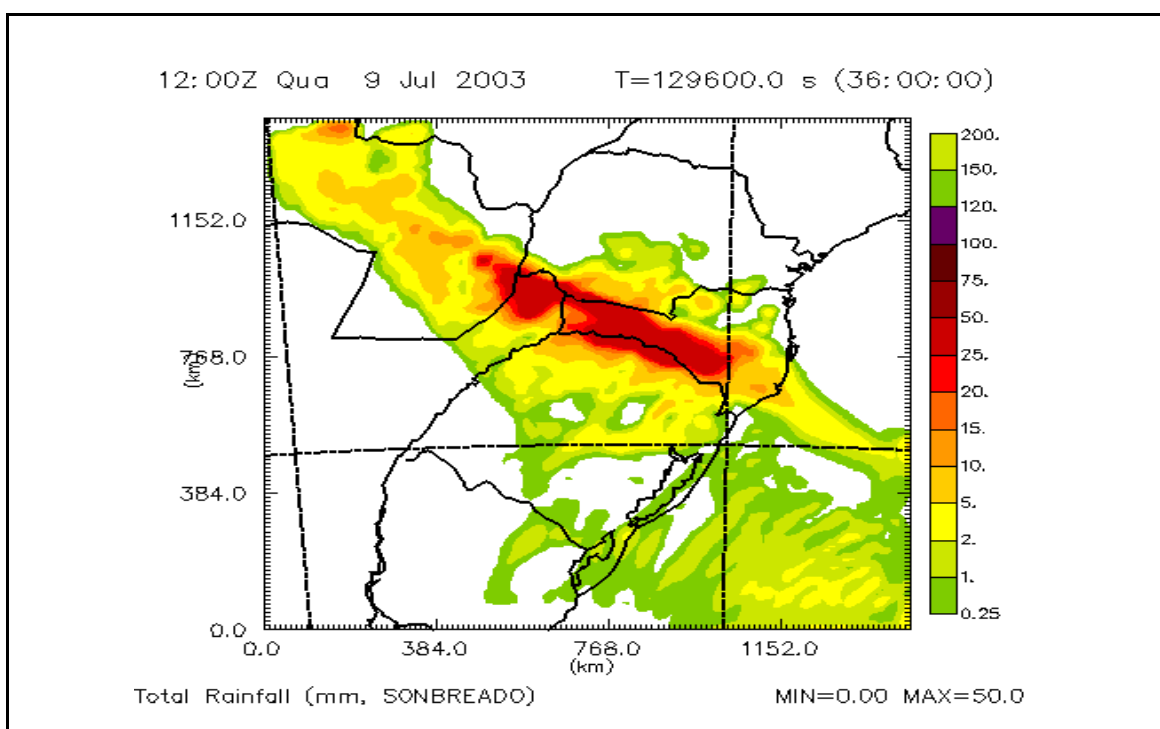


Figura 3.6. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 10 km as 09/07/2003 às 12Z (<http://cluster.labplan.ufsc.br/>)

O modelo ARPS de 4 km de resolução recebe as condições de contorno do modelo de 10 km e sua abrangência limita-se ao Estado de Santa Catarina e ao norte do Rio Grande do Sul, como mostra a figura 3.7.



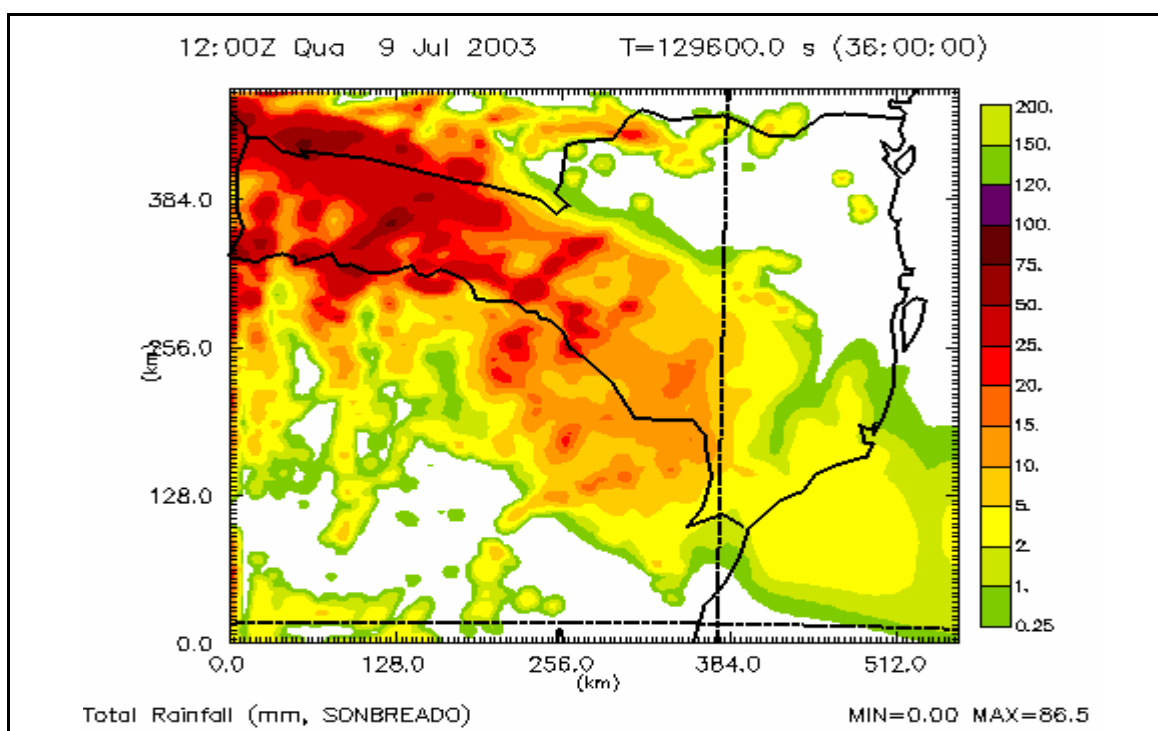


Figura 3.7. Previsão de chuva pelo modelo ARPS 04 km as 09/07/2003 as 12Z  
(<http://cluster.labplan.ufsc.br/>)

O modelo é processado para 60 horas de previsão nas grades de 40 e 10 km e por 36 horas na discretização com 4 km. A frequência de processamentos é de duas vezes ao dia (00Z e 12Z). Além disso, existe uma defasagem de 10 horas nas grades de 10 km e 4 km devido à iteração entre os modelos de diferentes discretizações e o tempo de cálculo. O horizonte máximo de previsão é obtido com ARPS 40 (60 horas) seguido do ARPS 10 (50 horas) e do ARPS 04 (26 horas).

### 3.3 Modelo hidrológico

As formulações detalhadas do modelo de grandes bacias (MGB) e algumas aplicações podem ser encontradas em Collischonn (2001). O modelo é apresentado aqui de forma simplificada e no anexo C são descritas as formulações e os parâmetros do modelo.

O modelo foi desenvolvido para simulações de grandes bacias, em intervalo de tempo diário, porém foi modificado para outros intervalos de tempo (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003). A discretização espacial consiste em dividir a área da bacia em estudo em células quadradas e uniformes, ou seja, o modelo é do tipo distribuído por

células. O tamanho de cada célula depende dos objetivos do estudo e da área da bacia.

O modelo representa os seguintes processos:

- i) balanço de água no solo;
- ii) evapotranspiração;
- iii) escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula;
- iv) escoamento na rede de drenagem.

A bacia é dividida em células quadradas e a ligação entre as células é feita por canais de drenagem. A bacia é classificada segundo grupos que contêm as combinações mais frequentes de uso do solo, cobertura do solo e tipo de solo. O uso, cobertura e tipo de solo constituem as chamadas classes. Por exemplo, pode haver: 4 classes de uso do solo, 5 classes de cobertura e 4 classes de tipo de solo. A combinação dessas classes permite formar grupos, porém o número de grupos normalmente é exagerado. Contemplando apenas as macro características da bacia, são escolhidos alguns grupos formando finalmente os blocos.

Para cada célula é definida a fração da mesma que está em cada bloco. Desta forma, cada célula é dividida em diversos blocos (figura 3.8). Com esta estrutura a variabilidade espacial é considerada inclusive no interior das células. A importância da variabilidade espacial no interior da célula é ilustrada na figura 3.9. O balanço de água vertical é realizado em cada bloco de cada célula. O escoamento difuso da vazão no interior das células é realizado integrando a contribuição dos blocos e propagando a vazão resultante através de reservatórios lineares simples.

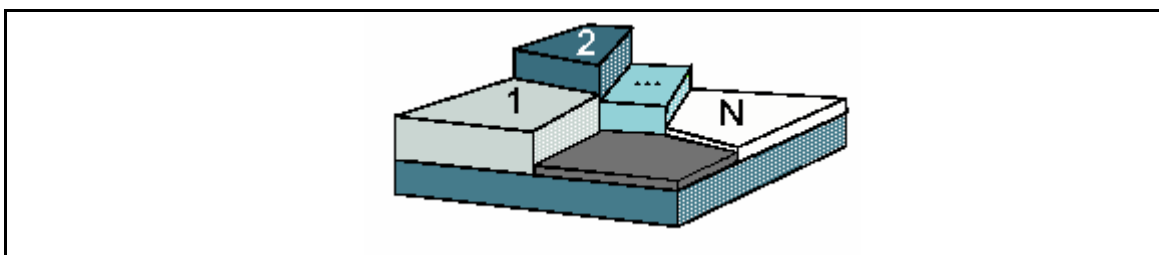


Figura 3.8. Célula do modelo dividida em N blocos  
(Collischonn, 2001)

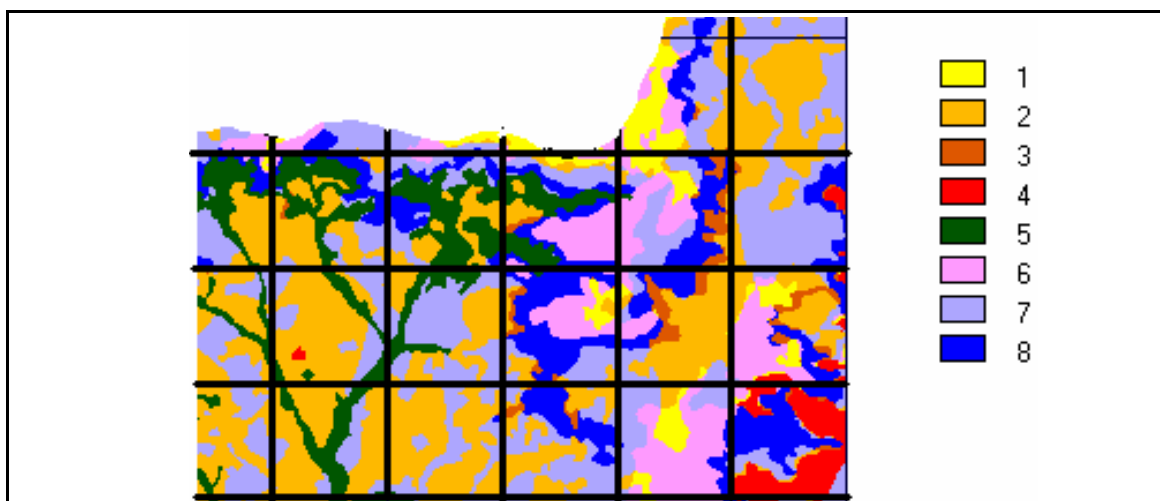


Figura 3.9. Variabilidade de classes no interior das células do modelo (Collischonn, 2001)

A figura 3.10 apresenta a estrutura de cálculo de uma célula do modelo constituída de 5 blocos. As setas coloridas correspondem às corres dos blocos. Assim, cada bloco contribui de maneira distinta para cada um dos 3 reservatórios (superficial, sub-superficial e subterrâneo).

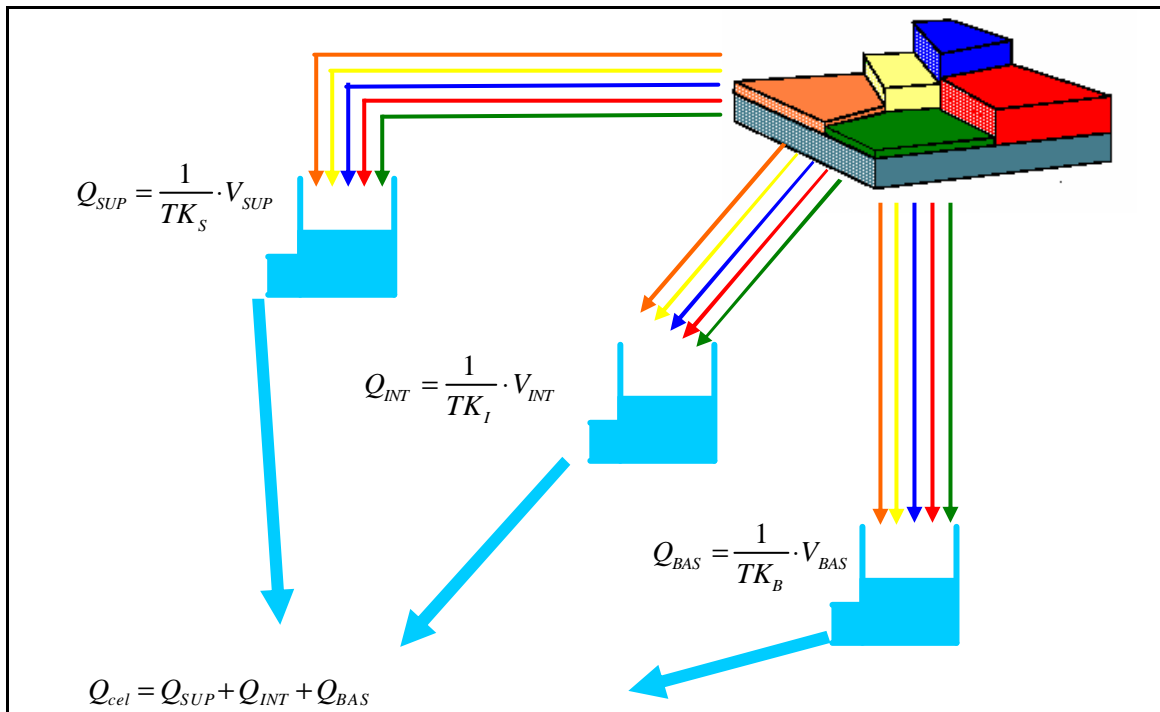


Figura 3.10. Determinação de escoamento de uma célula do modelo

As vazões resultante dos três reservatórios estão defasadas segundo funções de

retardo de escoamento representadas na mesma figura pelas 3 equações (TKS, TKI, TKB). Essas funções dependem dos parâmetros respectivos  $C_S$ ,  $C_I$  e  $C_B$ .

Os dados climatológicos em uma célula são obtidos por interpolação dos dados dos postos de chuva e dos postos climáticos mais próximos à célula. As vazões resultantes das  $n$  células do modelo são somadas ou propagadas pelo modelo Muskingum Cunge linear até o exutório da bacia, conforme as características dos rios e das confluências.

### 3.3.1 Balanço de água no solo:

Parte da precipitação que cai sobre a bacia é interceptada. A interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expresso pelo índice de área foliar (IAF). A interceptação é determinada por uma relação entre a capacidade de interceptação e o IAF. Da parcela restante da precipitação é realizado o balanço hídrico na camada superficial de solo. O modelo considera que o armazenamento na camada superficial ao final do intervalo de tempo ( $W^k$ ) é dado pela soma entre o armazenamento no início do intervalo ( $W^{k-1}$ ) e a precipitação no mesmo intervalo de tempo ( $P$ ) diminuído das perdas por evapotranspiração no solo ( $E$ ) e das drenagens: superficial ( $D_{SUP}$ ), sub-superficial ( $D_{INT}$ ), subterrânea ( $D_{BAS}$ ). A parcela de escoamento superficial é determinada considerando que existe uma relação entre o armazenamento na camada superficial no início do intervalo de tempo e a porcentagem de área saturada. O escoamento sub-superficial é determinado considerando que existe uma relação entre condutividade hidráulica do solo e a textura do solo. A relação utilizada pelo modelo é não linear com a umidade do solo. O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples que relaciona o escoamento subterrâneo com o estado de armazenamento do solo, com apenas um parâmetro que deve ser calibrado. A equação 3.1 apresenta o balanço de água no solo ilustrada pela figura 3.11.

$$\left( W^k = W^{k-1} + (P - E - D_{SUP} - D_{INT} - D_{BAS} + D_{CAP}) \cdot \Delta t \right)_{i,j} \quad 3.1$$

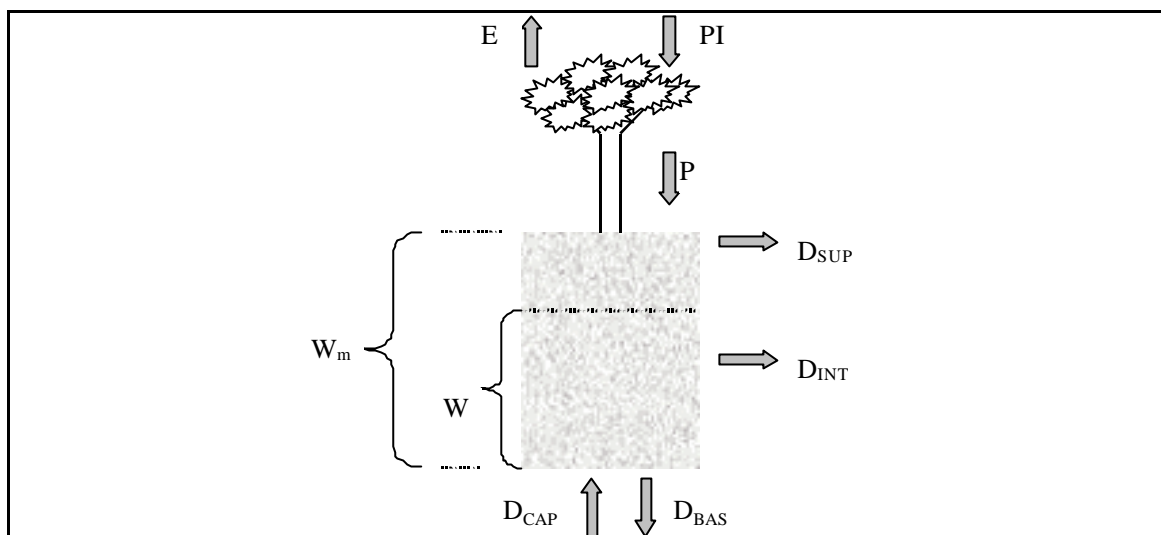


Figura 3.11. Esquema do balanço de água no solo (Collischonn, 2001)

### 3.3.2 Evapotranspiração

O modelo utiliza a equação de Penman-Monteith e calcula de maneira separada a evaporação da transpiração. A energia disponível é utilizada primeiramente para evaporar a água armazenada sobre caules, folhas e diretamente sobre o solo. Caso sobre energia, esta vai atender as perdas por transpiração da vegetação.

### 3.3.3 Escoamento nas células

No balanço de água na camada superior do solo, descrito no item 3.3.1, as perdas por drenagem superficial, sub-superficial e subterrânea não atingem diretamente a rede de drenagem. Esses escoamentos vão para reservatórios lineares onde são somados. Nesses reservatórios os hidrogramas são amortecidos antes de chegar à rede de drenagem. Cada reservatório é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples e um parâmetro é associado a cada um desses reservatórios.

### 3.3.4 Propagação na rede de drenagem

As células em que é dividida a bacia no modelo estão ligadas pela rede de drenagem, e cada célula escoar para uma de suas oito vizinhas. O modelo diferencia células fonte, localizadas nas cabeceiras dos cursos de água, e células com curso de água. As células fonte não têm nenhuma célula à montante, já as células com curso de

água estão à jusante de pelo menos uma célula. Nas células fonte não é realizada a propagação na rede de drenagem, mas apenas a propagação na célula, descrita no item anterior. Nas células com curso de água, além da propagação na célula, é realizada a propagação na rede de drenagem pelo modelo Muskingum-Cunge.

### 3.4 Previsão de vazão

#### 3.4.1 Ajuste off-line

O ajuste *off-line* consiste em determinar os valores dos parâmetros do modelo de tal forma a se obter a melhor representatividade das vazões observadas durante a fase de calibração e, além disso, assegurar o sentido físico dos valores obtidos. A metodologia de ajuste *off-line* para previsão em tempo real, se caracteriza pela determinação de valores iniciais dos parâmetros do modelo hidrológico através de otimização de uma ou mais funções objetivo, quando não é possível estimá-los com base em medições de campo.

Existem dois tipos de parâmetros que o modelo hidrológico considera: parâmetros fixos e parâmetros calibráveis e são descritos no anexo C. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos ou que não interferem profundamente nos resultados. O índice de área foliar (IAF), por exemplo, é considerado um parâmetro fixo. Os valores do IAF são obtidos da bibliografia, e não são calibrados, embora apresentem variação ao longo do tempo. O índice de porosidade do solo (XL) é considerado um parâmetro fixo porque exerce pouca influência sobre os resultados. São também considerados parâmetros fixos: albedo, altura de cobertura vegetal (Z), resistência aerodinâmica superficial (RS), e o armazenamento residual do solo ( $W_c$ ).

Os parâmetros do modelo que não são considerados fixos podem ser calibrados por bloco e por sub-bacia. Isto significa que é possível modificar um parâmetro, como o armazenamento máximo no solo ( $W_m$ ), do bloco de uso florestas, por exemplo, em todas as células de uma determinada sub-bacia. Em outras palavras, todas as células de uma sub-bacia têm o mesmo valor do parâmetro de um determinado bloco.

As sub-bacias são escolhidas de acordo com a disponibilidade de dados de vazão

ou níveis, pois são esses dados que permitem a calibração dos parâmetros.

Os parâmetros considerados na calibração são:  $C_S$ ,  $C_I$  e  $C_B$  (que são respectivamente: parâmetros de retardo do escoamento dos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneos);  $K_{SUP}$  (parâmetro de drenagem superficial);  $K_{INT}$  (parâmetro de drenagem sub-superficial);  $K_{BAS}$  (parâmetro de drenagem subterrânea);  $W_m$  (parâmetro de capacidade de armazenamento do solo) e  $b$  (parâmetro de separação de escoamento superficial). Em algumas situações também são incluídos neste grupo os parâmetros  $W_c$  (parâmetro de armazenamento residual) e  $CAP$  (parâmetro de fluxo ascendente no solo).

A qualidade da calibração é verificada em todos os locais com dados disponíveis pela obtenção de valores de duas funções objetivo: o coeficiente de Nash Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (NS); e a diferença relativa entre volumes calculados e observados ( $\Delta V$ ). As equações abaixo apresentam a definição destas funções:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad 3.2$$

$$\Delta V = \frac{\sum Q_{cal}(t) - \sum Q_{obs}(t)}{\sum Q_{obs}(t)} \quad 3.3$$

onde:  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada no intervalo de tempo  $t$ ;  $Q_{cal}(t)$  é a vazão calculada no intervalo de tempo  $t$ .

### 3.4.2 Atualização em tempo real – ajuste on-line

A previsão de vazão em tempo real pode ser incrementada pelo contínuo monitoramento da qualidade dos resultados e pela atualização de variáveis do modelo de previsão. Esta atualização pode incluir correção de valores de variáveis como o armazenamento em rios e reservatórios, e em reservatórios (virtuais) do modelo

matemático, como o que representa a umidade do solo (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003).

Existem diversas metodologias de atualização em tempo real das variáveis e parâmetros dos modelos hidrológicos, propostos na literatura. Porém, essas técnicas apresentam dificuldades operacionais quando aplicadas em modelos conceituais distribuídos, devido ao elevado número de parâmetros. A possível utilização desse modelo de previsão de forma operacional implica no desenvolvimento de técnicas simples de atualização que sejam viáveis operacionalmente.

A técnica de atualização em tempo real utilizada nesta pesquisa está baseada na utilização de dados disponíveis em tempo real nos postos telemétricos. Os valores de vazões previstos pelo modelo são comparados com os valores de vazão observada em cada um dos postos, gerando um fator de correção de atualização (FCA) conforme a equação a seguir:

$$FCA = \frac{Q_{obs}}{Q_{cal}} \quad 3.4$$

sendo FCA o fator de correção;  $Q_{obs}$  a vazão observada e  $Q_{cal}$  a vazão calculada ambas para o mesmo tempo.

A seguir, a vazão dos rios em todas as células a montante da célula correspondente ao posto fluviométrico, é corrigida por este mesmo fator de correção, utilizando a equação 3.5:

$$Q_{atual} = FCA \cdot Q_{cal} \cdot \left( \frac{A_i}{A_p} \right) + Q_{cal} \cdot \left( 1 - \frac{A_i}{A_p} \right) \quad 3.5$$

onde  $Q_{atual}$  é a vazão atualizada;  $A_i$  é a área a montante da célula considerada; e  $A_p$  é a área de drenagem no posto fluviométrico onde é observada a vazão  $Q_{obs}$ .



Esta equação propaga a correção de forma linear com a área de drenagem, considerando um fator maior para células mais próximas ao posto fluviométrico e diminuindo linearmente com a área de drenagem a montante para as demais células.

Durante as estiagens também é realizada a atualização dos volumes armazenados nos reservatórios que representam os aquíferos (reservatório subterrâneo de cada célula). Esta atualização está baseada no mesmo fator de correção, e é aplicada considerando um ponderador conforme equação 3.6:

$$VBAS_{atual} = FCA \cdot VBAS_{cal} \cdot (PBAS_i) + VBAS_{cal} \cdot (1 - PBAS_i) \quad 3.6$$

onde  $VBAS_{atual}$  é o volume no reservatório subterrâneo atualizado;  $VBAS_{cal}$  é o volume no reservatório subterrâneo calculado; e  $PBAS_i$  é a parcela da vazão na célula  $i$  que é oriunda do escoamento subterrâneo.

Esta forma de atualização leva em consideração a parcela de contribuição de cada reservatório. Por exemplo, se a parcela oriunda do escoamento subterrâneo é de 50% para a célula  $i$ , então o fator de correção será aplicado apenas em 50% da vazão, pois o restante da vazão é proveniente do escoamento superficial. Essa metodologia considera que os erros estão proporcionalmente distribuídos entre os reservatórios superficial e subterrâneo e é particularmente interessante em períodos de estiagem, quando o escoamento subterrâneo corresponde a quase 100% do escoamento.

A propagação da correção não ocorre de forma linear, já que a correção é dependente da parcela de vazão oriunda do escoamento subterrâneo ( $PBAS_i$ ) que por sua vez é variável em função de inúmeros fatores.

O modelo de previsão também incorpora a atualização das previsões de chuva a cada 12 horas – intervalo de tempo em que são disponibilizadas novas previsões pelo modelo ARPS.

### 3.4.3 Previsão de vazão com previsão de precipitação – tipos

A metodologia utilizada estabeleceu algumas alternativas para estimativa da precipitação futura (entre  $t$  e  $t + \tau$ ) que são as seguintes: Previsão de vazão com chuva zero; previsão de vazão com chuva observada; previsão de vazão com previsão quantitativa de chuva e previsão de vazão com previsão estatística de chuva.

#### i) Previsão de vazão com chuva zero.

Considerando que no instante atual será feita a previsão numa determinada seção do rio, surgem duas questões: Qual a precipitação na bacia no horizonte de previsão  $\Delta t$ ? Qual o  $\Delta t$  máximo possível dentro dos erros aceitáveis de previsão da vazão?

A primeira questão é respondida considerando que o modelo chuva zero consiste em utilizar nos intervalos entre  $t$  e  $t + \tau$  chuva igual a zero. Para responder à segunda questão deve-se considerar que a hipótese de chuva zero só é verdadeira em alguns casos. O sistema de previsão deve ser confiável e, portanto, interessam as situações em que a hipótese não se verifica. Nesses casos, o erro na previsão de vazão, em se admitir chuva zero, depende do tempo de traslado da água das principais sub-bacias e rios até a seção de interesse, ou seja, é dependente das características da bacia. Uma pequena bacia, com escoamento rápido, possuir baixo tempo de concentração e a desconsideração da chuva futura só é possível para pequenos horizontes de previsão. Mas para bacias de médio e grande porte, essa hipótese pode resultar em previsões de afluência aceitáveis. A rede telemétrica é fundamental para fornecer, em tempo real, informações de chuva que ocorreram recentemente na bacia.

#### ii) Previsão de vazão com chuva observada

Este modelo de previsão consiste em utilizar nos intervalos entre  $t$  e  $t + \tau$  a chuva observada, substituindo a previsão de chuva. Esse modelo não pode ser utilizado operacionalmente, porém indica o ganho que se pode obter caso a previsão de chuva fosse “perfeita” e é particularmente interessante para avaliar o desempenho dos modelos meteorológicos.

É importante notar que existe diferença entre previsão com chuva observada e simulação para determinado período. Na simulação, a entrada principal é a chuva observada e é gerado o hidrograma simulado para o período. Na previsão com chuva observada a principal variável de entrada continua sendo a precipitação, porém a vazão observada em cada instante  $t$  é utilizada pelo modelo hidrológico de previsão como forma de atualização. Em consequência disso, a previsão com base na chuva observada se ajusta melhor ao hidrograma observado do que o hidrograma obtido na simulação.

### iii) Previsão de vazão com previsão quantitativa da chuva

A previsão de chuva quantitativa é determinada, nesta pesquisa, pelos modelos regionais e podem utilizar diferentes discretizações espaciais e temporais.

A previsão hidrológica com base na chuva prevista permite, desde que as previsões de chuva sejam confiáveis, aumentar o horizonte de previsão. O horizonte de previsão de vazão fica limitado, principalmente, pelo horizonte de previsão de chuva e da qualidade das previsões de chuva. Por exemplo, se o modelo meteorológico fornece previsões com antecedência de 60 horas, não necessariamente as previsões de vazão serão de 60 horas ou mais por diversos motivos como: as previsões de chuva podem ser ruins em horizontes muito distantes, intervalo de tempo necessário para processamento das previsões de chuva, tempo de máquina para previsão de vazão.

Para uma previsão contínua de vazão, é necessário que a cada intervalo de tempo de previsão o modelo meteorológico forneça uma previsão de chuva para entrada no modelo de previsão de vazão. Por limitações computacionais os modelos regionais normalmente geram novas previsões de chuva em intervalos discretos superiores ao intervalo utilizado pelo modelo hidrológico. Este é o caso do modelo ARPS que gera novas previsões de forma discreta a cada 12 horas inviabilizando a previsão contínua para o horizonte máximo de previsão de chuva. É possível operacionalizar a previsão contínua desde que se utilize o horizonte máximo de  $\Delta t_1 - \Delta t_2$ , sendo  $\Delta t_1$  o horizonte máximo de previsão de chuva e  $\Delta t_2$  o intervalo entre duas previsões consecutivas. Assim, por exemplo, utilizando dados de chuva com previsão de 60 horas e intervalos entre previsões de chuva de 12 horas, tem-se disponível apenas 48 horas. No instante  $t_0$  utilizam-se os dados até a hora 48, para  $t_1$  os dados até 49, e assim segue até  $t_{11}$  quando

se utilizam os dados previstos entre a hora 11 e 60. Na hora seguinte uma nova previsão de chuva é disponibilizada e substitui a previsão entre a hora 12 e a hora 60 se estendendo até a hora 72. A seqüência segue indefinidamente. A figura 3.12 ilustra esses procedimentos. Na figura 3.12, a linha em azul claro representa o tempo, as células em amarelo representam as vazões observadas e as chuvas observadas ao longo do tempo, as células em verde representam as chuvas previstas ao longo do tempo pelo modelo ARPS. As flechas em vermelho, indicam a seqüência que a chuva observada, chuva prevista e vazões observadas são incorporadas no modelo de previsão de vazão, ao longo do tempo para cada  $\Delta t$  de previsão. A linha em azul marinho simboliza uma nova previsão de chuva, que ocorre a cada 12 horas, a qual substitui a previsão anterior entre a hora 12 e a hora 60, porém se estendendo até a hora 72 (60 horas de previsão). A linha branca logo abaixo da linha azul marinho representa a continuidade dos passos anteriores indefinidamente no tempo. A linha em cinza representa o resultado obtido da previsão de vazão (previsão contínua de vazão ao longo do tempo, ou indefinidamente no tempo). Na figura 3.12 é ilustrada a previsão de vazão com previsão de chuva na discretização de 40 km do modelo ARPS (60 horas de previsão), porém a sistemática é a mesma para as demais discretizações. A incorporação da vazão observada no modelo de previsão ao longo do tempo é importante para atualização das variáveis de estado do modelo hidrológico.

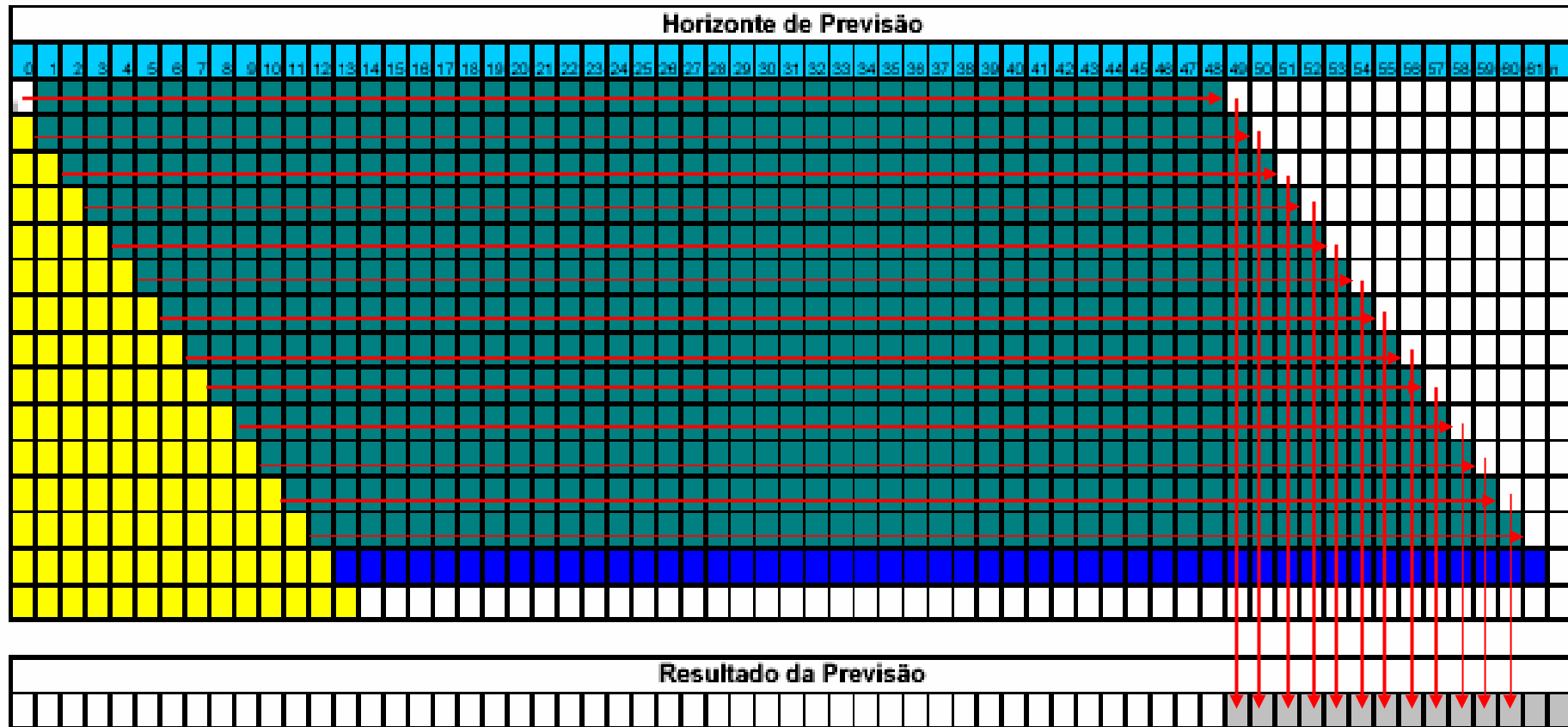


Figura 3.12. Diagrama da previsão de vazão com previsão de chuva – ARPS 40

#### iv) Previsões de vazão com previsão estatística de chuva

As previsões de chuva por métodos estatísticos constituem outra alternativa para melhorar as previsões de vazão em tempo real para horizontes acima do tempo de concentração da bacia. Alguns modelos probabilísticos baseados nas séries de Markov (Benjamin e Cornell, 1970) ou em séries temporais (Box e Jenkins, 1976) podem oferecer uma alternativa para estimativa da precipitação ao longo da previsão. Estudos de previsão hidrológicos com chuva prevista por modelos estatísticos podem ser encontrados em Mine (1998). Nesta pesquisa, porém, os métodos estatísticos não foram utilizados.

### 3.5 Avaliação dos modelos de previsão

Os modelos de previsão propostos foram analisados através de algumas estatísticas comumente utilizadas para avaliar a eficiência dos modelos de previsão e também através da análise gráfica entre vazões observadas e previstas. As estatísticas utilizadas foram: análise gráfica, coeficiente de Nash Sutcliffe (NS), coeficiente de eficiência (RD), erro padrão da vazão ( $E_p$ ) e erro padrão do volume ( $\Delta V$ ).

O coeficiente de NS, dado pela equação 3.7, tem um valor máximo igual a 1, que corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. O valor de NS é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NS supera 0,70, e é considerado aceitável se o valor de NS ficar entre 0,36 e 0,70 (Gotschalk e Motovilov, 2000 *Apud* Tucci, et al. 2003).

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(i+t) - Q_{cal}(i+t))^2}{\sum (Q_{obs}(i+t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad 3.7$$

A estatística de NS considera a eficiência do modelo proposto sobre um modelo alternativo que no caso é o modelo que prevê a média. No caso da previsão em tempo real é mais razoável admitir que as vazões futuras serão iguais à vazão atual do que tomar a média do período (Tucci, 1998; Lettenmaier e Wood, 1992). Este modelo de previsão é

conhecido como modelo de persistência. Esse modelo é particularmente interessante para avaliar os modelos de previsão de maior complexidade. Assim a previsão baseada na persistência de 48 horas é o valor de vazão observada 48 horas antes, a de 30 horas, é o valor observado 30 horas antes e assim segue. A figura 3.13 ilustra a persistência de 30 horas e 5 horas para um evento na bacia. Observa-se que a persistência de 5 horas apresenta pequeno erro no volume. As previsões por este modelo se deterioram rapidamente com a antecedência como se observa pela persistência de 30 horas.

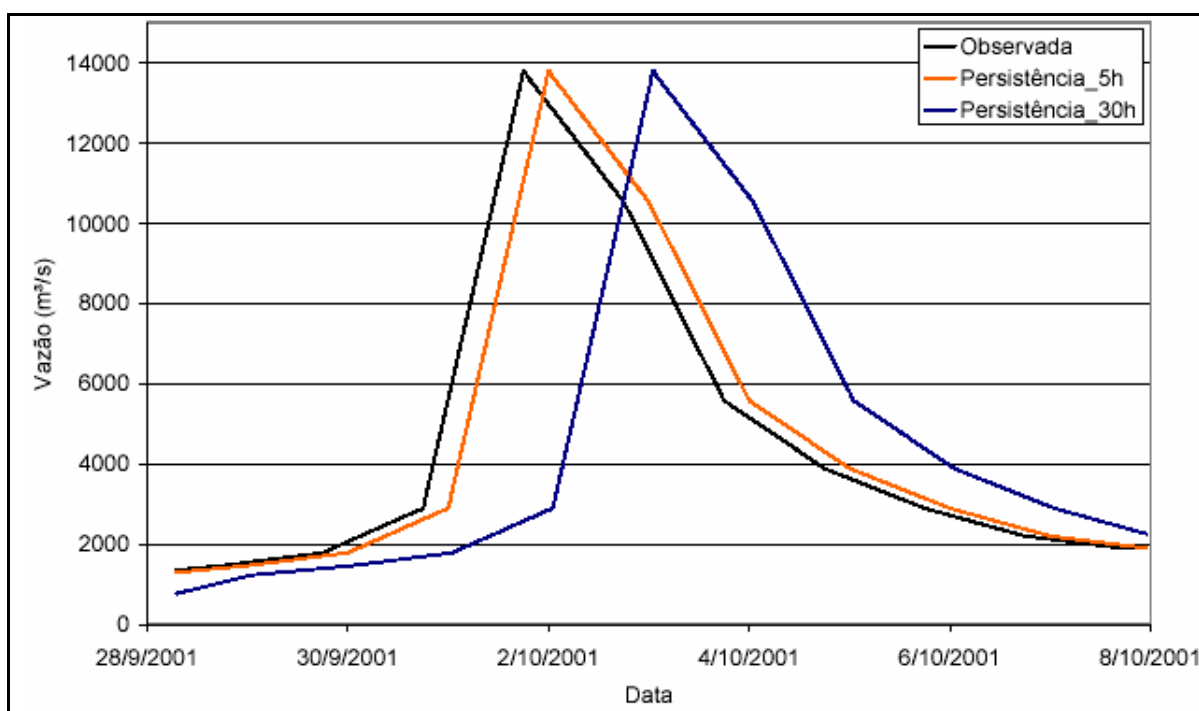


Figura 3.13. Exemplo de previsão por persistência para um evento

Considerando as vazões de persistência no lugar da média das vazões na estatística de Nash, resulta a estatística RD, dada pela equação 3.8. Valores negativos do fator informam que o modelo de persistência é melhor que o modelo alternativo e valores positivos informam que existem ganhos em se fazer previsão com o método alternativo.

$$RD = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(i+t) - Q_{cal}(i+t))^2}{\sum (Q_{obs}(i+t) - Q_{obs}(t))^2} \quad 3.8$$

O valor de  $\Delta V$ , dado pela equação 3.9, apenas expressa a diferença relativa entre a

soma de todas as vazões, calculadas e observadas, sem considerar sua seqüência temporal. Esta estatística é particularmente interessante na previsão de vazão em reservatórios hidrelétricos, pois nesta situação é mais importante na previsão de volumes do que do pico da cheia.

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}) - \sum(Q_{obs})}{\sum(Q_{obs})} \quad 3.9$$

A estatística do erro no volume expressa pela equação 3.9 é particularmente interessante nos problemas de simulação, porém, na previsão ela é tendenciosa. Utilizando a equação 3.9, obtém-se erro zero na previsão por persistência. Isso ocorre pela compensação de volume. A equação 3.9 foi adaptada para melhor avaliar o desempenho dos modelos de previsão. A equação 3.10 apresenta a expressão modificada.

$$\Delta V = \frac{\sum|Q_{cal} - Q_{obs}|}{\sum(Q_{obs})} \quad 3.10$$

A estatística do erro padrão mede a dispersão das previsões em torno das observações e é dada pela equação 3.11.

$$E_p = \left[ \frac{1}{n} \sum (Q_{cal}(i+t) - Q_{obs}(i+t))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad 3.11$$



## 4. PREVISÃO DE VAZÕES NO RIO URUGUAI EM MACHADINHO

### 4.1 Bacia do rio Uruguai

#### 4.1.1 Descrição

O rio Uruguai forma-se na região sul do Brasil, entre os Estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, a partir da confluência dos rios Canoas e Pelotas (conforme as figuras 4.1 e 4.2), escoando posteriormente em trecho internacional. No trecho internacional, inicialmente o Rio faz divisa entre Brasil e Argentina e depois entre Uruguai e Argentina até a foz na Bacia do rio da Prata onde forma, juntamente com o rio Paraná o rio da Prata. A figura 4.1 mostra a localização da bacia do Uruguai em terras brasileiras.

A bacia hidrográfica contemplada neste estudo envolve as sub-bacias 70, 71 e parte da 72 (numeração da Agência Nacional de Águas – ANA) e é definida na seção do reservatório de Machadinho, (figura 4.1, círculo pontilhado e figura 4.2). Esta bacia possui área de drenagem de 32.000 km<sup>2</sup> e comprimento do rio principal de 72 km. O escoamento na região é bastante rápido devido às altas declividades dos rios e predominância de escoamento superficial, gerado pela reduzida camada de solo.

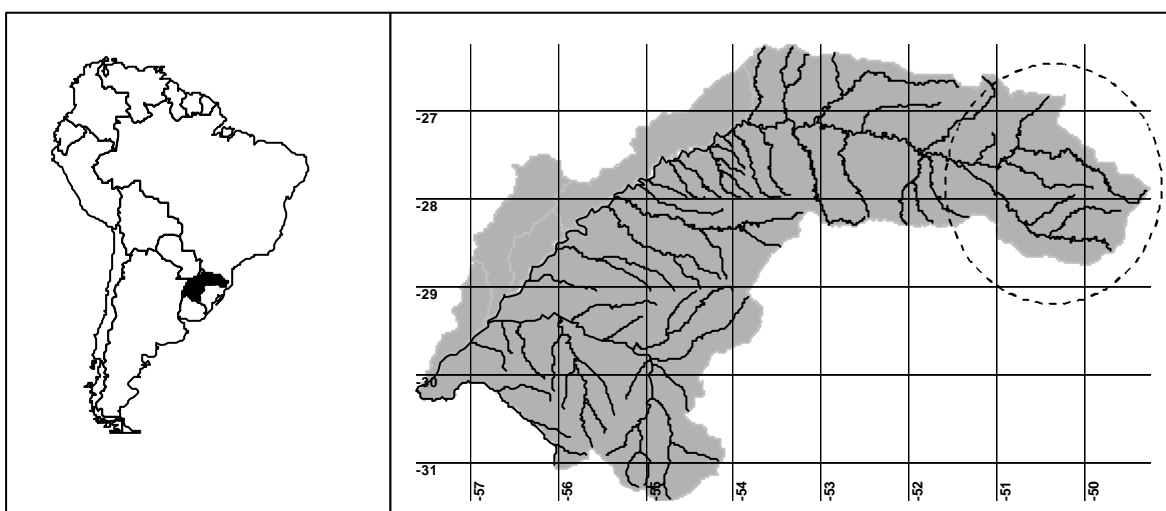


Figura 4.1. Situação da bacia do Uruguai  
À esquerda, a situação na América; à direita a bacia em território nacional

Considerando a localização da área em estudo pela figura 4.1, a região contemplada nesta pesquisa fica contida nos eixos de longitude 59° a 62° e latitude 26° a 29°.

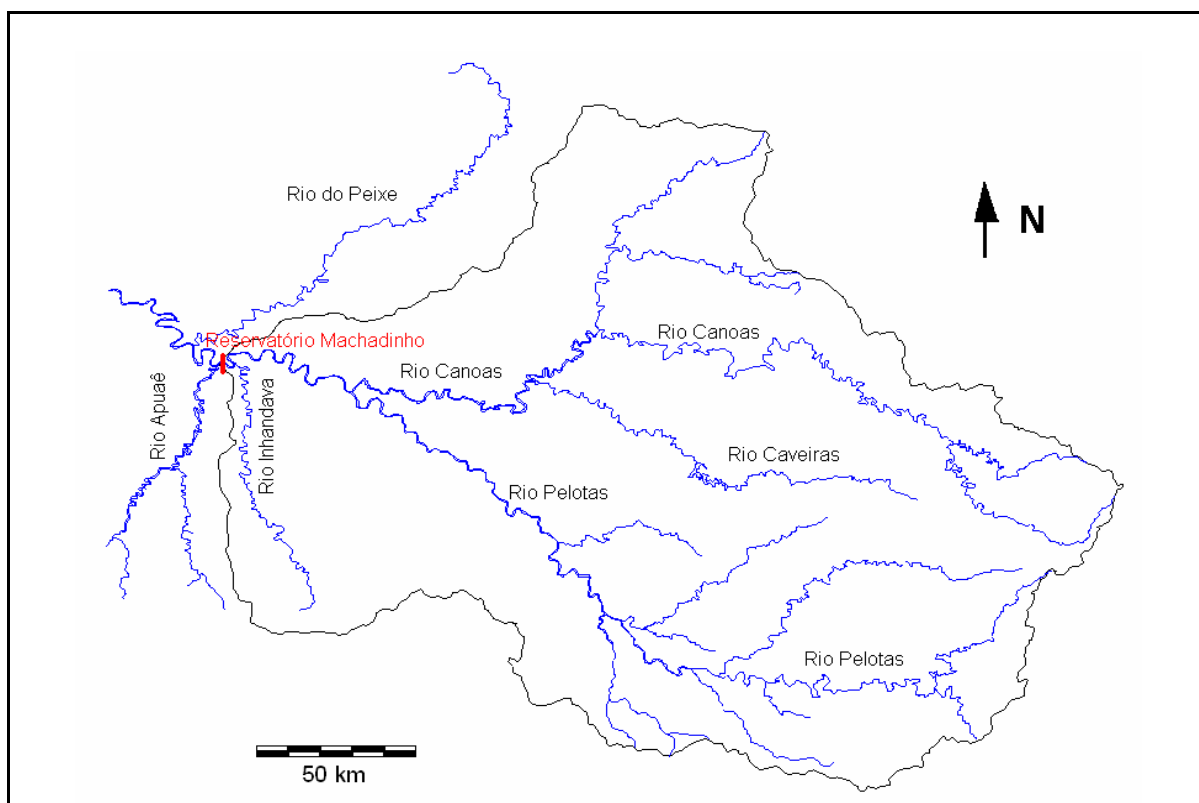


Figura 4.2. Bacia do Uruguai até Machadinho  
(Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

#### 4.1.2 Características meteorológicas

Em toda a Região Sul a circulação atmosférica é controlada pelos sistemas de massas de ar tropicais e polares, regulada pelos fenômenos resultantes do choque das mesmas, que é a frente polar. Ocorrem as massas de ar Tropical Atlântica (Ta), Polar Atlântica (Pa), Tropical Continental (Tc) e Equatorial Continental (Ec), sendo que predominam a Ta e a Pa.

Seguindo a metodologia especificada por Köeppen, o clima da bacia é classificado da seguinte forma.

i) Zona Fundamental: C, clima temperado, onde a temperatura do mês mais frio oscila entre -3° e 18° C;

ii) Tipo Fundamental: Cf, clima temperado, com chuvas em todas as estações;

iii) Variedades específicas: Cfa (clima subtropical) onde a temperatura do mês mais quente é superior a 22° C; ou Cfb (clima temperado) onde a temperatura do mês mais quente é inferior a 22° C.

As cabeceiras da bacia do rio Uruguai correspondem à região mais fria do Brasil, na região serrana catarinense e gaúcha. As temperaturas mais baixas ocorrem no período de junho a agosto e as mais elevadas de dezembro a fevereiro. A amplitude média da variação das temperaturas é proporcional à continentalidade, sendo maior, por exemplo, em Xanxerê (12,9 °C) do que em Lages (10,1 °C). Por outro lado, as amplitudes observadas nas isotermas de julho é menor do que as observadas em janeiro, já que no inverno o fator predominante é a ação dos anticiclones, o que faz diminuir a importância de outros fatores, como a continentalidade e a altitude.

A gênese das chuvas depende da época do ano. As chuvas de inverno ocorrem pela aproximação de um anticiclone ou zona de alta pressão. A área de depressão ou baixa atmosférica se desloca, dando lugar à área de alta que se aproxima. Quando a área de baixa pressão e alta temperatura é substituída por um anticiclone ou alta pressão, o ar atmosférico comporta menos umidade, ocasionando a condensação e a formação de nuvens. Durante o inverno, devido à intensificação de circulação secundária do ar, as penetrações das áreas de altas pressões são mais violentas, mais numerosas e sua ação mais duradoura, gerando chuvas mais prolongadas e em maior número de dias de precipitação. Os anticiclones que ocorrem na região são as Massas Polar Atlântica e Pacífica.

Durante o verão, quando a circulação secundária do ar enfraquece, os anticiclones decrescem em valor e frequência, passando a atuar novos fatores na formação das chuvas da estação quente. Um dos fatores é a presença dos ventos alísios, que sopram do Atlântico. Esses ventos estão relacionados com o anticiclone formado no Oceano Atlântico, que origina a frente Tropical Sul-Atlântica, sendo responsáveis pelo carregamento de umidade para o continente. Este ar úmido, por convecção, forma as chuvas de verão, com trovoadas e com grande intensidade e baixa duração.

Outro fator é a influência orográfica, que ocorre quando o relevo causa a elevação

das massas de ar, as quais se esfriam, condensam e precipitam. Cidades como Iraí, Soledade, Campos Novos, Xanxerê e Chapecó, influenciadas pelo efeito orográfico, apresentam precipitações mais elevadas do que outras estações próximas.

#### 4.1.3 Características hidrológicas

As nascentes dos rios Canoas e Pelotas estão localizadas em uma região de campos e florestas a uma altitude que ultrapassa os 1.500 m conforme figura 4.3. O relevo da bacia é bastante pronunciado e os rios, especialmente o rio Pelotas, apresentam grande declividade. O rio Canoas apresenta um percurso mais longo, um vale largo e uma planície que pode ser inundada. Já o rio Pelotas tem seu leito no interior de um vale profundo e estreito. Atualmente, a confluência dos rios Pelotas e Canoas, que marca o início do rio Uruguai, está na região de remanso do reservatório de Machadinho.

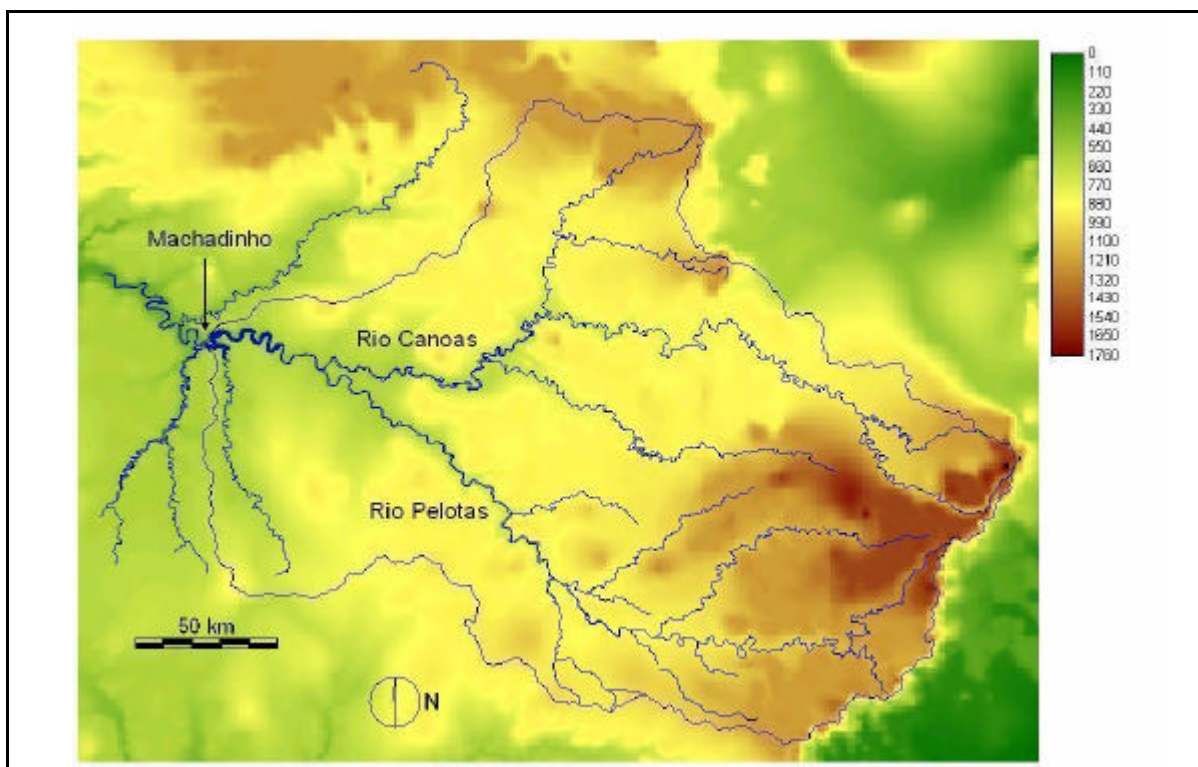


Figura 4.3. Relevo da bacia  
(Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

A bacia do rio Uruguai, à montante de Machadinho, está inteiramente localizada na região do derrame basáltico sul-brasileiro. Em geral, as rochas que formam o substrato desta região apresentam pouca porosidade e baixa capacidade de absorver e armazenar a

água no solo. Os solos na bacia do rio Uruguai a montante de Machadinho são, em sua maioria, originados a partir da decomposição da rocha basáltica, e contém altos teores de argila, o que contribui para reduzir a capacidade de infiltração. Além disso, a camada de solo sobre o substrato rochoso nas regiões das encostas é relativamente fina, apresentando pouca capacidade de armazenamento. Assim as características de geologia e solos da região contribuem para uma baixa capacidade de regularização natural de vazão na bacia, com grande predomínio de escoamento superficial em detrimento do escoamento subterrâneo. Além do basalto, que predomina de maneira geral na bacia, existem regiões em que ocorre o afloramento de rochas sedimentares de arenito, especialmente na bacia do rio Canoas, o que condiciona alguns aspectos da hidrologia da região e origina grande diferença de comportamento entre os dois principais rios da região, o Pelotas e o Canoas, conforme se observou em estudos anteriores (Tucci, Collischonn, Andreolli, 2003).

A vegetação original na bacia era de florestas, com exceção das regiões mais altas, em que existiam alguns campos nativos. Atualmente observa-se que boa parte das florestas foi substituída por lavouras ou pastagens, sendo estas as predominantes na região conforme figura 4.4.

Em consequência das características físicas da bacia, tais como relevo pronunciado, fortes declividades, solos relativamente argilosos, rasos e pouco permeáveis e substrato rochoso de basalto com baixa capacidade de armazenamento e regularização, as cheias no rio Uruguai ocorrem com muita rapidez e a vazão do rio é bastante variável. Além disso, as cheias na bacia ocorrem com maior frequência no inverno, porém ocorrem cheias em qualquer época do ano devido as condicionantes climáticas. A figura 4.5 apresenta a sazonalidade das vazões máximas para um posto fluviométrico próximo à seção de Machadinho. A série de dados é de 30 anos. O código e o nome do posto são, respectivamente, 72300000 e Passo Virgílio.

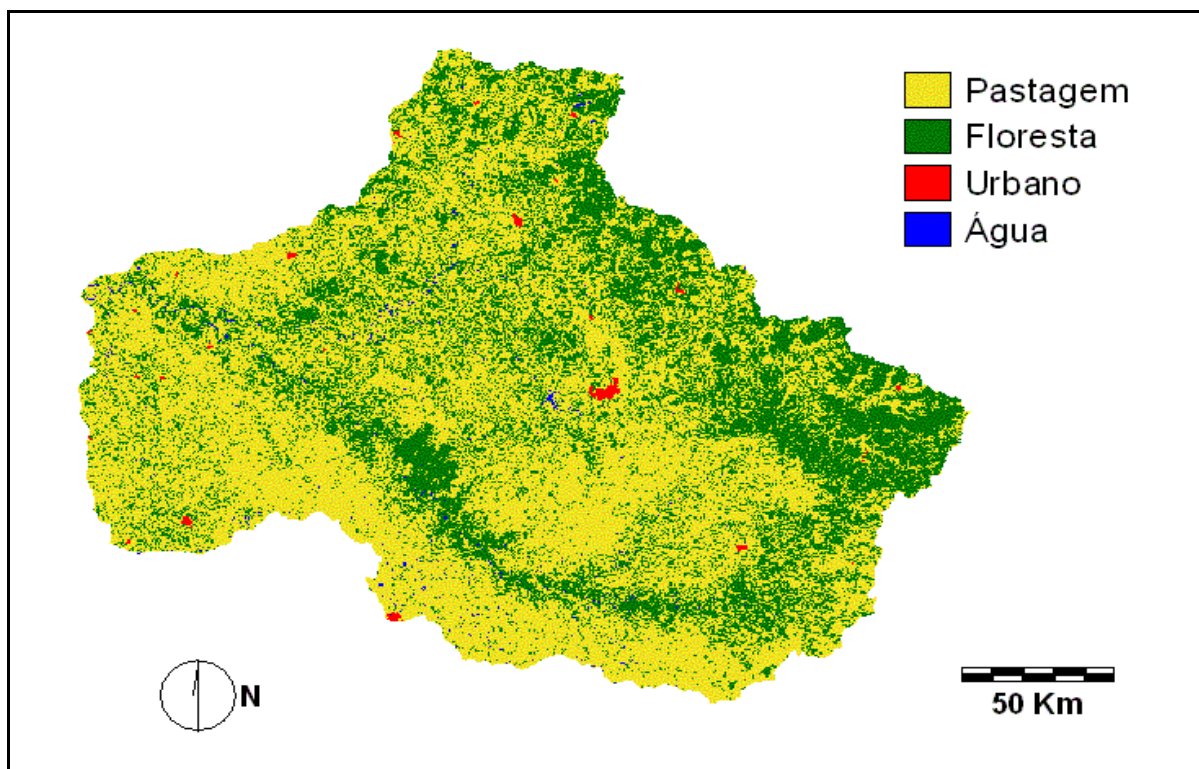


Figura 4.4. Uso do solo na bacia  
(Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

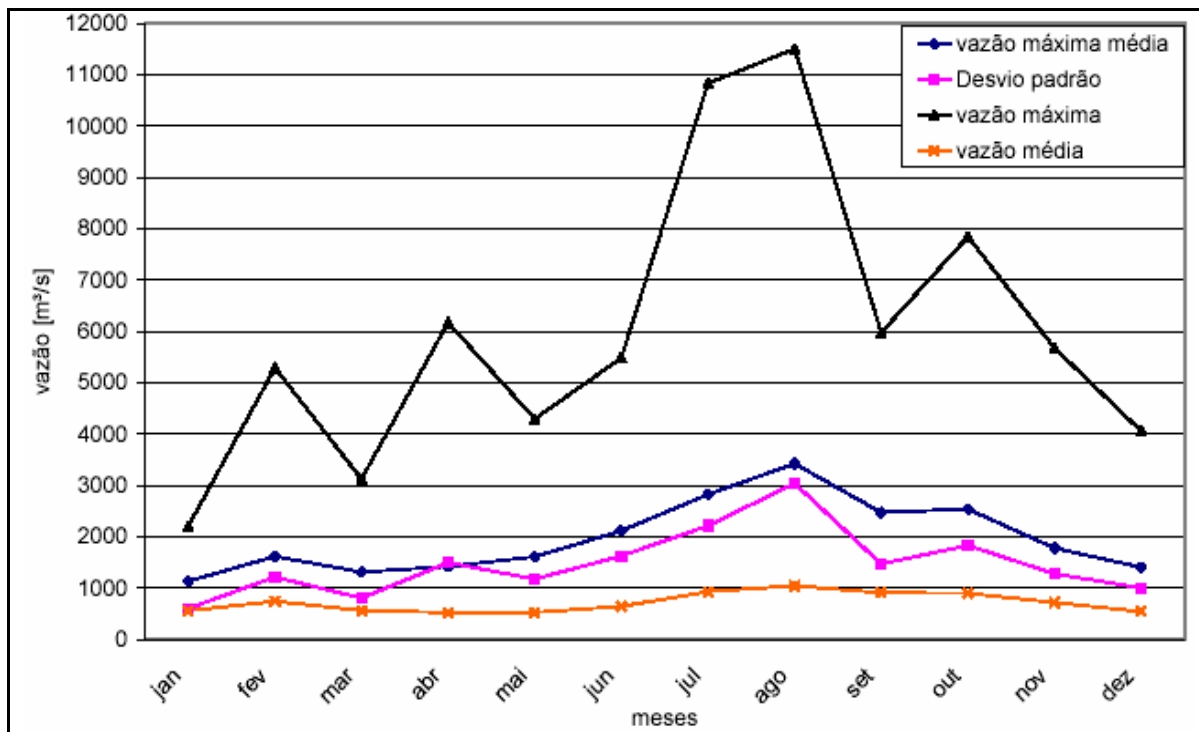


Figura 4.5. Sazonalidade das vazões máximas para o posto 72300000

A curva superior em preto apresenta as vazões máximas de cada mês da série de 30 anos (1971 – 2001). Essa curva mostra que apesar dos meses de dezembro a abril apresentarem vazões menores que nos meses de inverno, nesses meses ocorrem eventos extremos. Esse fato é muito importante, pois mostra a imprevisibilidade das cheias na bacia mostrando a importância de estudos de previsão em tempo real na bacia. A curva em azul marinho mostra as médias das máximas mensais da série de 30 anos. Novamente nota-se um crescimento de afluência de maio a agosto, porém fica claro que ocorrem eventos chuvosos nos outros meses. A curva em rosa, que apresenta o desvio padrão das máximas mensais ratifica a ocorrência de cheias em todos os períodos. Também na figura é apresentado a média das vazões mensais com objetivo de servir de base de comparação das vazões máximas.

## **4.2 Dados hidrológicos**

A bacia do Uruguai até a seção de Machadinho, conta com uma rede de pluviômetros e de linímetros e dados climáticos disponibilizadas pela ANA. Também na bacia, mais recentemente, foi implantado um sistema telemétrico de níveis (linígrafos) dos principais rios e de chuva, ambos com leituras de hora em hora. Esta rede é controlada pelo Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos de Santa Catarina (CLIMERH-SC).

### **4.2.1 Base de dados**

Os dados dos pluviômetros na bacia são operados por diversos órgãos de recursos hídricos e são disponibilizados pela ANA e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Alguns postos de chuva apresentam série desde 1943, porém a maior parte apresenta séries mais curtas em torno de 30 anos de dados com leituras uma vez ao dia. A tabela 4.1 apresenta um resumo das informações dos postos de chuva diária na bacia. A penúltima coluna apresenta o período de dados disponibilizados pelo CLIMERH-SC. Foi importante a disponibilização desses dados pelo CLIMERH-SC, porque nem todos os dados dos pluviômetros em operação estão disponíveis na ANA, como pode se observar na última coluna da tabela. A distribuição espacial dos pluviômetros pode ser observada na figura 4.6 que está apresentada no item a seguir do texto. Todos os postos apresentados na tabela 4.1 foram utilizados para previsão.

Tabela 4.1. Informações sobre pluviômetros na bacia

Dados de pluviômetros na bacia							
posto	long.	latitude	bacia	respons.	operadora	disponibilizado	série
02751001	-51.083	-27.683	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1964
02751015	-51.450	-27.667	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1977
02749035	-49.933	-27.733	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02849009	-49.633	-28.333	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1969
02850001	-50.433	-28.667	86	INMET	INMET	01/2001-11/2003	-
02651042	-51.000	-26.767	72	EPAGRI	EPAGRI	01/2001-11/2003	-
02750001	-50.767	-27.900	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1969
02751002	-51.227	-27.384	71	INMET	INMET	01/2001-11/2003	-
02750029	-50.455	-28.082	71	TRACT.	EPAGRI	01/2001-11/2003	-
02751012	-51.617	-27.333	72	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02751017	-51.450	-27.983	72	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02752005	-52.017	-27.233	73	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1955
02750023	-50.608	-27.288	71	EPAGRI	EPAGRI	01/2001-11/2003	-
02849023	-49.800	-28.367	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02752019	-52.267	-27.617	73	INMET	CELTINS	01/2001-11/2003	-
02851043	-51.183	-28.050	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1977
02750016	-50.933	-27.050	72	INMET	INMET	01/2001-11/2003	-
02752022	-52.333	-27.300	73	EPAGRI	EPAGRI	01/2001-01/2003	-
02751004	-51.500	-27.150	72	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1943
02750005	-50.317	-27.817	71	EPAGRI	EPAGRI	01/2001-11/2003	-
02851014	-51.533	-28.200	70	INMET	INMET	01/2001-11/2003	-
02751018	-51.917	-27.450	73	ANA	CPRM	01/2001-07/2003	1987
02750007	-50.100	-27.933	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1958
02750008	-50.833	-27.517	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1959
02850008	-50.750	-28.183	70	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1943
02750010	-50.467	-27.150	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1959
02750011	-50.383	-27.483	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1957
02651052	-51.410	-26.907	73	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1988
02751007	-51.800	-27.933	72	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1957
02849014	-49.933	-28.300	70	INMET	INMET	01/2001-11/2003	-
02750020	-50.583	-27.650	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02850002	-50.042	-28.759	86	CEEE	CEEE	01/2001-11/2003	-
02852046	-52.017	-28.083	72	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1976
02849021	-49.583	-28.017	71	ANA	CPRM	01/2001-11/2003	1943
02850014	-50.933	-28.500	70	INMET	CELTINS	01/2001-11/2003	-
02751016	-51.150	-27.004	72	EPAGRI	EPAGRI	01/2001-07/2003	-

Os dados de linímetros na bacia apresentam séries razoavelmente longas, com



registros, na maior parte das vezes, anterior a 1960. A tabela 4.2 apresenta algumas informações sobre esses postos. Na última coluna são agrupados, em cores, os postos correspondentes à bacia do rio Pelotas, Canoas e Uruguai. Esses postos foram importantes para calibração do modelo realizado em estudos anteriores. Para previsão em tempo real, foram utilizados apenas os postos Passo Caru (Rio Canoas) e Passo Socorro (Rio Pelotas), onde existem medidas de linígrafo. Atualmente são gerados dados de vazão afluente ao reservatório de Machadinho de 4 em 4 horas obtido através de balanço hídrico considerando armazenamento, vazão vertida e turbinada.

Tabela 4.2. Rede fluviométrica na bacia operada pela CPRM

posto	área [km <sup>2</sup> ]	longitude	latitude	bacia	respons.	serie	rio
70100000	528	-49.804	-28.368	70	ANA	1976	Pelotas
70300000	1119	-50.060	-28.090	70	ANA	1942	Lava Tudo
70500000	548	-50.441	-28.152	70	ANA	1944	Pelotinhas
70200000	2841	-50.296	-28.449	70	ANA	1964	Pelotas
70700000	8400	-50.759	-28.211	70	ANA	1940	Pelotas (socorro)
71550000	10258	-50.860	-27.538	71	ANA	1951	Canoas (caru)
71383000	4631	-50.384	-27.481	71	ANA	1957	Canoas
71498000	3654	-50.751	-27.331	71	ANA	1940	Das Marombas
71490000	360	-50.465	-27.215	71	ANA	1959	Das Marombas
71300000	1984	-49.833	-27.700	71	ANA	1942	Canoas
71200000	989	-49.778	-27.803	71	ANA	1958	Canoas
71250000	512	-49.626	-27.829	71	ANA	1959	João Paulo
71350001	3360	-50.329	-27.808	71	ANA	1984	Canoas
72680000	3626	-51.858	-27.560	72	ANA	1939	Apuaê
72430000	1604	-51.755	-27.879	72	ANA	1957	Inhandava
72300000	2914	-51.714	-27.501	72	ANA	1971	Uruguai

#### 4.2.2 Telemetria

Considerando o cenário brasileiro a bacia do Rio Uruguai, à montante do reservatório de Machadinho, conta com uma boa rede de monitoramento hidrológico de pluviógrafos e linígrafos (figuras 4.6 e 4.7). Essa rede iniciou sua operação em maio de 2001 e foi sendo incrementada com novos postos entrando em operação até setembro de 2001. Os dados telemétricos são coletados e transmitidos em intervalos de uma hora, o que é satisfatório pela rapidez do escoamento na bacia.

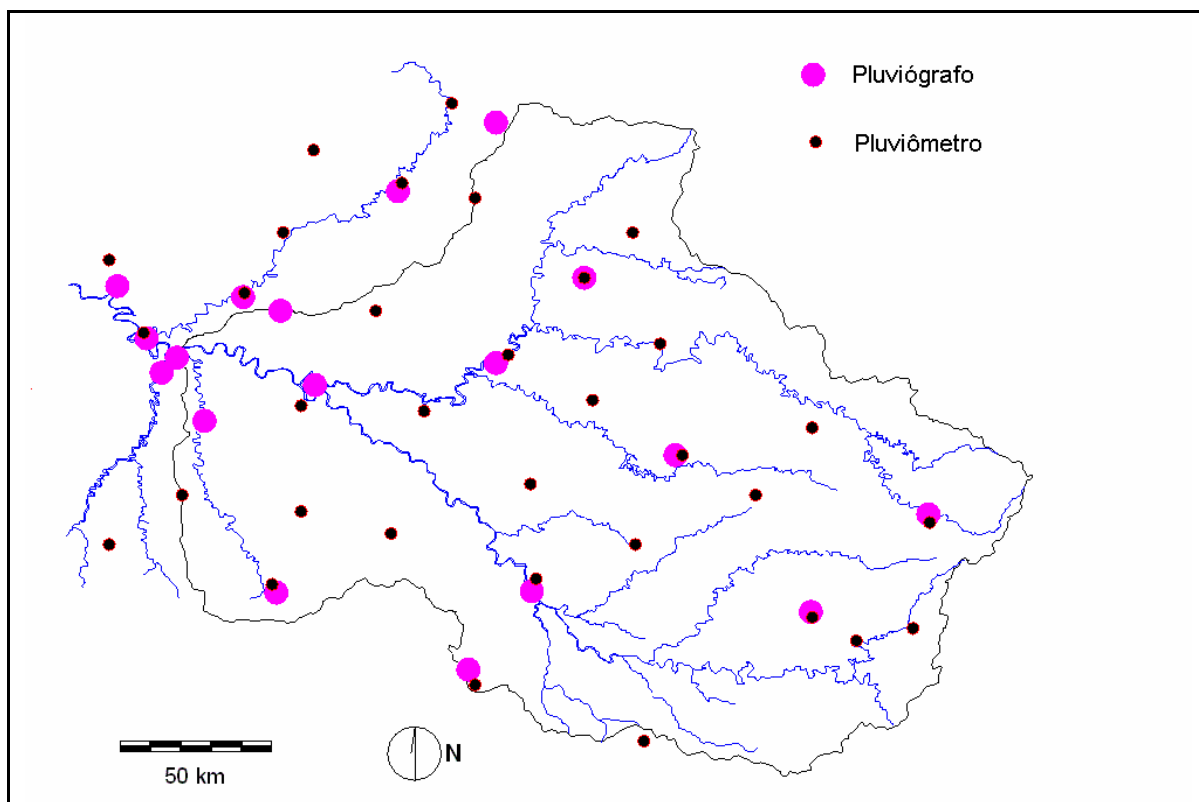


Figura 4.6. Distribuição espacial de pluviômetros e pluviógrafos na bacia (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

Os dados de pluviógrafos não cobrem a bacia suficientemente. Existem na bacia regiões razoavelmente grandes sem a presença de pluviógrafos. Essas áreas são, na realidade, bem maiores do que aparentam na figura 4.6, pois em certos períodos se observam falhas em alguns postos. A figura 4.8 apresenta o número de postos pluviográficos em operação na bacia em estudo para o período de abril de 2001 a agosto de 2002. Observam-se alguns períodos de ausência de dados telemétricos de chuva na bacia. Na figura, observa-se que o número máximo de postos em operação é 18, porém, para previsão foram disponibilizados apenas 15 pluviógrafos devido às falhas nos sensores de alguns postos.

Apesar das falhas observadas na rede de pluviógrafos e da possibilidade de melhorar significativamente a distribuição espacial e temporal da chuva na bacia com a implantação de mais pluviógrafos, esta bacia pode ser considerada ótima em termos de monitoramento hidrológico dentro do contexto brasileiro.

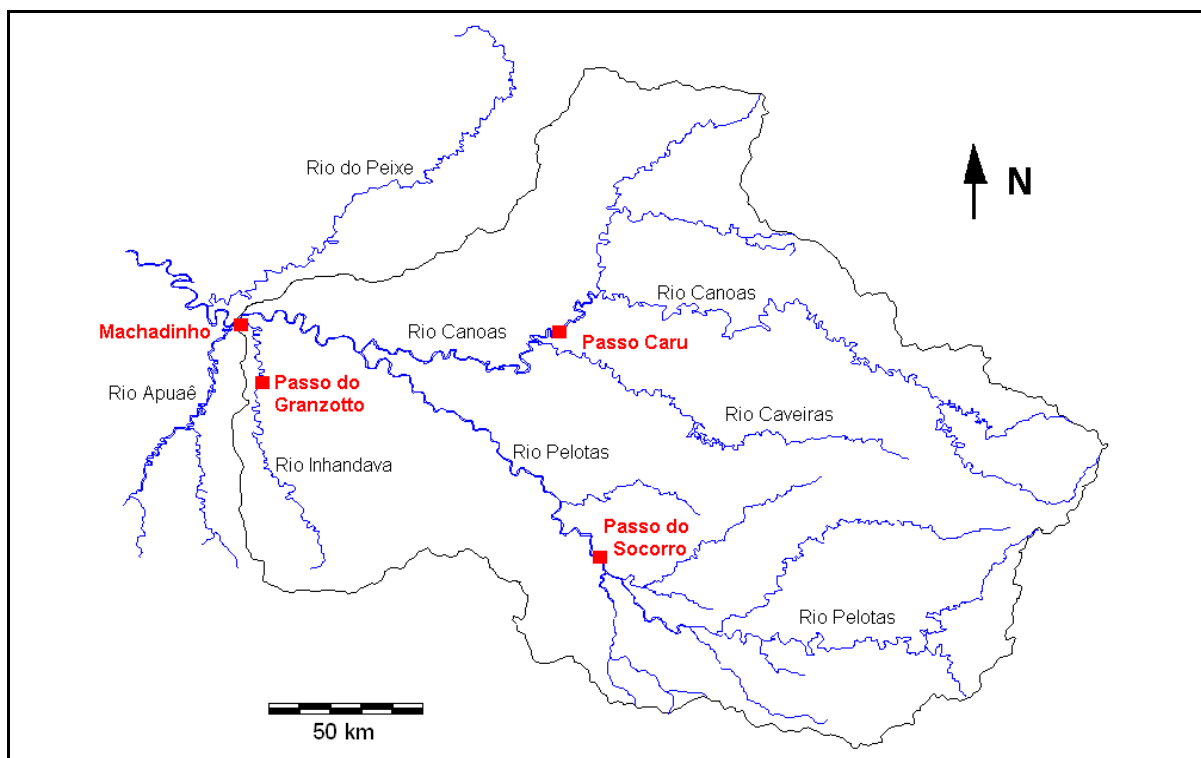


Figura 4.7. Distribuição espacial de fluviógrafos na bacia (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

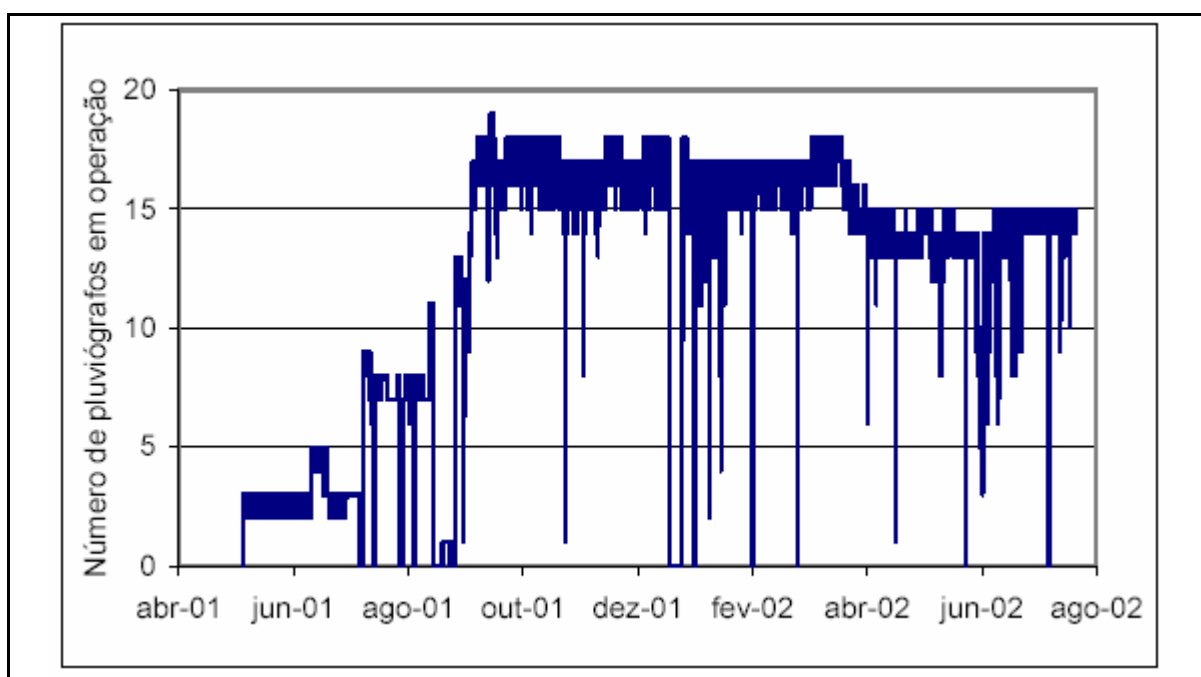


Figura 4.8. Número de pluviógrafos em operação na região ao longo do tempo

A tabela 4.3 apresenta os postos pluviográficos na bacia. A distribuição espacial pode ser observada pela figura 4.6 e 4.8.

Tabela 4.3. Dados dos pluviógrafos na bacia

Dados dos pluviógrafos					
posto	latitude	longitude	responsável	operadora	disponibilizado
2019	-50.870	-26.822	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2007	-51.510	-27.384	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2001	-50.608	-27.288	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2011	-50.338	-27.816	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2017	-51.521	-28.226	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2004	-51.619	-27.343	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2013	-50.869	-27.539	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2003	-51.735	-27.713	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2014	-50.764	-28.219	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2015	-49.935	-28.282	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2009	-49.586	-27.993	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2018	-50.953	-28.454	CLIMERH	CLIMERH	set 2001 a out 2003
2041	-50.383	-27.483	CLIMERH	CLIMERH	abr 2003 a out 2003
2005	-51.818	-27.523	CLIMERH	CLIMERH	abr 2003 a out 2003
1001	-51.904	-27.461	CLIMERH	CLIMERH	abr 2003 a out 2003

Os linígrafos estão localizados no rio Canoas (posto Passo Caru), no rio Pelotas (posto Passo do Socorro) e no rio Inhandava (posto Passo Granzotto), conforme figura 4.7. O posto Passo Granzotto apresentou muitas falhas o que impossibilitou a utilização dos seus dados. Para complementar os dados de vazão dos rios, estão disponíveis dados de vazão afluentes ao reservatório de Machadinho, calculados por balanço hídrico do reservatório com base na variação do nível da água e na soma das vazões vertida e turbinada. Infelizmente, esses dados estão disponíveis apenas em intervalos diários até 30 de junho de 2002. A partir de então os dados estão disponíveis em intervalos de 4 horas. Observou-se vários problemas dos dados de linígrafos dos rios Canoas e Pelotas que podem ter sido causados pelo sensor, principalmente em vazões baixas. A verificação foi possível, porque nos dois postos fluviográficos citados existe posto com régua convencional, com leitura duas vezes ao dia, como pode se observar pela tabela 4.2. A figura 4.9 e a figura 4.10 apresentam os níveis observados por leituras duas vezes ao dia e por linígrafos, respectivamente, para o Passo Socorro e Passo Caru no período de previsão contínua, onde se observam divergências nas leituras, mesmo em períodos de cheia. Nas cheias os dados de linígrafos estão razoavelmente corretos, mas nas estiagens estão, visivelmente, errados.

É possível que os erros nas vazões baixas sejam devido ao depósito de sedimentos no entorno do sensor do linígrafo. A hipótese foi levantada, porque quando ocorre uma vazão significativa no rio, ocorre também transporte significativo de sedimentos que podem estar sendo depositados no sensor, na estiagem, e removidos, na cheia, a cada evento.

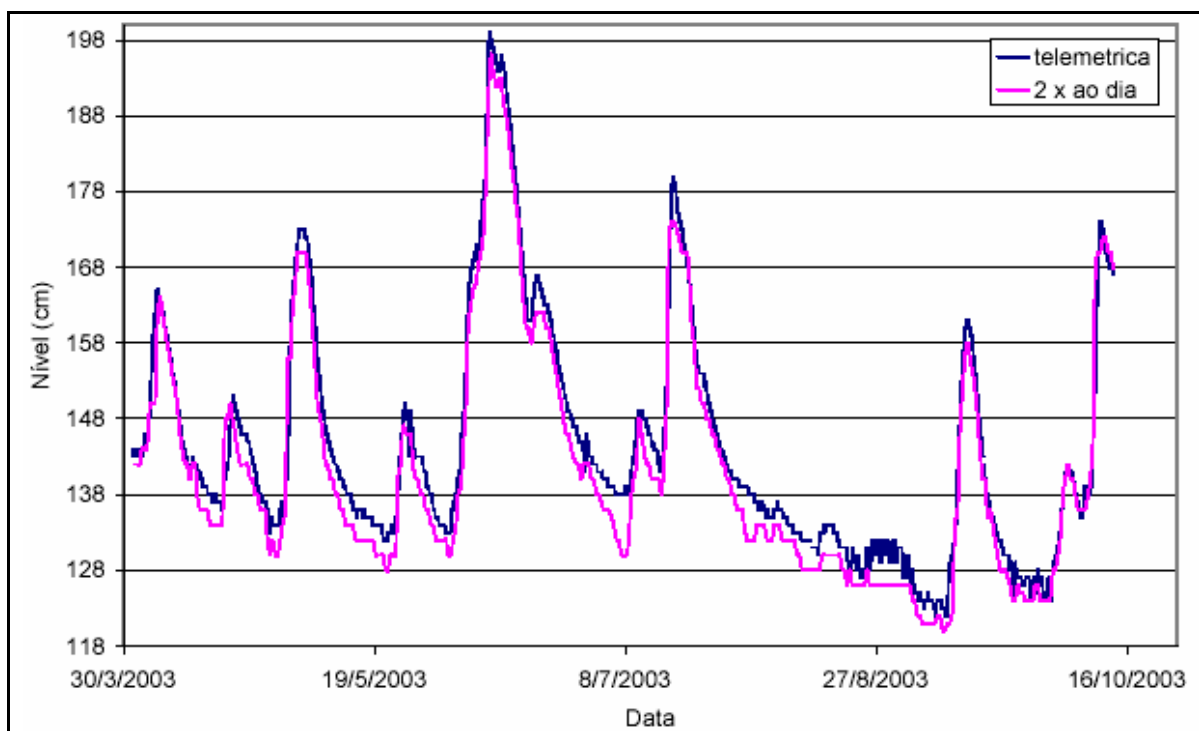


Figura 4.9. Série de níveis no Passo do Socoro – Rio Pelotas

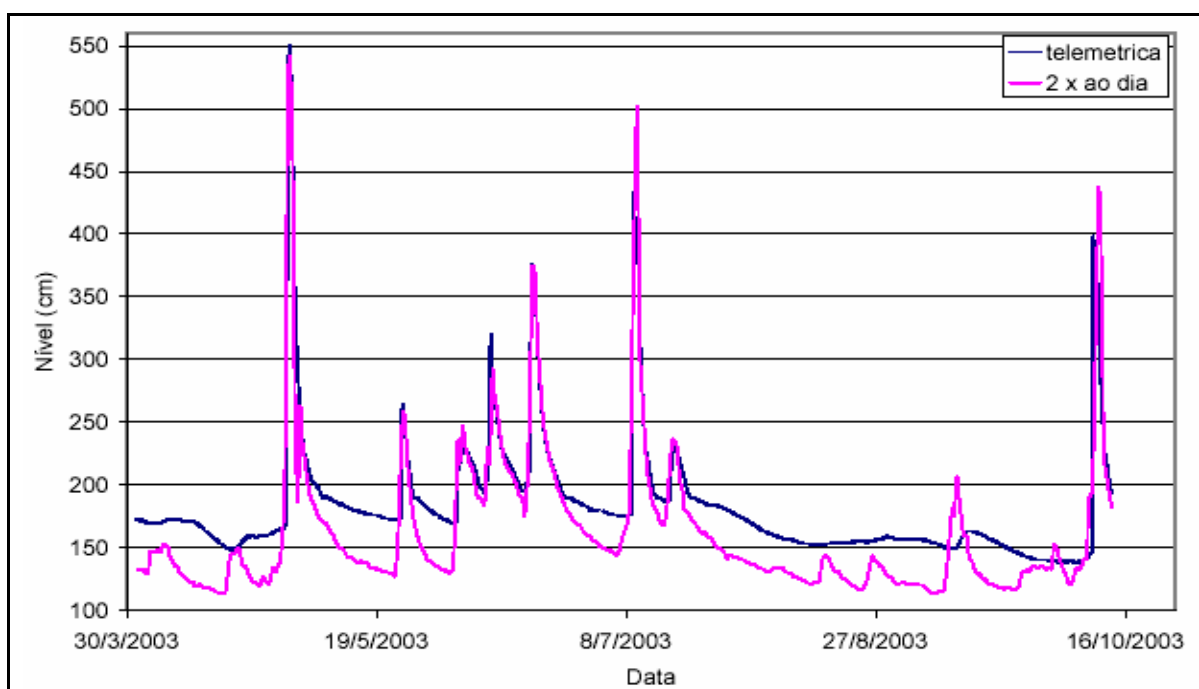


Figura 4.10. Série de níveis no Passo Caru – Rio Canoas

Devido aos erros nas leituras telemétricas, na totalidade do período de previsão hidrometeorológica contínua (26 abril a 10 outubro de 2003), os dados horários dos dois postos foram desprezados. Assim houve a necessidade de interpolar os dados de duas vezes ao dia dos postos convencionais Passo Caru e Passo Socorro, para intervalos horários. A interpolação adotada foi a linear. Desta forma, conclui-se que os dados de vazão dos rios da bacia são escassos.

### **4.3 Discretização**

A utilização do modelo de hidrológico para previsão necessita primeiramente de uma etapa de ajustes dos parâmetros realizada *off line* (sem atualização). A etapa de calibração, porém, não fez parte desta pesquisa. O modelo já havia sido utilizado em trabalhos anteriores (Collischonn, 2001; Tucci, Collischonn e Andreolli 2003) e estava calibrado. As etapas de discretização da bacia em células e blocos, bem como a determinação das classes e blocos de uso e tipos de solo foram feitos em estudo anteriores (Tucci, Collischonn e Andreolli 2003) e não são apresentados.

#### **4.3.1 Discretização temporal dos dados de chuva**

O modelo hidrológico foi preparado para simular os processos em intervalo de tempo horário, que corresponde ao intervalo de tempo em que estão disponíveis os dados da rede telemétrica. Entretanto, a rede telemétrica é relativamente esparsa, o que poderia comprometer a representatividade dos valores dos parâmetros encontrados durante a calibração. Assim, optou-se por incluir os postos pluviométricos, com dados em intervalo de tempo de um dia, na interpolação dos dados de chuva. Os dados diários dos pluviômetros foram transformados em dados horários, utilizando a distribuição temporal do posto pluviográfico mais próximo, entre às 9:00 da manhã de um dia e às 9:00 da manhã do dia seguinte, através de rotinas específicas.

Através desta metodologia foi possível aproveitar os dados dos pluviômetros, apesar do intervalo de tempo diário não ser adequado. Evidentemente existem erros associados ao processo de distribuição temporal adotado, o que determina que os resultados não são equivalentes aos que seriam obtidos por uma verdadeira rede densa de pluviógrafos.

No caso da adoção deste modelo de previsão para operação do reservatório de Machadinho os dados de pluviômetros estarão indisponíveis em tempo real e os resultados, provavelmente, serão inferiores aos obtidos nessa pesquisa. Acredita-se que a rede telemétrica pode ser ampliada pelas empresas que contemplam o consórcio da usina.

### 4.3.2 Discretização espacial dos dados de chuva

Os dados de chuva observada são originados de pluviômetros e pluviógrafos cuja distribuição espacial é inferior à discretização do modelo hidrológico o que torna necessário interpolar esses dados para obter valores em cada célula do modelo. A figura 4.11 apresenta a discretização do modelo hidrológico, utilizada nesta pesquisa. Na mesma figura ilustra-se o traçado da rede de drenagem considerada pelo modelo de grandes bacias (MGB).

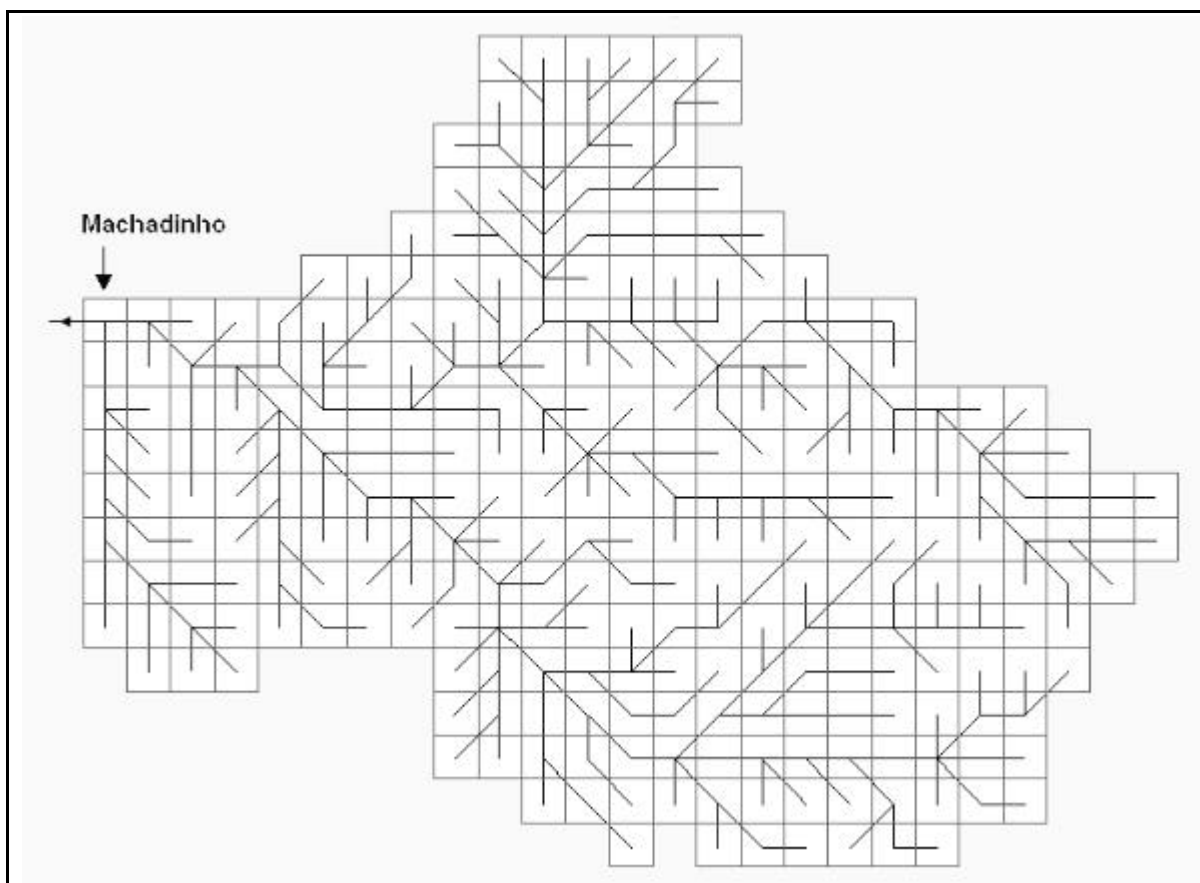


Figura 4.11. Discretização da bacia em células de 10 km  
(Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

A interpolação dos dados dos pluviógrafos para as células do modelo foi realizada

utilizando uma função de interpolação que utiliza apenas os postos com dados e aqueles que estão mais próximos do centro da célula. Esse procedimento é realizado de maneira automática pela rotina INTERPLU, desacoplada do MGB. A importância de cada posto escolhido no procedimento de interpolação é determinada por pesos, que são inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre o posto e o centro da célula. Esta função de interpolação é conhecida por “inverso da distância ao quadrado” e tem sido usada em muitas aplicações do modelo hidrológico com bons resultados (Collischonn, 2001). A interpolação dos dados de chuva prevista foi feita a partir de rotinas que lêem os dados de arquivos de previsão em formato GrADS (Software de manuseio de dados de previsão de chuva) e interpolam os valores de chuva para as células do modelo gerando, de cada previsão de 12 horas, 60 arquivos horários. Rotinas apropriadas foram desenvolvidas para compactar esses arquivos transformando-os em formato binário para entrada no modelo. Cada previsão de chuva (60 arquivos) é transformada em um único arquivo binário. Esses arquivos constituem em uma das entradas no MGB quando incorporada a previsão de chuva.

#### **4.4 Ajuste e verificação do modelo hidrológico**

##### **4.4.1 Ajuste do modelo hidrológico**

Como primeira estimativa dos parâmetros partiu-se de valores encontrados durante a simulação anterior da bacia do rio Uruguai (Collischonn 2001). A partir desta estimativa inicial, os parâmetros foram alterados buscando um bom ajuste entre hidrogramas observados e calculados em Machadinho e em dois postos fluviométricos localizados a montante de Machadinho: o posto Passo Caru, no rio Canoas, e o posto Passo do Socorro, no rio Pelotas. A área da bacia do rio Pelotas no local em que está o posto Passo do Socorro é de 8.400 km<sup>2</sup>, e a área do posto Passo Caru, no rio Pelotas, é de 9.800 km<sup>2</sup>. A área controlada por estes dois postos é, portanto, de 18.200 km<sup>2</sup>, o que corresponde a, aproximadamente, 57% da área de drenagem até a barragem de Machadinho.

O período completo de dados para ajuste corresponde ao período de maio de 2001 a setembro de 2003. Entre maio e setembro de 2001 existem poucos dados de pluviógrafos e foram, portanto, desconsiderados. Os dados de abril a setembro de 2003 foram utilizados para verificação. Assim, o período utilizado para a calibração se estende de setembro de



2001 a março de 2003.

Uma grande cheia ocorreu logo no início deste período. No dia 01/10/2001 a vazão no rio Pelotas no posto Passo do Socorro atingiu  $5.312 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (de acordo com a cota medida pelo linígrafo, às 11:00 do dia 01/10/2001). Na medição manual na régua a vazão do dia 01/10/2001 foi de  $5.119 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . No rio Canoas, em Passo Caru, o linígrafo apresentou problemas e a vazão máxima de  $2.578 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  foi registrada por leitura da régua no dia 02/10/2001. No reservatório de Machadinho, a vazão afluente máxima estimada por balanço hídrico atingiu  $13.787 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A precipitação total neste evento atingiu 200 mm em 24 horas em alguns postos da região. A precipitação média da bacia do rio Pelotas durante este evento, estimada através da interpolação dos dados no modelo distribuído, foi de 150 mm.

Os resultados da calibração foram avaliados através da análise visual do ajuste entre hidrogramas calculados e observados e pelos valores das funções objetivo. As funções objetivo consideradas foram os valores do coeficiente de Nash Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1973) e o erro no volume para os postos Passo Caru e Passo do Socorro, e da vazão afluente ao reservatório de Machadinho.

A tabela 4.1 apresenta o coeficiente de Nash Sutcliffe obtido em Machadinho e nos postos Passo Caru e Passo do Socorro, e o erro de volume, no período de calibração (set/2001 a mar/2003). Para um ajuste perfeito o coeficiente de Nash deve ser igual a 1, mas valores acima de 0,70 já mostram um ajuste razoável e valores acima de 0,80 podem ser considerados bons. Cabe ressaltar que, em períodos de cheia, o coeficiente de Nash Sutcliffe é tendencioso, porque é mais sensível aos erros nas vazões máximas do que nas vazões mínimas. Entretanto, como o objetivo da simulação é a previsão em tempo real, sobretudo das cheias, a utilização desta função objetivo pode ser considerada adequada. Os valores dos parâmetros são apresentados no anexo D e o significado de cada parâmetro é apresentado no anexo C.

Tabela 4.4. Valores das funções objetivo obtidos durante a calibração.

Função	Passo do Socorro	Passo Caru	Machadinho
Coeficiente de Nash-Sutcliffe (-)	0,81	0,85	0,89
Erro de volume (%)	+9,4	-8,3	-3,2

(Tucci, Collischonn e Andreolli 2003)

A figura 4.12 apresenta os hidrogramas observado e calculado no rio Uruguai em Machadinho. Observa-se que, após a cheia de outubro de 2001, ocorre um longo período, relativamente seco, que se estende até o inverno de 2002.

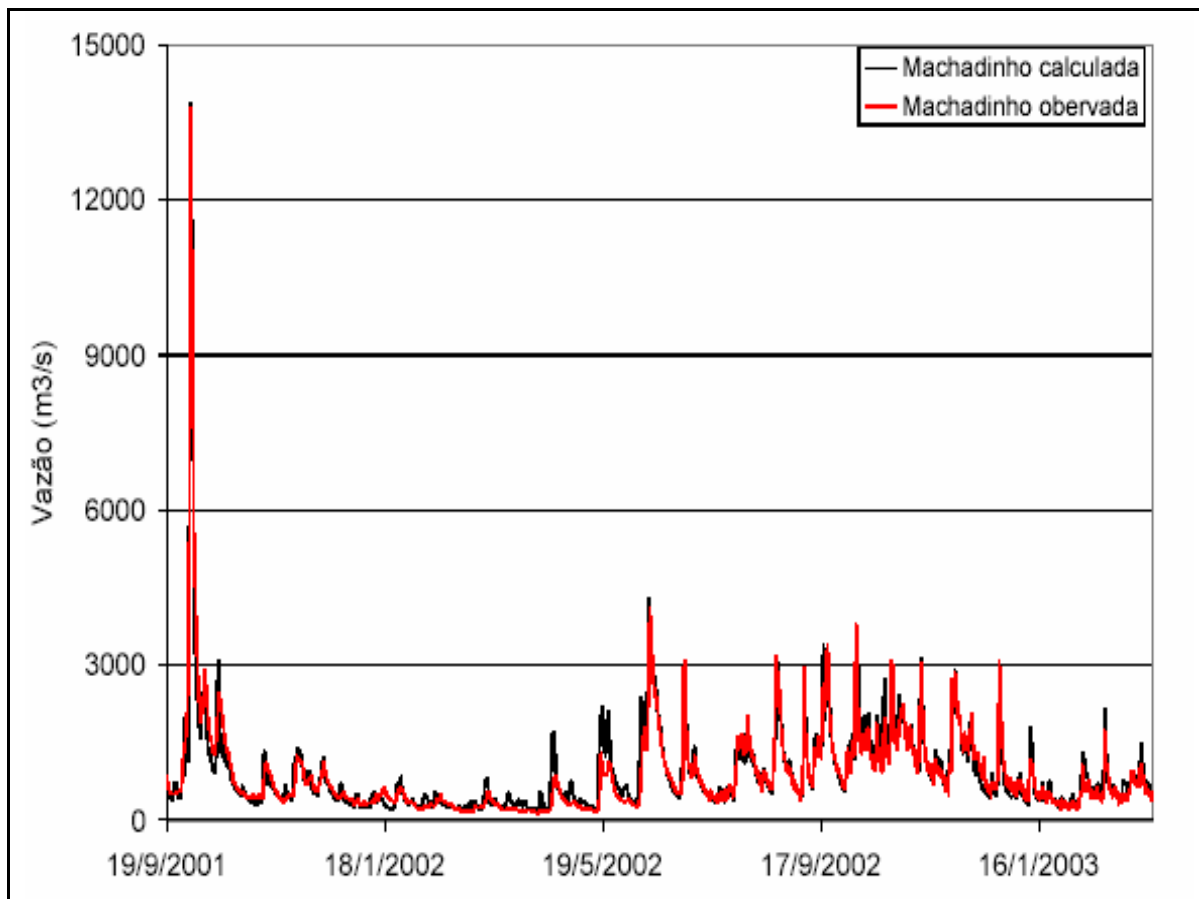


Figura 4.12. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho - calibração (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

A figura 4.13 apresenta os mesmos hidrogramas em detalhe durante a cheia de outubro de 2001. Pode-se observar na figura 4.13 que durante a cheia de outubro de 2001 o ajuste dos hidrogramas é excelente.

A figura 4.14 apresenta os mesmos hidrogramas da figura 4.12, com detalhe das cheias do inverno de 2002.

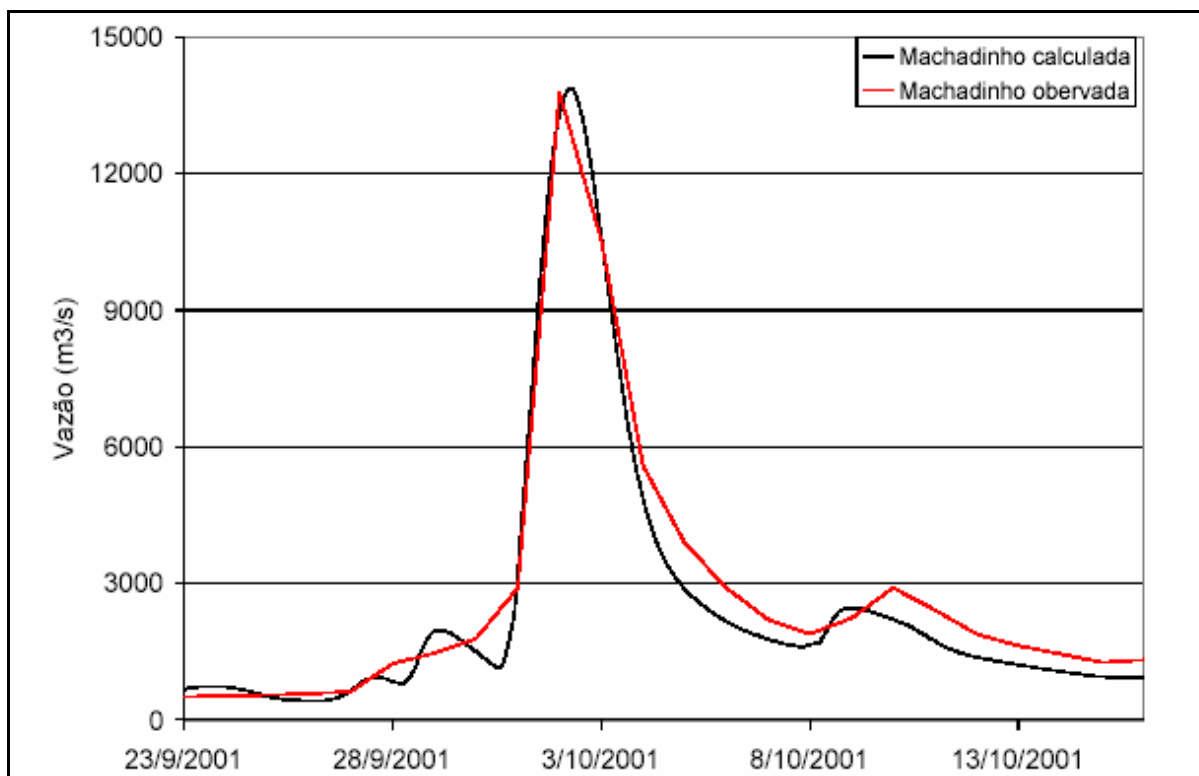


Figura 4.13. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho, maior evento de 2001 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

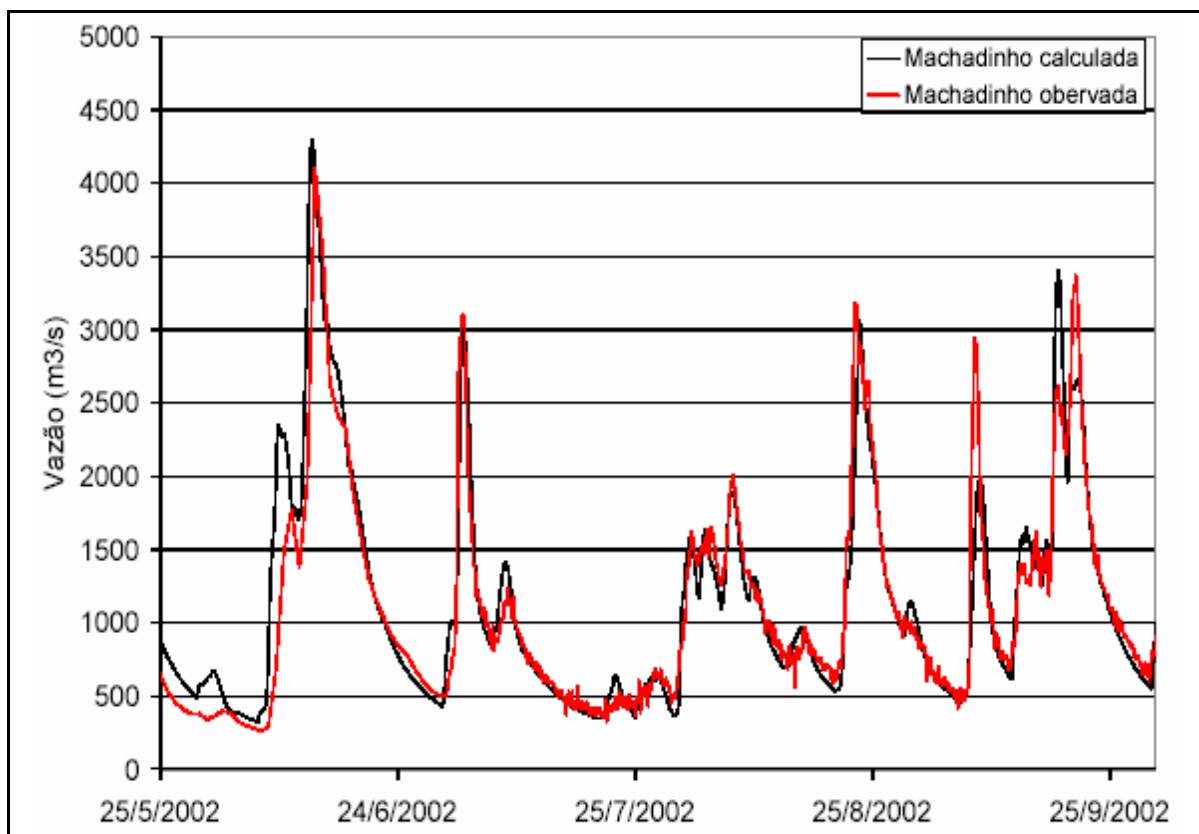


Figura 4.14. Hidrogramas observado e calibrado em Machadinho - inverno de 2002 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam respectivamente os hidrogramas calculados e calibrados para o posto Passo Socorro e Passo Caru, para o maior evento do período. Observa-se o excelente ajuste na subida dos hidrogramas para ambos os postos.

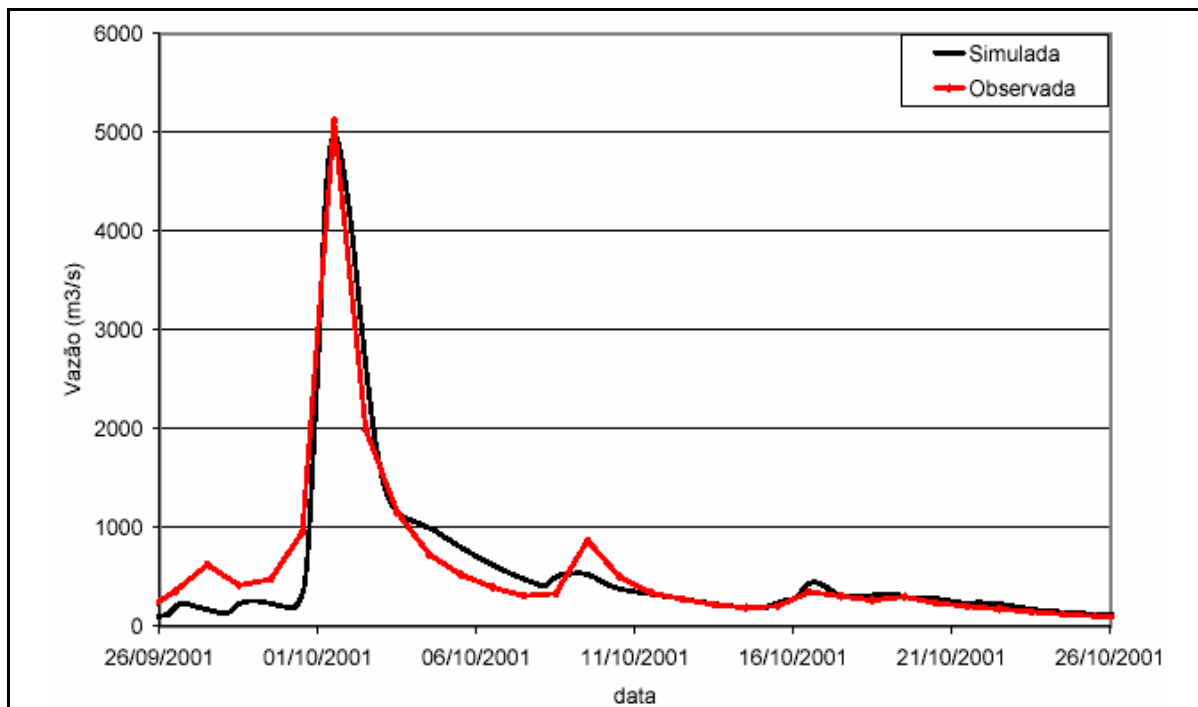


Figura 4.15. Hidrogramas observado e calibrado Passo Socorro, maior evento de 2001 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

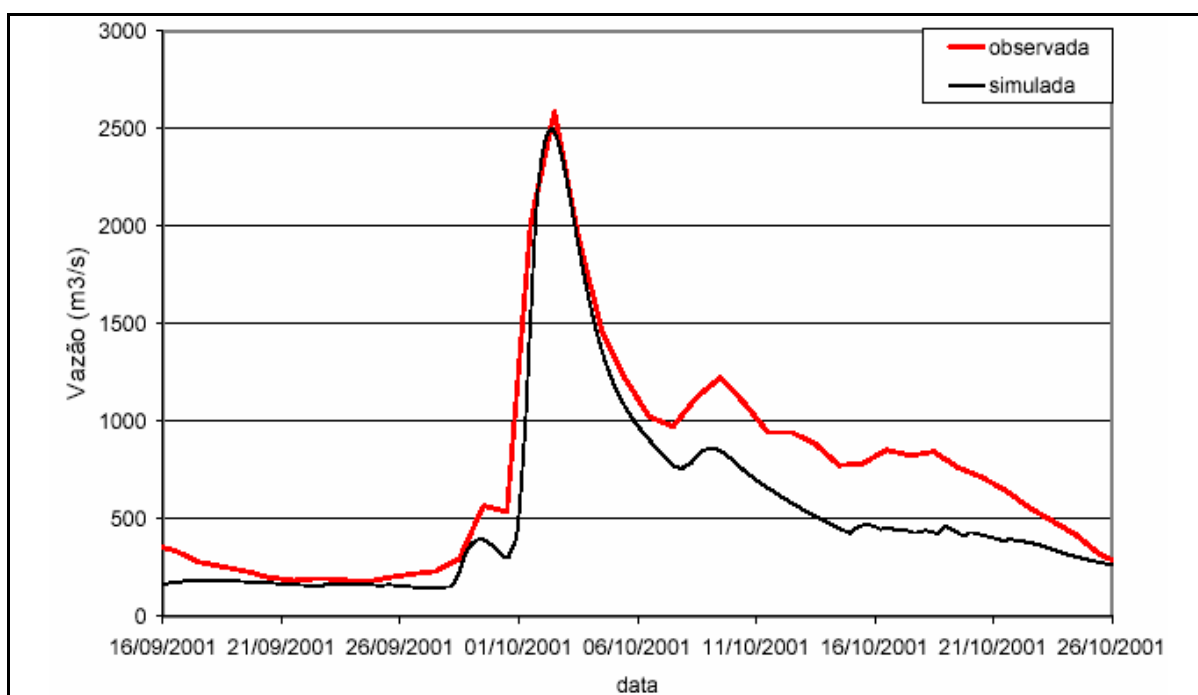


Figura 4.16. Hidrogramas observado e calculado Passo Caru, maior evento de 2001 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

Ainda são apresentados, pelas figuras 4.17 e 4.18, os hidrogramas calculados e calibrados para o período chuvoso de 2002, para os postos Passo Socorro e Passo Caru.

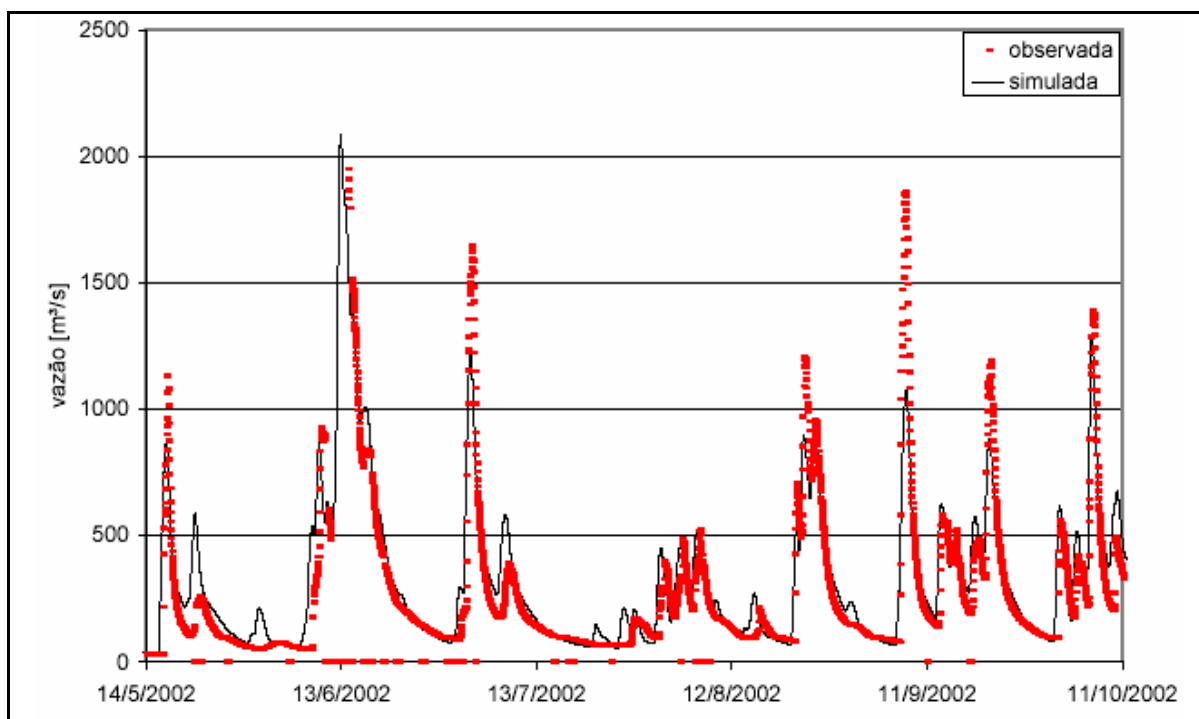


Figura 4.17. Hidrogramas observado e calibrado em Passo Socorro - inverno de 2002 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

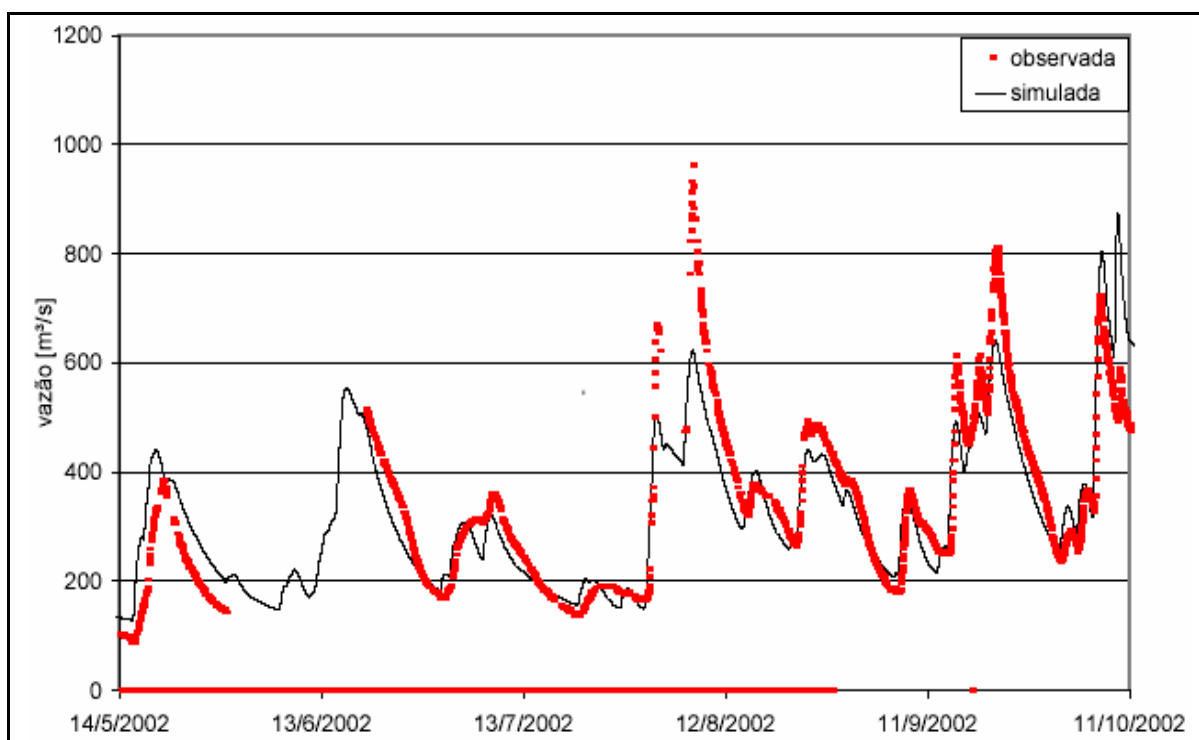


Figura 4.18. Hidrogramas observado e calibrado em Passo Caru - inverno de 2002 (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003)

Observa-se uma certa dificuldade de ajuste no hidrograma do posto Passo Caru (Bacia do Rio Canoas). Em parte a dificuldade é associada aos dados de vazão que apresentaram muitas falhas e provavelmente apresentam erros nas leituras. No gráfico da figura 4.18, observa-se visualmente as falhas pela linha vermelha contínua sobre o eixo horizontal. Na figura 4.17, posto Passo do Socorro, também se pode observar falhas pelos pontos vermelhos sobre o eixo horizontal, porém a ocorrência é menor que na situação do posto Passo Caru.

#### 4.4.2 Verificação do modelo hidrológico

Com os dados de chuva e vazão observada durante os cinco meses de simulação contínua (mai/set de 2003) foi feito a verificação do ajuste do modelo já que este período não foi utilizado para calibração. Porém, o período foi caracterizado por eventos de baixa magnitude com chuvas médias, abaixo da média histórica. A calibração do modelo foi baseada no coeficiente de NS que contempla a faixa de vazões de cheia, ou seja, esta função objetivo contempla o ajuste de vazões máxima. Assim é esperado que o modelo não se ajuste tão bem a este período, porque foi seco. A vazão média de abril a setembro de 2002 ficou próxima a  $1.144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Já a vazão média do mesmo período para 2003 ficou próxima a  $358 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

A figura 4.19 apresenta a simulação para o período de previsão contínua para a seção de Machadinho. Pela análise gráfica nota-se que o ajuste é bom para eventos acima de  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ou em períodos de recessão. O ajuste é ótimo para o evento máximo do período que ocorreu em 30/04/2003 a 06/05/2003. Nota-se que para eventos de baixa magnitude o ajuste foi ruim conforme esperado. A figura 4.20 apresenta em detalhe o ajuste gráfico ao maior evento do período na seção de Machadinho.

A tabela 4.5 apresenta algumas estatísticas da simulação para o período. Apesar do ajuste não ter sido tão bom para alguns eventos o coeficiente de Nash ficou em 0,82 para a seção de Machadinho o que é considerado bom. O erro no relativo de volume ficou próximo à 6%, ou seja, foi simulado um volume maior em 6% no período.

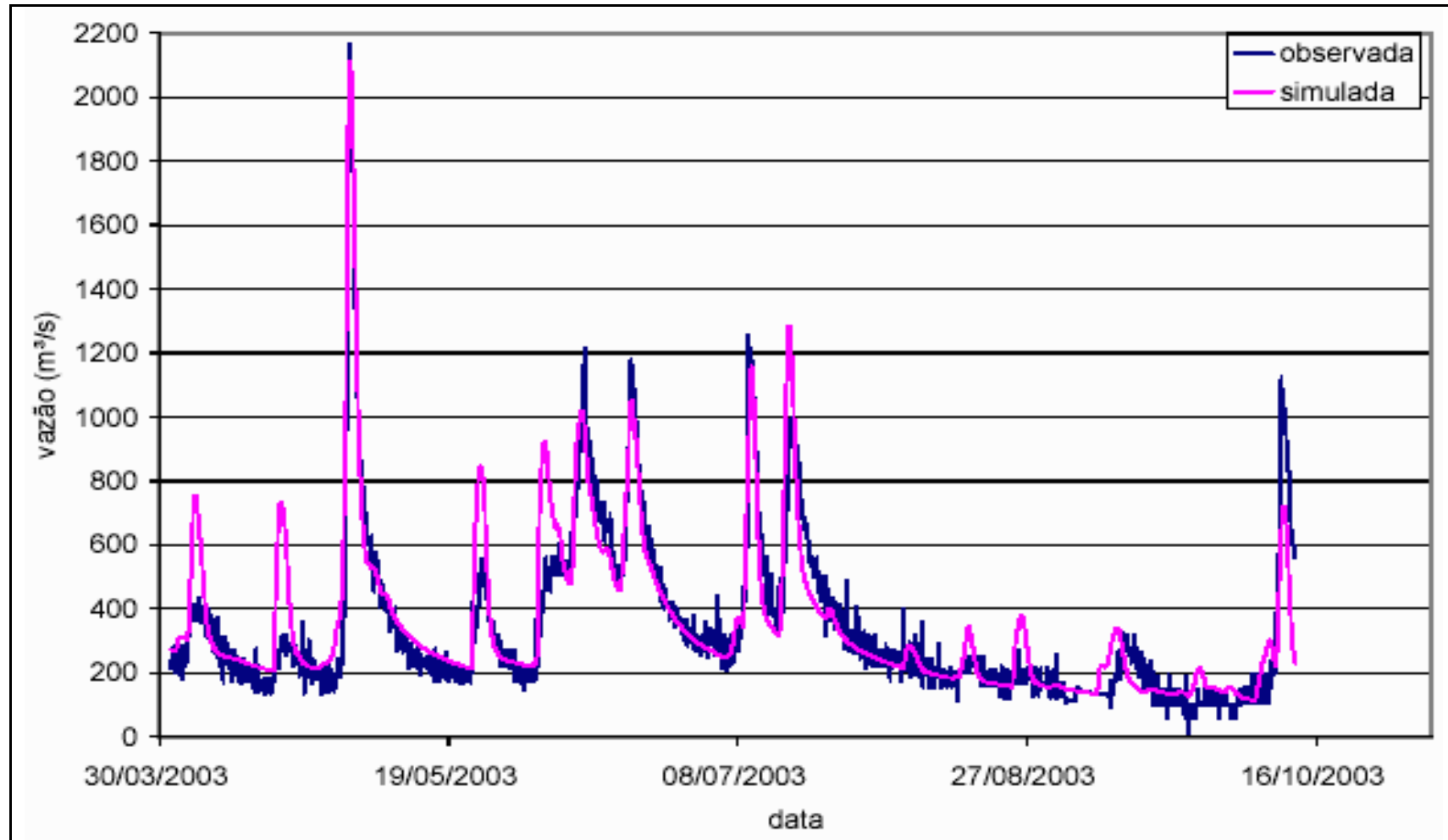


Figura 4.19. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua - Machadinho

As estatísticas não foram tão boas para as demais seções verificadas, principalmente para o posto Passo Caru. Parte dos resultados ruins desse posto foram atribuídos aos dados observados que apresentaram falhas. É possível também que a curva chave da seção esteja subestimando as vazões. Muito embora o resultado da verificação desse posto tenha sido ruim, o erro está principalmente nas vazões de base conforme pode se observar na figura 4.22. Essas vazões são corrigidas na previsão com as formas de atualização propostas e os erros são, dessa forma, minimizados.

Tabela 4.5. Estatísticas da verificação da simulação

Local	Coefficiente de Nash (NS)	Erro padrão	Erro padrão no volume ( $\Delta V$ )
Machadinho	0,8	123,2 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5,22%
Passo Socorro	0,67	76,02 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	-15,62%
Passo Caru	0,33	53,67 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	29,52%

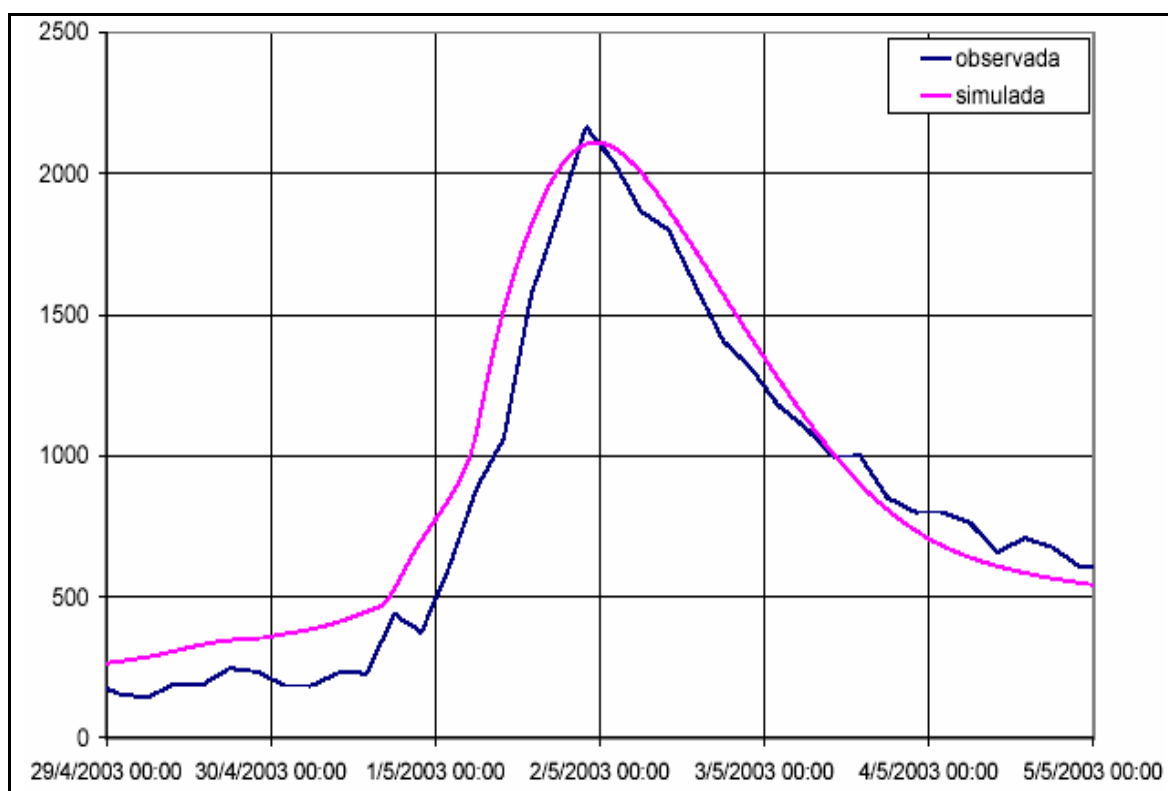


Figura 4.20. Detalhe da simulação do maior evento do período



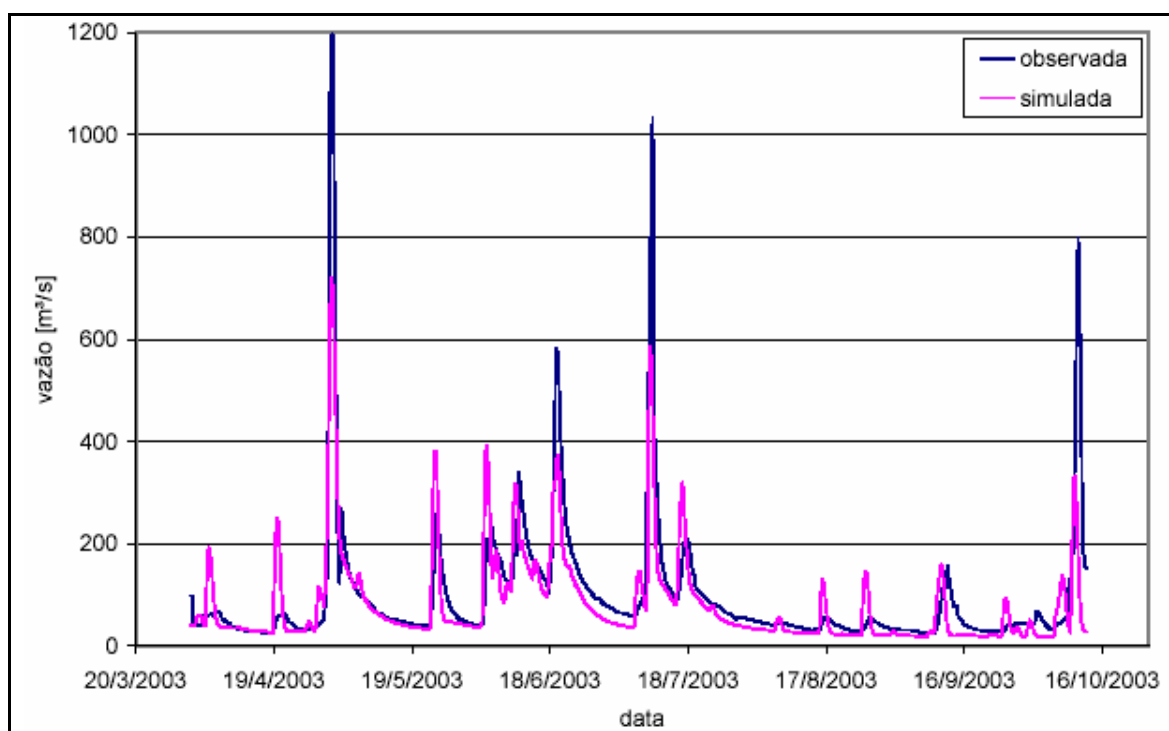


Figura 4.21. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Socorro

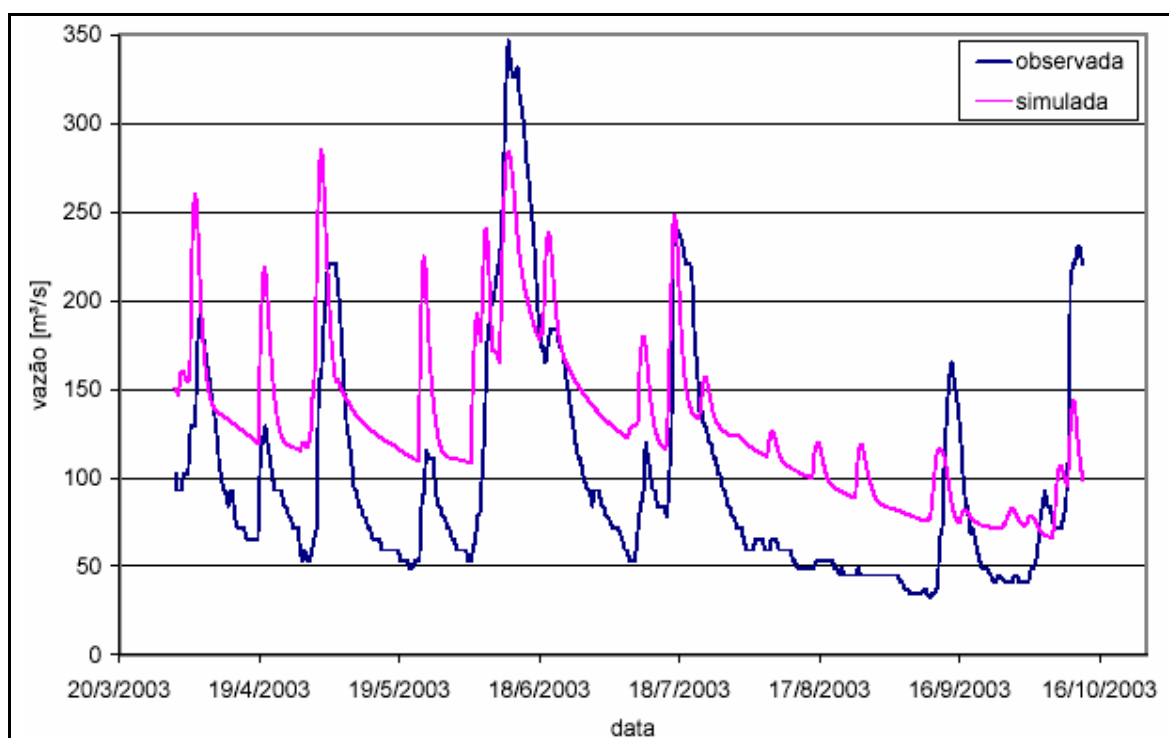


Figura 4.22. Hidrograma simulado/observado no período de previsão contínua – Passo Caru

#### 4.5 Avaliação do efeito da atualização do modelo hidrológico

A previsão em tempo real pode ser feita com atualização, ou sem atualização. Nesta pesquisa as duas formas de previsão foram testadas. A análise do desempenho dos modelos que utilizam as formas de atualização frente aos convencionais foi feita através das estatísticas apresentadas anteriormente (RD,  $\Delta V$ , Ep).

A técnica de atualização do modelo hidrológico em tempo real utilizada nesta pesquisa está baseada na utilização de dados medidos nos rios Canoas e Pelotas (disponíveis em tempo real de hora em hora nos postos telemétricos) e das vazões afluentes ao reservatório de Machadinho (obtidos em intervalos de 4 em 4 horas).

A figura 4.23 apresenta o fator RD como função da antecedência para os modelos chuva zero e chuva observada, com e sem atualização. Nessa figura, as curvas de mesma cor aparecem aos pares e representam o mesmo modelo de previsão, com e sem atualização. Primeiramente observa-se que as curvas dos modelos com atualização sempre se antecipam às outras, ou seja, utilizando a atualização existem ganhos ao se utilizar os modelos propostos frente à persistência ainda em horizontes iniciais. Comparando, por exemplo, o modelo chuva zero com e sem atualização, existe ganho na previsão com atualização próximo a 4 horas, já o sem atualização só fornece algum ganho a partir da hora 10. Observa-se que as curvas do modelo chuva zero se cruzam próximo a 28 horas. Esse fato não é trivial, pois, aparentemente, a atualização tende a melhorar as previsões sempre. O fato da atualização não acrescentar ganhos na previsão em horizontes longínquos pode ser explicado pelo tempo de concentração da bacia. Ao se considerar, por exemplo, um fator de correção na previsão de 40 horas, está se corrigindo uma vazão prevista para 40 horas à frente. À exceção de períodos secos, a vazão no tempo atual não explica a vazão 40 horas à frente e usá-la para correção é inserir mais erros na previsão. O ganho da atualização é mais visível nos horizontes iniciais e decresce de forma não linear com o aumento do horizonte de previsão, representado pela aproximação dos pares de curvas.

A figura 4.24 apresenta a redução relativa do erro no volume em função do horizonte de previsão dos modelos atualizados frente aos convencionais. A redução do erro

apresentada nas figuras, 4.24 e 4.25, não representam a redução do erro em relação aos dados observados, e sim, o ganho em relação ao modelo sem atualização.

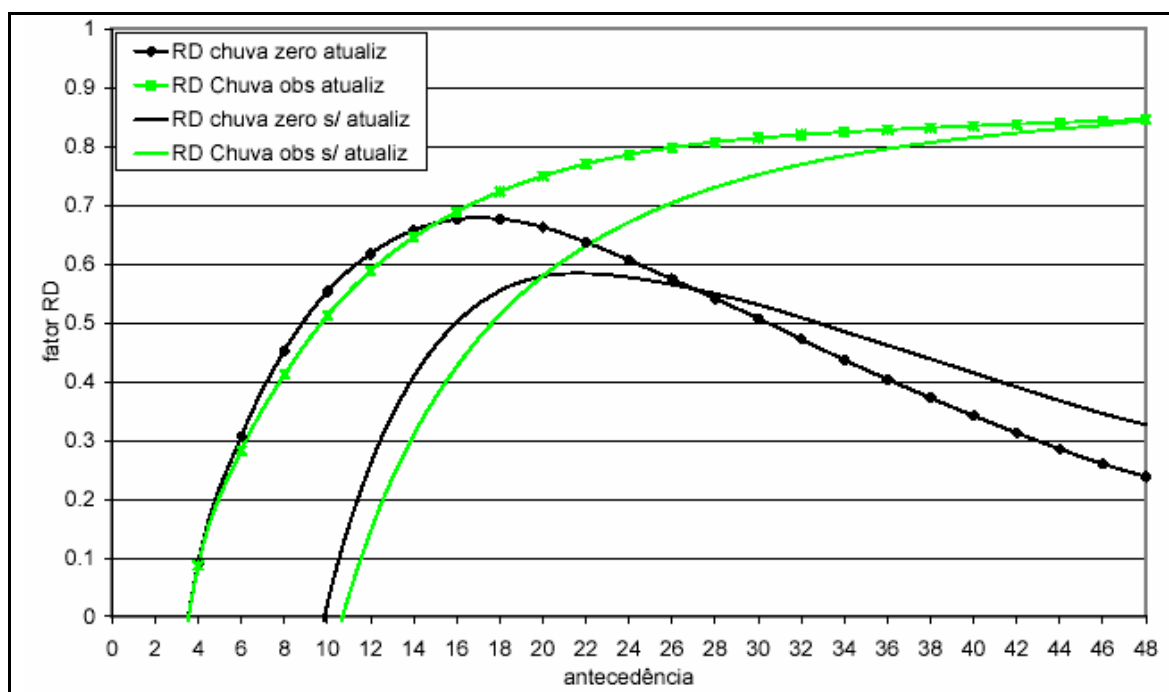


Figura 4.23. RD em função da antecedência da previsão, com e sem atualização

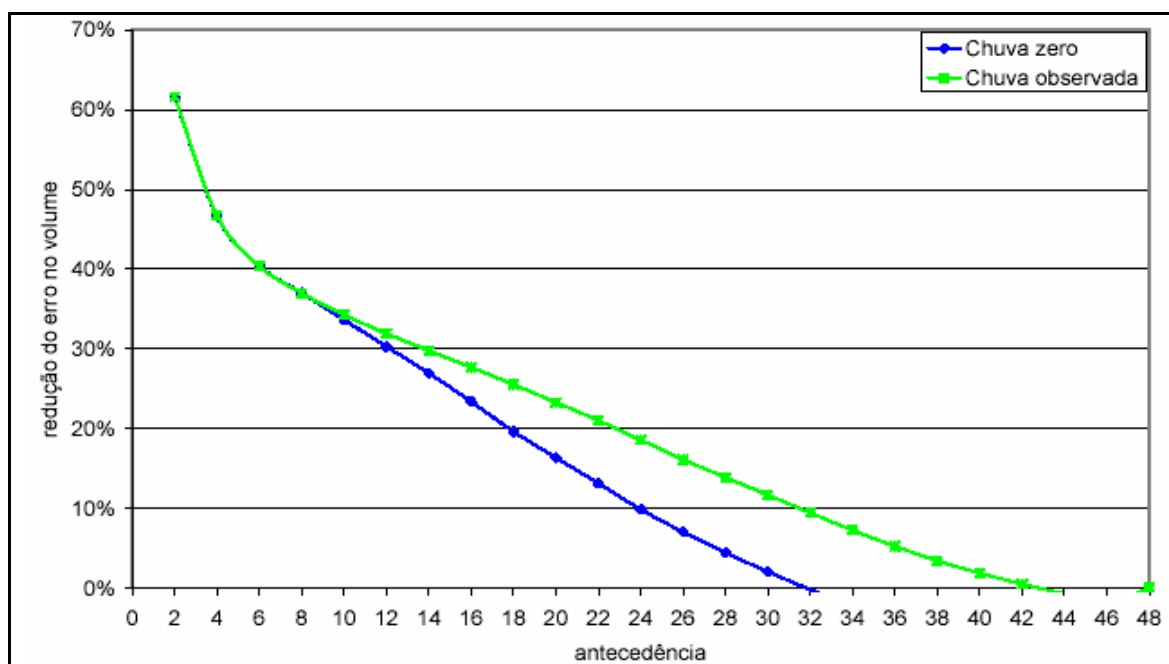


Figura 4.24. Benefícios com a atualização em termos de redução do erro no volume

Primeiramente na figura 4.24 observa-se que a redução do erro no volume é mais sensível em horizontes baixos e decresce de forma não linear, conforme esperado. Observa-se que a curva do modelo chuva zero cruza o eixo das abscissas, aproximadamente no horizonte 33h. Ou seja, em horizontes superiores a 33h é melhor utilizar os modelos sem atualização. Esta estatística é particularmente interessante para previsão de afluência em reservatórios com finalidades de geração de energia, pois, nesses casos, o interesse maior não está no acerto da vazão e sim no volume de afluência. Considerando esta estatística, e considerando o desempenho dos modelos propostos, poder-se-ia escolher o melhor modelo para o horizonte de interesse, e então utilizar as formas de atualização somente em horizontes abaixo de 33 horas. É importante não esquecer que o período analisado não é representativo e o desempenho dos modelos e das formas de atualização pode ser bem diferente do que está sendo apresentado neste estudo se avaliadas em um período mais longo.

A figura 4.25 mostra a redução do erro padrão em termos relativos aos modelos sem atualização quando se utiliza a atualização.

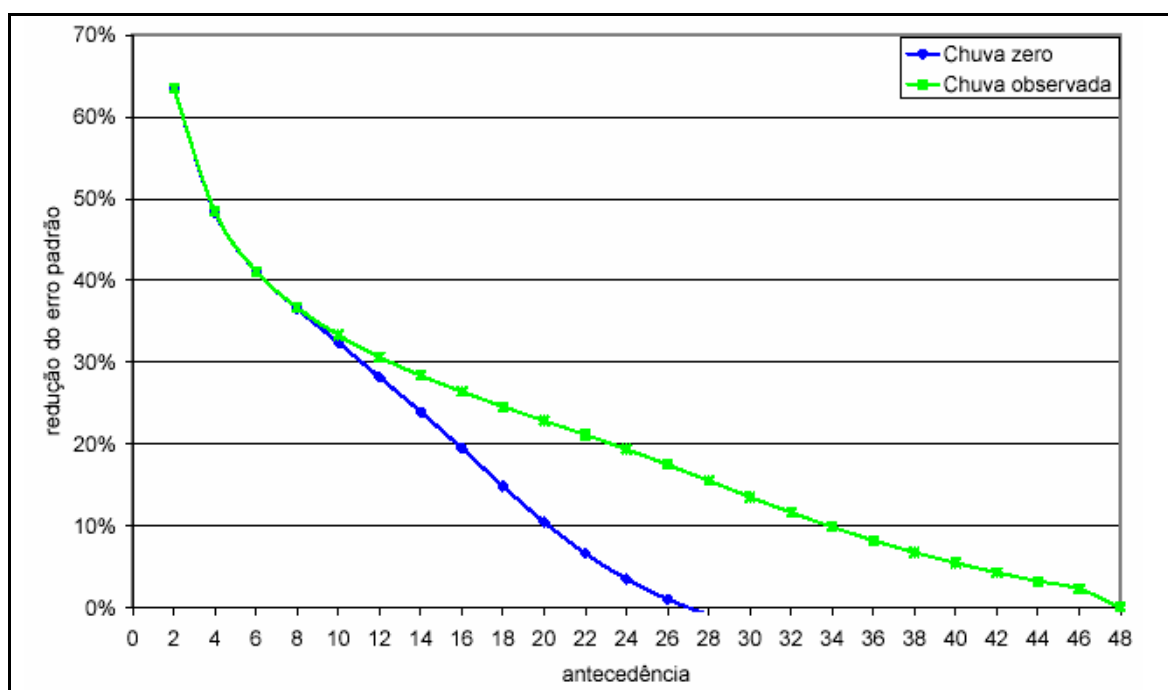


Figura 4.25. Benefícios com a atualização em termos de redução do erro padrão

Novamente se observa a não linearidade da redução com a antecedência. Esta figura, de certa forma, confirma a estatística do RD apresentada na figura 4.23, mostrando que o ganho com atualização atinge um horizonte máximo o qual é função do modelo de previsão.

As formas de atualização propostas levam em consideração períodos de estiagem e chuvosos, ponderando os efeitos mais importantes de acordo com o que é observado em termos de vazão em Machadinho, Caru e Socorro. Talvez os ganhos evidenciados nos gráficos apresentados mudem ao se utilizar períodos mais chuvosos, porque a forma adotada de atualização para esses períodos ficou prejudicada nessa análise pela baixa magnitude dos eventos analisados e da baixa frequência de cheias. Desconsiderando esses fatos, fica evidente a importância da atualização dos modelos de previsão propostos.

É importante lembrar que a atualização proposta está baseada nos dados de vazão dos postos: Passo Caru, Passo do Socorro e Machadinho. Os dois primeiros postos controlam aproximadamente 57% da área da bacia, porém não foram utilizados os dados de vazão horária devido aos erros nas leituras de nível dos sensores. É provável que a utilização de dados horários nesses postos venha acrescentar mais ganhos nas formas de atualização. A atualização poderia ainda incluir outras áreas, e também fragmentar as do Passo Caru e Socorro. O rio Inhandava, por exemplo, é um importante contribuinte para o reservatório de Machadinho e responde rápido aos eventos chuvosos, pois contribui diretamente ao reservatório. Um posto telemétrico de vazão nesse rio poderia incrementar os ganhos com a atualização.

#### **4.6 Previsão de eventos**

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida durante o projeto de pesquisa Tractebel, (Tucci, Collischonn e Andreolli, 2003). Os resultados já foram publicados em relatório de pesquisa segundo normas da ANEEL. Entretanto, estes resultados são reapresentados aqui com o intuito de complementar a análise.

Haja vista que a atualização melhora as previsões, as simulações apresentadas no

decorrer desta pesquisa incluem a atualização. Apesar de não terem sido apresentados, no item que trata sobre atualização os modelos que consideram a previsão de chuva, o comportamento observado foi análogo. No anexo E apresenta-se a curva RD com todos os modelos propostos, com e sem atualização.

A previsão meteorológica operacional gera uma grande quantidade de dados, que são disponibilizados através de boletins, gráficos e figuras na Internet. Estes arquivos são armazenados temporariamente, mas são sistematicamente eliminados passados alguns dias, porque exigem uma grande capacidade de armazenamento de informações que, normalmente não está disponível. Este é o caso das previsões do modelo ARPS, utilizadas nesta pesquisa. Além disso, nesse período o modelo ARPS estava em fase de implementação com troca do sistema de processamento paralelo e modificações do modelo para se adequar à física local (Haas et al., 2002). Ou seja, em grande parte do período as previsões não foram feitas de forma operacional o que inviabilizou a previsão contínua para todo o período. Assim, embora as previsões meteorológicas com este modelo ocorram desde 2001, os arquivos das previsões não estão disponíveis para todo este período, com exceção de alguns eventos isolados. A previsão para estes eventos isolados é interessante porque correspondem, justamente, a alguns eventos de cheias. Foram analisados três eventos neste período: 30/09/2001 a 04/10/2001 (setembro e outubro de 2001); 08/11/2002 a 15/11/2002 (meio de novembro de 2002); 25/11/2002 a 02/12/2002 (final de novembro de 2002).

#### **4.6.1 Evento de setembro e outubro de 2001**

Este foi o maior evento que ocorreu em todo o período (2001 a 2003), ocorrendo quando estava sendo finalizado o primeiro enchimento do reservatório de Machadinho. A precipitação ocorreu nos dias 30/09 e 01/10, com maior intensidade no período das 06:00 do dia 30/09 até às 11:00 do dia 01/10, e atingiu pouco menos de 200 mm nos postos de Vacaria, Lagoa Vermelha e Lages, que ficam na região sul da bacia. Na região norte da bacia a precipitação foi menos intensa, atingindo 130 mm no posto Passo Caru, e pouco mais de 60 mm em Campos Novos. Esta precipitação resultou em uma grande cheia, originada especialmente na sub-bacia do rio Pelotas, que atingiu a vazão máxima

instantânea de, aproximadamente,  $5.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  no posto Passo do Socorro. De acordo com as estimativas por balanço hídrico, a vazão máxima diária afluente ao reservatório de Machadinho foi de  $14.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

As previsões de chuva disponibilizadas para este evento foram:

i) Previsão com o modelo ARPS de resolução 40 km, aplicado com as condições iniciais correspondentes às 21:00 do dia 29/set (ou 00:00 do dia 30/set em horário de Greenwich); com resultados para o período de 60 horas estendendo-se das 21:00 do dia 29/set até às 09:00 do dia 02/out.

ii) Previsão com o modelo ARPS de resolução 10 km, aplicado com as condições iniciais correspondentes às 21:00 do dia 29/set (ou 00:00 do dia 30/set em horário de Greenwich); com resultados para o período de 50 horas estendendo-se das 07:00 do dia 30/set até às 09:00 do dia 02/out.

iii) Previsão com o modelo ARPS de resolução 04 km, aplicado com as condições iniciais correspondentes às 21:00 do dia 29/set (ou 00:00 do dia 30/set em horário de Greenwich); com resultados para o período de 26 horas estendendo-se das 07:00 do dia 30/set até às 09:00 do dia 01/out.

Em todas as previsões os dados de chuva observada nos pluviômetros e pluviógrafos foram utilizados até o instante  $T_0$ . A partir deste instante foram utilizadas as chuvas previstas pelo modelo meteorológico nas suas diferentes resoluções. Diversos horizontes foram simulados, porém a previsão de chuva é única e originada no tempo  $T_0$  que depende de cada discretização do modelo de chuva, ou seja, para este evento as previsões de chuva não foram atualizadas. Por exemplo, a previsão com ARPS 40 foi feita com antecedência entre 24 e 48 horas, para antecedência de 48 horas é incorporada a chuva observada até o instante zero e então chuva prevista até o horizonte 48h, para 24 horas é incorporada a chuva observada até o instante zero que avançou 24 horas em relação à previsão de 48h, porém a previsão de chuva no horizonte 24 continua sendo a previsão inicial de 60 horas. Para comparação foram realizadas, também, previsões considerando que a precipitação a

partir do instante  $T_0$  é nula.

As figuras 4.26 a 4.30 mostram os resultados da previsão de vazão, juntamente com a vazão observada e a vazão simulada utilizando os dados de precipitação observada.

Primeiramente deve-se observar que a vazão observada (linha preta com pontos) e a vazão simulada pelo modelo hidrológico, utilizando os dados de chuva observada (linha azul claro), apresentam a mesma magnitude do pico, porém mostram diferenças no tempo do pico. Infelizmente, não é possível definir com precisão a hora do dia em que ocorre o pico da vazão observada, porque esta vazão é estimada a partir do balanço hídrico do reservatório, que, para este evento, foi realizado em intervalo de tempo diário. Por isto, o ajuste entre hidrogramas observado e calculado foi considerado bom para este evento.

A figura 4.26 apresenta a previsão de vazão realizada no instante  $T_0=07:00$  horas do dia 30/set se prolongando em 48 horas para chuva zero, ARPS 40 e ARPS 10 e 27 horas para ARPS 04. Neste instante a vazão afluente ao reservatório de Machadinho é de, aproximadamente,  $2.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . A precipitação acumulada na bacia, ainda é pequena, atingindo no máximo 20 mm em Vacaria. Em consequência disso, a previsão de vazão considerando chuva nula a partir de  $T_0=07:00$  horas (linha azul escuro) indica uma redução da vazão nas próximas 48 horas. Por outro lado, as previsões de vazão baseadas na previsão de chuva do modelo ARPS de 40 km (linha vermelha) indicam que a chuva poderá aumentar a vazão afluente chegando  $2.847 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em 40 horas, e as previsões com o modelo ARPS de 10 km (linha amarela) indicam que a vazão afluente poderá chegar a  $5.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em 42 horas. O horizonte das previsões com o modelo ARPS de 4 km (linha rosa) não permitem avançar a previsão de vazão além da manhã do dia 01/out (27 horas), mas indicam um crescimento do hidrograma ainda mais rápido do que o previsto com base no modelo ARPS de 10 km chegando a  $3.805 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em 27 horas.

A figura 4.27 mostra as previsões realizadas no instante  $T_0=12:00$  horas do dia 30/set, ou seja, com antecedência inferior em 5 horas em relação a situação anterior, quando a precipitação acumulada no sul da bacia já chega a 70 mm, desde o início do evento. Mesmo assim, a vazão afluente ao reservatório, neste momento, ainda é inferior a  $3.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , de



acordo com os dados observados (linha preta com pontos). Neste momento, utilizando as mesmas previsões de chuva (rodada dos modelos iniciada às 21:00 horas do dia 29/set, em horário local), as previsões de vazão já indicam um crescimento maior do hidrograma nas próximas horas. As previsões baseadas no modelo ARPS de 40 km (linha vermelha), cuja antecedência é de 43 horas, indicam um pico de  $4.650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  com 31 horas de antecedência, as do modelo ARPS de 10 km, cuja antecedência é de 43 horas, indicam um pico de  $7.100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em 35 horas e as baseadas no modelo ARPS de 4 km, cuja antecedência é de 22 horas, indicam um crescimento até  $8.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ainda antes de atingir o pico, em 33 horas de antecedência.

Embora a chuva observada até este momento ( $T_0=12:00$  horas do dia 30/set) seja significativa em alguns locais, ela ainda é muito concentrada no sul da bacia. Em consequência disso, a vazão prevista com chuva nula a partir de  $T_0$  mostra um crescimento pequeno, não chegando a atingir  $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (linha azul escuro na figura 4.27).

A figura 4.28 mostra as previsões de vazão realizadas no instante  $T_0=18:00$  horas do dia 30/set, quando a precipitação acumulada na bacia já supera 100 mm em alguns locais, e já atinge também a bacia do rio Canoas (região norte da bacia). Neste momento, a previsão com base na precipitação nula a partir do tempo  $T_0$  (antecedência de 37 horas) indica que o pico da cheia será de  $8.170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (linha azul escuro na figura 4.28). Este resultado é muito importante, porque esta previsão de pico tem antecedência de 24 horas e porque representa uma estimativa do limite mínimo que o pico pode atingir. As previsões de vazão baseadas na previsão de precipitação do modelo ARPS 40 cuja antecedência é de 37 horas indica uma vazão de  $8.658 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em 27 horas. Já a previsão pelo ARPS 10 cuja antecedência é de 37 horas indica uma vazão de  $11.936 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em 28 horas. A previsão pelo ARPS 04 tem antecedência apenas de 16 horas não chegando ao pico e indicando uma vazão de  $8.622 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

O que se observa nas figuras sequenciais é que a inclusão de novos dados observados no sistema de previsão permite melhorar a previsão de vazão à medida que avança o tempo, mesmo que os dados de previsão de precipitação utilizados sejam sempre os mesmos, como mostram as figuras 4.26 até 4.30. A figura 4.29, por exemplo, mostra que considerando o

instante  $T_0=24:00$  horas do dia 30/set (31 horas de antecedência máxima), a previsão de vazão indica vazão de pico entre  $11.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (linha azul escuro = vazão prevista com base na chuva nula a partir de  $t_0$ ) e  $15.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (linha amarela = vazão prevista com base na previsão do modelo ARPS 10 km).

Finalmente, na previsão iniciada no tempo  $T_0=06:00$  do dia 01/out (antecedências de 25 horas para ARPS 40, ARPS 10, e chuva zero e antecedência de 4 horas para ARPS 04), a exceção do ARPS 04, todas as previsões realizadas indicam que o pico da vazão será de, aproximadamente,  $14.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  com antecedência próxima a 20 horas, como de fato ocorreu (figura 4.30). O modelo ARPS 04 não conseguiu atingir o horizonte de pico ficando defasado aproximadamente 16 horas.

Portanto, no caso do evento de 30 de setembro e 01 de outubro de 2001, quando a vazão afluente ao reservatório de Machadinho atingiu cerca de  $14.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , as previsões de vazão com base na previsão de chuva indicaram um aumento significativo das vazões, com antecedência de mais de 30 horas, entretanto subestimaram a magnitude do pico. Para tempos de antecedência entre 20 e 30 horas, a vazão de pico prevista indicou valores mais próximos aos observados (de pouco menos de  $9.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  a quase  $15.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Finalmente, para 20 horas de antecedência, todos os tipos de previsão indicaram a vazão de pico de aproximadamente  $14.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , como o valor observado. Para esta bacia e para o reservatório de Machadinho o importante não é o acerto do pico, mas os volumes totais afluentes ao reservatório, permitindo sua operação eficiente. Considerando que o volume afluente é conhecido é possível definir quanto a Usina poderá gerar em cada intervalo operacional. Na simulação apresentada observa-se que somente quando o tempo da simulação fica próximo da ocorrência da precipitação máxima obtêm-se volumes observados próximos dos previstos, indicando uma certa dificuldade de se antecipar o volume de precipitação.

Com relação às diferentes versões do modelo ARPS, com resolução espacial de 40 km, 10 km e 4 km, esperava-se uma redução do erro da previsão de chuva com o aumento da resolução espacial. Em outras palavras, o modelo ARPS de 4 km deveria resultar em previsões melhores do que as do modelo ARPS de 10 km e este em previsões melhores do

que as do modelo ARPS de 40 km. No evento de setembro e outubro de 2001, analisado aqui, isto ocorreu, de fato. As previsões de vazão baseadas nas previsões do modelo ARPS de 10 km de resolução foram mais corretas do que as do modelo ARPS de 40 km. As previsões do modelo ARPS de 4 km de resolução, embora com um horizonte mais curto, resultaram em previsões mais corretas da subida do hidrograma do que as previsões do modelo ARPS 10 km.

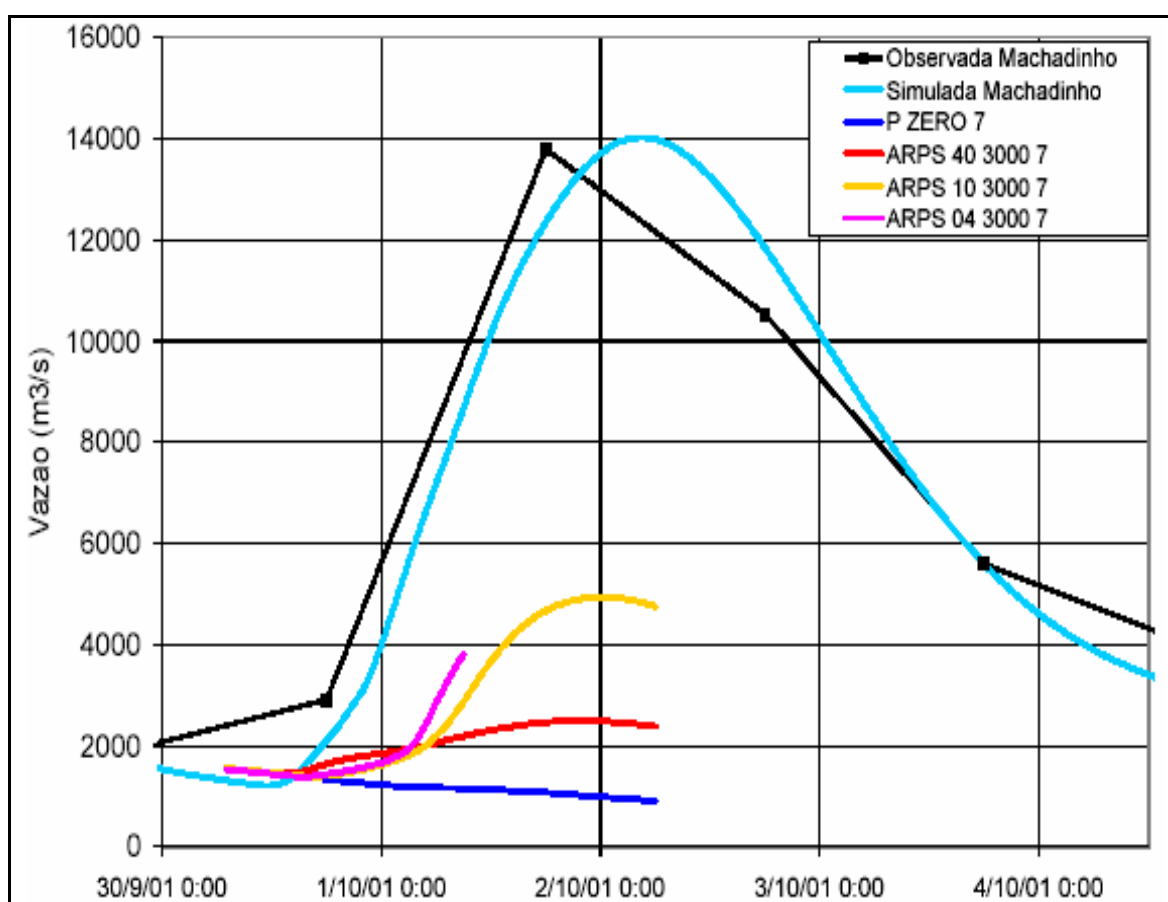


Figura 4.26. Previsão 30/09/01: 07:00h – antecedência máxima de 48 horas

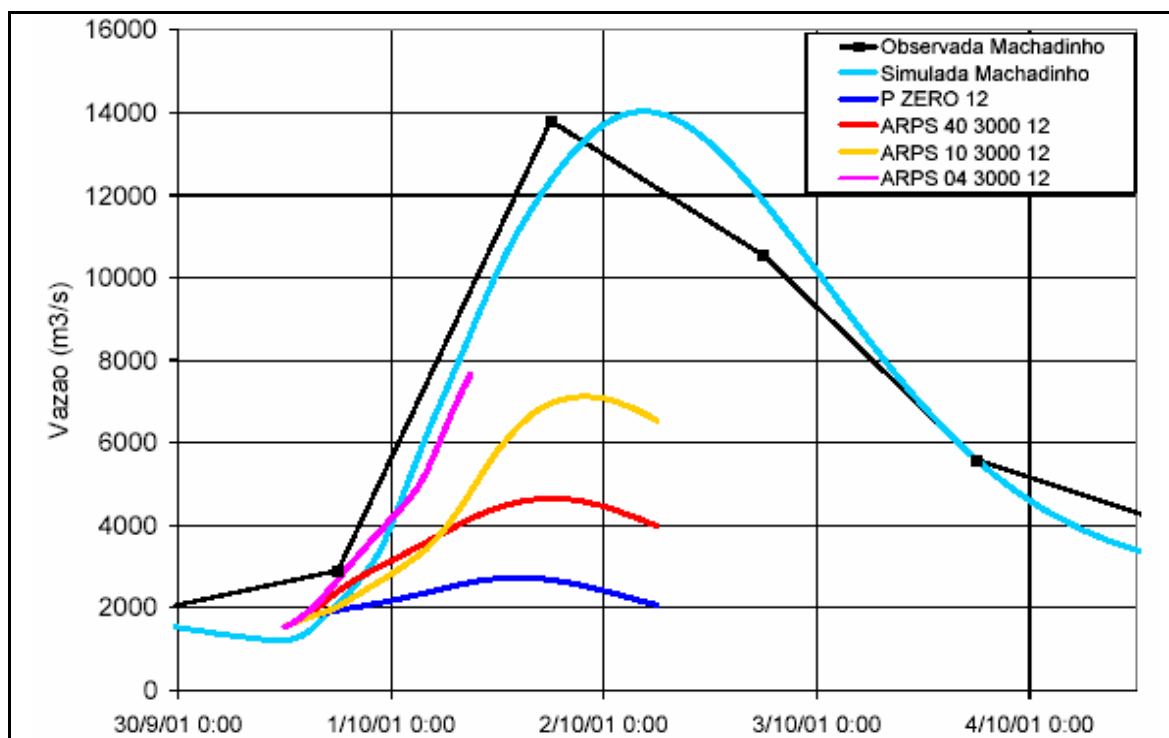


Figura 4.27. Previsão 30/09/01: 12:00h – antecedência máxima de 43 horas

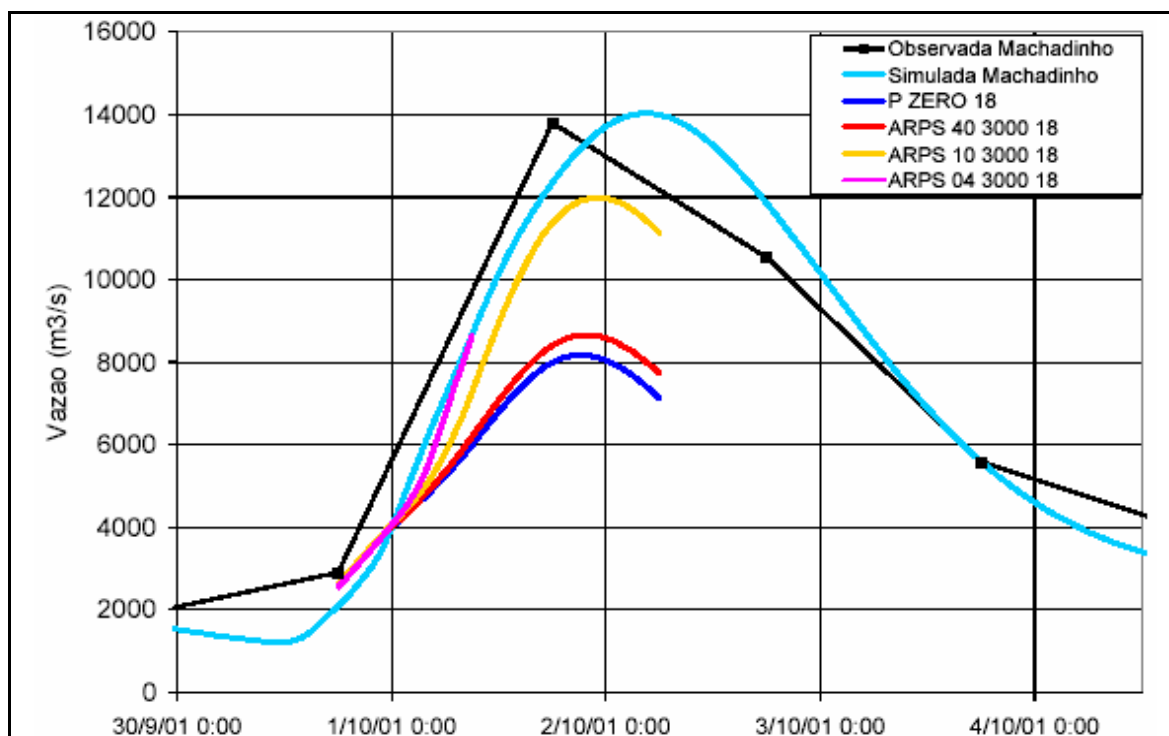


Figura 4.28. Previsão 30/09/01: 18:00h – antecedência máxima de 37 horas

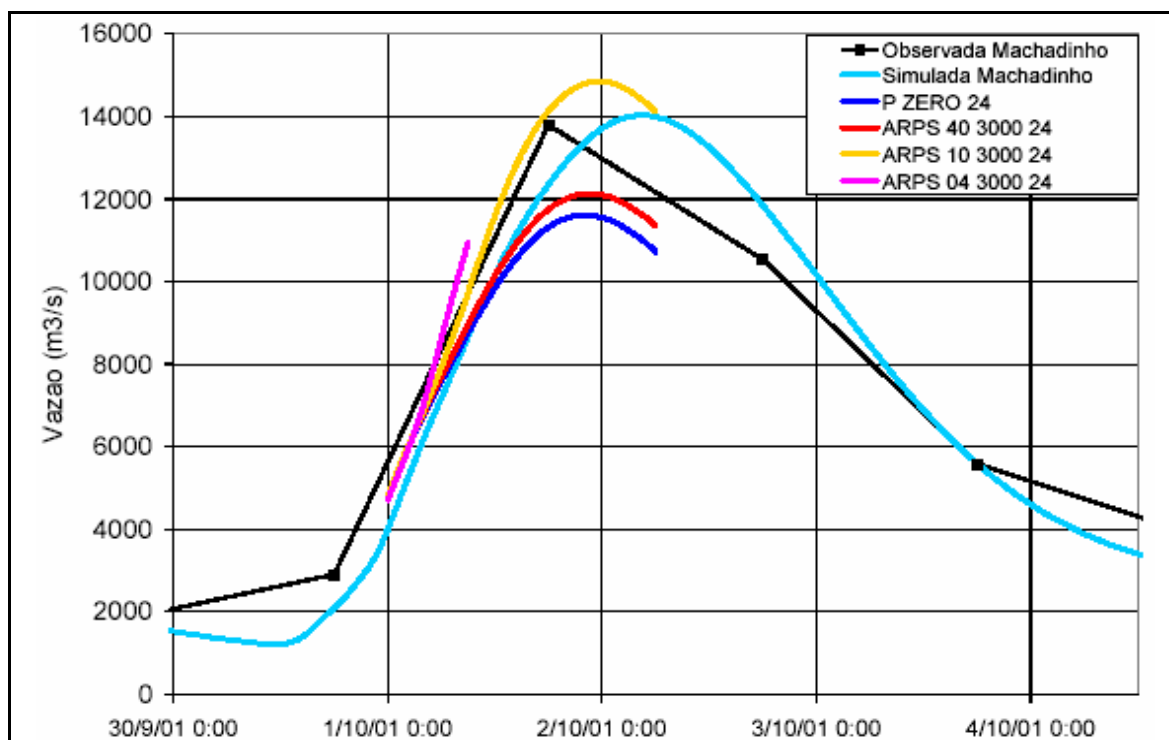


Figura 4.29. Previsão 30/09/01: 24:00h – antecedência máxima de 31 horas

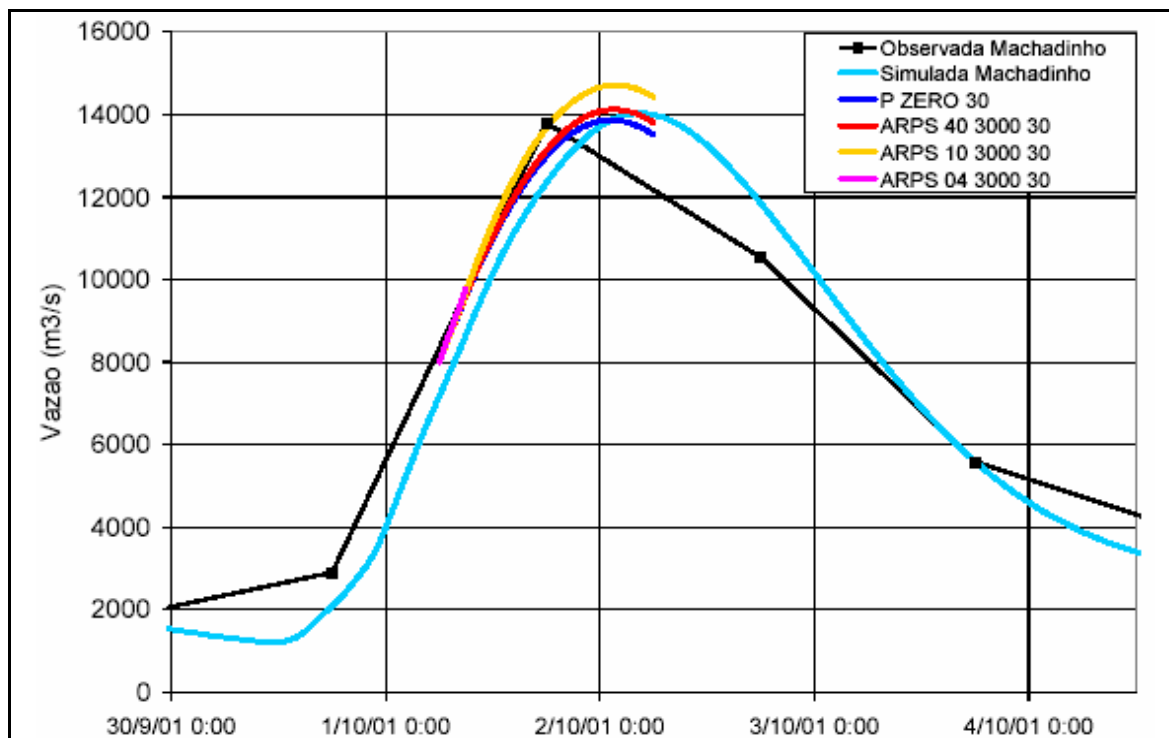


Figura 4.30. Previsão 31/09/01: 06:00h – antecedência máxima de 26 horas

#### 4.6.2 Evento de 10 a 13 de novembro de 2002

O segundo evento analisado corresponde ao período de 9 a 12 de novembro de 2002, quando a vazão máxima afluyente ao reservatório de Machadinho foi estimada em, aproximadamente,  $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

As previsões de chuva disponibilizadas para este evento foram:

i) Previsão com o modelo ARPS de resolução 40 km, aplicado com as condições iniciais correspondentes às 09:00 do dia 09/nov/2002 (ou 12:00 do dia 09/nov/2002 em horário de Greenwich), com resultados para o período de 60 horas estendendo-se das 09:00 do dia 09/nov/2002 até às 21:00 do dia 12/nov/2002.

ii) Previsão com o modelo ARPS de resolução 10 km, aplicado com as condições iniciais correspondentes às 09:00 do dia 09/nov/2002 (ou 12:00 do dia 09/nov/2002 em horário de Greenwich); com resultados para o período de 50 horas estendendo-se das 19:00 do dia 09/nov/2002 até às 21:00 do dia 12/nov/2002.

Como no evento de 2001, em todas as previsões os dados de chuva observada nos pluviômetros e pluviógrafos foram utilizados até o instante  $T_0$ , e a partir deste instante, foram utilizadas as chuvas previstas. Em analogia ao evento anterior, diversos horizontes foram simulados, porém novamente a previsão de chuva é única e originada no tempo  $T_0$ .

As figuras seqüenciais a seguir apresentam os resultados das previsões desse evento. A figura 431 mostra a vazão observada (linha preta); a vazão calculada pelo modelo hidrológico utilizando a chuva observada (linha azul claro); e as vazões previstas no instante  $T_0=09:00$  horas do dia 09/nov/2002, pelos diferentes métodos: a vazão prevista considerando chuva nula a partir de  $T_0$  (linha azul escuro); a vazão prevista com base na previsão de chuva do modelo ARPS de 40 km de resolução; e a vazão prevista com base na chuva observada (linha verde). Obviamente, a previsão baseada na chuva observada (linha verde) não pode ser utilizada operacionalmente. Entretanto, esta previsão é importante para a comparação com as previsões baseadas na previsão quantitativa de chuva. Se o número de

postos pluviográficos na bacia fosse muito grande, e estes postos fossem bem distribuídos e apresentassem poucas falhas, poder-se-ia dizer que a previsão de vazão com base na chuva observada representa o limite superior de qualidade que pode ser obtido com a metodologia proposta. Em outras palavras, a previsão de vazão com base na chuva observada equivaleria a uma previsão de vazão baseada em uma previsão perfeita de chuva.

Observa-se, na figura 4.31, que a previsão de vazão considerando precipitação nula a partir do instante  $T_0=09:00$  horas do dia 09/nov (linha azul escuro) indica uma contínua redução da vazão ao longo das 60 horas seguintes. Por outro lado, a previsão de vazão baseada na previsão de chuva do modelo ARPS de 40 km (linha vermelha) indica a ocorrência de uma cheia, atingindo uma vazão superior a  $3812 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ao longo do dia 11/nov/2002 com antecedência de 51 horas.

Na previsão do instante  $T_0=19:00$  do dia 09/nov/2002, apresentada na figura 4.32, é acrescentada ainda a previsão de vazão baseada na previsão de chuva do modelo ARPS de 10 km de resolução (linha amarela) ambas as previsões são de 49 horas de antecedência. Esta previsão indica uma vazão de pico pouco inferior a  $2.836 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , com antecedência de, 40 horas. A previsão pelo ARPS 40 indica uma vazão de  $3810 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em 41 horas. A previsão com ARPS 40 é boa e do ARPS 10 é ótima, tanto com relação à vazão de pico, como ao tempo de pico.

A figura 4.33, que apresenta as previsões de vazão do instante  $T_0=24:00$  horas do dia 09/nov/2002, cuja antecedência é de 43 horas, observa-se que o pico da cheia prevista com base na previsão de chuva do modelo ARPS de 40 km (linha vermelha) passa para  $4.573 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , em 35 horas e do modelo ARPS 10,  $3.492 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em 34 horas. Isto ocorre porque a chuva ocorrida e observada nos postos pluviométricos e pluviográficos até o instante  $T_0=24:00$  horas do dia 09/nov/2002 é somada à precipitação prevista a partir deste momento, resultando em vazões maiores do que as previstas inicialmente, caracterizando um erro temporal de previsão meteorológica. Ainda assim, as previsões de vazão baseadas na previsão quantitativa de chuva com o modelo ARPS são melhores do que a previsão de vazão baseada na hipótese de chuva nula a partir de  $T_0$ . Já na figura 4.34, observa-se que as previsões realizadas no instante  $T_0=06:00$  horas do dia 10/nov/2002, cuja antecedência é 37

horas, superestimam muito a cheia, indicando vazões de pico duas vezes superiores às observadas (vazão de  $6.177 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  com antecedência de 30 horas para ARPS 40 e vazões de  $5.620 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  com antecedência de 29 horas para ARPS 10).

Finalmente, na figura 4.35 observa-se que as previsões de vazão realizadas em  $T_0=12:00$  do dia 10/nov/2002, cuja antecedência é de 31 horas, com base na chuva prevista pelo modelo ARPS, tanto na resolução de 40 km (linha vermelha) como na resolução de 10 km (linha amarela) voltam a se aproximar bastante do hidrograma observado (Vazão de  $2.820 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  com antecedência de 24 horas pelo ARPS 40 e vazões de  $3.822 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  com antecedência de 27 horas pelo ARPS 10).

Nestas simulações observa-se que a dificuldade de previsão da precipitação compromete a previsão de volumes com antecedência. Neste evento ocorre o inverso do evento anterior, as precipitações são superestimadas, resultando em volume maiores que os esperados, além do erro na distribuição temporal, resultando em dupla soma de precipitação (prevista/observada). Os resultados de volumes se aproximam dos observados quando a precipitação fica melhor definida na bacia.

Neste evento observa-se que, comparando a precipitação acumulada em todo o evento, a chuva prevista pelo modelo ARPS, tanto de 40 km como de 10 km, é muito próxima da chuva observada, e, por isso, as previsões de vazão realizadas antes do início da chuva observada (figura 4.31 -  $T_0=09:00$  horas do dia 09/nov; e figura 4.32 -  $T_0=19:00$  horas do dia 09/nov) apresentam resultados excelentes. Entretanto, as chuvas previstas apresentam diferenças na distribuição temporal, em relação às chuvas observadas. A principal diferença é que as chuvas previstas ocorrem de forma concentrada, em algumas horas, enquanto as chuvas observadas são um pouco mais prolongadas, iniciam antes, e são menos intensas. Em consequência, a previsão de vazão realizada depois do início da chuva (figura 4.33 e figura 4.34) sobrepõe as chuvas observadas e previstas, resultando em volumes e picos de cheia muito superiores aos observados. Nas figuras 4.31 a 4.35 observa-se o excelente ajuste entre as previsões realizadas utilizando a chuva observada (linha verde) e a vazão observada (linha preta). Isto significa que a metodologia de previsão de vazão, utilizando MGB, e a técnica de atualização com dados observados, é adequada para



a previsão de vazão, desde que as previsões de chuva sejam de boa qualidade.

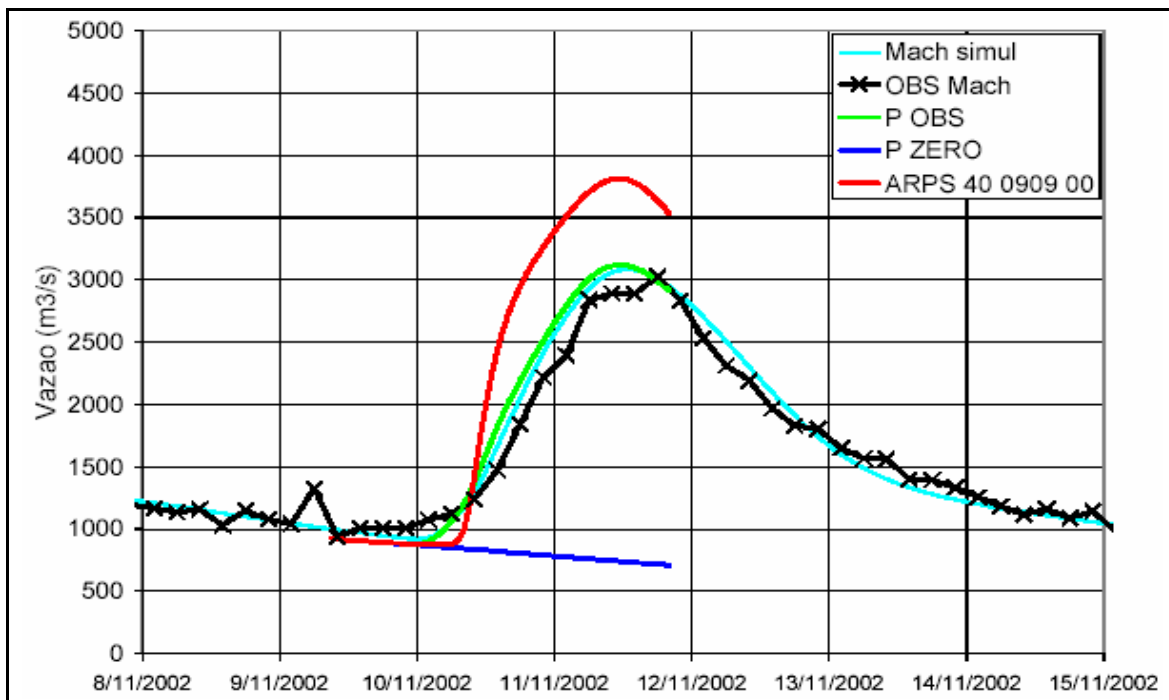


Figura 4.31. Previsão 09/11/02: 09:00h– antecedência máxima de 60 h

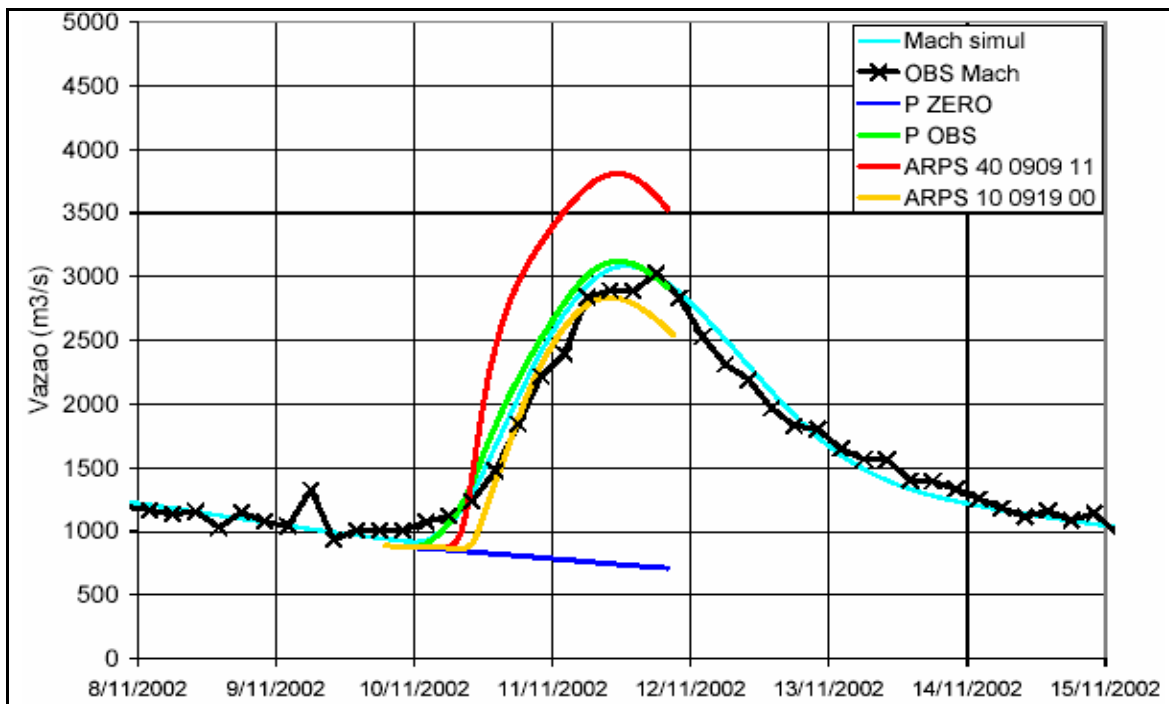


Figura 4.32. Previsão 09/11/02: 19:00h– antecedência máxima de 49 h

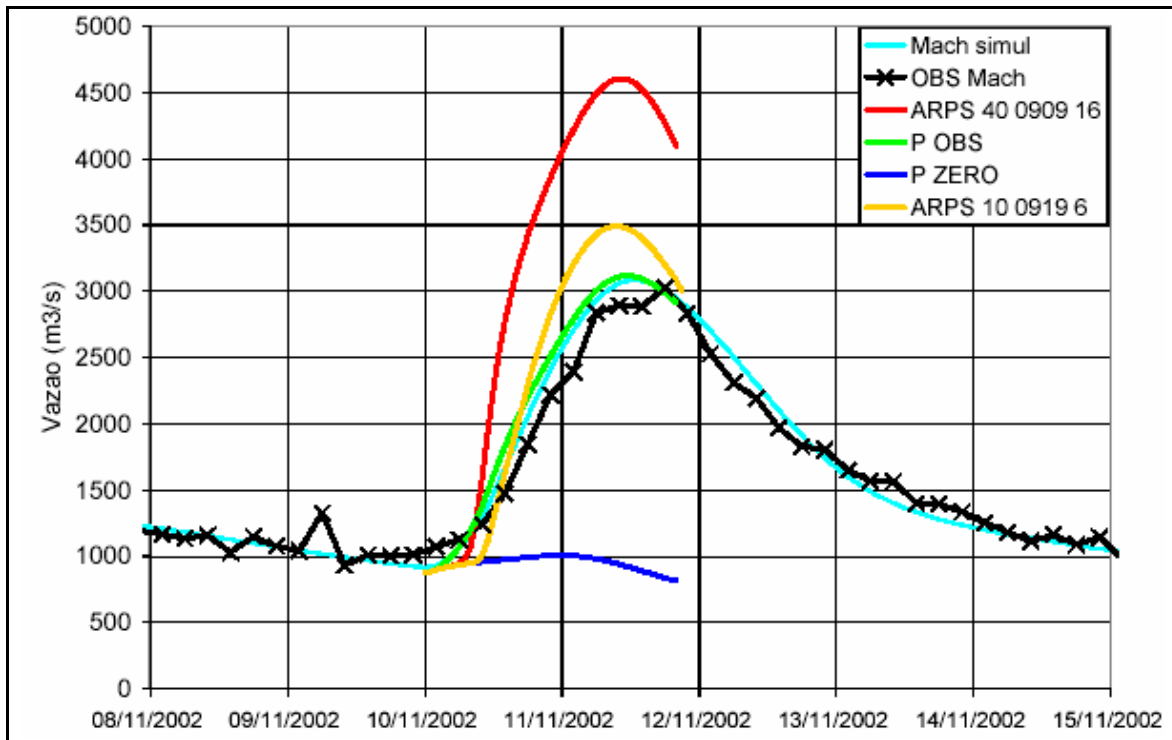


Figura 4.33. Previsão 09/11/02: 24:00h– antecedência máxima de 43 h

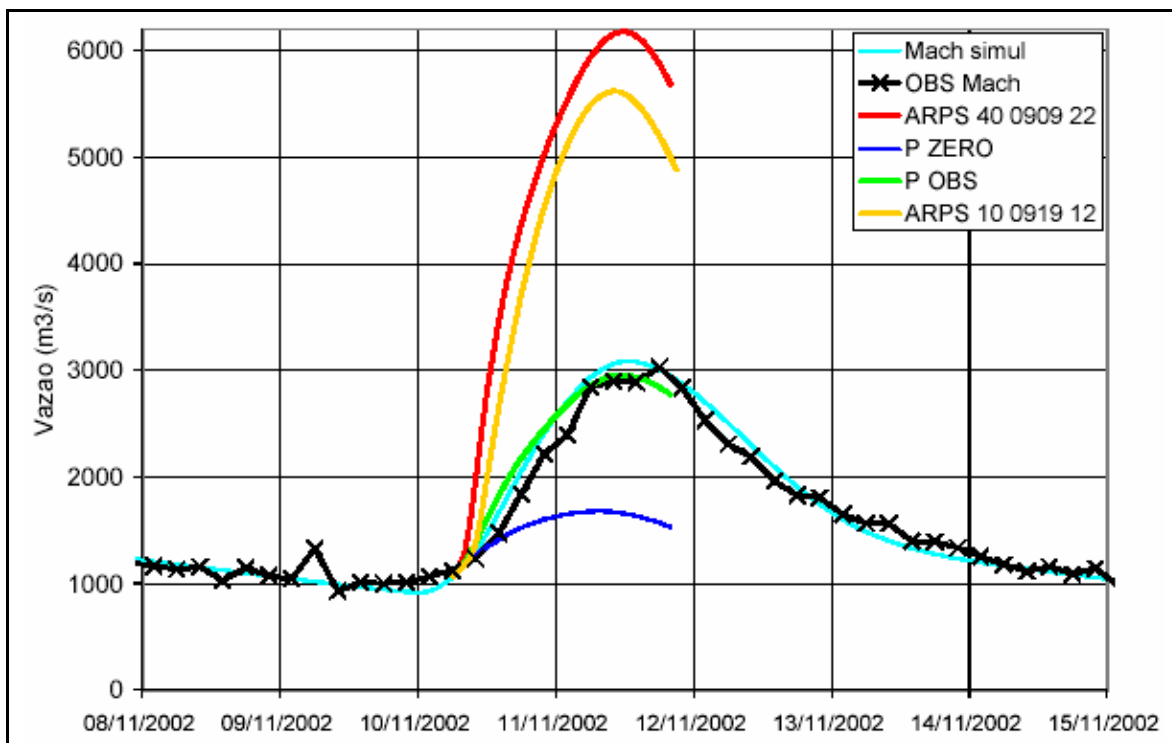


Figura 4.34. Previsão 10/11/02: 06:00h– antecedência máxima de 37 h

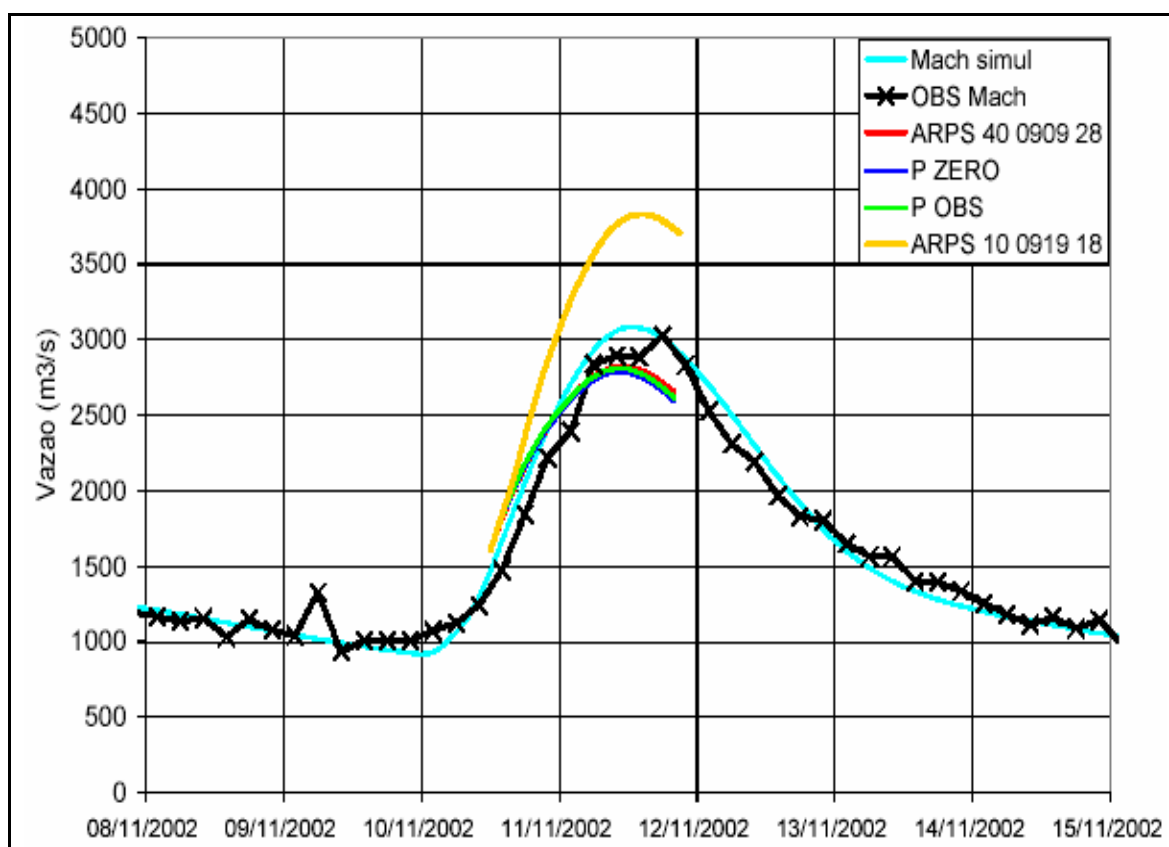


Figura 4.35. Previsão 10/11/02: 12:00h– antecedência máxima de 31 h

#### 4.6.3 Evento final de novembro de 2002

O terceiro evento analisado isoladamente corresponde ao período de 25 de novembro a 2 de dezembro de 2002, quando a vazão máxima afluente ao reservatório de Machadinho foi estimada em, aproximadamente,  $2.800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

As previsões de chuva disponibilizadas para este evento foram:

i) Previsões com o modelo ARPS de resolução 40 km; aplicado com as condições iniciais de 12 em 12 horas, começando às 21:00 do dia 24/nov/2002 (ou 00:00 do dia 25/nov/2002 em horário de Greenwich); com resultados para o período de 48 horas estendendo-se das 21:00 do dia 24/nov/2002 até às 21:00 do dia 26/nov/2002, e terminando às 09:00 do dia 30/nov/2002, com resultados para o período de 48 horas das 09:00 do dia

30/nov até às 09:00 do dia 02/dez/2002.

ii) Previsões com o modelo ARPS de resolução 10 km; aplicado com as condições iniciais de 12 em 12 horas, começando às 07:00 do dia 25/nov/2002; com resultados para o período de 38 horas estendendo-se das 07:00 do dia 25/nov/2002 até às 21:00 do dia 26/nov/2002, e terminando às 19:00 do dia 30/nov/2002, com resultados para o período de 38 horas das 09:00 do dia 30/nov até às 09:00 do dia 02/dez/2002.

Novamente, na metodologia de previsão, os dados de chuva observada nos pluviômetros e pluviógrafos foram utilizados até o instante  $T_0$  e a partir deste instante foram utilizadas as chuvas previstas.

Como foram disponibilizadas previsões novas de chuva a cada 12 horas, se estendendo sempre ao horizonte de 48 horas para o ARPS 40 e 38 horas para o ARPS 10, então se fez apenas uma análise da previsão para o horizonte máximo gerando 12 previsões defasadas de 12 horas seqüencialmente. Esta situação é diferente das anteriores em que apenas uma previsão de chuva era disponibilizada. Aqui a cada 12 horas uma nova previsão é gerada substituindo a antiga. O modelo operacionalmente gera previsões dessa forma.

As figuras a seguir apresentam a seqüência de previsões para todo o evento. Estas previsões foram realizadas a cada 12 horas, totalizando 12 previsões, sendo de 38 horas o horizonte máximo do ARPS 10 e 48 horas o horizonte máximo do ARPS 40. Em cada uma delas apresenta-se a vazão observada (linha preta) e a vazão simulada com o modelo hidrológico utilizando a chuva observada (linha azul claro) para o evento completo. Além disso, em linhas curtas que representam partes do evento, são apresentadas as previsões realizadas utilizando os diferentes métodos.

A figura 4.36 apresenta as previsões realizadas às 21:00 horas do dia 24/nov/2002, utilizando a chuva observada (linha verde), a chuva prevista pelo modelo ARPS de 40 km de resolução (linha vermelha), e considerando a chuva nula (linha azul escuro). A figura 4.37 apresenta as previsões realizadas às 09:00 horas do dia 25/nov/2002, utilizando a chuva observada (linha verde), a chuva prevista pelo modelo ARPS de 40 km de resolução,

(linha vermelha), a chuva prevista pelo modelo ARPS de 10 km (linha amarela), e considerando a chuva nula (linha azul escuro). As figuras 4.38 a 4.39 apresentam as previsões realizadas às 21:00 horas do dia 25/nov (figura 4.38); às 09:00 horas do dia 26/nov (figura 4.39); às 21:00 horas do dia 26/nov (figura 4.40); e às 09:00 horas do dia 27/nov (figura 4.41). Seguindo de 12 em 12 horas, As figuras 4.42 a 4.47 apresentam as previsões realizadas das 21:00 horas do dia 27/nov (figura 4.42); até as 09:00 horas do dia 30/nov (figura 4.47). Em todas as figuras a legenda para as cores das linhas se mantém.

Observa-se na seqüência de previsões, que o hidrograma de vazão simulada com o modelo hidrológico (linha azul claro) não acompanha bem o hidrograma observado (linha preta), especialmente na subida do hidrograma ao longo do dia 28/nov. Esta diferença é importante, e foi atribuída a ocorrência de precipitações intensas em áreas mal monitoradas pela rede de pluviógrafos existente, uma vez que, em outros eventos, dessa magnitude, os hidrogramas simulados foram muito mais próximos dos observados.

Comparando, as figuras 4.36 a 4.41 as previsões realizadas com base na previsão de chuva (linhas amarela e vermelha) com as previsões realizadas considerando precipitação nula (linha azul escuro) observa-se que as previsões baseadas nas previsões de chuva do modelo ARPS indicavam um crescimento do hidrograma desde o dia 25/nov. Este crescimento previsto foi maior em alguns casos (figura 4.38) e menor em outros (figura 4.40), tornando-se mais claro a partir da previsão das 09:00 horas do dia 27/nov, que indicava um crescimento de  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para  $2.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em menos de 48 horas.

As figuras 4.42 e 4.43 mostram que o crescimento previsto para a vazão seria ainda maior, chegando a superestimar a vazão de pico. Nas figuras 4.44 e 4.45 observa-se que as previsões são contraditórias: enquanto a previsão baseada no modelo ARPS de 40 km indica uma redução das vazões, a previsão baseada no modelo ARPS de 10 km indica um segundo pico de cheia superando  $3500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  em pouco mais de 24 horas, a partir de  $T_0=07:00$  do dia 28/nov. O segundo pico ocorreu nas vazões observadas, entretanto a vazão máxima foi inferior à prevista, não atingindo  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Finalmente, as figuras 4.46 e 4.47 mostram que todas as previsões indicam vazões próximas a  $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para as 24 horas seguintes, a partir de  $T_0=21:00$  horas do dia 29 e a partir de  $T_0=09:00$  horas do dia 30.

Portanto, no caso do evento de 25 de novembro a 02 de dezembro de 2002 as previsões de vazão com base na chuva prevista pelo modelo ARPS permitiram antecipar a subida do hidrograma em cerca de 24 horas, embora a vazão de pico tenha sido superestimada utilizando o modelo ARPS 10 km e subestimada utilizando o modelo ARPS 40 km.

Analisando os gráficos seqüenciais, pode se dizer que as previsões de vazão baseadas na previsão de chuva do modelo ARPS de mais alta resolução (10 km) tiveram desempenho melhor do que as baseadas nas previsões do modelo ARPS de menor resolução (40 km), o que é coerente com os resultados para os eventos anteriores.

Com relação à metodologia de atualização do modelo hidrológico de previsão há um fato importante que deve ser destacado na análise deste evento. Em quase todos os gráficos das figuras seqüências as linhas curtas que representam as previsões iniciam muito próximas da vazão simulada (linha azul claro). Entretanto, em alguns gráficos é possível verificar que o início dos hidrogramas de previsão está afastado do hidrograma simulado e mais próximo do hidrograma observado (figura 4.41 a 4.45, por exemplo). Esta modificação das condições iniciais ocorre em função da metodologia adotada para a atualização do modelo hidrológico, através da qual são incorporados os dados de vazão dos postos dos rios Pelotas e Canoas, e os dados de vazão afluente ao reservatório. Observa-se que a metodologia de atualização permite iniciar a previsão em melhor situação (mais próxima do hidrograma observado), mas ainda existem erros que ocorrem principalmente porque existem poucos dados de linígrafo na bacia e porque estes freqüentemente apresentam falhas.

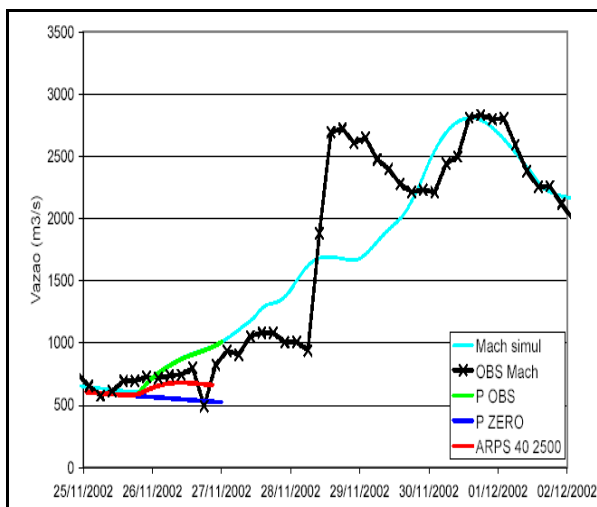


Figura 4.36. Previsão 24/11/02: 21:00h

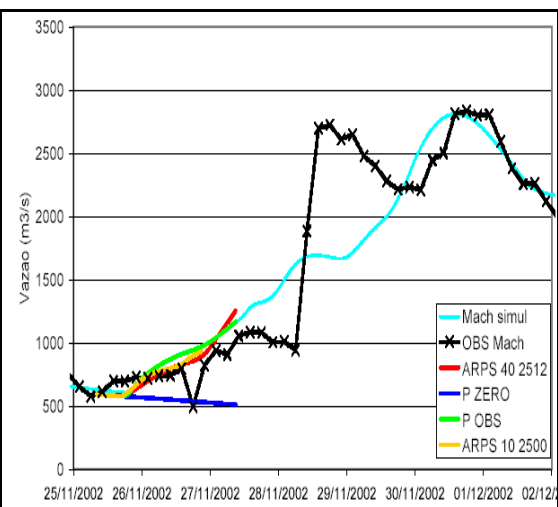


Figura 4.37. Previsão 25/12/02: 09:00h

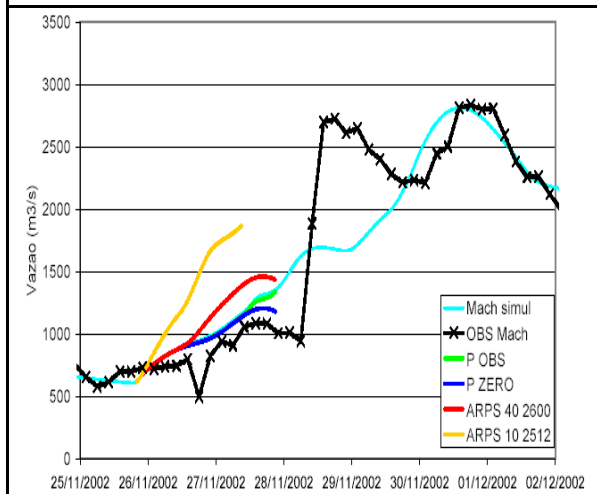


Figura 4.38. Previsão 25/11/02: 21:00h

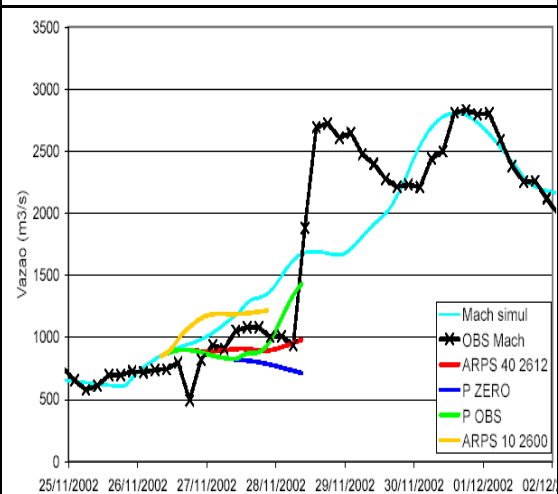


Figura 4.39. Previsão 26/11/02: 09:00h

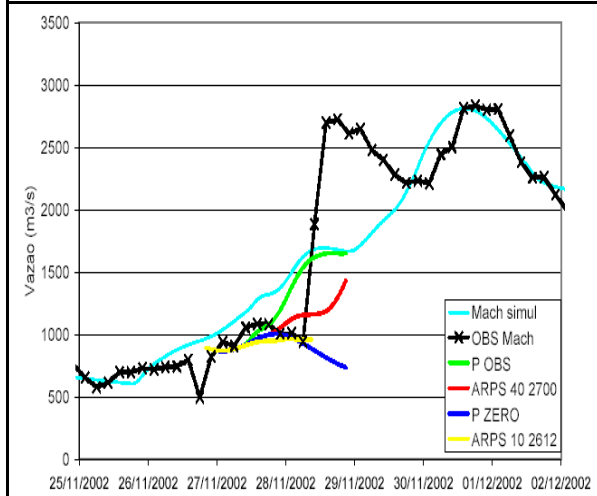


Figura 4.40. Previsão 26/11/02: 21:00h

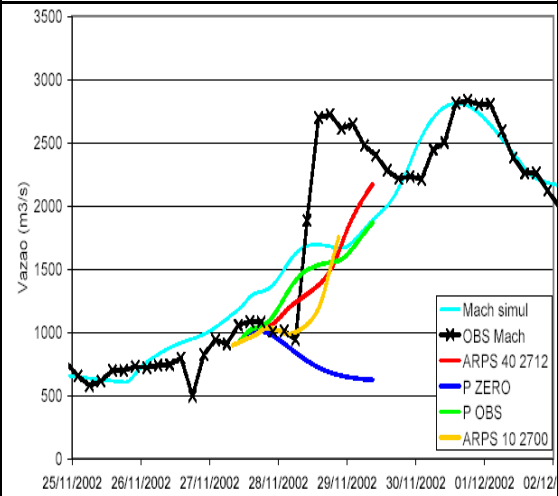


Figura 4.41. Previsão 27/11/02: 09:00h

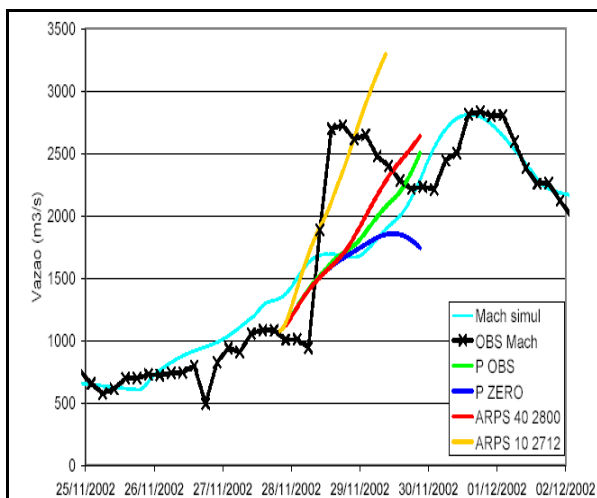


Figura 4.42. Previsão 27/11/02: 21:00h

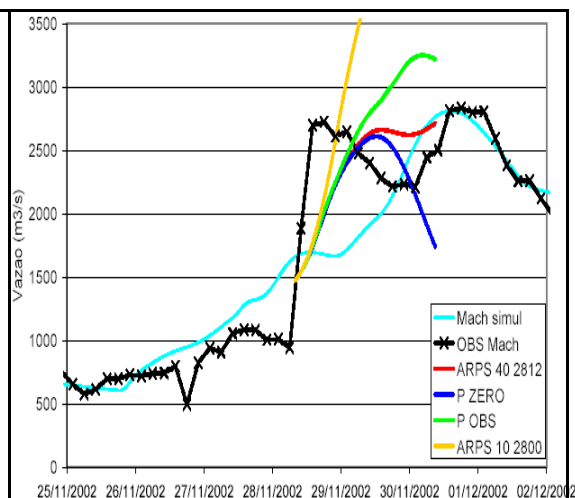


Figura 4.43. Previsão 28/11/02: 09:00h

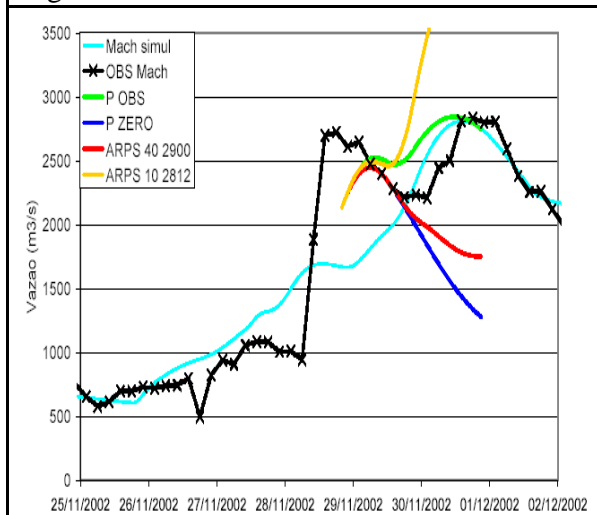


Figura 4.44. Previsão 28/11/02: 21:00h

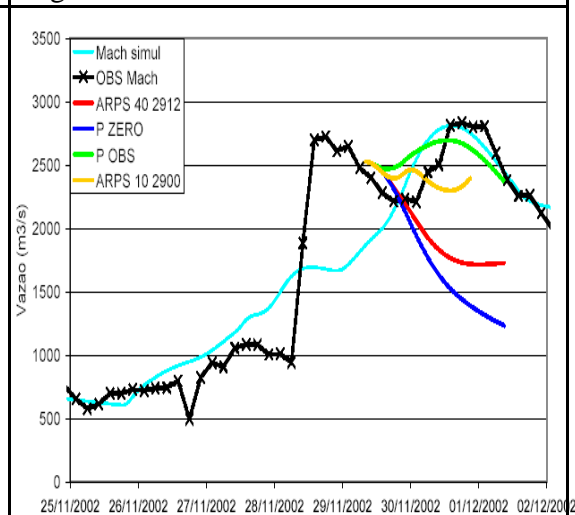


Figura 4.45. Previsão 29/11/02: 09:00h

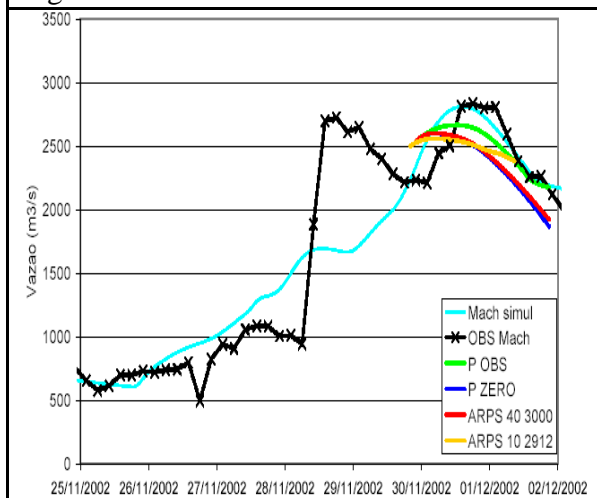


Figura 4.46. Previsão 29/11/02: 21:00h

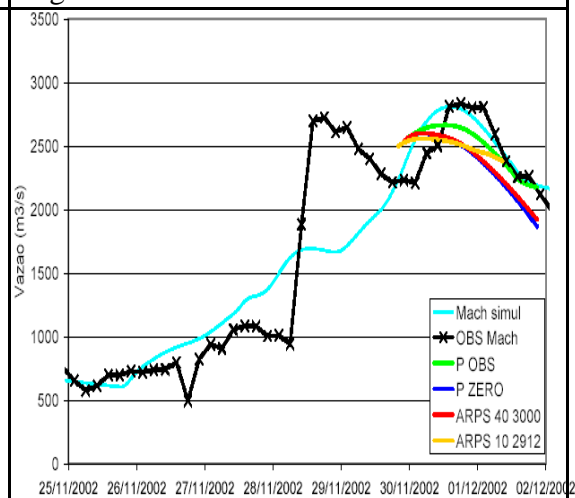


Figura 4.47. Previsão 30/11/02: 09:00h



#### 4.7 Previsão contínua

Durante 5 meses, entre os dias 25 de abril de 2003 e 10 de outubro de 2003, as previsões de chuva foram geradas de forma operacional pelo modelo ARPS e disponibilizadas em servidor FTP. Neste período, diversos modelos de previsão de vazão com antecedências variando de 0 a 48 horas foram utilizados para previsão contínua de vazão em tempo real no reservatório de Machadinho com objetivo de avaliar o desempenho desses modelos na bacia em estudo. O período citado foi caracterizado por vazões bastante baixas conforme é apresentado na figura 4.48. Neste período a vazão média em Machadinho ficou em  $358 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . No período correspondente do ano anterior, a vazão média ficou em  $1.354 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Essas vazões são apresentadas na figura 4.48. A representação gráfica das vazões do período chuvoso de 2002 foi apresentada anteriormente respectivamente pelas figuras 4.12 e 4.14.

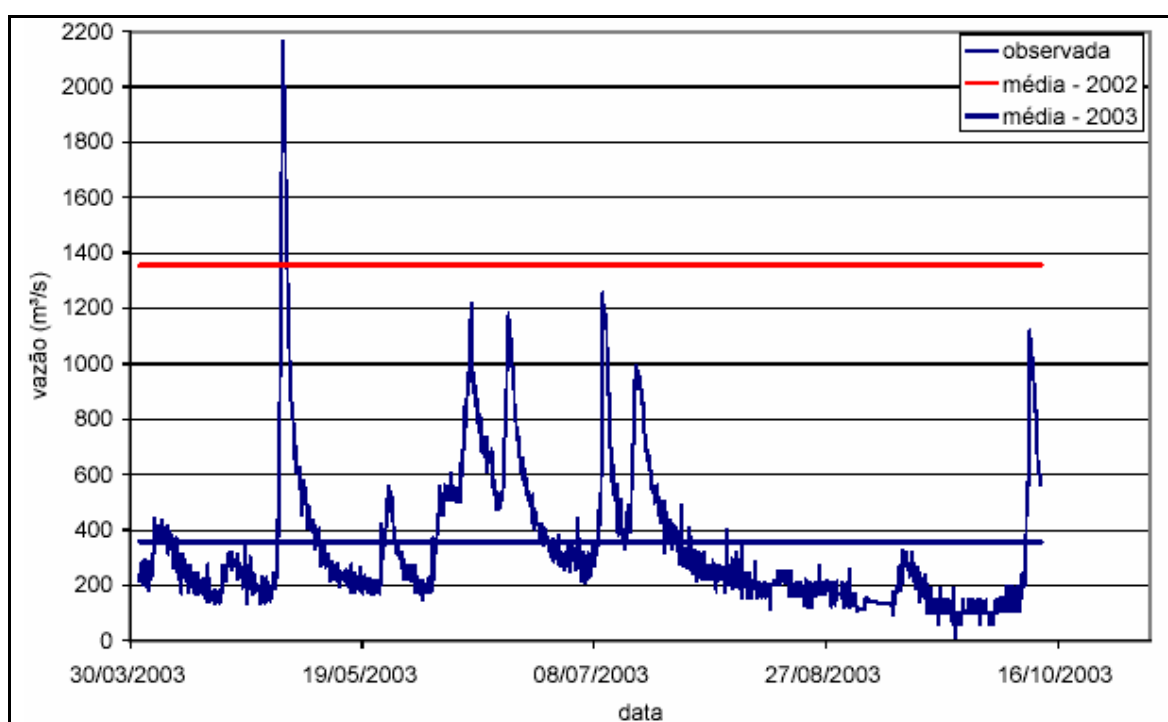


Figura 4.48. Vazão observada em 01/04/2003 a 14/10/2003 em Machadinho

Normalmente os modelos meteorológicos conseguem acertar previsões do tipo chove - não chove, a dificuldade está em prever quantitativamente os eventos chuvosos em que as

incertezas na distribuição espaço-temporal e em intensidade estão envolvidas e deterioram rapidamente as previsões de vazão. Como a análise dos modelos foi sobre a vazão prevista, houve pouca representatividade da vazão para avaliar os modelos meteorológicos. Em períodos secos, os hidrogramas são representativos de vazões de recessão em que as formulações matemáticas já estão bastante desenvolvidas. Essas vazões são previstas razoavelmente bem pelos modelos propostos. A importância na previsão, e onde se justificaria a utilização dos modelos meteorológicos, está nos eventos de cheia. Como esses eventos foram escassos e de pequena magnitude, a avaliação do ganho hidrológico com a previsão de chuva ficou prejudicada no período analisado.

A análise do desempenho dos modelos propostos para previsão de vazão foi baseada em algumas estatísticas comumente utilizadas na previsão de vazão e através de análise gráfica. Foram considerados eventos de cheia, os eventos com vazão superior a  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Assim, nesse período ocorreram 6 eventos de cheia conforme a figura 4.48. A análise gráfica enfatizou esses eventos.

#### **4.7.1 Análise estatística**

A figura 4.49 apresenta o coeficiente RD em função do horizonte de previsão para a seção de Machadinho no período de previsão contínua. Esta estatística evidencia que não há ganhos em se fazer previsão em horizontes menores que 4 horas (RD negativo ou nulo). Nesses horizontes o melhor, dos modelos propostos, é o de persistência. Observa-se que em horizontes acima de 4 horas, todos os modelos oferecem ganhos frente ao modelo de persistência. Esse resultado faz sentido, pois considerar, por exemplo, o modelo que subestima a chuva sempre (modelo chuva zero), se está ao menos considerando a chuva que já caiu na bacia e que ainda não perturbou a vazão. Isso não é levado em conta no modelo de persistência. Mesmo na ausência de chuvas, o modelo de persistência é pior que o modelo chuva zero, pois este prevê a recessão. Quando confrontamos o modelo chuva observada com chuva zero, notamos que em horizontes até 15 horas o modelo chuva observada possui desempenho praticamente igual ao modelo chuva zero, porém, em horizontes superiores a 15 horas o modelo chuva observada possui um desempenho superior. Ou seja, o erro na vazão em considerar a hipótese de chuva zero no futuro tem

interferência significativa em horizontes acima de 15 horas. O modelo chuva observada é particularmente interessante para avaliar o desempenho dos modelos meteorológicos, pois a chuva observada representa um modelo simplificado de previsão perfeita de chuva. O modelo representaria uma previsão perfeita de chuva caso a rede de pluviógrafos fosse densa. Na figura 4.49 a distância vertical entre os modelos meteorológicos e de chuva perfeita representa o que pode ser ainda melhorado em termos de previsão de chuva. Confrontando os modelos meteorológicos frente ao modelo de chuva zero, nota-se que o modelo de chuva zero é melhor praticamente em todos os horizontes. Infelizmente essa análise fica prejudicada para os modelos ARPS 04 e ARPS 10 cujas previsões não atingem o horizonte de 48 horas. O baixo desempenho dos modelos que consideram a previsão de chuva se deve às incertezas da previsão meteorológica, que nos eventos de chuva produzem erro muito grande na precipitação e na sua distribuição espaço-temporal. Os erros na previsão da chuva acabam inclusive afetando as previsões de recessão.

Esses resultados devem sempre ser visto com restrições, pois o período analisado é pouco representativo para avaliar o ganho com a previsão meteorológica da chuva.

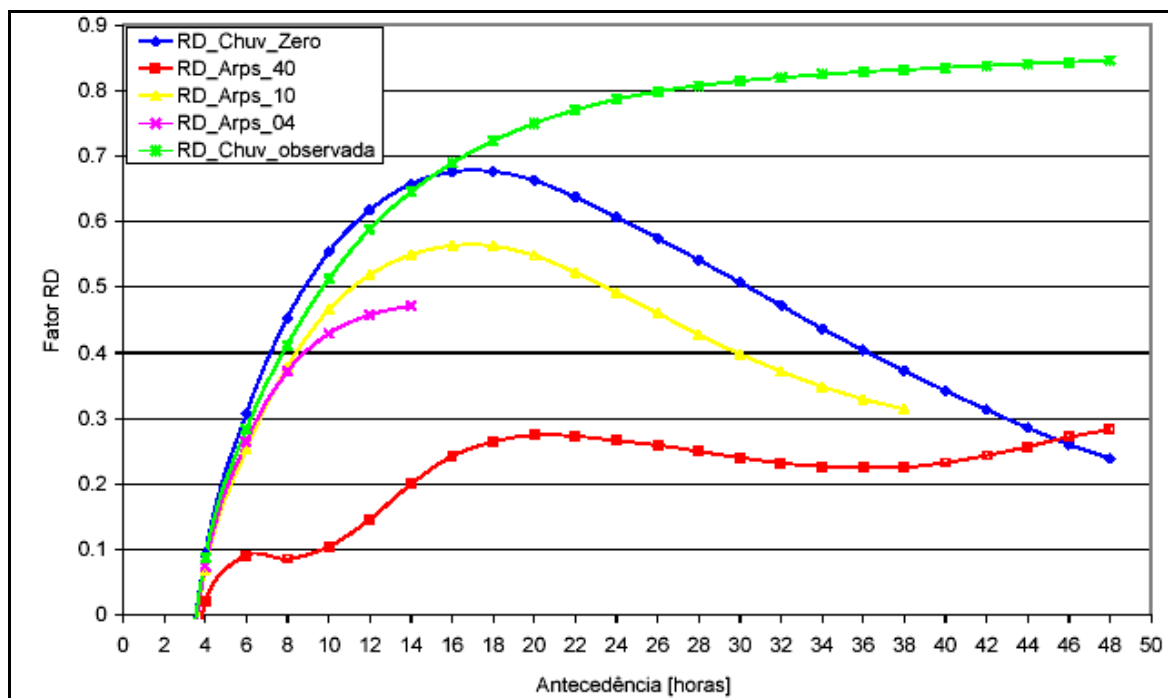


Figura 4.49. Fator RD em função da antecedência da previsão

Quando são confrontados os modelos que consideram a previsão de chuva, fica evidente que o modelo ARPS 40 é o de pior desempenho. Esse fato era esperado, pois o modelo de 40 km não considera diversos processos de importância meteorológica que ocorrem em escalas menores que 40 km. A tendência é de melhoria nas previsões quando se aumenta a discretização espacial, porém existe um limite condicionado, por exemplo, pelas redes de monitoramento de dados de campo (Gleick, 1990).

A figura 4.50 apresenta as estatísticas do erro no volume como função da antecedência. Primeiramente observa-se que o modelo de persistência é o de pior desempenho praticamente em todos os horizontes somente supera os demais em horizontes abaixo de 4 horas. Como na estatística RD, o modelo chuva observada apresenta desempenho praticamente igual ao chuva zero até o horizonte de 15 horas, sendo então superior acima desse horizonte. Também fica evidente, praticamente em todos os horizontes, o melhor desempenho do modelo chuva zero frente aos modelos que consideram a previsão de chuva. O modelo ARPS 4 apresenta desempenho ligeiramente superior ao ARPS 40, porém inferior ao ARPS 10.

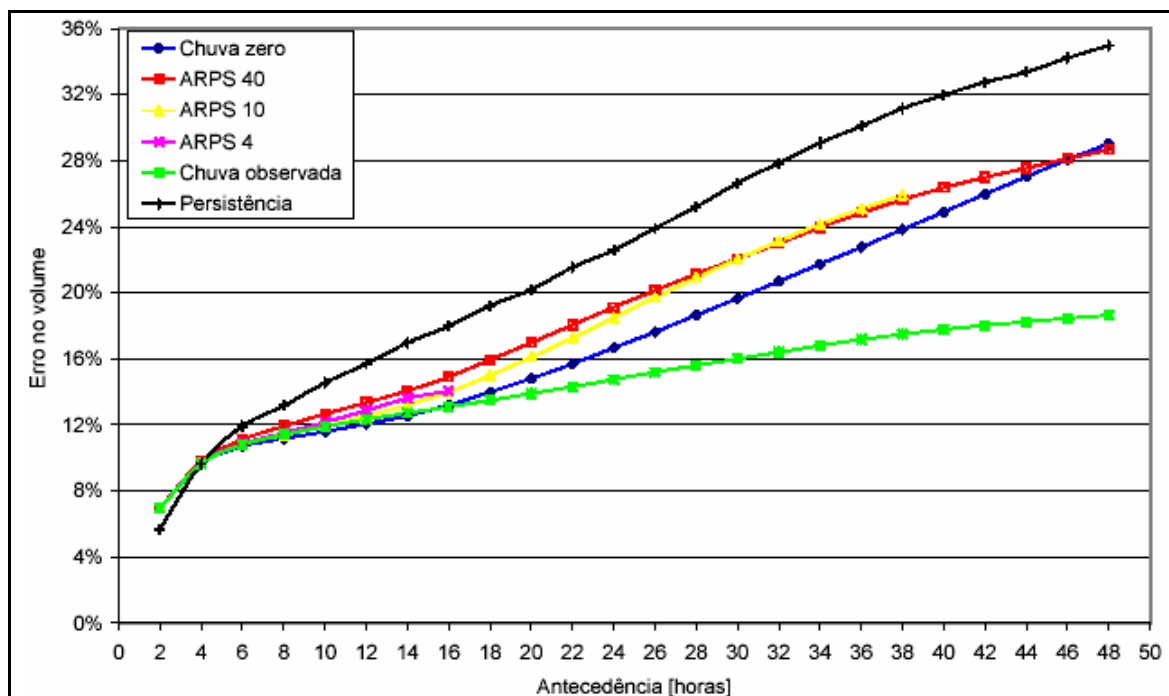


Figura 4.50. Erro no volume em função da antecedência da previsão

A estatística de volume é mais sensível aos eventos de maior magnitude. Pode ser que em períodos chuvosos os modelos meteorológicos sejam melhores que o modelo chuva zero, pois nesses períodos as previsões de chuva têm maior importância. Infelizmente o período de dados de previsão de chuva é curto e extremamente seco. Assim esses resultados devem ser verificados com um período maior de dados e que sejam representativos. O hidrograma dos meses de agosto e setembro de 2003 (últimos meses da previsão contínua), por exemplo, tem a forma de uma curva de recessão. Em períodos tão secos o modelo chuva zero apresenta poucos erros, porém, em períodos chuvosos isso não se verifica e as previsões com este modelo se deterioram rapidamente.

A figura 4.51 apresenta o coeficiente de NS em função do horizonte de previsão para o período de previsão contínua. Esta estatística não é recomendada para previsão em tempo real, pois compara o modelo de previsão proposto como o modelo que prevê a média. Esta estatística, porém, é útil para avaliar o desempenho de um modelo frente aos demais propostos. Comparando o desempenho dos modelos pelo coeficiente de NS, tem-se a confirmação das estatísticas anteriores.

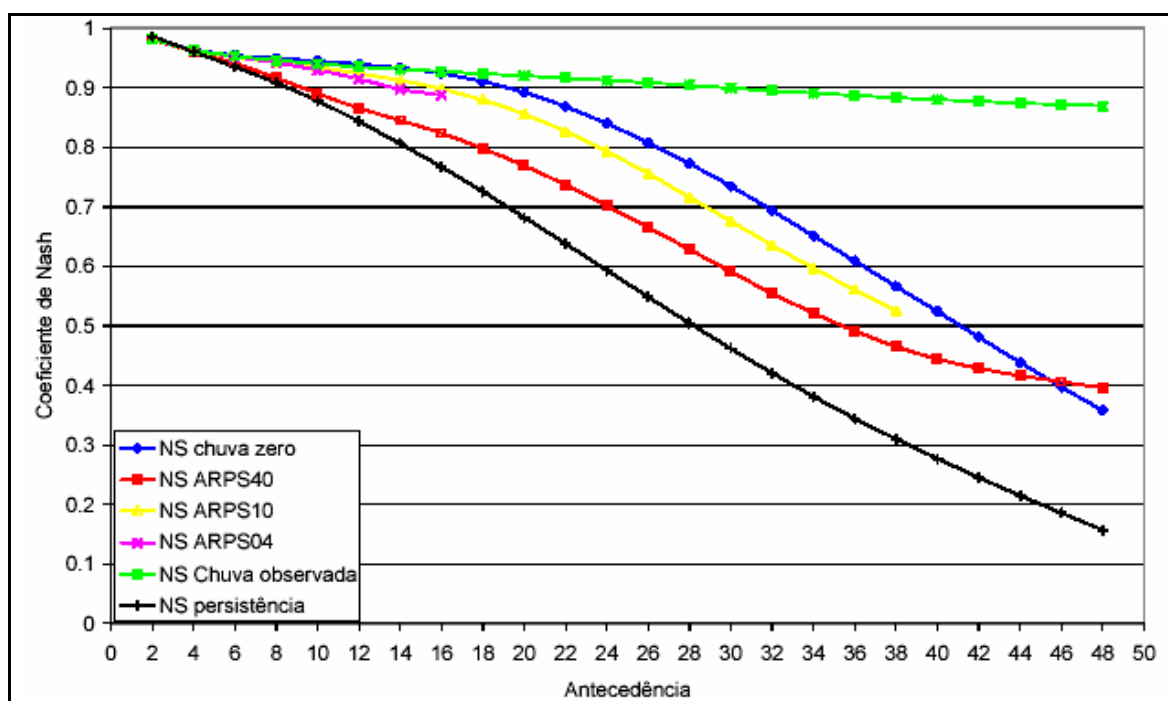


Figura 4.51. Coeficiente de Nash em função da antecedência de previsão

A figura 4.52 apresenta o erro padrão em função do horizonte de previsão. Novamente observa-se que o modelo de persistência supera aos demais em horizontes inferiores a 4 horas. As estatísticas anteriores são também ratificadas pela estatística do erro padrão. Avaliando-se o desempenho do modelo de previsão de chuva com horizonte de 48 horas (ARPS 40) frente ao modelo de previsão perfeita (chuva observada), por esta estatística, observa-se uma diferença de 100%, ou seja, as previsões de chuva do modelo ARPS 40 ainda apresenta m erros muito grandes.

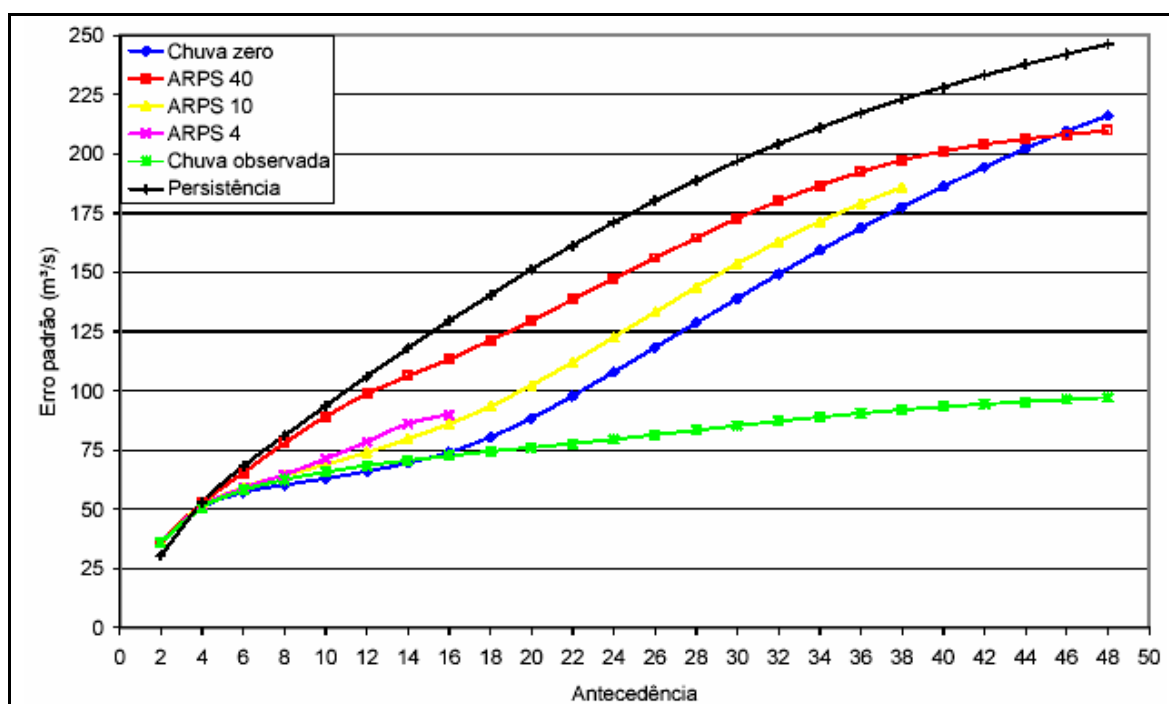


Figura 4.52. Erro padrão em função da antecedência da previsão

Pelas estatísticas propostas não fica evidente se os erros nos modelos que consideram a previsão de chuva são devidos à distribuição espacial, temporal ou em intensidade. Apresenta-se a seguir a análise do maior evento do período onde se procura mostrar o erro predominante dos modelos meteorológicos propostos.

#### 4.7.2 Análise gráfica – evento 01/ 05/ 2003

Os gráficos apresentados a seguir mostram o desempenho dos modelos propostos em

prever a vazão em Machadinho para o horizonte de 12h, 18h, 24h e 30h respectivamente. Para avaliar o desempenho é plotada também a vazão observada. O modelo de persistência não foi plotado, pois representa apenas as vazões observadas com erros na distribuição temporal equivalente ao horizonte de previsão. Em todas as figuras, o eixo das abscissas representa o tempo e o eixo das ordenadas representa a vazão em unidades do sistema internacional (SI). O primeiro evento de cheia do período está apresentado pelas figuras 4.53 a 4.56. Este também foi o maior evento do período atingindo a vazão próxima a  $2.200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A figura 4.53 apresenta a previsão de 12 horas. Cada ponto do hidrograma de previsão dessa figura foi gerado 12 horas antes, ou seja, a antecedência das vazões representadas nessa figura é constante. Primeiramente observa-se que todos os modelos de previsão prevêem aproximadamente a mesma vazão de pico e muito próxima a vazão observada. É interessante notar que a hipótese de chuva nula apresenta resultado muito próximo à chuva observada. Isso ocorre porque para a antecedência de 12 horas, analisada nesta figura, a maior influência sobre a vazão é exercida pela chuva ocorrida até o instante  $T_0$ , e a precipitação durante as 12 horas que seguem tem pouco efeito sobre o hidrograma. Pode-se dizer que todos os modelos tiveram bom desempenho tanto na previsão de volumes quanto na previsão de vazão de cheia para esta antecedência.

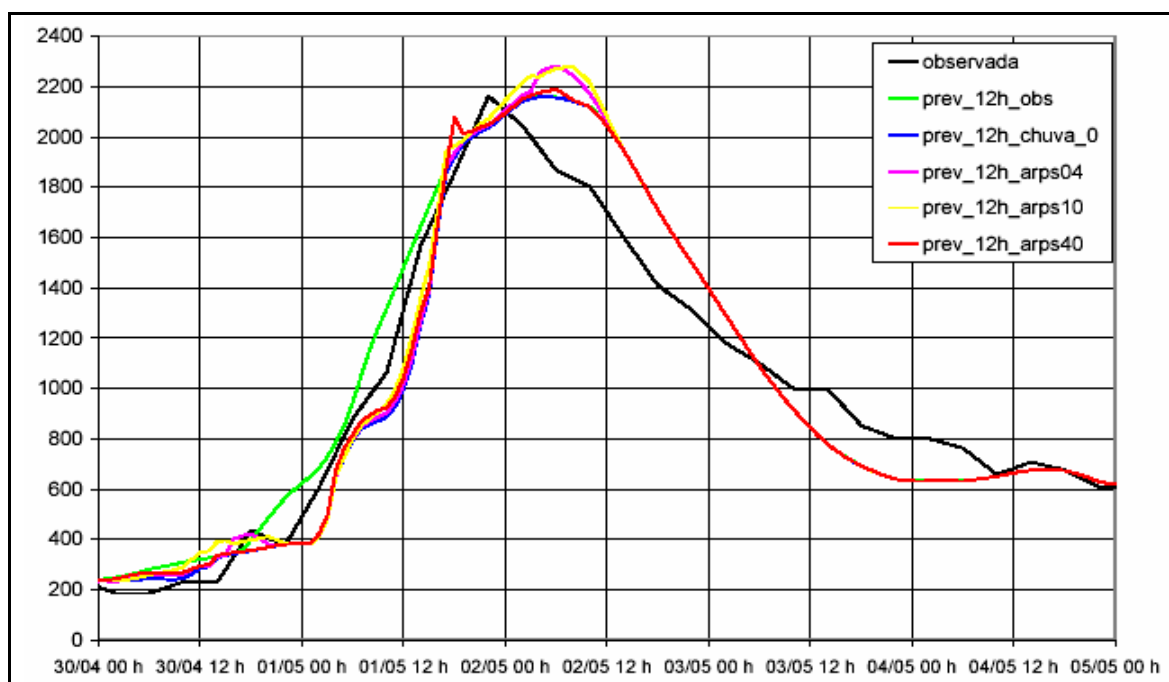


Figura 4.53. Previsão com 12 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03

A figura 4.54 apresenta o mesmo evento, porém com previsões de 18 horas. Observa-se que a previsão de 18 horas se deteriorou um pouco quando comparada às previsões de 12 horas. A magnitude da vazão de cheia foi bem prevista, porém com pequena defasagem temporal. O erro temporal fica evidente na parte do hidrograma de subida. Os modelos que consideram a previsão de chuva prevêem a vazão observada, porém com atraso de aproximadamente 6 horas. As previsões dos modelos meteorológicos estão acertando a quantidade de chuva, porém estão errando na distribuição temporal para esta antecedência.

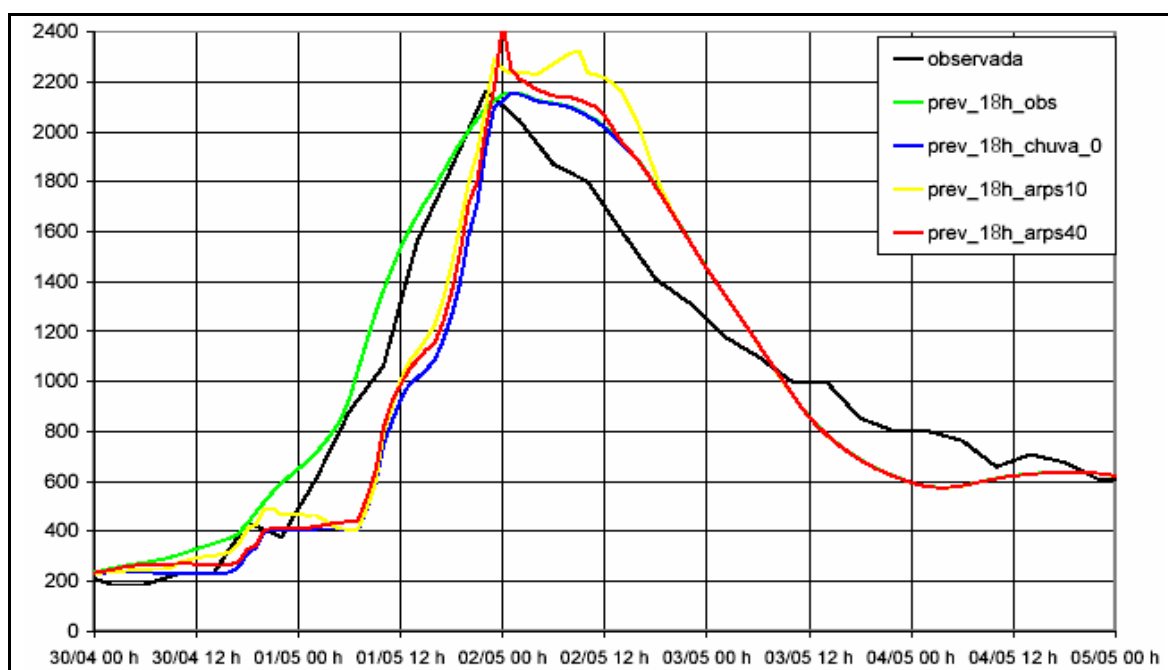


Figura 4.54. Previsão com 18 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03

Uma diferença maior nos hidrogramas pode ser observada na figura 4.55, que apresenta os hidrogramas previstos com 24 horas de antecedência. Observa-se nesta figura que o hidrograma de vazões previstas com base na previsão de chuva nula (linha azul) apresenta um atraso de cerca de 12 horas em relação ao hidrograma observado. A inclusão das previsões de chuva dos modelos ARPS resultam em uma redução do atraso dos hidrogramas previstos em relação ao observado, porém os erros ainda são relativamente grandes. A precipitação na bacia para esta antecedência, durante este evento foi, portanto, bastante subestimada nas previsões do modelo ARPS em todas as resoluções espaciais.



Uma previsão de chuva de melhor qualidade poderia resultar em melhores previsões de vazão, como indica o hidrograma de vazões previstas com base na chuva observada, que poderia ser considerada uma previsão quase perfeita.

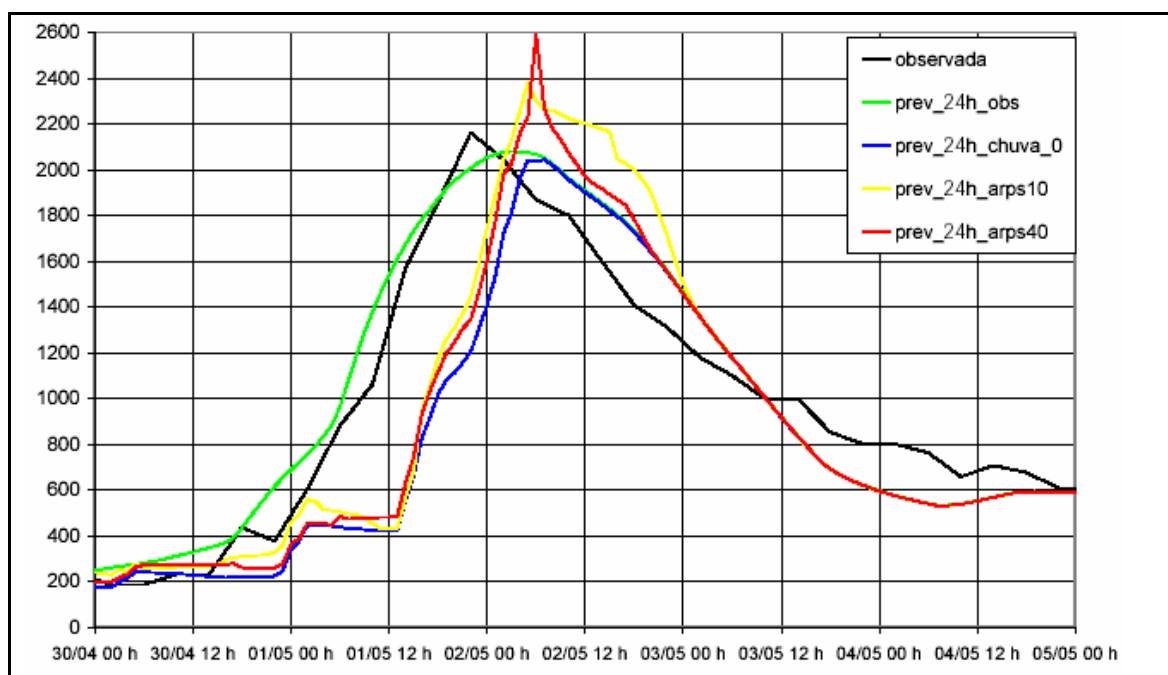


Figura 4.55. Previsão com 24 h de antecedência – evento 30/04/03 a 05/05/03

A figura 4.56 apresenta as previsões de 30 horas para o mesmo evento. Essas previsões já estão bastante deterioradas devido aos erros da previsão de chuva. A hipótese de chuva nula, por exemplo, apresenta defasagem temporal próximo a 18 horas. Esse fato era esperado já que a chuva toma importância no hidrograma para previsões acima de 12 horas. Como a previsão é de 30 horas, então restam 18 horas de defasagem. Isso significa que considerar chuva nula em horizontes acima de 12 a 15 horas resulta numa previsão de vazões de recessão. Os hidrogramas com base na previsão de chuva apresentam praticamente a mesma defasagem temporal da chuva zero nesta antecedência, porém superestimam o pico. Este erro é característico de previsão de pouca chuva, com defasagem temporal. Ou seja, quando já foi considerada a chuva observada pelo modelo de previsão, o modelo ARPS preveu um pouco de chuva.

Os gráficos dos demais eventos do período são apresentados no anexo A. Os

hidrogramas contínuos no período são apresentados no anexo B. A figura 4.57 mostra a previsão pelo modelo ARPS 40 para diversas antecedências.

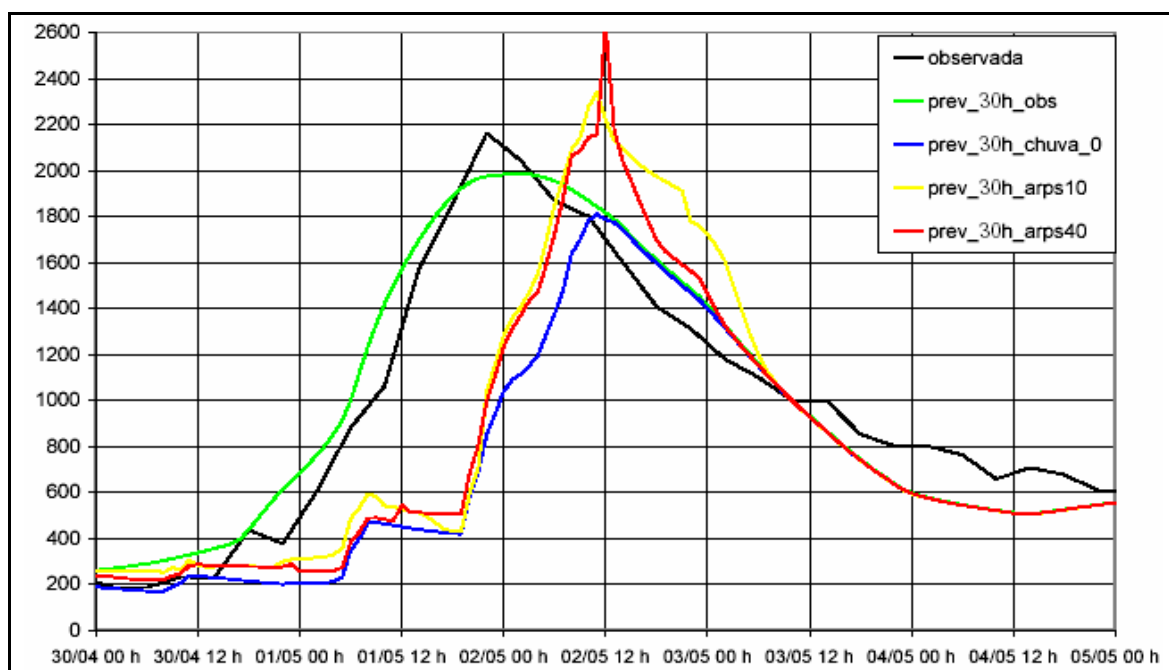


Figura 4.56. Previsão com 30 h de antecedência – e vento 30/04/03 a 05/05/03

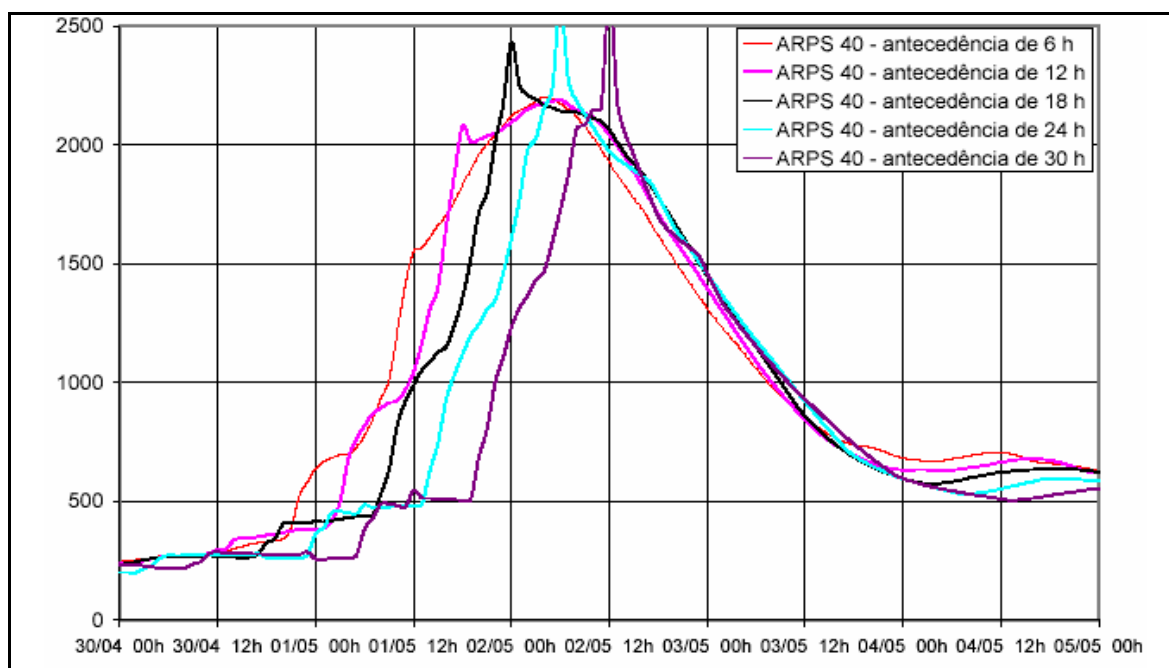


Figura 4.57. Modelo ARPS 40 – antecedência de 6 em 6 horas até 30 horas

Essa figura tem por objetivo enfatizar a subestimação da chuva para o evento e também o erro temporal. Observa-se que os hidrogramas se deslocam em direção a recessão característica do modelo chuva zero (subestimação).

#### **4.8 Avaliação da densidade da rede telemétrica**

Uma das motivações desse estudo é que num futuro não muito distante o sistema de previsão desenvolvido nesta pesquisa seja implantado no reservatório de Machadinho, ou em outro local. É interessante, então, conhecer a importância de uma rede telemétrica densa sobre a bacia, ou seja, qual o ganho que se obtém, em termos de redução do erro da vazão prevista em Machadinho, com uma rede densa de pluviógrafos. Acredita-se que, aumentando o número de pluviógrafos na bacia, aumente também a qualidade das previsões de vazão. Também, acredita-se que existem regiões na bacia que são mais importantes para geração de escoamento do que outras. É razoável, por exemplo, admitir que o monitoramento das cabeceiras da bacia são mais importante para previsões em horizontes próximos ao tempo de concentração da bacia.

As informações quantitativas do desempenho das previsões em função do número de pluviógrafos, ou de sua distribuição na bacia, é interessante pelos seguintes motivos: probabilidades altas de ocorrerem falhas na rede; para dimensionamento de uma rede próxima à ideal e também para detectar possíveis regiões de maior importância de geração de escoamento. Para avaliar essas questões, foram feitas previsões no período de setembro de 2001 a julho de 2003 em Machadinho para alguns cenários. Os cenários propostos foram: retirada de todos os pluviômetros; retirada de postos por região; retirada de postos semi-aleatória.

##### **4.8.1 Retirada dos pluviômetros e retirada de postos por região**

Para mostrar a importância de uma rede densa de pluviógrafos foram retirados todos os pluviômetros da bacia e feita a previsão de até 12 horas de antecedência. A previsão de 12 horas foi escolhida, pois representa, aproximadamente, o patamar superior de previsão aceitável com base em chuva zero, ou seja, aproximadamente o tempo de pico. Este cenário

representa as previsões que poderiam ser feitas atualmente em Machadinho, de forma operacional, sem os modelos de previsão de chuva. Isso, porque as chuvas dos pluviômetros são lidas uma vez ao dia e informações diárias não são suficientes para previsão em tempo real para esta bacia.

A análise das regiões de maior importância foi feita dividindo-se a bacia em 7 sub-bacias segundo a rede de drenagem principal e a forma da bacia. A divisão é apresentada na figura 4.58. Foram retirados individualmente 8 postos (pluviômetros e pluviógrafos) de cada sub-bacia, ou em região próxima e feita a previsão contínua de 12 horas para Machadinho para o período de 11/09/2001 a 29/07/2003.



Figura 4.58. Divisão da bacia em regiões

A análise foi feita com base em algumas estatísticas que são comumente utilizadas em previsões em tempo real e também através da análise gráfica. A figura 4.59 apresenta o coeficiente RD em função do horizonte de previsão para a retirada de postos nas diversas regiões e também a retirada de todos os pluviômetros da bacia: previsão retirando os postos da região do Pelotas concentrado (sem Pelotas concentrado), previsão retirando os postos

da região do Canoas concentrado (sem Canoas concentrado) e assim segue para as demais regiões. Na legenda da figura 4.59, “RD completa” representa a curva do fator RD considerando a totalidade de postos e “RD sem pluviômetros” representa a curva RD desconsiderando todos os pluviômetros na bacia.

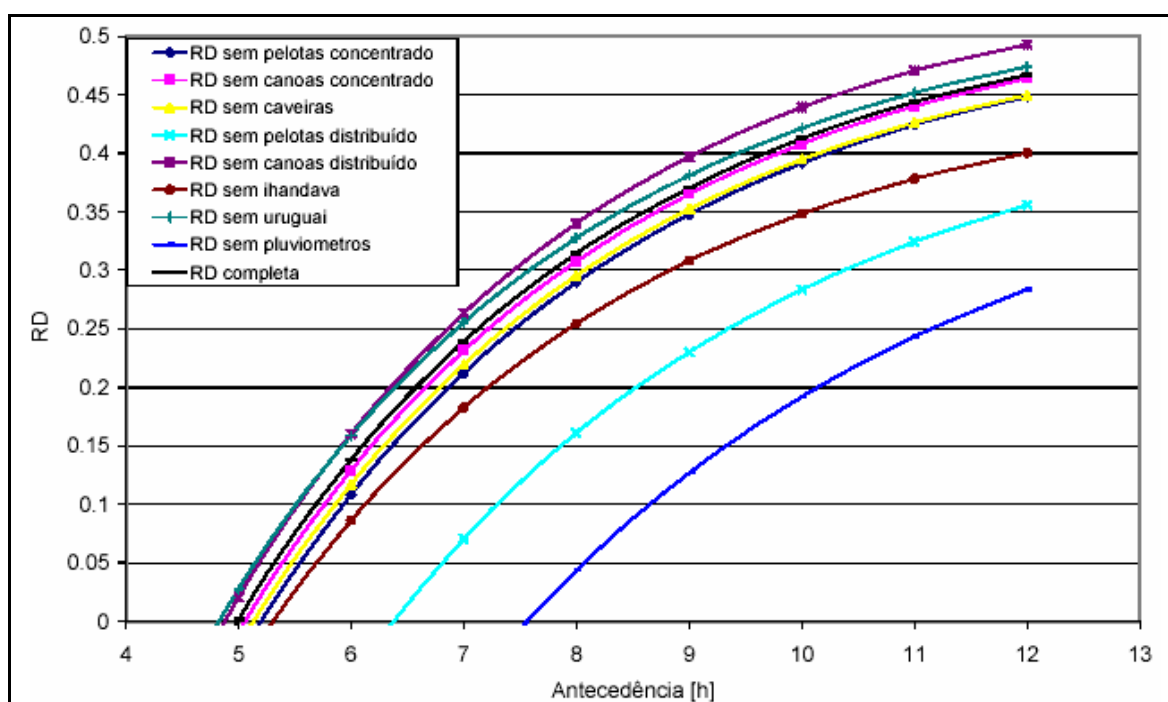


Figura 4.59. Fator RD em função da antecedência para diversos cenários de previsão

O horizonte analisado vai de 0 horas a 12 horas de antecedência, porém, nota-se que o fator RD continua crescendo em 12 horas (derivada de primeira ordem positiva). Devido a grande quantidade de dados associados às dificuldades computacionais de processamento, aqui apresenta-se uma análise até a hora 12, visto que uma análise completa de chuva zero (até 48 horas) foi apresentado anteriormente no item que trata de previsão contínua. O fator RD está apresentado somente da hora 4 em diante, porque abaixo desse horizonte o fator RD é negativo e o melhor dos modelos propostos é o de persistência.

Deve-se observar primeiramente que a retirada dos pluviômetros ocasiona grandes perdas de qualidade na previsão representada pela curva, “RD sem pluviômetros”. Essa curva é interessante, pois representa a situação atual da bacia, haja vista que não é possível

utilizar dados de pluviômetros nesta bacia para previsão em tempo real. Essa curva, quando comparada com as demais, mostra em parte a importância de uma rede densa de pluviógrafos na bacia. É importante notar que, caso os pluviômetros fossem substituídos por pluviógrafos, provavelmente ter-se-ia um ganho maior em termos de previsão de vazão do que a ilustrada na figura acima. Isso porque a distribuição temporal da chuva estaria melhor caracterizada.

Analisando as demais curvas observam-se duas delas que se destacam caracterizando as regiões de maior importância a serem monitoradas para previsão de vazão em Machadinho (região do Pelotas distribuído e região do Inhandava). Ambas as regiões se localizam na parte sul da bacia. Ainda, se levarmos em conta a terceira curva de maior importância, observa-se que esta também se localiza na região sul (Pelotas concentrado). Conclui-se, por esta análise, que a Região Sul da bacia é a região de maior importância para geração de escoamento em Machadinho. Uma explicação para este fato é que a Região Sul da bacia é caracterizada por solos de pouca profundidade, subsolo basáltico e declividades altas. Esses fatores contribuem para maior geração de escoamento superficial e geração de hidrogramas mais rápidos. De fato, quando comparamos as vazões de pico no maior evento do período analisado (2001-2003) que aconteceu entre setembro e outubro de 2001, para o posto Passo do Socorro (bacia do Pelotas – Região Sul e área de drenagem de 8.400 km<sup>2</sup>) e Passo Caru (bacia do Canoas – Região Norte e área de drenagem de 10.258 km<sup>2</sup>), nota-se um pico no Passo do Socorro praticamente 2 vezes maior que no Passo do Caru. Apesar da bacia do Passo da Caru ter área de drenagem superior a do Passo do Socorro, as características hidrológicas daquela bacia ocasionam menor geração de escoamento superficial e uma maior regularização da vazão. Também deve-se considerar que, em alguns eventos importantes deste período, as chuvas foram mais intensas na Região Sul da bacia, inclusive no maior evento do período. Talvez se considerássemos um período maior de dados a tendência observada nas curvas apresentadas não fosse verificada.

Além disso, observa-se que, à exceção da curva “RD sem Uruguai”, as demais curvas não se cruzam. Esse fato salienta a importância das regiões independente da antecedência, porém, a importância não se mantém constante ao longo da antecedência. O fato da curva “RD sem Uruguai” cruzar com uma das curvas em antecedências baixas, ou seja, alterar a

posição de importância, é esperado, uma vez que a região do Uruguai se constitui na região mais próxima ao reservatório de Machadinho. Assim, a contribuição dessa região, é importante para horizontes da ordem do tempo de concentração dessa bacia. Em horizontes maiores, a importância diminui, pois as magnitudes das outras vazões que chegam ao reservatório são bastante superiores a essa. Era esperado que esta curva cruzasse também as demais, porém isso deve ocorrer para horizontes muito baixos. Nesses casos o fator RD é negativo mostrando que a previsão por persistência é melhor e não está representado na figura.

Um fato não esperado é das previsões considerando todos os postos (RD completa). Esperava-se que esta curva ficasse na região como contorno superior às demais, porém considerando todos os postos tem-se uma previsão em Machadinho pior do que a retirada separadamente dos postos da Região do Uruguai e Canoas concentrado. Esse fato pode ter ocorrido por dois fatores: erros nas medições de chuva nos postos dessa região ou pouca sensibilidade do modelo hidrológico a esses postos. Essa última causa é aceitável haja vista que as três curvas (sem Uruguai, sem Canoas concentrado e completa) se mantêm muito próximas. É importante notar que nas regiões do Uruguai e Canoas concentrado existe uma maior concentração de pluviômetros, é possível que existam erros associados aos sensores desses equipamentos.

A figura 4.60 apresenta a estatística do erro padrão para cada antecedência. Observa-se que as regiões de maior importância determinadas pelo fator RD são ratificadas por esta estatística. Na figura é apresentado também o erro resultante da persistência, a qual se constitui em utilizar a vazão no instante zero para cada antecedência. Como era de se esperar, esta curva cruza todas as demais, porém em pontos distintos. O cruzamento se dá primeiro na curva de menor erro, que novamente não são considerando todos os postos e sim retirando separadamente os postos da região do Uruguai e Canoas concentrado. A de maior erro é cruzada no intervalo [7h, 8h] e representa a situação atual possível de previsão, o que está de acordo com o gráfico do fator RD.

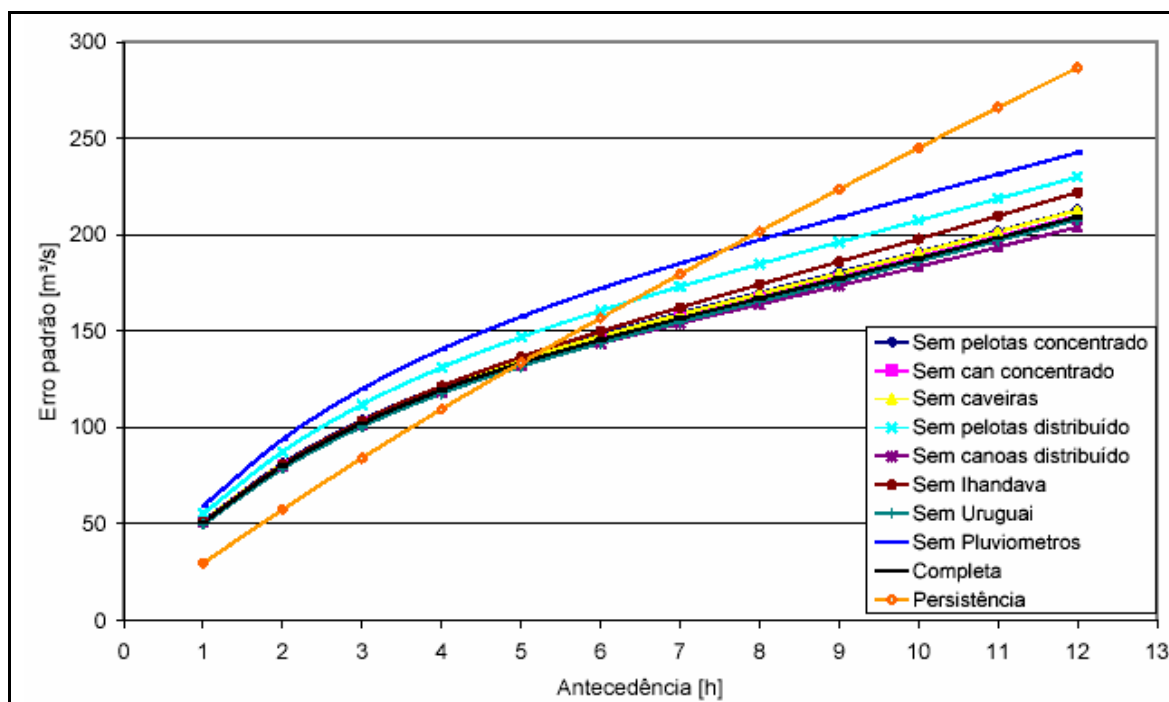


Figura 4.60. Erro padrão em função da antecedência para diversos cenários de previsão

Conclui-se, dessa forma, que para a situação atual de previsão (somente os pluviógrafos) só se obtém ganhos em fazer a previsão quando o horizonte for próximo de 8 horas. Caso os pluviômetros fossem substituídos por pluviógrafos o ganho ao realizar a previsão passaria para menos de 5 horas, porém, espera-se que o ganho seja ainda maior em termos de antecedência e em termos de eficiência, pois a distribuição temporal da chuva estaria melhor caracterizada.

Por outro lado, considerando a escassez de recursos para planejar e executar uma rede hidrológica próxima à ideal pode ser inviável tal rede sobre este aspecto. Assim, num período de recursos limitados, poder-se-ia monitorar regiões que influenciam mais nas vazões em Machadinho que seriam as regiões localizadas na parte Sul da bacia (Pelotas distribuído, Pelotas concentrado, e Ihandava).

#### 4.8.2 Retirada de postos semi-aleatória

Uma análise simplificada de como se deterioram as previsões à medida que postos são



retirados de forma semi-aleatória sobre a bacia é também apresentada. Uma análise mais geral poderia incluir um número maior de simulações com introdução de bandas de confiança com probabilidades associadas aos erros das previsões.

Nas retiradas semi-aleatórias adotou-se o seguinte critério: a bacia foi dividida em 6 faixas verticais (direção norte-sul); retirou-se aleatoriamente um pluviômetro de cada faixa formando o primeiro conjunto de postos; repetiu-se o procedimento anterior resultando então em 12 pluviômetros e constituindo o segundo conjunto. A seqüência seguiu até a retirada total de pluviômetros (36 pluviômetros), resultado no sexto conjunto de postos. Para cada conjunto foi feita a previsão de vazão de 12 horas em Machadinho, resultando 6 simulações. Foi feito um total de 24 simulações. Para as demais simulações, consideraram-se os conjuntos já formados anteriormente, escolhendo-os de forma a não haver repetição da previsão. Para cada simulação foi calculado o erro padrão na vazão e construída a curva “erro padrão versus número de postos permanentes”.

A figura 4.61 apresenta os resultados obtidos das previsões para o horizonte de 12 horas com chuva zero. Cada valor das curvas representadas pela figura 4.61 foi obtido a partir de 4 valores. A máxima representa o máximo dos 4 valores, a mínimo representa o mínimo dos 4 valores e a média representa a média dos 4 valores. Observa-se que as curvas apresentam comportamento de natureza exponencial, ou seja, o decréscimo do erro é maior quando poucos postos estão em operação e alguns postos são acrescentados. Considerando que todos os pluviômetros existentes na bacia fossem substituídos por pluviógrafos, o ganho em termos de redução de erro padrão poderia ficar em torno de 15%. Se realmente os pluviômetros fossem substituídos, o ganho esperado seria maior que 15%, pois a distribuição temporal da chuva estaria melhor caracterizada.

Além disso, foi feito um estudo complementar com objetivo de avaliar a melhora da previsão, em termos de redução do erro padrão, caso uma rede de pluviógrafos fosse instalada na bacia, seguindo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

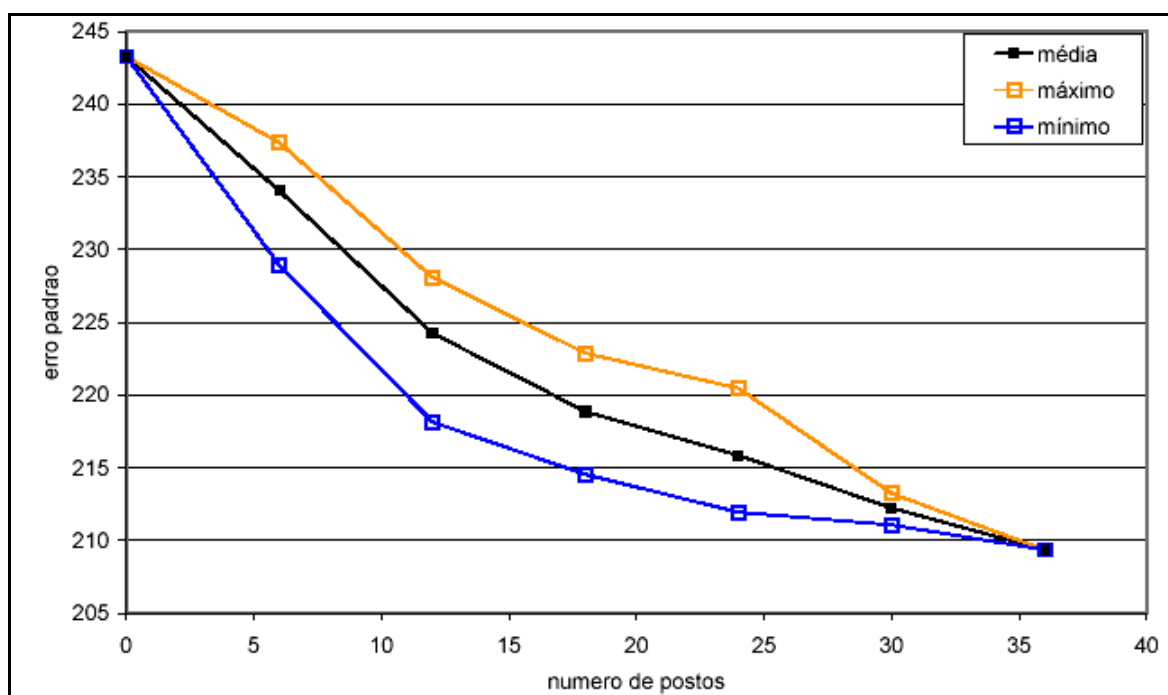


Figura 4.61. Erro padrão em função do número de pluviômetros na bacia

As recomendações da OMM, para regiões montanhosas e de clima tropical, é de um pluviógrafo a cada 250 km, representando este valor o limite mínimo de postos para uma rede moderada. Adotando-se este valor para esta bacia, o número de pluviógrafos distribuídos espacialmente deveria ser 128. A bacia em estudo pode ser considerada excelente quanto ao monitoramento hidrológico relativamente a outras bacias do Brasil. Mesmo assim existe, aproximadamente, apenas 1 posto de chuva a cada 1.000 km<sup>2</sup>. Comparando com alguns países desenvolvidos, tem-se: na Alemanha um posto a cada 9 km<sup>2</sup>, nos EUA, 1 posto a cada 32 km<sup>2</sup> e na Austrália, 1 posto a cada 35 km<sup>2</sup> (Ebert, 2002). Para a curva média dos erros como função do número de postos, foram ajustadas duas funções analíticas. O melhor ajuste foi obtido pela função de potência e logarítmica. Admitindo que o erro como função do número de postos segue uma lei de potência, ou logarítmica, foi possível determinar o erro médio para o número de 128 postos.

A figura 4.62 apresenta os resultados do ajuste e a extrapolação da curva média seguindo as recomendações da OMM para o número de postos em função da área de drenagem. As curvas estão transladadas no eixo horizontal por que se considerou no ajuste

o número total de postos na bacia (pluviógrafos existentes mais pluviógrafos faltantes segundo a OMM). Seguindo a recomendações da OMM, a redução do erro ficaria em torno de 25%. Assim, com 50 postos, ou seja, acrescentando 36 pluviógrafos na bacia a redução do erro fica em torno de 15%. Acrescentando mais 78 postos o decréscimo relativo do erro é aproximadamente 10% o que totaliza os 25%. Salienta-se que a extrapolação, nessa situação, é quase um “chute”, mas motiva o investimento em monitoramento.

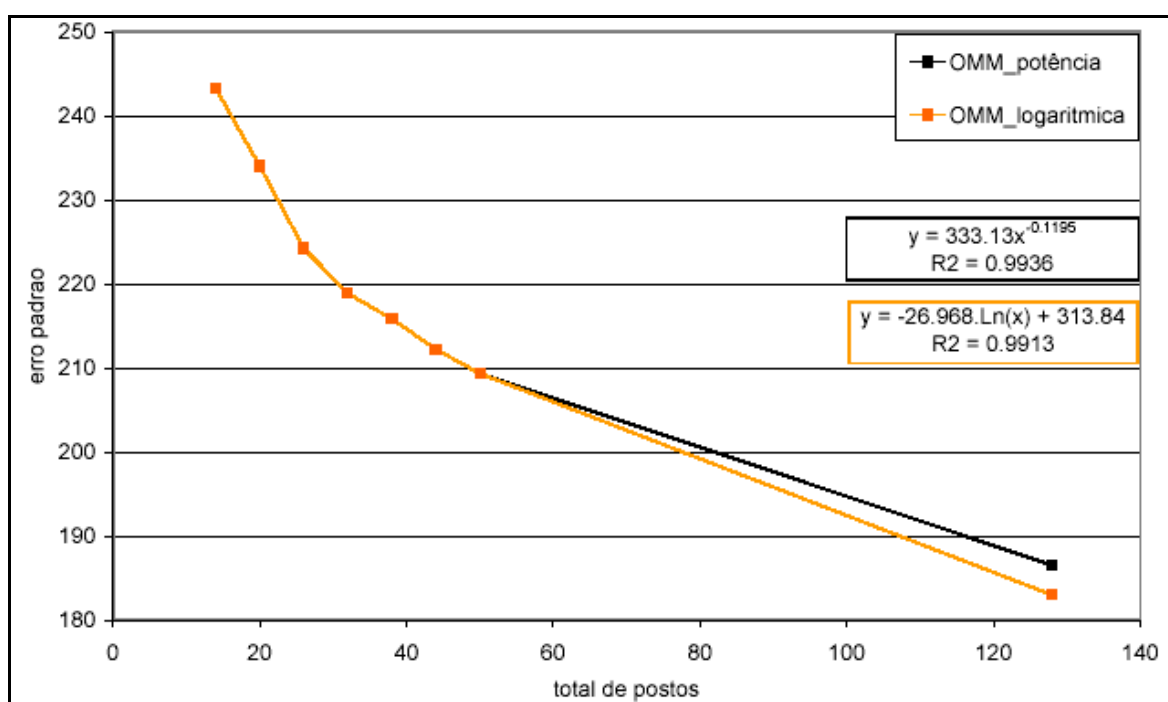


Figura 4.62. Extrapolação da curva erro padrão versus número de postos na bacia

Embora na presença de conclusões parciais, não podendo os valores aqui apresentados serem tomados como definitivos, os resultados poderiam ser confirmados mediante uma série mais exhaustiva de simulações computacionais, onde, aplicar-se-ia a mesma metodologia desenvolvida e proposta neste trabalho.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

As conclusões numeradas que seguem devem ser vistas com cautela, porque a análise das previsões com os modelos propostos foi feita num período de pouca representatividade, o modelo ARPS estava em fase de implementação, sendo adaptado à física local, as previsões de chuva foram baseadas em apenas um modelo e os dados da rede telemétrica apresentaram problemas, principalmente os dados de linígrafos que não puderam ser utilizados.

i) Embora o modelo hidrológico tenha apresentado algumas inconsistências, observadas principalmente no período de verificação, o modelo, com a discretização proposta, foi considerado adequado. As inconsistências foram observadas em eventos de pequena magnitude os quais têm menor importância na previsão de cheias.

ii) As formas de atualização propostas se mostraram eficientes para horizontes até 32 horas. Em parte a atualização ficou prejudicada pelos erros nas leituras dos sensores nos postos fluviográficos. O fato da atualização não melhorar as previsões acima de 32 horas é esperado, já que a vazão atual explica uma parte menor da vazão à medida que a antecedência aumenta.

iii) A previsão por eventos foi interessante, porque incluiu alguns eventos de cheia de 2001 a 2002. Embora os erros nas previsões de chuva tenham ocasionado grandes erros nas previsões em horizontes entre 30 a 40 horas, nessas antecedências esses modelos tiveram desempenho superior ao modelo chuva zero. Em antecedências menores que 30 horas, os ganhos ficaram mais evidentes. Em alguns casos, pela análise gráfica, foi possível caracterizar o erro temporal na distribuição de chuva, o que resultava em dupla soma das chuvas, gerando hidrogramas com grandes erros de pico e volume.

iv) Nos três eventos analisados observou-se que as melhores previsões foram obtidas com uso dos modelos meteorológicos de maior resolução espacial, o que está de acordo com o esperado e mostra a importância da discretização dos modelos de previsão de chuva.

v) No período de simulação contínua, as estatísticas mostraram que as previsões de chuva do modelo ARPS nas diferentes discretizações não acrescentaram aumento da precisão e antecipação das vazões na maior parte das antecedências quando comparado ao modelo com hipótese de chuva zero. Algum ganho foi observado apenas em antecedências próximas a 48 horas. A eficiência dos modelos ARPS 10 e ARPS 04 foi superior ao ARPS 40, o que mostra a importância da discretização.

vi) A análise gráfica do maior evento do período de previsão contínua, mostrou que entre 12 e 15 horas, as previsões com a hipótese de chuva zero, apresentam resultados satisfatórios. Esse fato também é comprovado pela análise dos eventos isolados. Essa previsão é importante, pois representam o limite superior de antecedência de previsões caso seja adotado um modelo baseado apenas na chuva observada. A análise desse evento mostra que as chuvas, nas diferentes discretizações espaciais do modelo ARPS, foram subestimadas, resultando em grandes erros de volumes em antecedências acima de 24 horas.

vii) A análise da importância da rede de pluviógrafos distribuídas por região, mostrou que as regiões de maior importância para geração de escoamento em Machadinho estão situadas no sul da bacia, além disso, ficou evidente que a desconsideração dos pluviômetros na previsão acarreta perda considerável na eficiência das previsões em Machadinho.

viii) A análise simplificada da rede de pluviógrafos quando postos são retirados de forma semi-aleatória na bacia, mostrou certa dispersão. Considerando a média dos valores, a redução em termos de erro padrão na vazão fica em torno de 15% quando os pluviômetros são substituídos por “pluviógrafos”. Seguindo as recomendações da OMM, o número de pluviógrafos da bacia deveria ser no mínimo 128, o que reduziria em 25% o erro padrão na vazão quando utilizada extrapolação exponencial.

Os resultados das previsões de vazão no período de 2001 a 2002, analisados em forma de eventos (eventos de cheia), mostraram ganhos significativos quando incorporada a previsão quantitativa de chuva. O mesmo não foi observado no período de simulação contínua. Apesar das análises nesse período terem mostrado que as previsões quantitativas de chuva ainda não serem adequadas para previsão de vazão no reservatório de Machadinho, não se pode esquecer que: esses resultados foram baseados em apenas um modelo de previsão de chuva, o período de análise foi bastante curto e foi caracterizado por chuvas abaixo da média histórica. Quando se avalia, por exemplo, os trabalhos de Hollingsworth, et al. (2003) e Ebert, et al. (2002) encontra-se motivação para seguir essa linha de pesquisa. Acredita-se que as previsões de chuva em breve se constituirão de ferramenta indispensável na previsão de vazão. Mesmo no estado atual da arte, e mesmo nesta bacia, os modelos meteorológicos já fornecem algum ganho em termos de vazão prevista. Uma análise mais detalhada, com um número maior de modelos e um período de dados mais longo poderia comprovar esse fato ou mostrar ganhos maiores. Em bacias de grande área de drenagem os ganhos em termos de volume previstos com uso dos modelos de previsão de chuva são mais evidentes, como mostram os estudos de diversos autores como, Ebert, et al. (2002).

Uma previsão em tempo real de alguns dias pode acrescentar informações para tomada de decisão e trazer benefícios no gerenciamento dos recursos hídricos. Em horizontes menores, as decisões podem ser mais fortemente influenciadas pela previsão.

## **5.2 Recomendações**

A metodologia de previsão proposta nesta pesquisa pode ser implementada para previsões operacionais em qualquer bacia para melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Particularmente este estudo foi feito na bacia do Uruguai até o reservatório de Machadinho. Porém, para que se justifique a implementação de um modelo de previsão de volumes afluentes, modificando, por exemplo, as regras operacionais atualmente executadas no sistema elétrico, se faz necessário uma análise mais detalhada dos modelos propostos.

Seria desejável:

i) Utilizar um período maior de dados de previsão de chuva para melhor avaliar o desempenho do modelo ARPS nas diferentes discretizações. Justifica-se a utilização de um período maior de dados por dois motivos: o modelo ARPS vem sendo adaptado à física local sendo que recentemente foi alterado mais severamente e o período analisado nesta pesquisa não é representativo, foi muito seco e curto.

ii) Utilizar outros modelos de previsão de chuva. É possível que existam outros modelos que se adaptem melhor ao local. No Brasil, por exemplo, são feitas, rotineiramente, previsões com o modelo ETA (INPE) e RAMS (IAG-USP). Em fase de implementação está o modelo MM5 na Bacia do Rio Doce. Nada impede a utilização de outros modelos regionais existentes no mundo, porém existe a necessidade de adaptá-los a física local o que demanda mais recursos humanos e financeiros. A utilização de diversos modelos de previsão de chuva para prever vazão é interessante, pois se torna possível confrontar esses modelos perante a variável de saída de interesse - volumes afluentes. É possível que determinado modelo de chuva seja ideal para previsão de chuvas convectivas, por exemplo. O sistema operacional de previsão poderia estar baseado em mais de um modelo de previsão de chuva.

iii) Ordenar as previsões de chuva. Uma forma de aumentar a eficiência das previsões de vazão com base na previsão de chuva seria procurar agrupar as previsões de chuva em tipos comuns. Ou seja, formar grupos de diferentes tipos de chuva. Como citado por Damrath, et al. (2000), existe dificuldade dos modelos preverem chuvas convectivas. Poderia existir um escala de confiabilidade nas previsões de chuva baseada em estudos dessa natureza. Assim, é provável que previsões de chuvas originadas de frentes frias tenham maior chance de acerto do que previsões de chuvas convectivas, por exemplo. As decisões a serem tomadas em horizontes mais remotos poderiam ser influenciadas pelas previsões de chuva com ponderação segundo o tipo de frente de chuva.

iv) Obter previsão por conjuntos. Gerar conjuntos de previsões quantitativas de chuva a partir de perturbações nas condições iniciais. Uma análise estatística sobre o conjunto de previsões poderia introduzir os conceitos de incertezas e aos resultados das previsões seriam associadas bandas de confiança. Com os conceitos de incertezas introduzidos, ao

invés de uma hidrograma de vazões previstas, seria gerada uma zona possível de vazões. Este sistema foi implementado pelo National Weather Service River Forecast (Perica, et al., 2000).

v) Avaliar as incertezas de posicionamento da chuva. As incertezas quanto ao posicionamento da chuva (incertezas no espaço) poderiam ser avaliadas de forma análoga aos trabalhos Jasper, et al. (2002). A movimentação do campo de precipitações sobre a bacia criaria condições diferentes de volumes gerados. Às saídas do modelo de previsão seriam associadas probabilidades e existiria uma faixa de vazões com determinada probabilidade de ocorrência, onde, parcialmente as incertezas no posicionamento da chuva estariam quantificadas.

vi) Analisar os resíduos das previsões. A análise pode mostrar que existe alguma correlação com determinada variável do sistema. Se existir alguma correlação é por que ainda é possível melhorar as previsões geradas.

vii) Aprofundar a análise da rede de pluviógrafos. Uma análise mais consistente da importância de uma rede densa de pluviógrafos na bacia deveria incluir um número maior de simulações e a cada conjunto de retiradas de postos poderia ser ajustada uma distribuição estatística. Os erros nas vazões previstas, à medida que postos são retirados, seriam avaliadas com técnicas de incertezas. Avaliações econômicas poderiam comprovar a viabilidade da rede em determinada bacia. Um estudo dessa natureza poderia ser feito em diversas bacias com monitoramento hidrológico adequado, para, possivelmente extrapolar os resultados em outras bacias.

Como aplicação direta para incrementar a geração de energia da hidrelétrica de Machadinho sugere-se: desenvolver os tópicos abordados anteriormente e incluir na análise as regras operacionais adotadas atualmente no reservatório de Machadinho para propor um sistema de previsão de volumes para o reservatório. O sistema poderia incluir modelos distintos conforme o período do ano. No inverno, por exemplo, que na média chove mais e as chuvas são fortemente dependentes das frentes frias, um sistema de previsão de volumes que inclui previsão da chuva pode se mostrar eficiente.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDERSON, M. L; CHEN, Z.-Q; KAVVAS, M. L; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic*, v. 7, n. 4, p. 312–318, jul-ago 2002.

ARAÚJO, FILHO P.F. de; MOURA, G. B. A. de. Utilização do modelo ETA para subsidiar informações ao sistema de controle de enchentes do Rio Capibaribe. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2000, Natal, *Anais*. ABRH, jun. 2000.

BATHURST, J. C; WICKS, J. M; O'CONNEL, P. E. The SHE / SHESED basin scale water flow and sediment transport modeling system. In: *Water Resources Publications*. Singh, V. P. Editora: Computer Models of Watershed Hydrology, Highlands Ranch, 1995.

BEDIENT, F. B; HOBLIT, B. C; GLADWELL, D.C; VIEUX, B. E. Nexrad radar for flood prediction in Houston. *Journal of Hydrologic*, v. 5, n. 200, p. 269–277, jul. 2000.

BENJAMIN, J. R; CORNEL, C. A. *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. Editora: McGraw-Hill Book Company, 1970.

BEVEN, K. J; WOOD, E. F. Flow routing and the hydrological response of channel networks. In: Beven, K; Kirkby, M. J. *Channel Network Hydrology*, ed. 1993, Editora: John Wiley & Sons.

BORGA, M. Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, n. 267, p. 26-39, set. 2002.

BOX, G. P.; JENKINS, G. M. *Time series analysis forecasting and control*. Oakland: Holden-Day, 1976.

BRUN, G. W. *Previsão Contínua em Tempo Real do Volume de Afluência do Reservatório Ernestina, RS*. Porto Alegre: UFRGS, 1999. Dissertação (Mestrado em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

CASTANHARO, G; MINE, M. R. M. Operação de reservatórios baseada em previsão de aflúências de curto prazo em tempo real. In: XIV Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju, *Anais*. ABRH, nov. 2001.

CASTILHO, A. S. de; OLIVEIRA, L. M. de. Previsão hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares utilizando modelo linear de propagação. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, *Anais*. ABRH, nov. 2001.

CARTER, M. M; ELSNER, J. B; BENNETT, S. P. A. Quantitative precipitation forecast experiment for Puerto Rico. *Journal of Hydrologic*, n. 239, p. 162–178, nov. 2000.

CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: Editora: McGraw-Hill Book Company, 1959.

CHU, S. T. Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources*, n. 14, p. 461-466, 1978

COLLIER, C. G; KRZYSZTOFOWICZ, R. Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*. v. 239, p. 1-2, 2000.

COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

CORDERO, A. *Previsão de Cheias com Modelos Simplificados do Processo Chuva-Vazão, RS*. Porto Alegre: UFRGS, 1988. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

COUTINHO, M. M. *Previsão por Conjuntos Utilizando Perturbações Baseadas em Componentes Principais*. São José dos Campos: INPE, 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CRUZ, J. C.; LANNA, A. E.; LEAO, S.; GERALDO L.; SILVEIRA, A. L. L. Previsão de cheias em tempo real pelo uso conjugado de modelos semi-conceitual e empírico. In: VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, *Anais*. São Paulo: ABRH, nov. 1987.

CUNGE, J. A. On the of flood propagation computation method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research*, n. 2, v. 7, p. 20-30, 1969.

DAMÁZIO, J M; OLIVEIRA, L C. K. de. Um Modelo para a Geração Sintética de Pseudo-Previsões de Médias Espaciais de Precipitação Diária. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, *Anais*. São Paulo: ABRH: nov. 2001.

DAMRATH, U; DOMS, G; FRUHWALD, D; HEISE, E; RICHTER, B; STEPPELER, J; Operational quantitative precipitation forecasting at the German weather service. *Journal of Hydrologic*, n. 239, p. 260–285, set. 2000.

Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE-SP. *NET*, SP. Disponível em <<http://www.daee.sp.gov.br/servicos/>>. Acesso em 20 outubro de 2003.

DIAZ, A. F; STUDZINSKI, C.D; MECHOSO, C. R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguai and Southern Brazil and sea surface temperature in the pacific and Atlantic Oceans. *Journal Climate*, n. 11, v. 2, p. 251-271.1998.

EBERT, E. E; DAMRATH, U; WERGEN, W; BALDWIN, M. E. The WGNE assessment of short-term quantitative precipitation forecasts (QPFs) from operational numerical weather prediction models. Revised version submitted to *Bulletin of the American Meteorological Society*, 24 jul. 2002.

GIANNONI, F; SMITH, J. A; ZHANG, Y; ROTH, G. Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates. *Advances in Water Resources*, n. 26, p. 195–203, set. 2003.

GLEICK, J. *Caos a Criação de uma Nova Ciência*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990.

GOLDING, B. W; Quantitative precipitation forecasting in the UK. *Journal of Hydrologic*, n. 239, p. 286–305, set. 2000.

HAAS, J; MINE, M. R. M; FERNANDES, C. V. S. Feasibility of Meteorological Rainfall Forecast to Improve Hydroplant Reservoir Inflows Forecasts In: *XI World Water Congress*, 2003, Madrid, 2003.

HAAS, R; REINERT R. R; DOTTA D. 2002. Avaliação do modelo de previsão de tempo regional ARPS em sistema computacional distribuído. *NET*, Santa Catarina - Brasil. Disponível em: <<http://150.162.19.150/arquivos/rmav-flnCLIMERH.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2003.

HAMLET, A. F; LETTENMAIER, D. P. Columbia river streamflow forecasting based on ENSO and PDO climate signals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, p. 333- 341, nov-dez-1999.

HAMLET, A; HUPPERT, D; LETTENMAIER, D. P. Economic value of long-lead streamflow forecast for Columbia river hydropower. *Journal of Water Resources Planning and Management*, p. 91- 101, mar-abr-2002.

HOLLINGSWORTH, A; SIMMONS, A. J; GHELLI, A; TSUYUKI, T; HART, T. Improvements in the skill of numerical weather prediction with global models. *Bulletin World Meteorological Organization*, v. 52, n. 1, p. 33-39, jan. 2003.

IBBITT, R. P; HENDERSON, R. D; COPELAND, J; WRATT, D. S. Simulating mountain runoff with meso-scale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience. *Journal of Hydrology*, n. 239, p. 19-32, set. 2001.

INEMET. Disponível em <[http://www.inmet.gov.br/previsao\\_tempo](http://www.inmet.gov.br/previsao_tempo)>. Acesso em 22 de outubro de 2003.

JASPER, K; GURTZ, J; LANG, H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecast with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, n. 267, p. 40-52, set. 2002.

JOHNSON, D; SMITH, M; KOREN, V; FINNERTY, B. Comparing mean areal precipitation estimates from NEXRAD and rain gauge networks. *Journal of Hydrologic*, v. 4, n. 2, p. 117-124, abr. 1999.

KOUSSIS, A. D; LAGOUVARDOS, K; MAZI, K; KOTRONI, V; SITZMANN, D; LANG, J; ZAISS, H; BUZZI, A; MALGUZZI, P. Flood forecasts for urban basin with integrated hydro-meteorological model. *Journal of Hydrologic*, v. 8, n. 1, jan. 2003.

LANNA, A. E; INDURSKY, A. B. Predição de vazões médias mensais com modelos empíricos. *Revista Brasileira de Engenharia*. Caderno de Recursos Hídricos. ABRH, v. 1, p. 59-91, 1983.

LETTENMAIER, D. P; WOOD, E. F. Hydrologic Forecasting. In: David R. Maidment. *Handbook of Hydrology*, ed. 1993, Editora: McGRAW – Hill

LORENZ, E. N. Deterministic non-periodic flow. *Journal Atmospheric Sciences*, v. 20, p. 130-141, 1963.

LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28- variable atmospheric model. *Tellus*, v. 17, p. 321-333, 1965.

LORENZ, E. N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, v. 21, p. 289-307, 1969.

LUDWIG, K. Derivation of optimal flood forecast models from river basin models for planning purposes. *Proceedings of the Oxford Symposium*. Oxford, abr. de 1980, IAHS, n. 129.

MACHADO F. W; STEINER, A. A; MINE, M. R. M. Previsão de precipitação através de modelos estocásticos para controle de cheias e maximização da geração de energia. In: XIV Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, *Anais*. São Paulo: ABRH: nov. 2001.

MAO, Q; MUELLER, S. F; JUANG, H. M. H. Quantitative precipitation forecasting for the Tennessee and Cumberland river watersheds using the NCEP the regional spectral model. *American Meteorological Society*, n. 15, p. 29-45, fev. 1999.

MCBRIDE, J. L; EBERT, E. E. Verification of quantitative precipitation forecast from operational numerical weather prediction models over Australia. *American Meteorological Society*, v. 15, n. 15, p. 103-121, fev. 1999.

MINE, M. R. M. *Método Determinístico para Minimizar o Conflito entre Gerar Energia e Controlar Cheias*. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

MINE, M. R. M. *Modelos Estocásticos Lineares para Previsão de Cheias em Tempo Real*. São Paulo: EPUSP, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, 1984.

MOORE, R. J. The probability-distributed precipitation and runoff production at point and basin scales. *Hydrologic Science Journal*, n. 30, p. 273-297, 1985.

MULLEN, S. L; BUIZZA, R. Quantitative precipitation forecast over the united by the ECMWF ensemble prediction system. *American Meteorological Society*, n. 129, p. 638–663, jun. 2000.

National Centers for Environmental Prediction – NCEP. *NET*, EUA. Disponível em <<http://www.ncep.noaa.gov>> Acesso em: 24 jul. 2003.

NAKAYAMA, P. T; BRAGA, Junior. B. P. F. Sistema de suporte à decisão: previsão de chuva com radar. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, *Anais*. São Paulo: ABRH: nov. 1997.

NASH, J. E; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I a Discussion of Principles. *Journal of Hydrologic*, n.1, v. 10, p. 282 – 290, 1970.

National Hydrologic Warning Council. Use and Benefits of the National Weather Service River and Flood Forecasts. Prepared by EASPE, mai. 2002, *NET*, EUA. Disponível em <<http://www.ncep.noaa.gov>> Acesso em: 24 jul. 2003.

O`CONNELL, P. E; CLARKE, R. T. Adaptive hydrological forecasting – a review. *Hydrological Sciences – Bulletin – des Sciences Hydrologiques*, v. 26, n. 2, p. 175-205, jun. 1981.

OLSON, D. A; JUNKER, N. W; KORTY, B. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC. *Weather and Forecasting*, v. 10, p. 498-511, 1995.

PEDROLLO, O. C. *Previsão em Tempo Atual de Cheias com Uso de Sistema Especialista Difuso*. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.

PEDROLLO, O. C; LANNA, A. E. Previsão de cheias em tempo atual em sistemas fluviais com contribuição laterais relevantes. *Revista Brasileira de Engenharia*. ABRH, v. 9, n. 2, p. 25-51, 1991.

PEREIRA FILHO, A. J. Sistema de previsão hidrometeorológica, In: *Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH: Vitória, ES, Vol II, p. 1 – 8, nov. 1997.

PINHEIRO, A; *Avaliação da Aplicação e Previsão de Cheias com Modelo Distribuído na Bacia do Rio Itajaí-Açu*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1990.

PINHEIRO, M. C; *Modelação Matemática do Escoamento e Caracterização Geométrica da Morfologia Fluvial*: subsídios para a navegação e a operação de reservatórios. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2000.

PREVISÕES NUMÉRICAS. INPE / CPTEC. Brasil. *NET*, São Paulo, Brasil. Disponível em <[http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp\\_ensemble.shtml](http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_ensemble.shtml)>. Acesso em: 24 julho 2003.

PREVISÕES NUMÉRICAS. INPE / CPTEC. Brasil. *NET*, São Paulo, Brasil. Disponível em <[http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp\\_global.shtml](http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_global.shtml)>. Acesso em: 28 julho 2003.

PROJETO PrevMeso: Previsão quantitativa de chuva. *NET*, Santa Catarina, Brasil. Disponível em <<http://cluster.labplan.ufsc.br>>. Acesso em: 20 março 2003.

SILVEIRA, C. A. C. *Previsão de Volumes de Espera em Tempo Real para Usina Hidrelétrica de Sobradinho*. Porto Alegre: UFRGS, 1996. Dissertação, (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA DIAS, M. A. F. Complexos Convectivos de Mesoescala. *Climanálise Especial*, CPTEC/INPE, Cachoeira Paulista - SP, out. 1996.

SIMEPAR: *NET*, Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em 20 outubro de 2003.

SMITH, K. T; AUSTIN, G. L. Nowcasting precipitation – a proposal for a way forward. *Journal of Hydrologic*, n. 239, p. 34 – 45, set. 2000.

SMITH, M.B; KOREN, V. I; WELLS, E; WANG, D; ZHANG, Z. Evaluation of the advantages of the continuous SAC-SMA model over an event api model: In: Presented at 15<sup>th</sup> Conference on Hydrology, AMS, 9 a 14 de jan. 2000. Long Beach, CA.

REFSGAARD, J. C. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, v. 28, p. 65-84, 1997.

TANG, X. N; KNIGHT, D. W; SAMUELS, P. G. Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 6, p. 610 – 620, jun. 1999.

TENÓRIO, R. S; ANTONIO M. A. de; MOLION, L. C. B. Estudo da precipitação através de um sistema de radar meteorológico no nordeste do Brasil: In:, *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Centro Oeste*, 25 a 28 de nov. de 2001. Aracaju-SE.

TUCCI, C. E. M; COLLISCHONN, W; ANDREOLLI, I. *Previsão de Vazões de Curto e Médio Prazo na Operação de Usinas Hidrelétricas*. Porto Alegre: UFRGS, 2003, Instituto



de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico, P&D e ANEEL.

TUCCI, C. E. M; CLARKE, R. T; DIAS, P. L. S. da; COLLISCHONN, W. *Previsão de Vazão com Base na Previsão Climática*. Distrito Federal: Dupligráfica, 2003. Projeto BRA/00/029, capacitação do setor elétrico brasileiro em relação à mudança global do clima. Relatório de pesquisa.

TUCCI, C. E. M. Flood Flow Forecasting. *Bulletin World Meteorological Organization*, v. 52, n. 1, p. 46-52, fev. 2003.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2<sup>o</sup> edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

TUCCI C. E. M; CLARKE, R. T. Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. *IAHS*. p. 455-454, 1980.

TUCCI C. E. M; SÁNCHEZ, J; LOPES, M. O. S. Modelo matemático precipitação-vazão IPH II. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (*Recursos Hídricos. Publicação n. 3*), 1981.

WEISSE, A; MICHEL, C; AUBERT, D; LOUMAGNE, C. Assimilation of soil moisture in a hydrological model for flood forecasting. In: *Proceedings of a Symposium held During the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht*. The Netherlands, jul. 2001, IAHS, n. 270.

WERNSTEDT, K; HERSH, R. Climate forecasts in planning promise and ambiguity. *American Water Resources*, v. 38, n. 6, p. 1703-1713, dez. 2002.

XUE, M; DROEGEMEIER, K, K; WONG, V. The advanced regional prediction system (ARPS) - A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: model dynamics and verification. *Meteorology and Atmospheric Physics*, n. 75, p. 161-193, jul. 2000.

XUE, M; DROEGEMEIER, K. K; WONG, V; SHAPIRO, A; BREWSTER, K; CARR, F; WEBER, D; LIU, Y; WANG, D. The advanced regional prediction system (ARPS)- A

multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. part II: model physics and applications. *Meteorology and Atmospheric Physics*, n. 76, p. 143-165 jul. 2001.

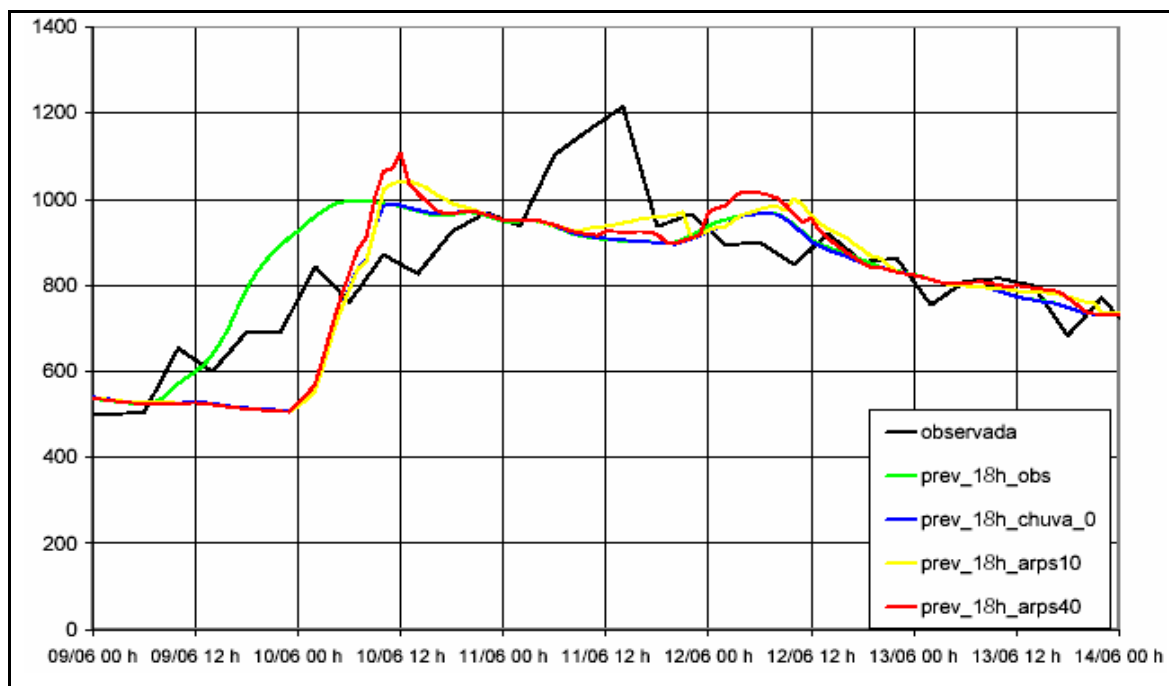
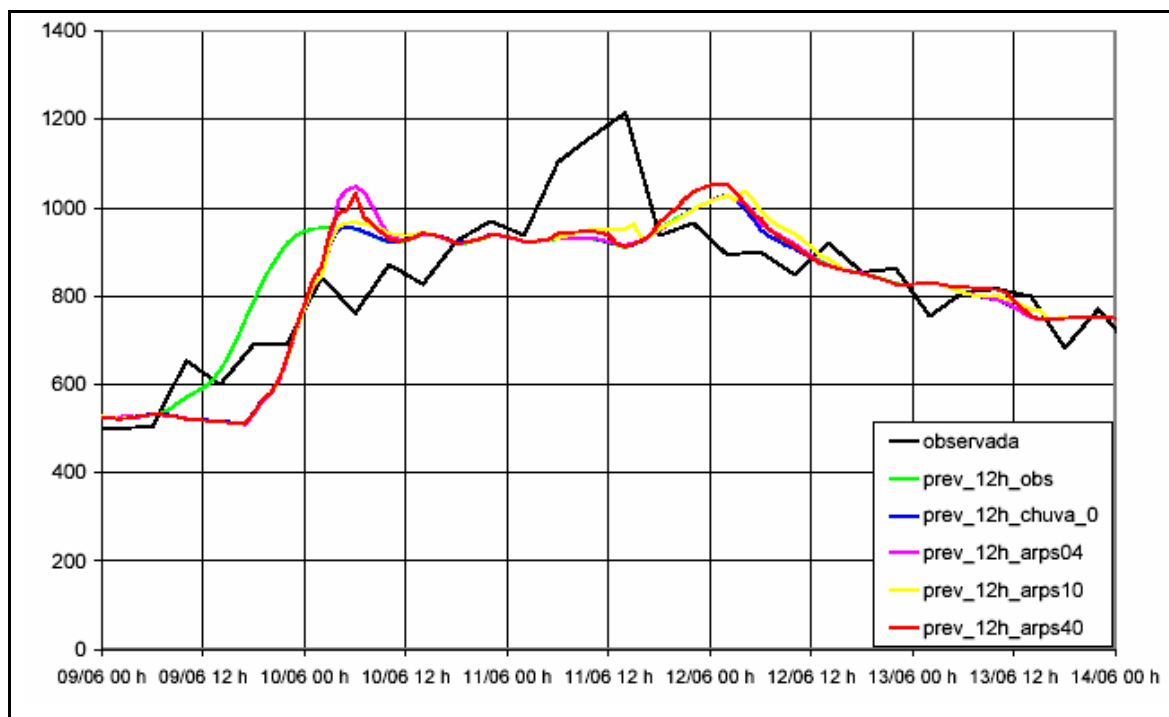
YATES, D. N; WARNER, T. T; LEAVESLEY, G. H. Prediction of a Flash Flood in complex terrain. Part II: A comparison of flood discharge simulations using rainfall input from radar, a dynamic model, and an automated algorithmic system. *American Meteorological Society*, v. 39, n. 6, p. 815-825, jun. 2000.

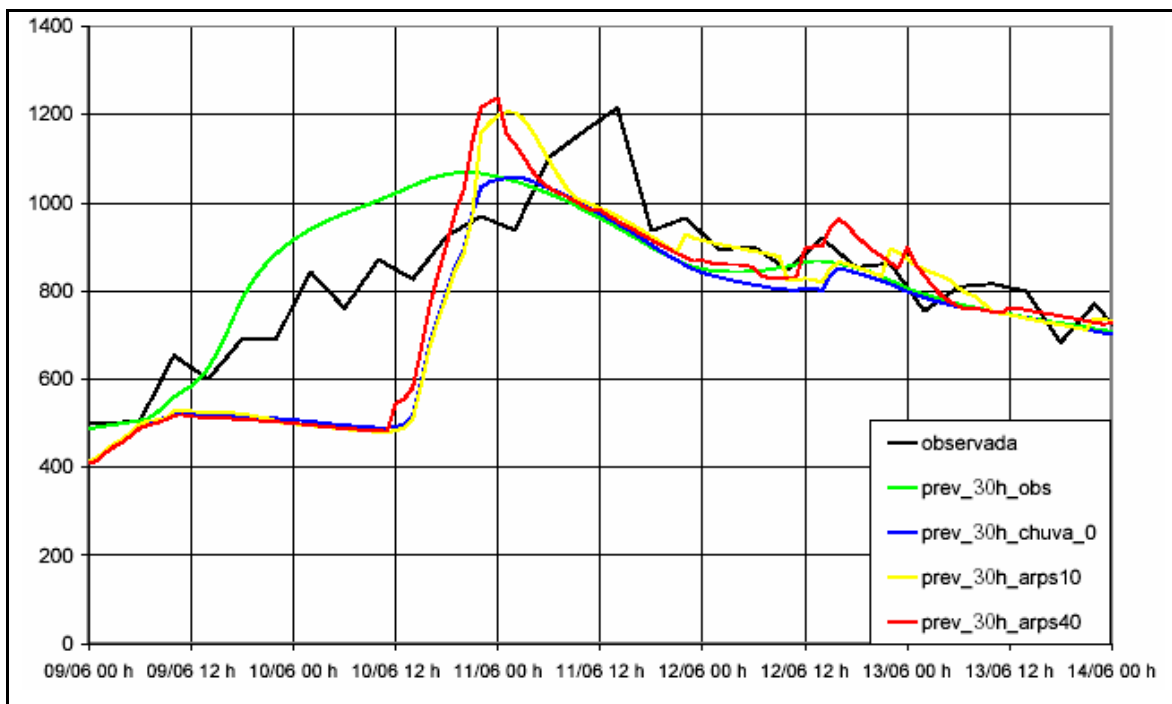
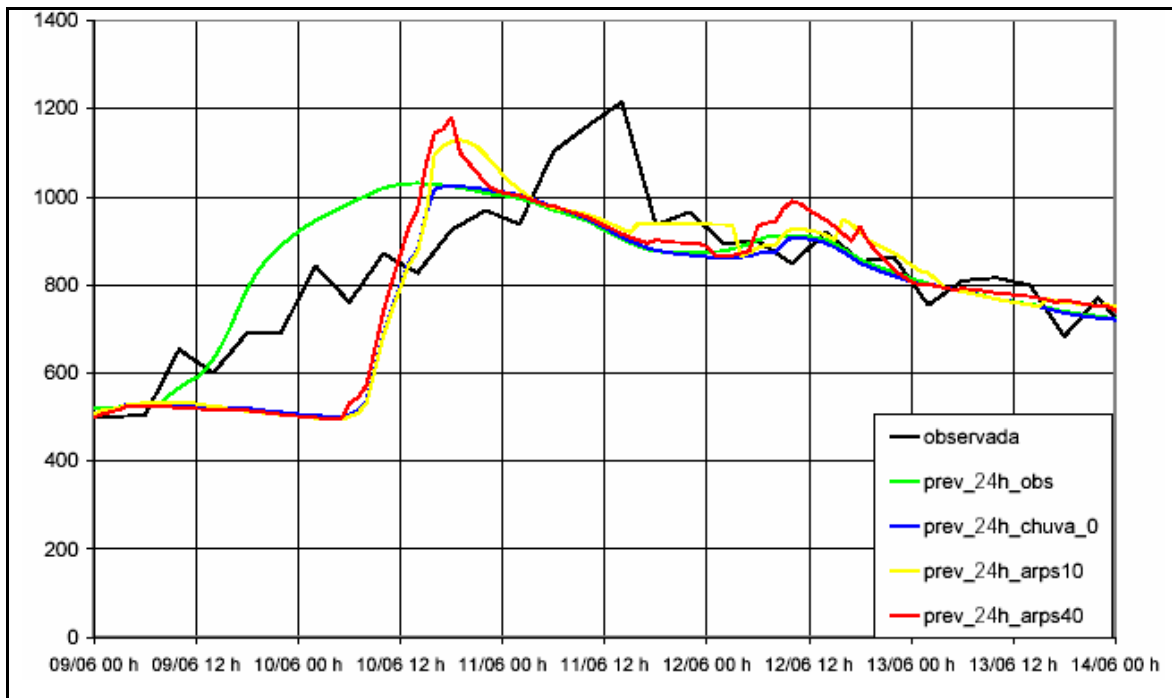
YU, Z; LAKHTAKIA, M. N; YARNAL, B; WHITE, R. A; MILLER, D. A; FRAKES, B; BARRON, E. J; DUFFY, C; SCHWARTZ, F. W. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. *Journal of Hydrology*, n. 218, p. 72-91, fev. 1999.

ZAMANILLO, E. A. *Previsão em Tempo Real em uma Hidrovia Controlada por Barragens*. Porto Alegre: UFRGS, 1988. Dissertação, (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

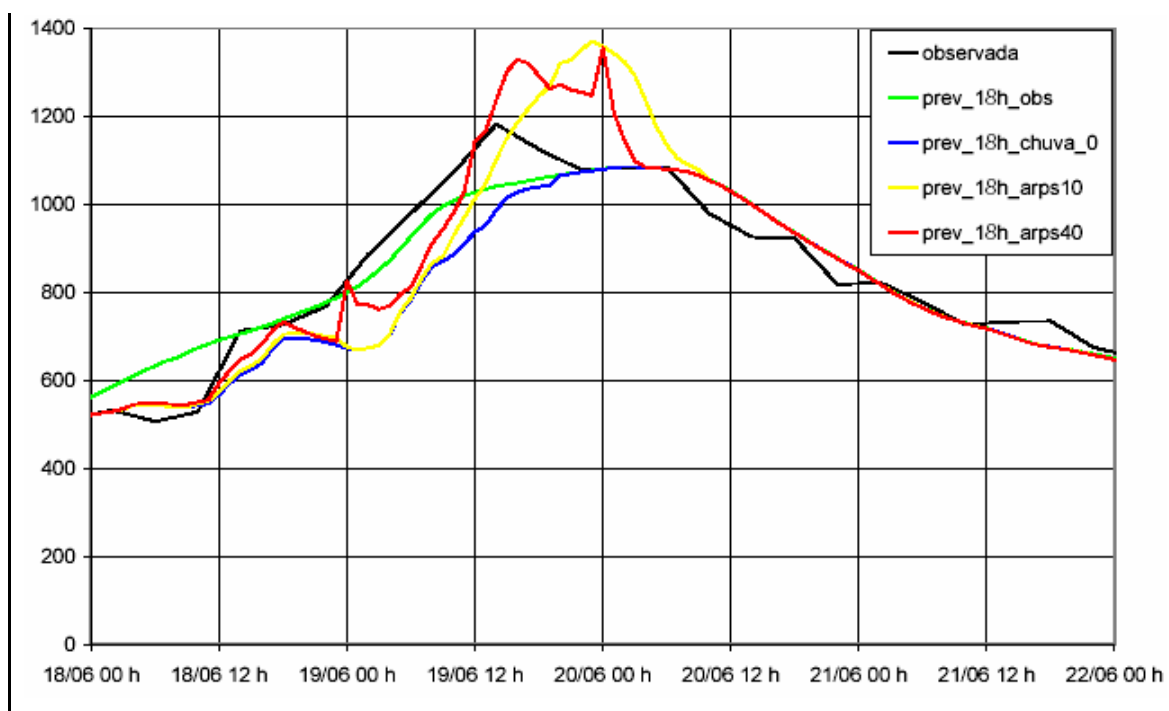
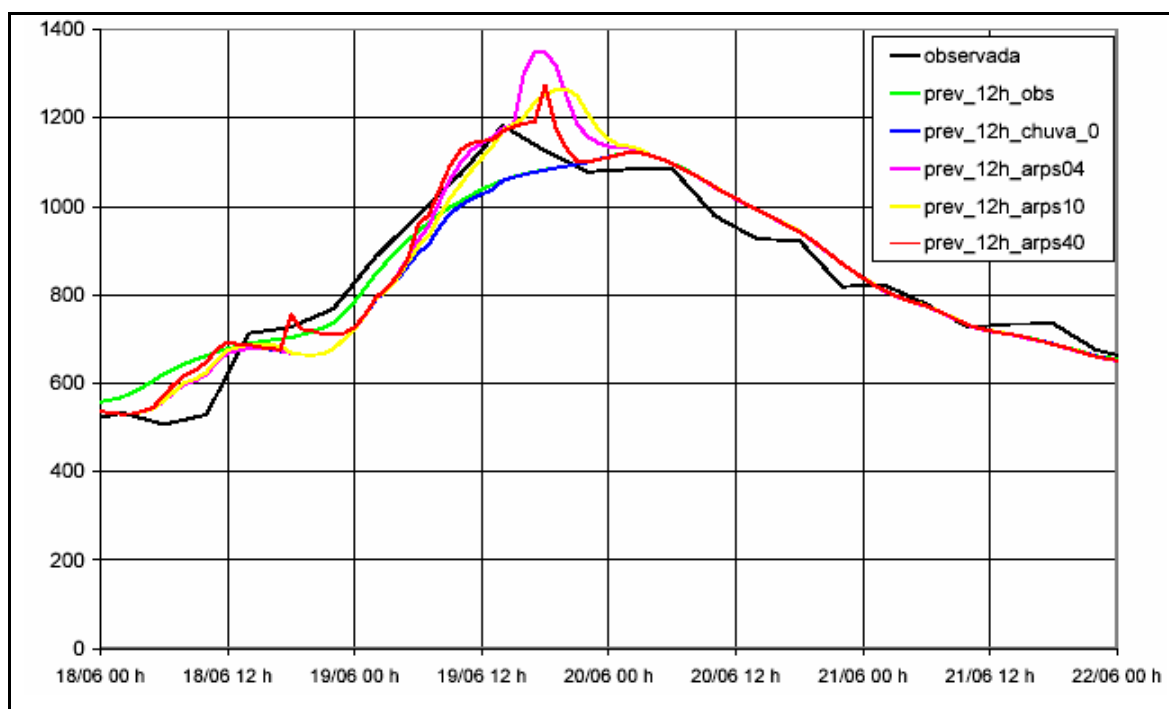
**ANEXOS A: Hidrogramas dos eventos no período de simulação contínua**

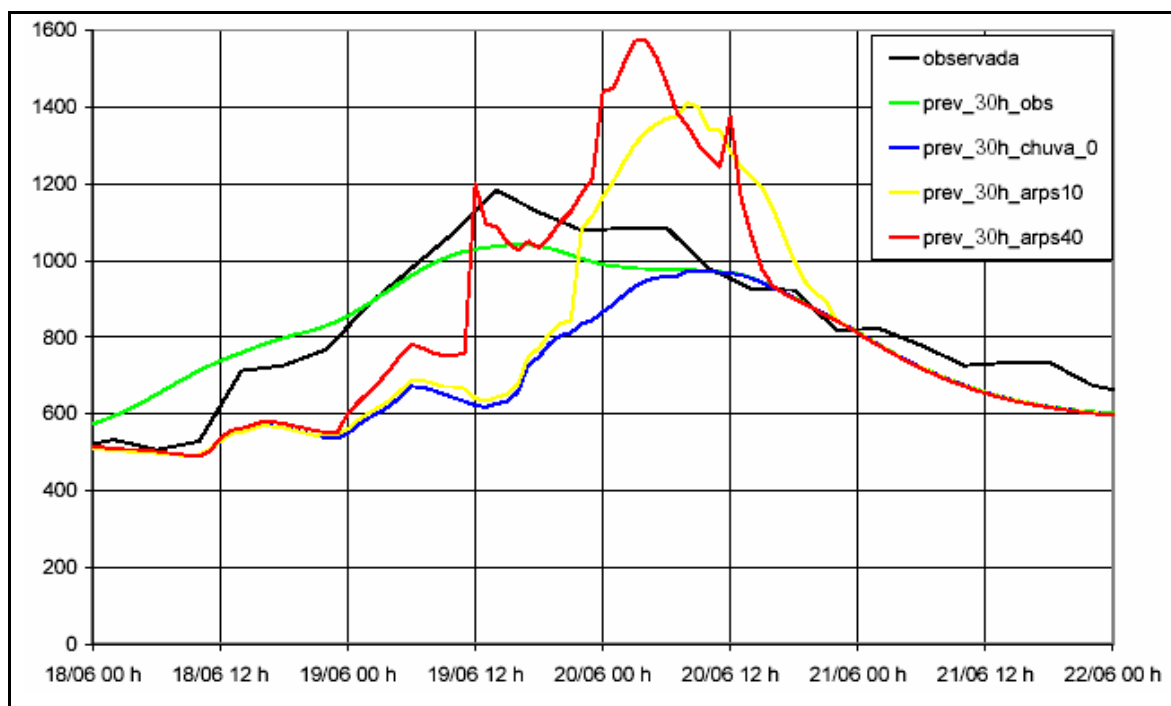
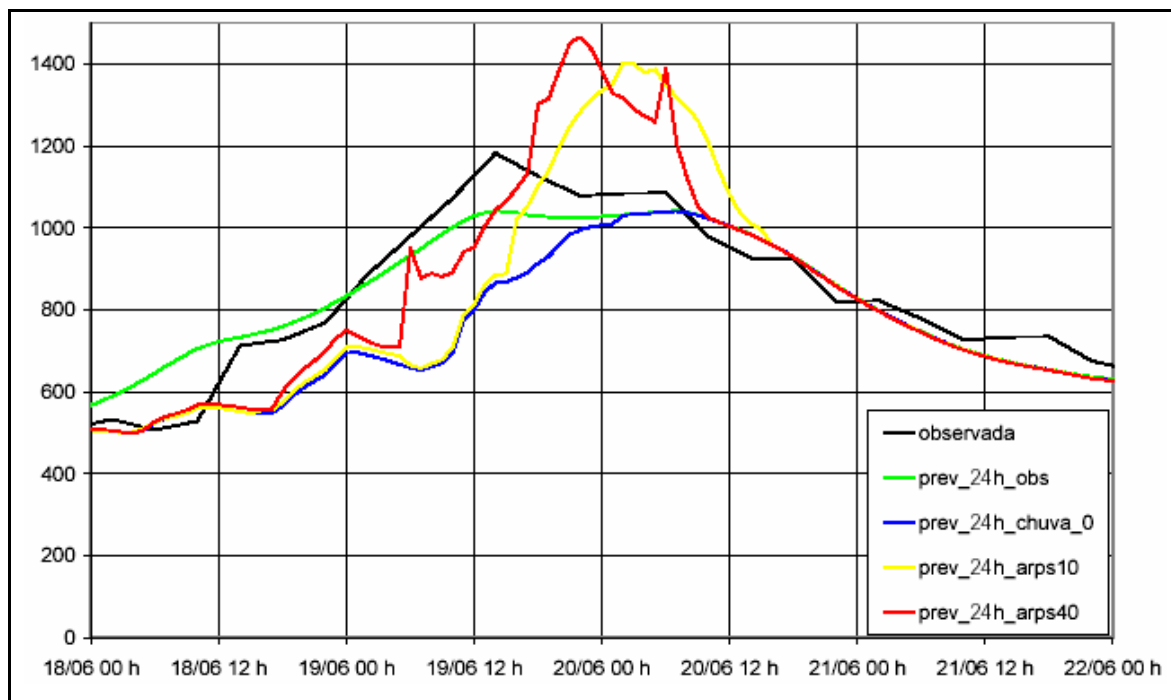
**ANEXO A1** – hidrogramas do evento 09/06/2003 a 14/06/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, 18 h, 24h e 30 h respectivamente – vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



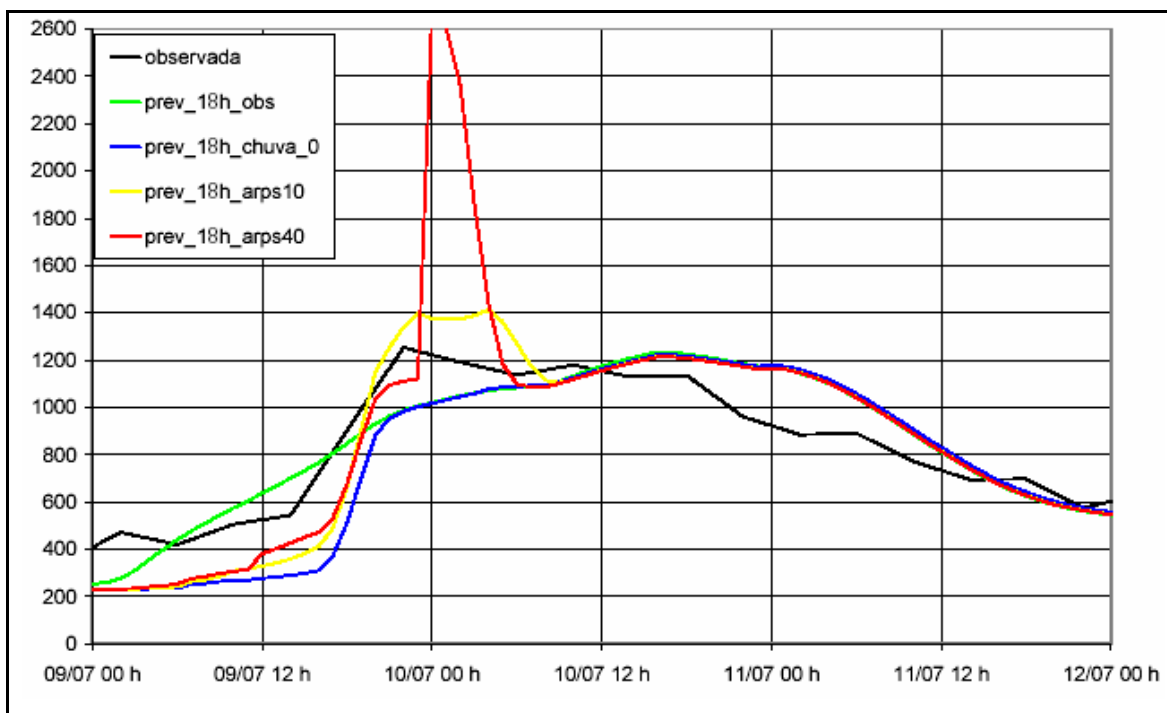
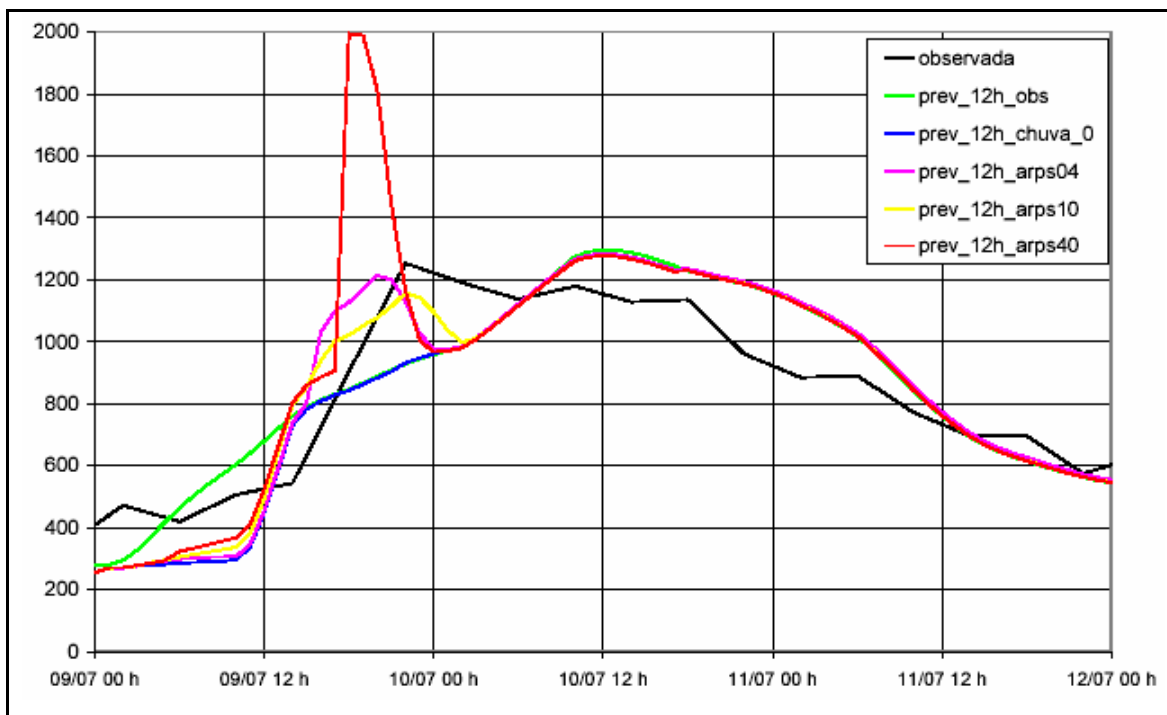


**ANEXO A2** – hidrogramas do evento 18/06/2003 a 22/06/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, 18 h, 24h e 30 h respectivamente – vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

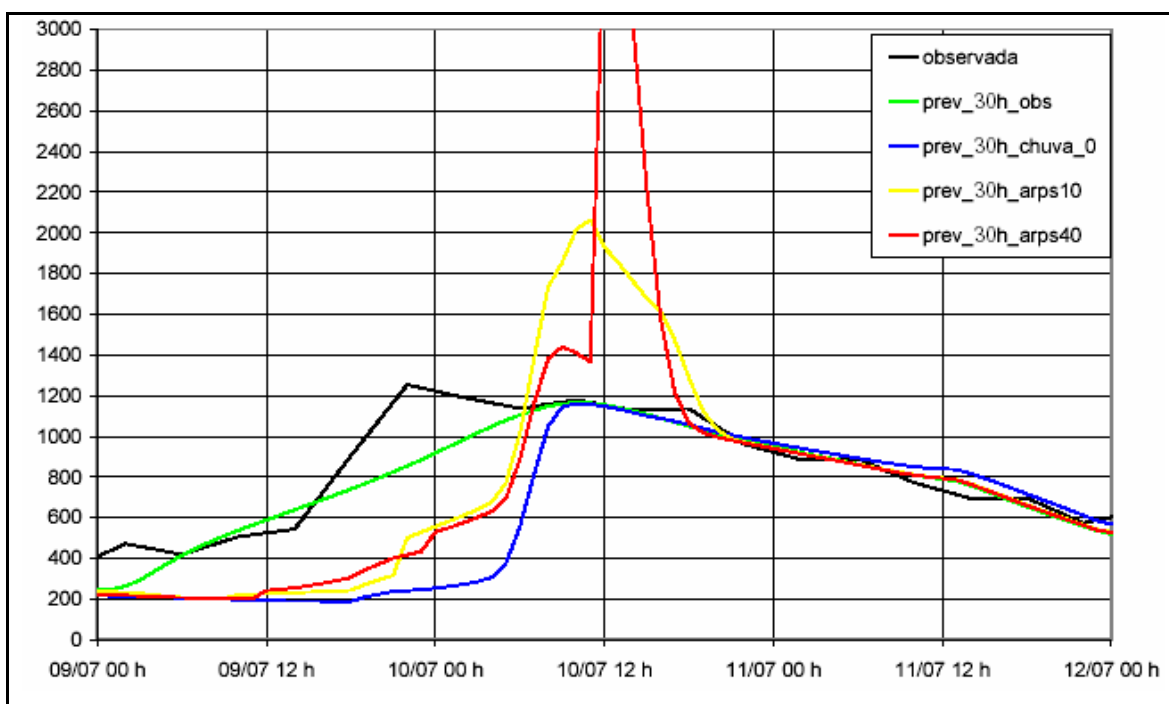
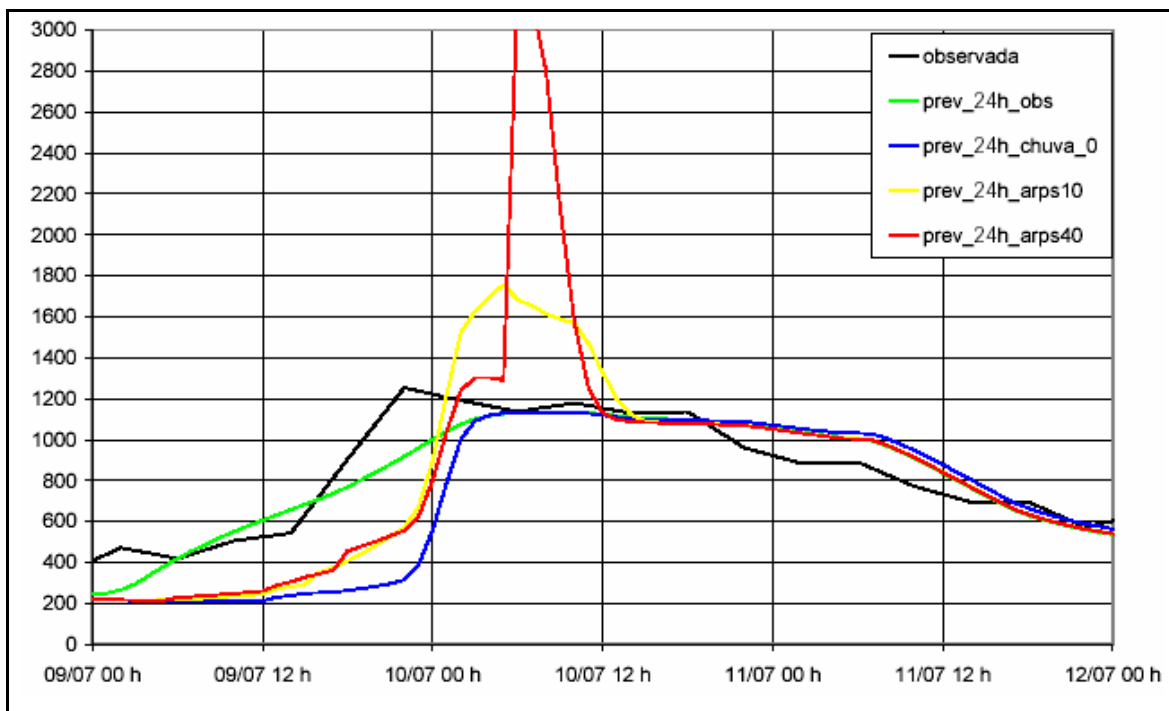




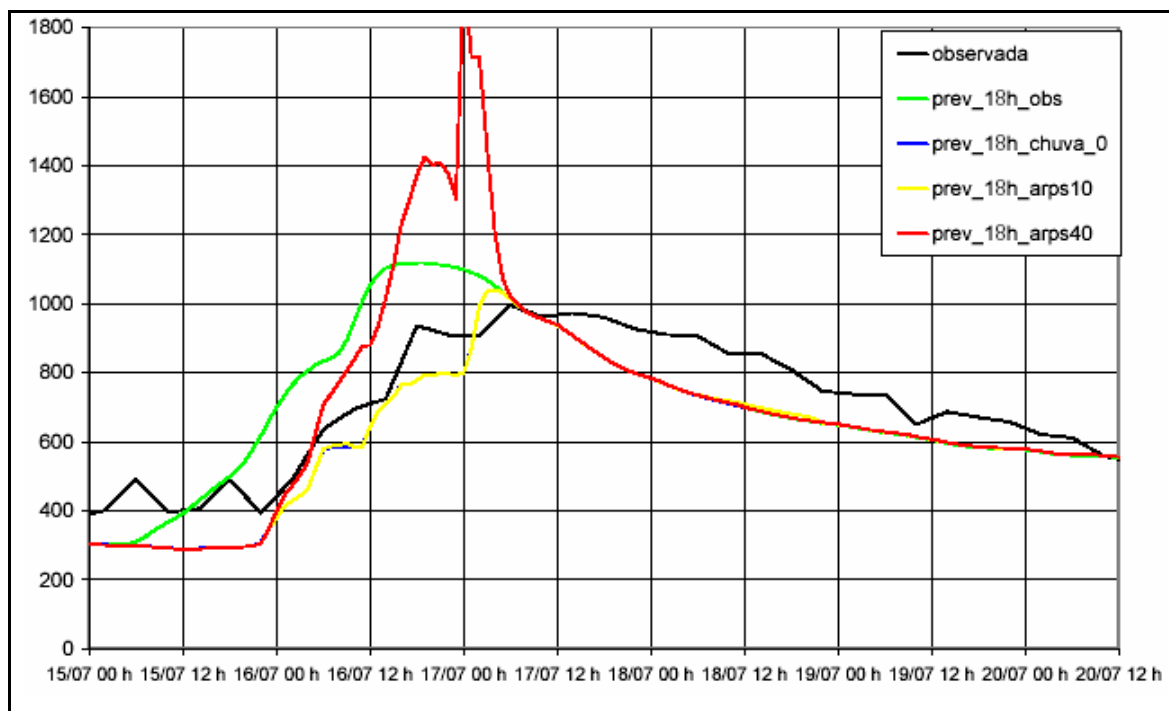
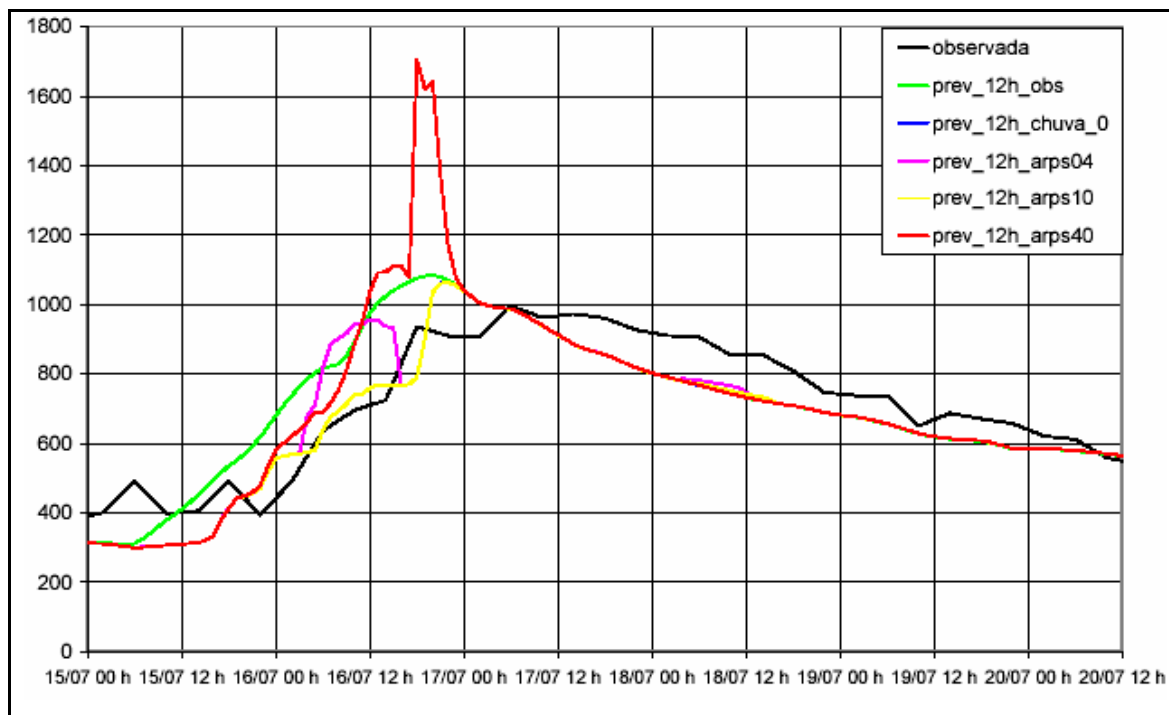
**ANEXO A3** – hidrogramas do evento 09/07/2003 a 12/07/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, 18 h, 24h e 30 h respectivamente – vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

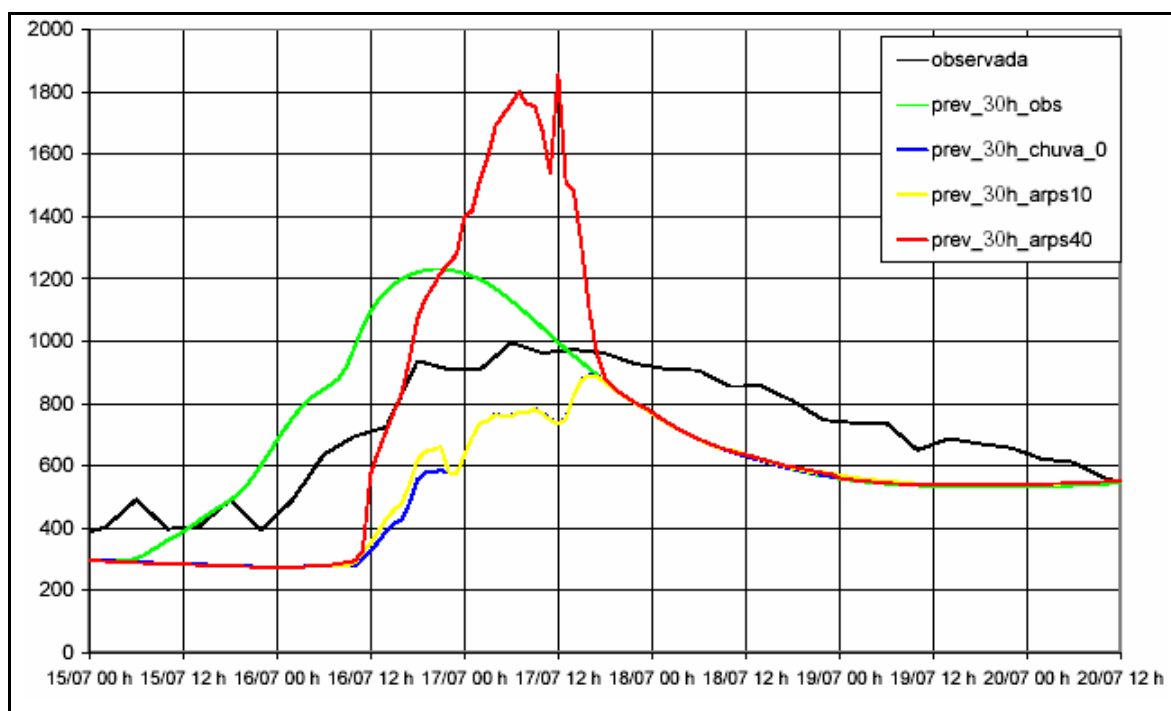
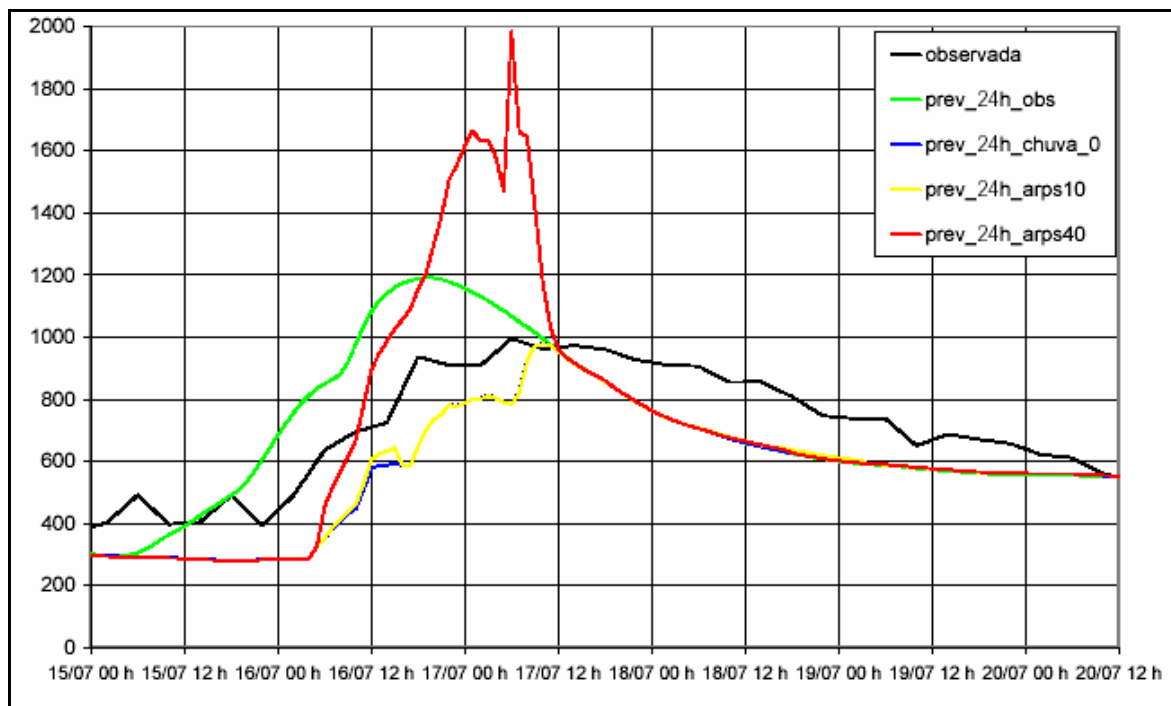




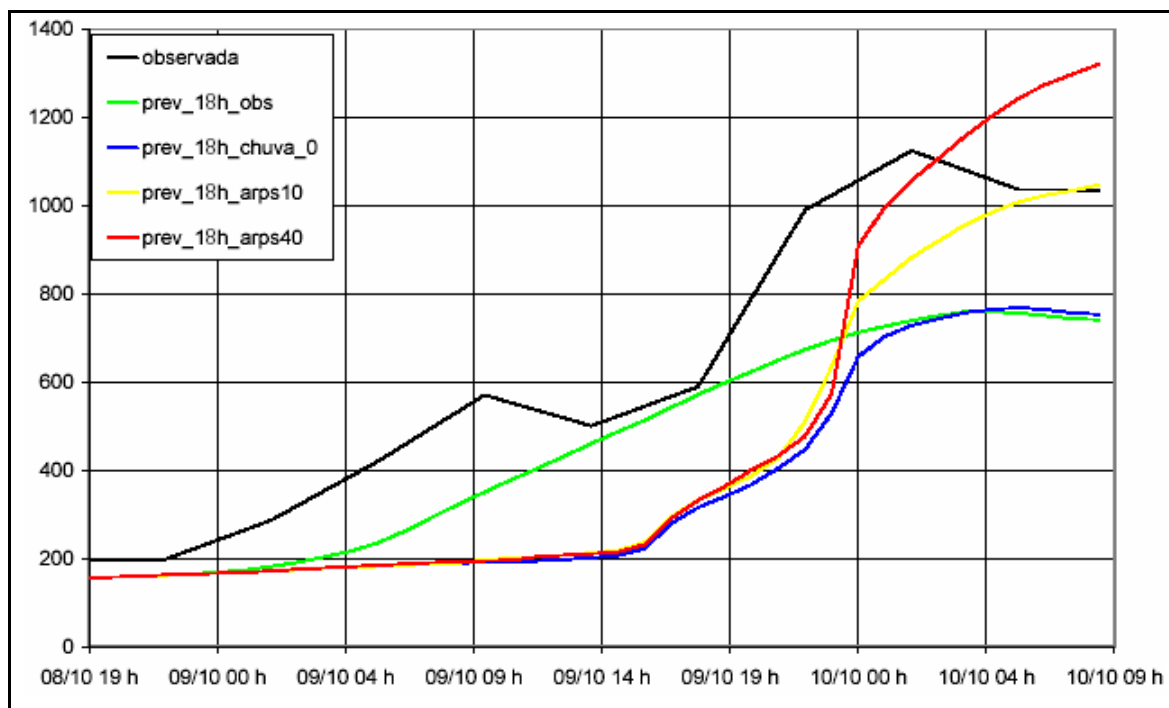
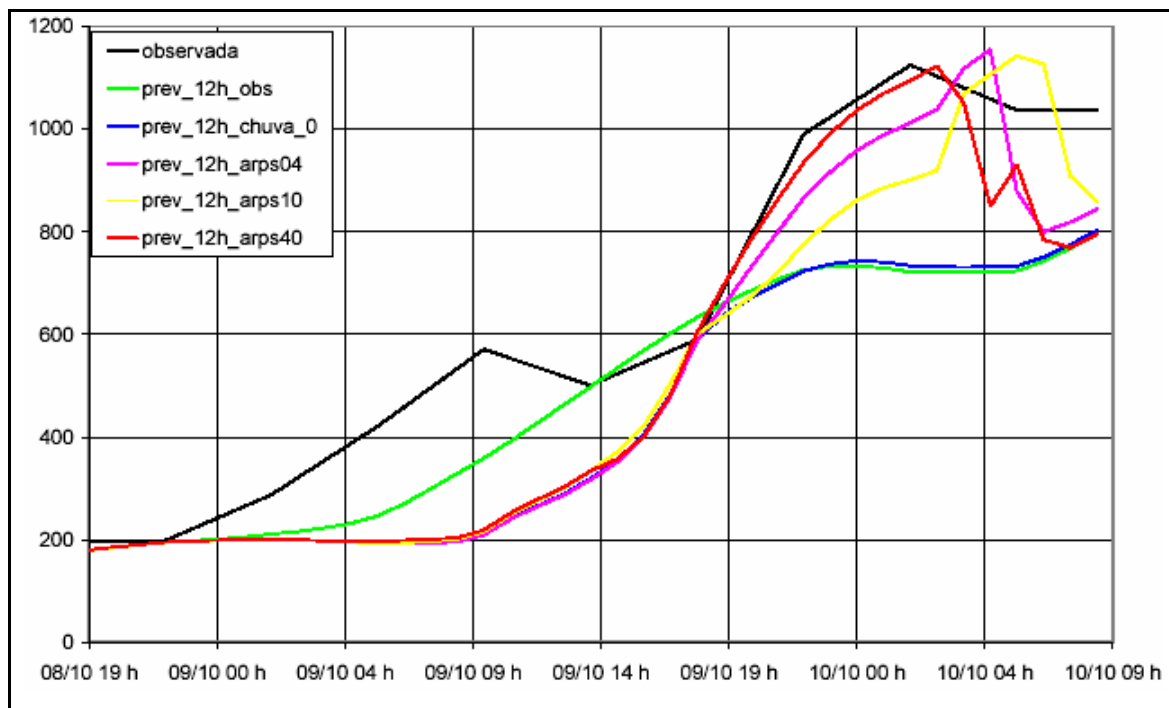


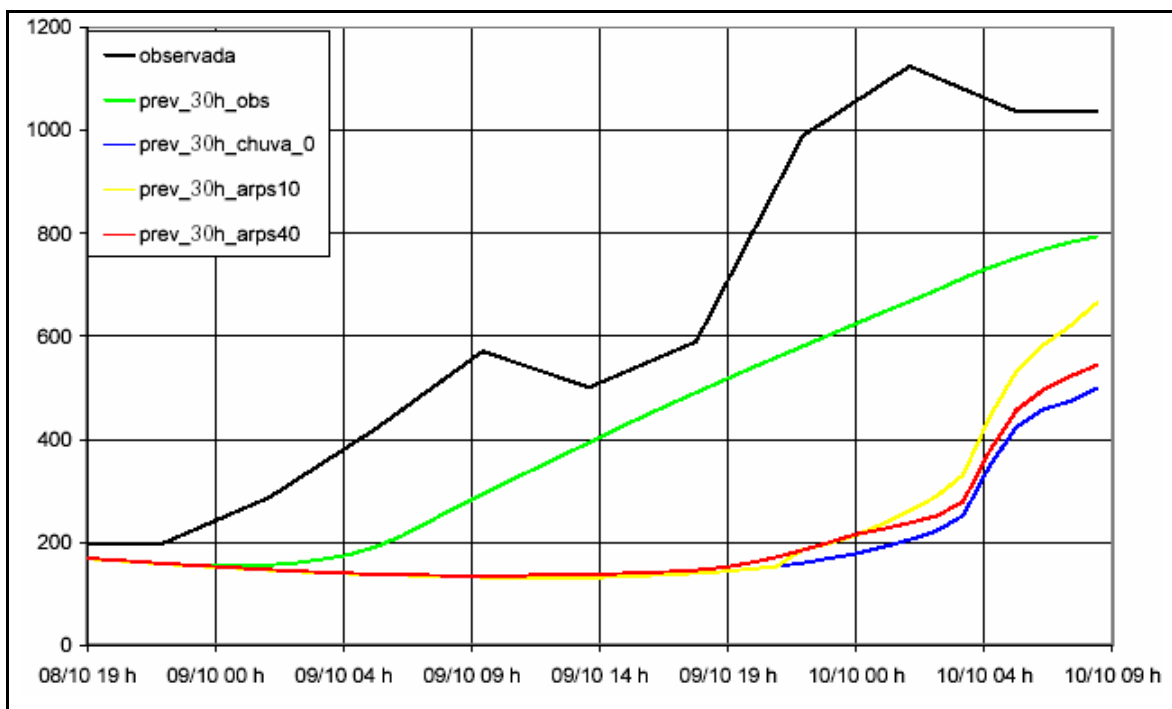
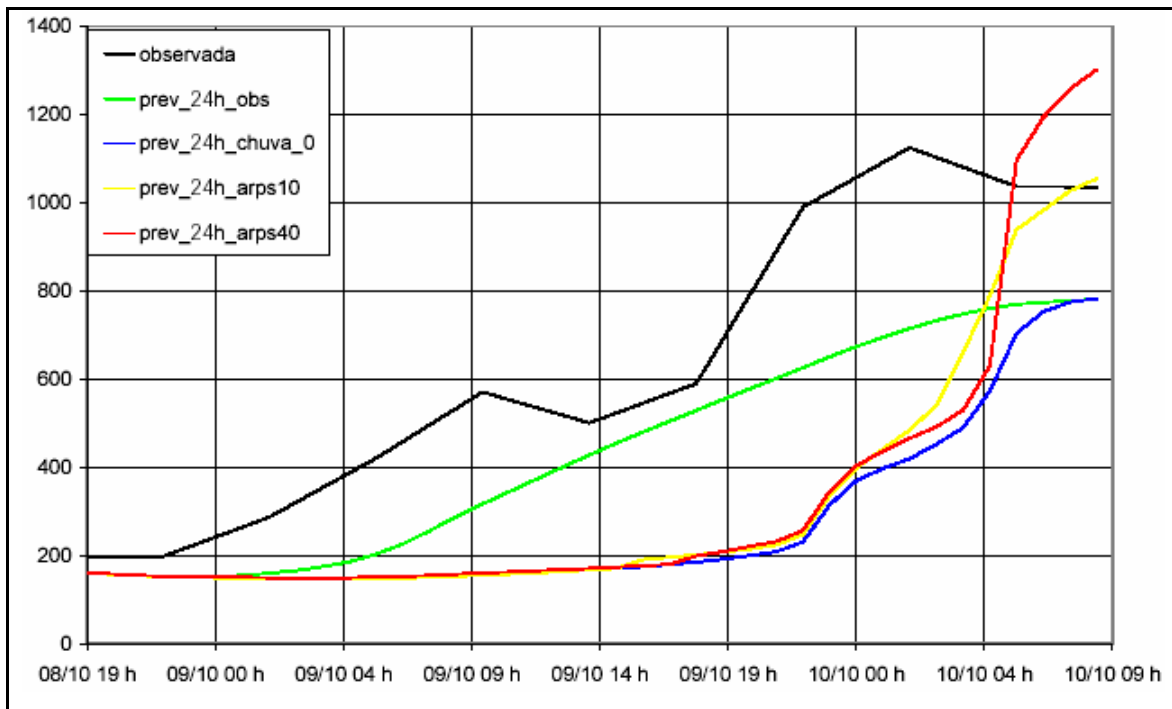
**ANEXO A4** – hidrogramas do evento 15/07/2003 a 20/07/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, 18 h, 24h e 30 h respectivamente – vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).





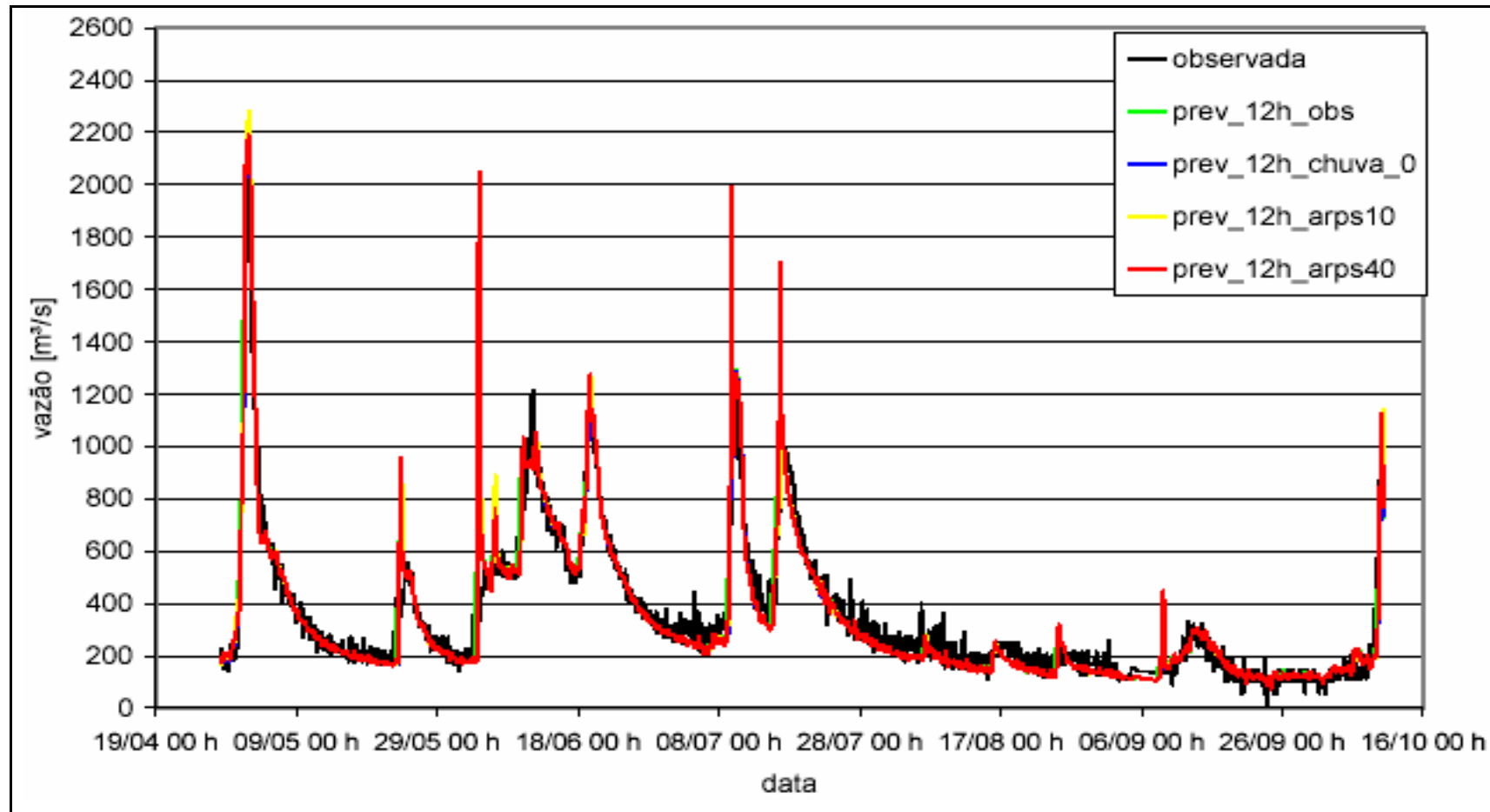
**ANEXO A5** – hidrogramas do evento 08/10/2003 a 10/10/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, 18 h, 24h e 30 h respectivamente – vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

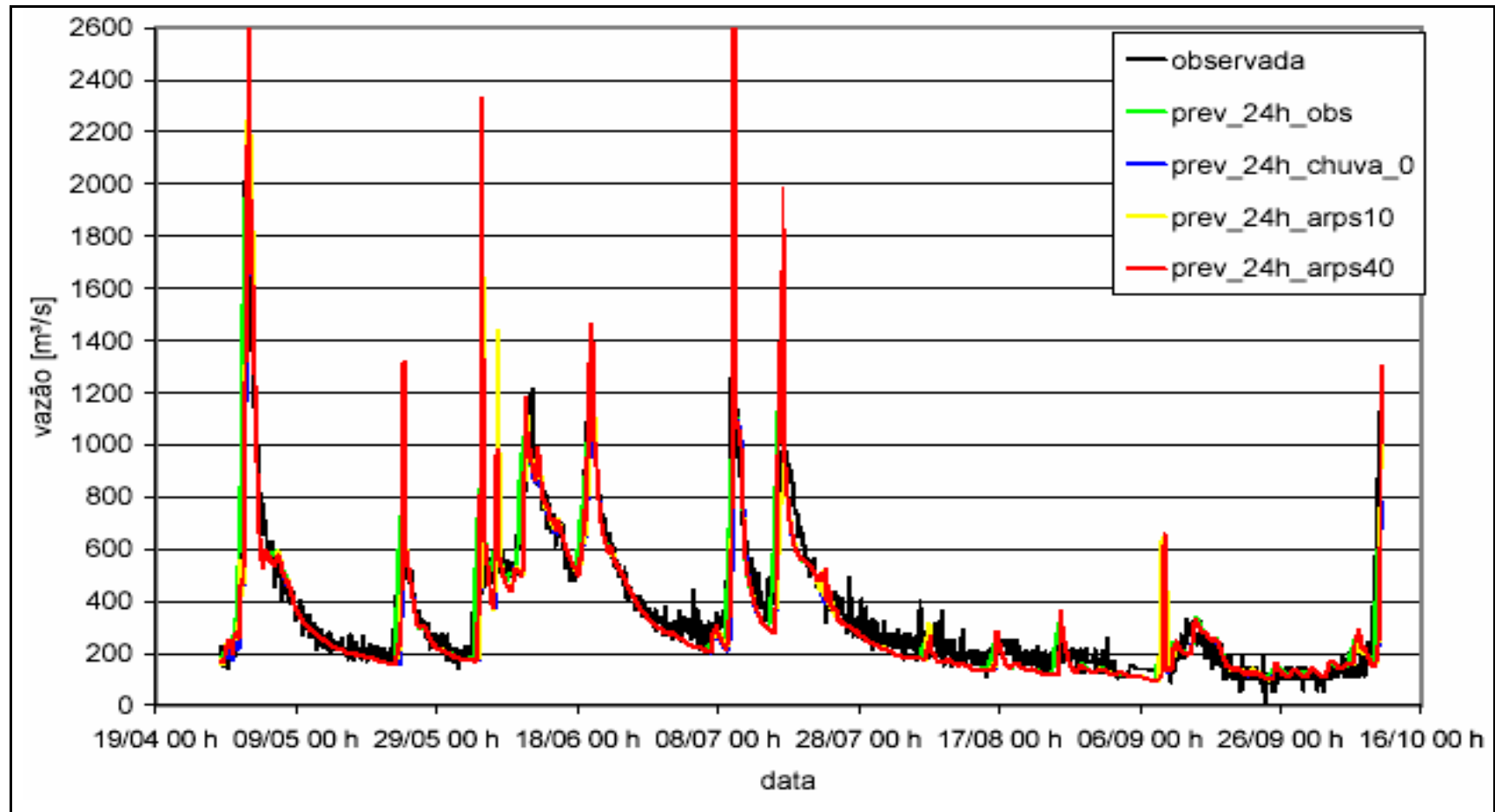




**ANEXOS B: Hidrogramas contínuos no período de simulação contínua**

**ANEXO B1** – hidrogramas contínuos do período 27/04/2003 a 10/10/2003 em Machadinho (observado e previsto pelos modelos propostos com antecedência de 12 h, e 24 h, respectivamente).







**ANEXOS C: Formulações, parâmetros e preparação dos dados de entrada do modelo  
de grandes bacias**

## ANEXO C1 – Formulações matemáticas

### Balanço de água no solo

O balanço hídrico no solo é realizado de maneira independente para cada bloco de uso, utilizando as características e os parâmetros do bloco. A figura C1 e a equação C1 descrevem o balanço na camada de solo.

$$(W^k = W^{k-1} + (P - E - D_{SUP} - D_{INT} - D_{BAS} + D_{CAP}) \cdot \Delta t)_{i,j} \quad C1$$

onde:  $W^k$  [mm] é o armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo;  $W^{k-1}$  [mm] é o armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo;  $P$  [mm] é a precipitação incidente (PI) menos a interceptação (I) ao longo do intervalo de tempo;  $T$  [mm] é a evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo;  $D_{SUP}$  [mm] é o escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida);  $D_{INT}$  [mm] é o escoamento sub-superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem lenta);  $D_{BAS}$  [mm] escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo (drenagem muito lenta);  $D_{cap}$  [mm] é o fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo. O intervalo de tempo considerado é de 1 hora neste estudo.

A camada de solo do bloco recebe a precipitação descontada da interceptação, que depende do tipo de cobertura vegetal. Uma fração da precipitação, que depende do estado de armazenamento de água na camada de solo ( $W$ ), e do armazenamento máximo na camada de solo ( $W_m$ ), é imediatamente transformada em escoamento superficial ( $D_{SUP}$ ). Além do escoamento superficial, o solo é drenado pelo escoamento subterrâneo ( $D_{BAS}$ ), pelo escoamento sub-superficial ( $D_{INT}$ ), e sofre a demanda de transpiração. A transpiração e a evaporação direta da água interceptada somadas definem a evapotranspiração total ( $E$ ).

Em algumas situações a camada de solo pode receber um fluxo de umidade ascendente denominado  $D_{CAP}$ .

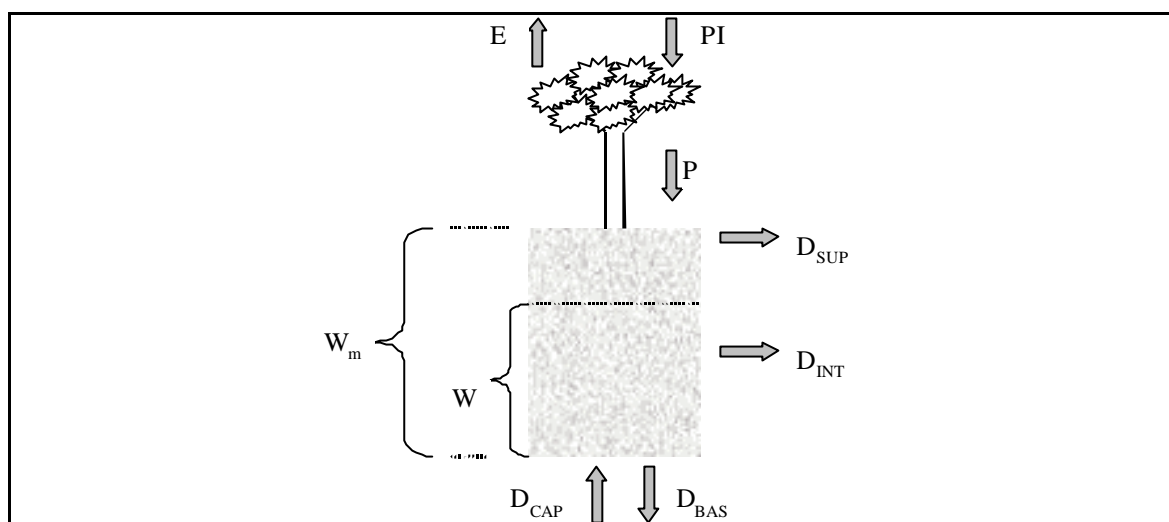


Figura C1: Esquema do balanço de água vertical na camada de solo.

O chamado “escoamento superficial” é, na realidade, um escoamento rápido, ou direto. Neste caso, a palavra “superficial” é utilizada para designar o escoamento que chega rapidamente à rede de drenagem. O termo  $D_{SUP}$ , que representa o escoamento superficial, é calculado considerando que toda a chuva que cair sobre uma porção de solo já saturada de umidade irá gerar escoamento superficial. O modelo considera que existe uma relação entre  $W$ , que é o estado de armazenamento atual da camada de solo, e a porcentagem de área saturada.

O escoamento superficial, ou direto, é calculado por:

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) \quad C2$$

quando  $\delta \leq 0$  e por

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) + W_m \cdot (\delta)^{b+1} \quad C3$$

quando  $\delta > 0$

onde

$$\delta = \left[ \left( 1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(b+1) \cdot W_m} \right] \quad C4$$

$W$  [mm] é o armazenamento na camada do solo;  $W_m$  [mm] é o armazenamento máximo na camada do solo;  $b$  [-] é um parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco;  $P$  [mm] é a precipitação menos a interceptação e  $D_{SUP}$  [mm] é o escoamento superficial (drenagem rápida).

O escoamento sub-superficial é obtido por uma relação não linear com o armazenamento na camada de solo baseada na equação da condutividade hidráulica do solo de Brooks e Corey.

$$D_{INT} = K_{INT} \cdot \left( \frac{W - W_Z}{W_m - W_Z} \right)^{(3+2/XL)} \quad C5$$

Nesta relação  $W_Z$  [mm] é o limite de armazenamento para haver escoamento sub-superficial;  $K_{INT}$  [mm] é o parâmetro de escoamento sub-superficial;  $XL$  [-] é o índice de porosidade do solo (parâmetro) e  $D_{INT}$  [mm] é o escoamento sub-superficial. O parâmetro  $K_{INT}$  é calibrado e o índice  $XL$  é fixo, e representa a média para diferentes tipos de solo.

O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples, linear com relação ao armazenamento no solo.

$$D_{BAS} = K_{BAS} \cdot \frac{(W - W_c)}{(W_m - W_c)} \quad C6$$

onde  $W_c$  [mm] é o limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo;  $K_{BAS}$  [mm] é o parâmetro de escoamento subterrâneo e  $D_{BAS}$  [mm] é o escoamento subterrâneo.

Quando  $W$  é menor do que  $W_z$ , não há escoamento sub-superficial, e quando  $W$  é menor do que  $W_c$ , não há escoamento subterrâneo. Normalmente  $W_z$  e  $W_c$  são fixados em um décimo de  $W_m$ , para evitar a possibilidade de escoamento negativo, e não são considerados na calibração.

Em alguns casos, quando o armazenamento do solo é baixo, pode ocorrer a transferência de água do reservatório subterrâneo para a camada de solo. Esta possibilidade visa permitir ao modelo simular situações em que as águas subterrâneas voltem a ser disponibilizadas para a evapotranspiração. A equação a seguir descreve o fluxo ascendente.

$$D_{cap} = \frac{W_c - W}{W_c} \cdot DM_{cap} \quad C7$$

onde:  $W_c$  [mm] é o limite de armazenamento para haver fluxo ascendente;  $D_{cap}$  [mm] fluxo ascendente e  $DM_{cap}$  [mm] máximo fluxo ascendente para o solo (parâmetro do modelo).

### Evapotranspiração

O modelo calcula a evaporação e transpiração pela equação de Penman – Monteith. A equação de Penman –Monteith é:

$$e = \left( \frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_W} \quad C8$$

onde:  $e$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] taxa de evaporação da água;  $\lambda$  [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ] calor latente de vaporização;  $\Delta$  [ $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ] taxa de variação da pressão de saturação do vapor;  $R_L$  [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] radiação líquida na superfície;  $G$  [ $MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ] fluxo de energia para o solo;  $\rho_A$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] massa

específica do ar;  $\rho_w$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] massa específica da água;  $c_p$  [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ] calor específico do ar úmido;  $e_s$  [kPa] pressão de saturação do vapor;  $e_d$  [kPa] pressão do vapor;  $\Delta$  [ $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ] constante psicrométrica;  $r_s$  [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ] resistência superficial da vegetação;  $r_a$  [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ] resistência aerodinâmica.

A energia disponível para a evapotranspiração é utilizada, primeiramente, para evaporar a água interceptada, armazenada sobre as folhas, caules e ramos da vegetação e diretamente sobre o solo. Caso ainda haja energia disponível ao final da etapa da evaporação, esta energia vai atender a transpiração.

A evaporação potencial ( $E_{IP}$ ) da lâmina interceptada é calculada considerando que a resistência superficial ( $r_s$ ) é nula. A evaporação real da lâmina interceptada é igual à potencial, caso a lâmina interceptada seja maior do que a evaporação potencial, caso contrário, a evaporação real é igual à lâmina interceptada.

A interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação. O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo, e pode ser medido. O valor do IAF depende da vegetação, e valores típicos vão de 1,0 ou menos para vegetação rasteira, até 6,0 ou mais para florestas.

Em culturas agrícolas o IAF varia ao longo do ano, entre valores próximos a zero na época de preparação do plantio, até valores máximos no momento de máximo desenvolvimento das plantas. Em florestas decíduais e no cerrado o IAF também varia conforme a época do ano. Esta variabilidade é considerada no modelo utilizando valores mensais do IAF para cada bloco.

A equação a seguir expressa a relação entre a capacidade de interceptação e o IAF.

$$S_L = F_i \cdot \text{IAF}$$

C9

onde  $S_{IL}$  [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação;  $IAF$  [-] é o índice de área foliar (adimensional) e  $F_i$  [mm] é o parâmetro de lâmina máxima de interceptação. O valor de  $F_i$  é fixado em 0,2 mm.

A transpiração é calculada considerando os valores de resistência superficial e resistência aerodinâmica adequados para o tipo de cobertura vegetal. A resistência superficial depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, os valores de resistência superficial são mínimos. Valores típicos de resistência superficial são encontrados na literatura.

Durante períodos de estiagem mais longos, a umidade do solo vai sendo retirada por transpiração e, à medida que o solo vai perdendo umidade, ocorre o *stress* hídrico, isto é, a transpiração diminui, mas a redução não ocorre imediatamente. Para valores de umidade do solo entre a capacidade de campo e um limite, que vai de 50 a 80 % da capacidade de campo, a evapotranspiração não é afetada pela umidade do solo. A partir deste limite a evapotranspiração é diminuída, atingindo o mínimo – normalmente zero – no ponto de murcha.

Esta diminuição da evapotranspiração com a redução da umidade do solo ocorre pelo aumento da resistência superficial. A resistência superficial original é alterada por um coeficiente de ajuste ( $F_4$ ). O coeficiente é igual a 1, da saturação até um limite mínimo de armazenamento no solo ( $W_L$ ), a partir do qual seu valor começa a aumentar.

$$r_{su} = F_4 \cdot r_s \quad C10$$

onde

$$\frac{1}{F_4} = \frac{W - W_{PM}}{W_L - W_{PM}} \quad \text{para} \quad W = W_L \quad C11$$

onde  $r_{su}$  [ $s \cdot m^{-1}$ ] é a resistência superficial considerando a umidade do solo;  $r_s$  [ $s \cdot m^{-1}$ ] é a resistência superficial em boas condições de umidade do solo;  $F_4$  é um coeficiente de ajuste

da resistência superficial;  $W$  [mm] é o armazenamento do solo;  $W_{PM}$  [mm] é o armazenamento do solo no ponto de murcha e  $W_L$  [mm] é o armazenamento em que inicia o efeito sobre a resistência superficial. Os valores de  $W_L$  e  $W_{PM}$  são fixados em 50% e 10% de  $W_m$ , respectivamente, e não são considerados na calibração.

A resistência aerodinâmica é calculada a partir da velocidade do vento e da rugosidade da cobertura vegetal, que está relacionada à altura média da vegetação.

### Escoamento na célula

Os termos  $D_{SUP}$ ,  $D_{INT}$  e  $D_{BAS}$ , referem-se ao escoamento que deixa a camada de solo, conforme mostra a figura C1. Este escoamento não atinge instantaneamente a rede de drenagem, mas sofre retardo e amortecimento ainda no interior da célula. Estes efeitos são representados no modelo pela passagem do escoamento por reservatórios lineares, conforme a figura C2. O escoamento superficial vai para o reservatório superficial, o escoamento sub-superficial vai para o reservatório sub-superficial e o escoamento subterrâneo vai para o reservatório subterrâneo. É nestes reservatórios que o escoamento dos diferentes blocos de uso e cobertura vegetal se encontram.

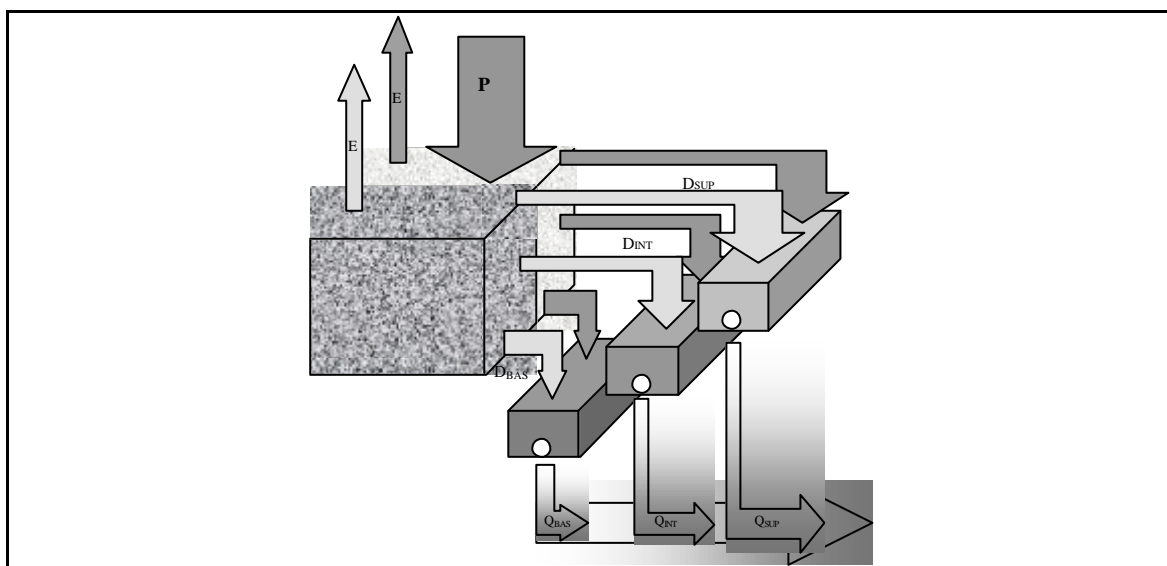


Figura C2. Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos.



Cada um dos reservatórios é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples. A soma dos valores de  $Q_{SUP}$ ,  $Q_{INT}$  e  $Q_{BAS}$  é o escoamento da célula.

$$Q_{SUP} = \frac{1}{TK_S} \cdot V_{SUP} \quad C12$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT} \quad C13$$

$$Q_{BAS} = \frac{1}{TK_B} \cdot V_{BAS} \quad C14$$

onde  $Q_{SUP}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório superficial;  $Q_{INT}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório sub-superficial;  $Q_{BAS}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] é a vazão de saída do reservatório subterrâneo;  $V_{SUP}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório superficial;  $V_{INT}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório sub-superficial;  $V_{BAS}$  [ $m^3$ ] é o volume no reservatório subterrâneo;  $TK_S$  [s] parâmetro de retardo do reservatório superficial;  $TK_I$  [s] parâmetro de retardo do reservatório sub-superficial;  $TK_B$  [s] parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

O valor do parâmetro  $TK_B$  pode ser obtido analisando os períodos de recessão do hidrograma e em alguns locais da bacia. As equações a seguir mostram como é obtido o valor de  $TK_B$  a partir de dados observados.

$$TK_B = C_B \cdot 86400 \quad C15$$

$$C_B = \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{ND}}{Q_0}\right)} \quad C16$$

onde  $C_B$  [dias] é o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo;  $ND$  é o número de dias do período de recessão do hidrograma;  $Q_0$  é a vazão no início da recessão e  $Q_{ND}$  é a vazão no final da recessão.

Os valores de  $TK_S$  e  $TK_I$  são obtidos considerando as características do relevo no interior da célula. A calibração é complementar a um processo de regionalização, proposto por Bremicker (1998), que relaciona os parâmetros de retardo às características do relevo no interior da célula. Para isto é necessário contar com um modelo numérico do terreno com resolução espacial bastante inferior à resolução espacial do modelo hidrológico.

Para cada célula do modelo é calculado um tempo de retardo característico, que é corrigido durante a calibração por um coeficiente de ajuste adimensional. O tempo de retardo característico é obtido pela equação de Kirpich, utilizando a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo do MNT encontrados dentro da célula do modelo considerada.

$$TK_S = C_S \cdot T_{ind} \quad C17$$

$$TK_I = C_I \cdot T_{ind} \quad C18$$

onde:  $T_{ind}$  [s] é o tempo de retardo característico da célula;  $C_S$  é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento superficial e  $C_I$  é um parâmetro adimensional para calibração do escoamento sub-superficial.

$$T_{ind} = 3600 \cdot \left( 0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad C19$$

onde  $L$  [km] é a largura da célula e  $\Delta H$  [m] é a diferença de altura entre os extremos mais alto e mais baixo da célula.

Os tempos de retardo do escoamento no interior da célula nada têm a ver com a propagação ao longo da célula. As equações acima servem para calcular a propagação do escoamento gerado no interior da célula. A propagação através dos principais rios é realizada de forma independente como se descreve a seguir.

### **Escoamento na rede de drenagem**

O modelo realiza a propagação nos trechos de rio utilizando o método de Muskingum-Cunge (Tucci, 1998), que relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual.

Os parâmetros do modelo Muskingum-Cunge são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio. O comprimento e a declividade são obtidos de mapas topográficos. A largura é obtida com base em uma relação com a área de drenagem válida para a bacia e a rugosidade é estimada com base em observações locais, fotografias e informações sobre material do leito.

O intervalo de tempo utilizado no modelo é sub-dividido em intervalos menores durante a propagação por Muskingum-Cunge na rede de drenagem, considerando o intervalo de tempo ideal para a propagação apresentar precisão no tempo viagem e no amortecimento do hidrograma, conforme descrito em Tucci (1998).

## ANEXO C2 – Preparação dos dados de entrada

Um modelo distribuído utiliza em geral, uma grande quantidade de dados, de difícil manipulação (Collischonn, 2001). Os dados de entrada de um modelo distribuído podem ser obtidos de fontes como imagens de satélite, mapas de tipos e usos do solo e modelo numérico de terreno (MNT). O modelo de grandes bacias (MGB) utiliza um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e rotinas próprias desenvolvidas ou adaptadas por Collischonn (2001), como parte integrante da preparação dos dados de entrada. O SIG está fortemente baseado no Software IDRISI.

Para traçado da rede de drenagem, são utilizados mapas topográficos e MNTs. Cada célula do modelo recebe dois números correspondentes à cota máxima e mínima da célula.

A entrada de dados no modelo é feita através dos seguintes arquivos: arquivo de entrada principal, arquivo de parâmetros calibráveis, arquivos de parâmetros fixos, o arquivo de precipitação interpolada em cada célula do modelo e eventualmente arquivos de precipitação prevista interpolada em cada célula do modelo.

O arquivo de entrada principal é um arquivo do tipo texto que resume o conteúdo dos diversos mapas e contém: número da célula (quanto maior o número, mais à jusante está a célula dentro da bacia), coordenadas do centro da célula (georeferenciamento), número da sub-bacia a qual pertence a célula, área de cada célula (muda conforme a latitude), área acumulada da célula (área de drenagem até a célula considerada), número da célula localizada à jusante, cotas máxima e mínima do MNT de alta resolução das células, porcentagem da célula ocupada por cada um dos blocos e comprimento e declividade do rio que percorre a célula.

O arquivo de parâmetros fixos contém os valores dos parâmetros que são obtidos da literatura, ou que podem ser medidos, como o índice de área foliar (IAF); a resistência superficial (RS); a altura média da vegetação (Z) e o albedo. O valor desses parâmetros

pode variar conforme a época do ano e são indicados no mesmo arquivo.

O arquivo de parâmetros calibráveis contém os valores dos parâmetros restantes, que são alterados durante a calibração. Esses parâmetros são considerados constantes ao longo de toda simulação e podem estar associados aos blocos ou às células. Quando associados ao bloco, tem o mesmo valor no mesmo bloco em todas as células. Quando associado à célula, tem o mesmo valor em todas as células de uma mesma sub-bacia. A divisão em sub-bacia tem por objetivo facilitar a calibração e a divisão é normalmente feita em locais com dados de vazão.

Finalmente, o arquivo de dados de chuva, prevista, e ou, observada é preparado utilizando a rotina INTERPLU. Esta rotina utiliza informações das coordenadas dos postos, séries de dados observados de chuva numeração e localização das células do modelo (busca no arquivo de entrada principal). A interpolação pode ser feita pelo método de Thiessen, ou inverso do quadrado da distância. A saída do programa INTERPLU contendo valores de chuva em cada célula do modelo se constitui do arquivo de dados de chuva. Quando o intervalo de dados de chuva é de hora em hora e existem na bacia pluviômetros e pluviógrafos, pode-se utilizar uma rotina anterior ao INTERPLU denominada PLUVIOMPLUVIOG, que transforma os dados diários em horários com base no pluviógrafo mais próximo.

### ANEXO C3 – Descrição dos parâmetros do modelo hidrológico

O modelo considera um conjunto de parâmetros fixo e outro conjunto calibrável. Parte dos parâmetros do modelo estão associados às células e possuem o mesmo valor para todas as células de uma mesma sub-bacia. O restante dos parâmetros estão associados aos blocos. Nesse caso, os parâmetros têm o mesmo valor em determinado bloco em todas as células da bacia. Uma descrição sucinta dos parâmetros variáveis é apresentada a seguir.

O parâmetro  $W_m$  representa a capacidade de armazenamento do solo, está relacionado ao bloco e influi diretamente sobre o balanço hídrico, porque o volume de água retido no solo permanece disponível para a evapotranspiração ao longo do tempo em que não é drenado como escoamento sub-superficial ou subterrâneo. O parâmetro  $W_m$  depende do tipo de solo e da cobertura, porque a capacidade de armazenamento depende da profundidade em que as raízes das plantas podem recuperar água infiltrada, da profundidade, da textura e porosidade do solo.

O parâmetro  $b$  está relacionado ao bloco e controla a separação de escoamento superficial até a saturação da capacidade de armazenamento do solo. O parâmetro  $b$  é mais importante nos pequenos eventos, pois nos eventos de cheia, o solo normalmente já está encharcado. Um aumento no parâmetro produz maior escoamento superficial e menos água é infiltrada, diminuindo a evapotranspiração e, por conseguinte, há aumento na vazão total da bacia.

O parâmetro de drenagem subterrânea ( $K_{BAS}$ ) está relacionado ao bloco e controla o fluxo de água para o reservatório subterrâneo. Quando o solo está saturado, o  $K_{BAS}$  é máximo e diminui à medida que o solo vai secando.

O parâmetro de drenagem sub-superficial ( $K_{INT}$ ) está relacionado ao bloco e controla a quantidade de água da camada de solo que é escoada sub-superficialmente. Este parâmetro depende de fatores como a condutividade hidráulica ou a taxa de infiltração e

deve ser calibrado.

Os parâmetros  $C_B$ ,  $C_S$  e  $C_I$  são respectivamente, parâmetros de retardo do escoamento dos reservatórios subterrâneos, superficial e sub-superficial. O  $C_B$  está associado à célula e depende do número de dias e da forma da recessão do hidrograma em pontos da bacia. O  $C_S$  e  $C_I$  também são associados à célula e são obtidos inicialmente por formulações que consideram as características do relevo no interior da célula.

Para propagação em canal, é necessário fornecer a vazão de referência e o coeficiente de Manning. A vazão de referência utilizada pelo modelo considera uma vazão de referência específica como parâmetro para toda a bacia. Para cada célula do modelo a vazão de referência é determinada em função da área drenada à montante. Não é possível a utilização de uma vazão de referência como 30% inferior ao pico do hidrograma de entrada, como recomendada por Tucci (1998), pois em simulação contínua existem diversos picos.

O conjunto de parâmetros fixos é apresentado resumidamente a seguir.

O albedo representa a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. O albedo é variável com a época do ano e com a cobertura vegetal e assim é associado ao bloco. A variabilidade dentro do ano é considerada no modelo pelo uso de valores médios mensais.

O índice de área foliar (IAF) expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. Este parâmetro é associado ao bloco e a variabilidade dentro do ano é considerada através do uso de valores médios no mês.

A altura da cobertura vegetal ( $Z$ ), é importante para calcular a resistência aerodinâmica à evapotranspiração e valores médios são encontrados na literatura.

A resistência superficial ( $RS$ ) representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. A  $RS$  depende do tipo de vegetação e de variáveis ambientais como: umidade do solo, temperatura do ar e radiação recebida pela planta. O

modelo considera a RS como um parâmetro fixo e pode ser obtido pela literatura.

O parâmetro  $X_L$  é um parâmetro que leva em consideração o índice de porosidade do solo. A rigor este parâmetro tem diferentes valores conforme o tipo de solo, porém é considerado um parâmetro fixo representativo da média dos solos na bacia.

O parâmetro de armazenamento residual ( $W_c$ ) está associado ao bloco e limita o escoamento sub-superficial e o subterrâneo. Esse parâmetro é pouco sensível em uma faixa razoável de valores e, em geral, é fixado em 10% de  $W_m$  e não é calibrável (Collischonn, 2001).



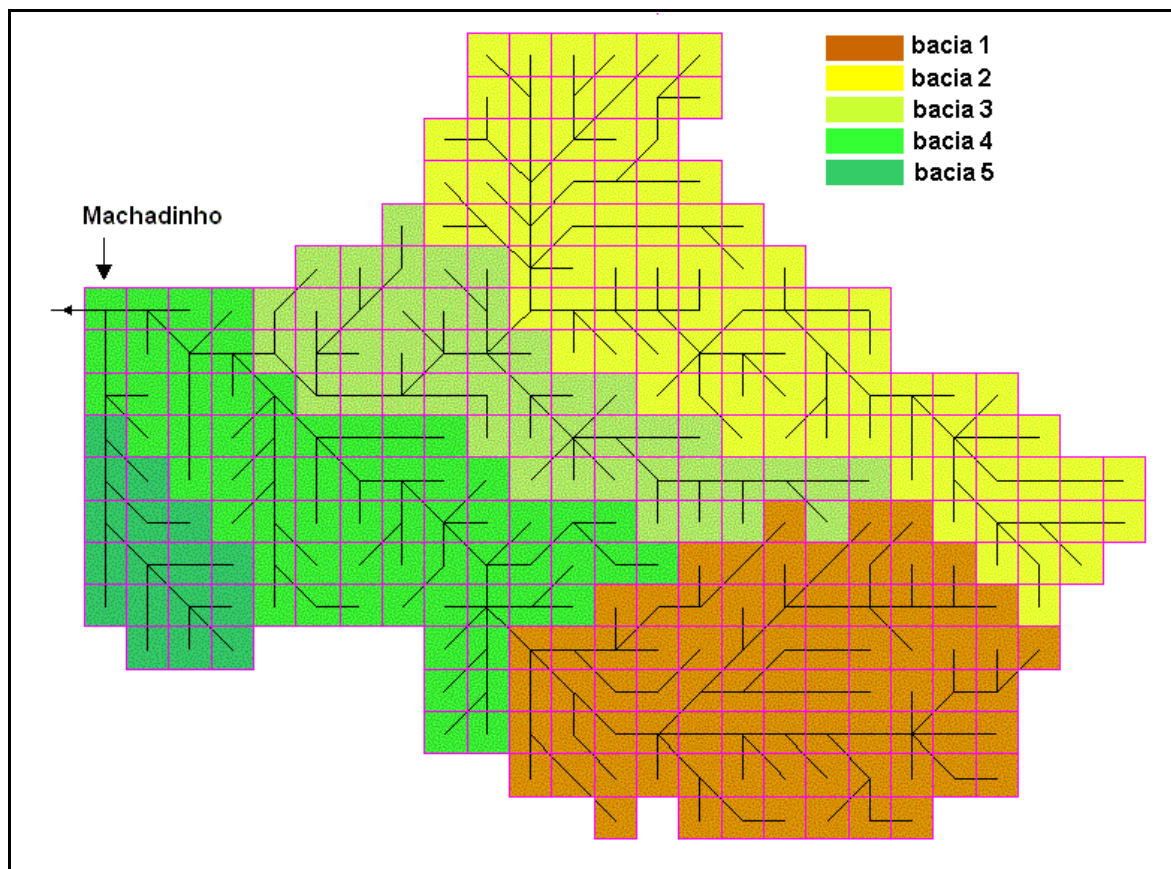
**ANEXOS D: Valores dos parâmetros utilizados no modelo de grandes bacias**

## ANEXOD1 – valores dos parâmetros do modelo de grandes bacias calibráveis.

<b>Paramet./grupos</b>	$W_m$ [mm]	b	$K_{bas}$ [mm/dia]	$K_{int}$ [mm/dia]	$C_S$	$C_I$	$C_B$ [dias]	$Q_B$ [m <sup>3</sup> /s.km <sup>2</sup> ]
Pastagem	130	0.2	0.5	40	1.7	22	100	0.0073
Floresta	620	0.2	0.5	40	1.7	22	100	0.0073
Urbano	70	0.2	0.5	40	1.7	22	100	0.0073
Agua	0	1.0	0.5	2	1.7	22	100	0.0073
<b>Grupos/ paramet.</b>	$W_m$ [mm]	b	$K_{bas}$ [mm/dia]	$K_{int}$ [mm/dia]	$C_S$	$C_I$	$C_B$ [dias]	$Q_B$ [m <sup>3</sup> /s.km <sup>2</sup> ]
Pastagem	150	0.1	1.7	100	1.6	40	300	0.0073
Floresta	620	0.1	1.7	100	1.6	40	300	0.0073
Urbano	90	0.1	1.7	100	1.6	40	300	0.0073
Agua	0	1	0.5	2	1.6	40	300	0.0073
<b>Grupos/ paramet.</b>	$W_m$ [mm]	b	$K_{bas}$ [mm/dia]	$K_{int}$ [mm/dia]	$C_S$	$C_I$	$C_B$ [dias]	$Q_B$ [m <sup>3</sup> /s.km <sup>2</sup> ]
Pastagem	100	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Floresta	500	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Urbano	160	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Agua	0	1	0.5	2	3.2	48	100	0.0073
<b>Grupos/ paramet.</b>	$W_m$ [mm]	b	$K_{bas}$ [mm/dia]	$K_{int}$ [mm/dia]	$C_S$	$C_I$	$C_B$ [dias]	$Q_B$ [m <sup>3</sup> /s.km <sup>2</sup> ]
Pastagem	100	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Floresta	500	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Urbano	160	0.15	0.7	10	3.2	48	100	0.0073
Agua	0	1	0.5	2	3.2	48	100	0.0073

**ANEXO D2** – valores dos parâmetros do modelo de grandes bacias fixos.

<b>Albedo</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem	0.18	0.18	0.19	0.2	0.22	0.23	0.23	0.23	0.21	0.19	0.19	0.18
Floresta	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Urbano	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Água	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>Índice de área foliar - IAF</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem	3	3	2	2	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2	3
Floresta	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Urbano	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Altura da cobertura vegetal - Z [m]</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Floresta	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Urbano	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Água	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>Resistência superficial - RS [s/m]</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Floresta	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Urbano	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Índice de porosidade - XL [-]</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem						0.165						
Floresta						0.165						
Urbano						0.165						
Água						0.165						
<b>Armazenamento residual - Wc [mm]</b>												
<b>Uso/mês</b>	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Pastagem						0.1						
Floresta						0.1						
Urbano						0.1						
Água						0.1						

**ANEXO D3** – divisão da bacia em sub-bacias para calibração dos parâmetros.

**ANEXOS E: Desempenho da atualização em termos de RD –todos os modelos.**

**ANEXO E1** – Desempenho da atualização em termos do fator RD para todos os modelos propostos. As curvas aos pares de cores representam o mesmo modelo de previsão, porém, com e sem atualização.

