

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO PONTUAL EM DIFERENTES ESCALAS
PARA USO EM MODELO CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO**

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.

VITOR SOUZA VIANA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo
Co-Orientadora: Prof.^a Dr.^a Nilza Maria dos Reis Castro

Banca Examinadora

Prof. Dr. Irani dos Santos UFPR
Prof. Dr. Juan Martin Bravo IPH/UFRGS
Prof. Dr. Walter Collischonn IPH/UFRGS

Porto Alegre, abril de 2011.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
ABSTRACT	v
RESUMO	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 Precipitação.....	7
3.2 Determinação da Chuva Média na Bacia Hidrográfica	8
3.3 Análise Espacial.....	13
3.3.1 Métodos de Interpolação	16
3.3.2 A Grade Regular e o Aplicativo SURFER 8.0 utilizado para estimar a precipitação média na bacia	23
3.4 Modelos Hidrológicos.....	27
3.4.1 Aspectos Gerais.....	27
3.4.2 Classificação dos Modelos	28
3.4.3 Aplicação dos Modelos	29
3.4.4 Calibração dos Modelos	30
3.5 Modelo IPH II.....	31
3.5.1 Descrição do Modelo IPH II	31
3.5.2 O Algoritmo de Perdas por Evaporação e Intercepção	32
3.5.3 Algoritmo de Separação dos Escoamentos	33
3.5.4 Propagação Superficial e Subterrânea.....	38
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	42

4.1 Bacia e Dados	42
4.1.1 Escolha da Bacia de Estudo	42
4.1.2 Medidas Pluviométricas	45
4.1.3 Medidas Fluviométricas	50
4.1.4 Dados de Evaporação	54
4.2 Métodos	54
4.2.1 Eleição do Melhor Método de Interpolação (Etapa 1)	54
4.2.3 Espacialização da Precipitação com o Melhor Interpolador (Etapa 2)	59
4.2.3 Determinação da Precipitação Média ou Mediana Obtidas Diretamente das Séries (Etapa 3)	65
4.2.4 Definição dos Dados de Entrada para Simulação do Processo Chuva-Vazão (Etapas 4 e 5).....	66
4.2.5 Transferência dos Parâmetros do Modelo nas diferentes Escalas (Etapa 6)..	68
5.0 RESULTADOS	70
5.1 Avaliação do desempenho dos interpoladores	70
5.2 Definição da Geometria das Grades nas Diferentes Escalas (Etapa 2).....	74
5.3 Análise das precipitações obtidas por Interpolação com o Vizinho Natural e pelos Cálculos Diretos.....	78
5.4 Teste das séries das chuvas médias e das medianas no modelo IPH II	82
5.4.1 Teste na bacia do Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística.....	83
5.4.2 Teste na bacia do Ijuí no posto fluviométrico Santo Ângelo	90
5.4.3 Teste na bacia do Potiribu	96
5.4.4 Teste na bacia do Taboão	102
5.4.5 Teste na bacia do Turcato.....	108
5.4.6 Análise do Efeito da Escala no Desempenho do Modelo IPH II	113
5.5 Transferência direta dos parâmetros nas escalas	114
6 CONCLUSÕES	125

6.1 Conclusões referentes às etapas da pesquisa	125
6.2 Recomendações	127
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
ANEXO I.....	134
ANEXO II	137

AGRADECIMENTOS

- Ao CNPq, pelo suporte financeiro durante o curso.
- Ao meu orientador e co-orientadora, os professores Olavo Pedrollo e Nilza Castro, pelas sugestões e dedicação para o melhor desenvolvimento deste trabalho.
- Aos Professores Irani dos Santos, Juan Bravo e Walter Collischonn, cuja contribuição proporcionou melhorias significativas nesta pesquisa.
- Ao Professor Alfonso Rizzo pelos ensinamentos, que motivaram a introdução de ferramentas contempladas neste estudo.
- Aos colegas Mino Sorribas, Ingo Wottrich, Rosane Cavalcante, Paulo Rógenes e Marcelo Argoud, pelo mútuo aprendizado e pela amizade.
- A minha mãe Mary Mônica, a minha avó Walquíria e aos meus irmãos Michelle e Danilo, pelas palavras de incentivo em pró do meu crescimento pessoal e acadêmico.
- A família Dariano, pelo acolhimento, conselhos e incentivo, especialmente, a minha namorada Angela Dariano, pelo amor, companheirismo, conselhos, compreensão e incentivo em todas as etapas desta caminhada.

ABSTRACT

Precipitation is a key hydrological variables analyzed before being supplied as input to rainfall-runoff models. The difficulties to quantify the amount of rain in order to truly represent the event that occurs in the watershed, primarily come from the high spatial variability of precipitation, the number of stations distributed in an area of flaws in the rainfall series (faults in apparatus in data processing and for loss of data). One way to quantify the amount of rainfall in a given area for use in concentrated rainfall-runoff models, from a network of rain gauges, can be based on the arithmetic mean or median, which was one of the purposes of this research. The methods to obtain these statistics would be off by using the direct calculations applied in these posts within the limits of the basin, or through the values of the nodes of a regular grid located inside the basin, we estimated these values by interpolation offs positioned inside and outside the boundaries of the basin. The interpolators used were the Inverse Square Distance, Nearest Neighbor, The Natural Neighbor and Linear Triangulation. The interpolation method most appropriate to the situations found in the precipitation series, was selected by using the Cross Validation technique, which the Natural Neighbor method showed better performance. The series of daily precipitation means and medians obtained by direct calculations, and after the spatial interpolator with Natural Neighbor, were used as input to rainfall-runoff model focused conceptual HPI II, version WIN_IPH II, at different scales of watersheds embedded (9426 to 19.5 km ²). The results of the simulated flows by the model after the calibration procedures, calibration using the SCE-UA monoobjetivo, showed the best method, Direct calculations or interpolation, and timely statistics, mean or median, which was more appropriate to the performance stages of the model calibration and verification of resulting parameters. It was concluded that besides the existing faults influence on rainfall averages and medians obtained by direct calculations, the median is a statistic that well represents the volume of rainfall occurring in the basin, because it produced lower scores in the model and parameter values without physical meaning to rural basins. We observed an improvement in the two point statistics, after calculating the mean and median rainfall based on the values of the nodes of regular grid within the basin, estimated by the Natural Neighbor interpolation. The occasional use of statistics obtained by this method produced good performance of the model in steps of calibration and verification. The average rainfall obtained by interpolation from the Natural Neighbor was statistically more representative for most of the scales analyzed. This work also showed the possibility of making the transfer of model parameters HPI II, using the best statistical point of basins larger for smaller basins, in order to check conditions for obtaining flows in smaller basins that have no measurements gauged.

Keywords: Rain-flow simulation, interpolated, Scale Effect, Precipitation Mean, Median rainfall.

RESUMO

A precipitação é uma das principais variáveis hidrológicas analisadas antes de ser fornecida como dado de entrada aos modelos chuva-vazão. As dificuldades para quantificar o valor da chuva, de modo a representar o evento que verdadeiramente ocorre na bacia hidrográfica, provêm principalmente da alta variabilidade espacial da precipitação, da quantidade de postos distribuídos em uma área, das falhas existentes nas séries pluviométricas (falhas nos aparelhos, no processamento dos dados e por perdas dos dados). Uma das formas de quantificar o valor da chuva em uma determinada área para uso em modelos concentrados chuva-vazão, a partir de uma rede de pluviômetros, pode ser com base na Média Aritmética ou na Mediana, que foi uma das propostas desta pesquisa. Os métodos para se obter estas estatísticas pontuais seriam mediante a utilização dos cálculos diretos aplicados nos postos presentes dentro dos limites da bacia, ou através dos valores dos nós de uma grade regular localizados no interior da bacia, com os valores destes nós estimados por interpolação de medidas pontuais posicionadas no interior e fora dos limites da bacia. Os interpoladores utilizados foram o Inverso do Quadrado da Distância, O Vizinho mais Próximo, O Vizinho Natural e a Triangulação Linear. O método de interpolação mais adequado, para as situações encontradas nas séries de precipitação, foi selecionado com o uso da Técnica da Validação Cruzada, ao qual, o método do Vizinho Natural apresentou melhor desempenho. As séries das precipitações médias e medianas diárias obtidas pelos Cálculos Diretos, e após a espacialização com o Interpolador Vizinho Natural, foram utilizadas como dados de entrada no modelo chuva-vazão concentrado conceitual IPH II, versão WIN_IPH II, em diferentes escalas de bacias hidrográficas embutidas (9426 a 19,5 Km²). Os resultados das vazões simuladas pelo modelo, após os processos de calibração, com o uso da calibração monoobjetivo SCE-UA, evidenciaram o melhor método, Cálculos Diretos ou Interpolação, e a estatística pontual, Média ou Mediana, que foi mais adequada a partir do desempenho do modelo nas etapas de calibração e de verificação dos parâmetros resultantes. Concluiu-se que além das falhas existentes influenciarem nas chuvas médias e medianas obtidas por cálculos diretos, a mediana não é uma estatística que representa bem o volume de chuva ocorrente na bacia, pois produziu baixo desempenho no modelo e valores de parâmetros sem significado físico para bacias rurais. Observou-se uma melhora nas duas estatísticas pontuais, após o cálculo da chuva média e da mediana com base nos valores dos nós da grade regular no interior da bacia, estimados pelo interpolador Vizinho Natural. O uso das estatísticas pontuais obtidas por este método produziu bom desempenho do modelo nas etapas de calibração e de verificação. A chuva média obtida por interpolação com o Vizinho Natural foi a estatística mais representativa para a maior parte das escalas analisadas. Este trabalho também mostrou a possibilidade de se fazer à transferência de parâmetros do modelo IPH II, com o uso da melhor estatística pontual, de bacias maiores para bacias menores, com o intuito de verificar situações para obtenção de vazões em bacias menores que não possuem medições pluviométricas.

Palavras-Chave: Simulação Chuva-Vazão, Interpoladores, Efeito da Escala, Precipitação Média, Precipitação Mediana.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 Determinação da precipitação média na bacia com o uso da Média Aritimética. Fonte: Garcez & Alvarez (1988).	10
Figura 3. 2 Determinação da precipitação média na bacia com o uso do método dos Polígonos de Thiessen. Fonte: Garcez & Alvarez (1988).	10
Figura 3. 3 Determinação da precipitação média na bacia com o uso do método das Isoietas. Fonte: Garcez & Alvarez (1988).	10
Figura 3. 4 Determinação da precipitação média no interior dos limites da bacia com base nos valores dos centróides das celulas no interior dos limites da bacia da informação de radar (NCRFC, 2011).	11
Figura 3. 5 Determinação da precipitação nos centróides das células de 10 km x 10 km, a partir da interpolação de uma rede de pluviômetros e pluviógrafos distribuídos em área, no modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias), Andreolli (2003).	12
Figura 3. 6 Determinação da precipitação média com base nos valores nodais presentes no interior dos limites da bacia após a interpolação com base na informação da rede de pluviômetros e pluviógrafos.	13
Figura 3. 7 Geometrias: pontos 2D, amostra e polígonos na esquerda, e a representação geométrica da grade regular na direita, adaptado de Câmara (2001).	15
Figura 3. 8 Superfície e a malha regular obtida através do método da Triangulação, adaptado de Câmara (2001).	16
Figura 3. 9 Visualização do Método do Vizinho mais Próximo realizado a partir de dados pontuais, SURFER 8.0.	18
Figura 3. 10 Método de triangulação: o valor de x_0 é uma média ponderada de 3 amostras/vértices (x_1, x_2, x_3) do triângulo que contém x_0 , em que os ponderadores são proporcionais à distância de x_0 a cada um dos vértices, adaptado de Soares (2000). ...	19
Figura 3. 11 Método do inverso ponderado das distâncias: o valor de x_0 é uma média ponderada das N amostras vizinhas, em que os ponderadores são determinados pelo inverso ponderado das distâncias de cada uma das amostras a x_0 , adaptado de Soares (2000).	20
Figura 3. 12 Triangulação de Delaunay (a), Polígonos de Voronoi correspondentes, para um conjunto de pontos amostrais (b) (Smith, 2009).	21
Figura 3. 13 Sobreposição de áreas de polígonos de Voronoi, utilizada no cálculo das coordenadas locais.	22

Figura 3. 14	Visualização da bacia hidrográfica genérica, com postos de medição de precipitação no seu interior e outros postos próximos ao seu limite, adaptado de Garcez & Alvarez (1998).	23
Figura 3. 15	Geração de campos de precipitação a partir de interpolação utilizando uma grade regular, adaptado de Garcez & Alvarez (1998).	24
Figura 3. 16	A precipitação Média ou Mediana determinada somente para os nós da grade regular no interior da bacia genérica.	25
Figura 3. 17	Programa Scripter que permite a automação dos processos de interpolação no SURFER 8.0.	26
Figura 3. 18	Perdas por Evaporação no Solo e Intercepção (Mine, 1998).	32
Figura 3. 19	Continuação na camada superior do solo (Mine, 1998).	33
Figura 3. 20	Representação das funções do algoritmo de infiltração (Mine, 1998).	35
Figura 3. 21	Situações encontradas no algoritmo de infiltração (Tucci, 1998).	36
Figura 3. 22	Método de Clark (Mine, 1998).	38
Figura 3. 23	Fluxograma de cálculo do modelo IPH II (Mine, 1998).	41
Figura 4. 1	Região de estudo: Bacia do rio Ijuí, nos postos fluviométricos da Ponte Mística, Santo Ângelo, Potiribu Taboão e do Turcato.	42
Figura 4. 2	Visualização dos postos pluviométricos disponíveis na Hidroweb.	45
Figura 4. 3	Visualização da posição dos pluviômetros e pluviógrafos na bacia do rio Taboão e das suas sub-bacias Turcato e Donato (Goldenfun, 2005).	47
Figura 4. 4	Visualização dos postos fluviométricos das sub-Bacias do rio Ijuí, nos exutórios Ponte Mística, Santo Angelo e Ponte Nova do Potiribu.	51
Figura 4. 5	Visualização da série de vazões da bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Potiribu no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.	52
Figura 4. 6	Visualização da série de vazões do rio Ijuí no posto fluviométrico do Santo Angelo no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.	52
Figura 4. 7	Visualização da série de vazões do rio Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.	53
Figura 4. 8	Grade de quatro pontos espaçados em 0,001m na posição do pluviômetro retirado da amostragem para a posterior interpolação.	55
Figura 4. 9	Visualização do arquivo grd criado pela ferramenta Grid Data na Esquerda, e do arquivo dat convertido do grd pela ferramenta Grid Convert.	56
Figura 4. 10	Visualização do local onde foram armazenados os resultados.	56

Figura 4. 11 Postos presentes na bacia do Taboão utilizados na validação cruzada.	57
Figura 4. 12 Postos pluviométricos na bacia do rio Ijuí e na sua sub-bacia Santo Angelo e Potiribu utilizados na validação cruzada.	58
Figura 4. 13 Visualização das séries de precipitação diárias com falhas dos postos das Bacias do Taboão, Turcato e Donato mês de agosto de 1989.	60
Figura 4. 14 Visualização dos limites da bacia do rio Ijuí, na esquerda mostra o arquivo em extensão bln, e na direita mostra a visualização deste arquivo no SURFER 8.0.	61
Figura 4. 15 Visualização da grade regular resultante da ferramenta Grid Data (a), da grade regular resultante da ferramenta Grid Blanking (b).....	62
Figura 4. 16 Ferramenta Grid Blankin (a), e a Ferramenta Grid Math (b). Conversão da grade (grd) em arquivo dat (c).....	63
Figura 4. 17 Visualização dos valores dos nós no interior da bacia do rio Ijuí em extensão .dat, e o cálculo dos Resíduos na coluna D da planilha, onde foi eliminada a constante 1.70E+38.	64
Figura 4. 18 Local onde as séries foram armazenadas para posterior exportação.....	65
Figura 4. 19 Função Média calculada nos postos presentes no interior da bacia.	66
Figura 5. 1 Histograma do REMQ e do R obtidos dos valores da tabela 5.1.	72
Figura 5. 2 Precipitações acumuladas estimadas e medida no PVG 23 no período de 360 dias iniciado em 27/06/1990.....	73
Figura 5. 3 Grade com resolução de 50 x 50 abrangendo os limites da bacia do Ijuí no posto Ponte Mística.	75
Figura 5. 4 Grade com resolução de 50 x 50 abrangendo os limites da bacia do Santo Ângelo.	76
Figura 5. 5 Grade com geometria de 40 x 40 abrangendo os limites da bacia do rio Ijuí no posto Potiribu.....	76
Figura 5. 6 Grade com resolução de 20 x 20 abrangendo os limites da bacia do rio Taboão.	77
Figura 5. 7 Grade com resolução de 10 x 10 abrangendo os limites da bacia do rio Taboão.	78
Figura 5. 8 Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 22/08/1989, caso I.	79
Figura 5. 9 Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 30/08/1989, caso II.	80

Figura 5. 10Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 20/10/1989, caso III.....	81
Figura 5. 11Precipitações Médias e Medias Acumuladas determinadas com o uso do interpolador Vizinho Natural e.pelos Cálculos Diretos. No período de 22/08/1989 a 05/08/1990 na área de drenagem do posto fluviométrico Ponte Mística.	82
Figura 5. 12Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.	84
Figura 5. 13Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística	84
Figura 5. 14Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.	85
Figura 5. 15Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.	85
Figura 5. 16Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva média obtida por interpolação, no posto fluviométrico Ponte Mística.	86
Figura 5. 17Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Diretos, no posto fluviométrico Ponte Mística.	87
Figura 5. 18Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação, no posto fluviométrico Ponte Mística.	87
Figura 5. 19Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva mediana obtida pelos Cálculos Diretos, no posto fluviométrico Ponte Mística.	88
Figura 5. 20Calibração do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	91
Figura 5. 21Calibração do Modelo IPH II com a série de precipitações médias pelos cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	91
Figura 5. 22Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	92

Figura 5. 23Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.....	92
Figura 5. 24Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	93
Figura 5. 25Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	93
Figura 5. 26Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	94
Figura 5. 27Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.	94
Figura 5. 28Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.97	
Figura 5. 29Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.	98
Figura 5. 30Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.98	
Figura 5. 31Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.	99
Figura 5. 32Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.99	
Figura 5. 33Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.	100
Figura 5. 34Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.	100
Figura 5. 35Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.	101
Figura 5. 36Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.	103

Figura 5. 37 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.	103
Figura 5. 38 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações mediana obtida por interpolação, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.	104
Figura 5. 39 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.	104
Figura 5. 40 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva média obtida por interpolação na bacia do Taboão.....	105
Figura 5. 41 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Direto na bacia do Taboão.	105
Figura 5. 42 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Taboão.	106
Figura 5. 43 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Taboão.	106
Figura 5. 44 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.....	108
Figura 5. 45 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.	109
Figura 5. 46 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações mediana obtida por interpolação, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.	109
Figura 5. 47 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.	110
Figura 5. 48 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva média obtida por interpolação na bacia do Turcato. ...	110
Figura 5. 49 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Direto na bacia do Turcato.	111
Figura 5. 50 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Turcato.	111
Figura 5. 51 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/07/2008 a 23/01/2009 utilizando a chuva mediana obtida por cálculos diretos na bacia do Taboão.	112

Figura 5. 52 Vazão calculada e observada na bacia do Santo Angelo, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.	116
Figura 5. 53 Vazão calculada e observada na bacia do Potiribu, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.	116
Figura 5. 54 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.	117
Figura 5. 55 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.	117
Figura 5. 56 Vazão calculada e observada na bacia do Potiribu, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.	119
Figura 5. 57 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003.	119
Figura 5. 58 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.	119
Figura 5. 59 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003.	121
Figura 5. 60 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.	121
Figura 5. 61 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 Ferramentas encontradas no SURFER 8.0 para análise espacial dos dados aplicados na grade regular (Grid).	27
Tabela 4. 1 Descrição dos Postos Pluviométricos da bacia do rio Íju e proximidade... 46	46
Tabela 4. 2 Descrição dos pluviômetros (PM) e pluviógrafos (PG) na sub-bacia do rio Taboão e na sua sub-bacia do Turcato do projeto Potiribu.	48
Tabela 4. 3 Inventário mensal dos dados de pluviometria disponíveis do projeto Potiribu, adaptado de (Medeiros 2003):	50
Tabela 4. 4 Descrição dos Postos Fluviométricos da ANA.....	53
Tabela 4. 5 Descrição dos Postos Fluviométricos do Projeto Potiribu.....	53
Tabela 4. 6 Localização da Estação Meteorológica.	54
Tabela 4. 7 Limites dos Parâmetros que serão utilizados na calibração do Modelo IPH II (Fonte: Collischonn e Tucci, 2003).	68
Tabela 5. 1 Resultado da Validação Cruzada para os métodos de interpolação analisados.	70
Tabela 5. 2 Resultado das precipitações médias com o interpolador Vizinho Natural para diferentes resoluções da Grade Regular, no dia 30/07/1990.	74
Tabela 5. 3 Descrição da geometria da Grade Regular para a bacia da bacia do Ijuí no posto Ponte Mística.	75
Tabela 5. 4 Descrição da Geometria da Grade Regular para a bacia do Ijuí no posto Santo Ângelo.	76
Tabela 5. 5 Descrição da resolução da Grade Regular para a bacia do rio Ijuí no posto Potiribu.	77
Tabela 5. 6 Descrição da Geometria da Grade Regular para a bacia do rio Taboão.....	77
Tabela 5. 7 Descrição da geometria da Grade Regular para a bacia do rio Taboão.....	78
Tabela 5. 8 Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 22/08/1989, Caso I.....	79
Tabela 5. 9 Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 30/08/1989, Caso II.	80

Tabela 5. 10	Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 20/10/1989, Caso III.	81
Tabela 5. 11	Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD), da bacia da Ponte Mística.	88
Tabela 5. 12	Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), da Ponte Mística.	89
Tabela 5. 13	Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e o dos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Santo Ângelo.	95
Tabela 5. 14	Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas, determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Santo Ângelo.	95
Tabela 5. 15	Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (VD), na bacia do Potiribu.	101
Tabela 5. 16	Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas, determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (VD), na bacia do Potiribu.	102
Tabela 5. 17	Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD), na bacia do Taboão.	107
Tabela 5. 18	Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Taboão.	107
Tabela 5. 19	Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD) na bacia do Turcato.	112
Tabela 5. 20	Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Turcato.	113
Tabela 5. 21	Redução do Coeficiente de Nash-Sutcliffe nas diferentes escalas utilizando a chuva média obtida pelo Vizinho natural como entrada no modelo Concentrado IPH II.	113
Tabela 5. 22	Parâmetros utilizados para análise da transferência de escalas.	115
Tabela 5. 23	Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com a transferência de parâmetros da bacia do rio Ponte Mística para as sub-bacias.	118

Tabela 5. 24Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com a transferência dos parâmetros da bacia do rio Santo Ângelo para as sub-bacias.....	120
Tabela 5. 25Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com os parâmetros da bacia do rio Potiribu.....	121
Tabela 5. 26Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com os parâmetros da bacia do rio Taboão.....	122
Tabela 5. 27Valores do Coeficiente de Desempenho de Nash-Sutcliffe provenientes do processo de transferência direta de parâmetros do Modelo IPH II.....	123

1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico pode ser entendido como um sistema, sendo este sistema formado por um conjunto de partes conectadas de um todo, que são os processos hidrológicos (precipitação, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamentos). Estes processos são impulsionados principalmente pela energia solar e ação gravitacional (Chow et al., 1988).

A representação dos processos hidrológicos a partir dos modelos hidrológicos apresenta algumas limitações. Segundo Tucci (2005), estas limitações decorrem da insuficiência da quantidade e da qualidade dos dados hidrológicos. Além disso, a formulação matemática de alguns processos e o comportamento espacial de variáveis e fenômenos são necessariamente simplificados.

Quanto à maneira de representar a variabilidade espacial, os modelos hidrológicos chuva-vazão de forma geral são classificados como: concentrados, distribuídos por sub-bacias e distribuídos por módulos. Os modelos concentrados possuem a característica de não levar em conta a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros. A utilização da chuva média como variável de entrada neste tipo de modelo é o mesmo que admitir a uniformidade espacial da precipitação representada por esta estatística pontual (Tucci, 2005).

A dificuldade ocorre no momento da determinação da precipitação média na bacia, pois as séries de precipitações geralmente apresentam falhas (falhas dos aparelhos, falhas no processamento dos dados e perda de dados). Além disso, a precipitação é uma das principais variáveis hidrológicas que apresenta alta variabilidade espacial e temporal (Oliveira, 1995). Necessita-se de técnicas para se obter o máximo aproveitamento das informações disponíveis para quantificar a chuva média, de maneira que esta apresente representatividade e boa resposta na saída dos modelos hidrológicos.

A determinação da precipitação média em área pode ser obtida com base nas informações a partir de uma rede densa de medidas pontuais (pluviômetros) e / ou por estimativas por radar para a melhor representatividade do verdadeiro volume sobre a superfície de uma determinada área (NCRFC, 2011). As técnicas utilizadas para estimar a chuva média em área são descritas como: a média aritmética; a análise por Isoietas; os polígonos de Thiessen; Grid (Grade Regular) e a distância ponderada no centróide da bacia.

Existem métodos como o MAPX, proposto pela NWS (National Weather Service) que determina a chuva média em área com base nas estimativas de precipitação em centróides de Grid de 4Km x 4 Km, com base na informação do radar WSR-88D.

Uma alternativa promissora, portanto, utilizada nesta pesquisa, é o método do Grid (Grade Regular), para estimar o valor da precipitação em área para uso no modelo do tipo concentrado chuva-vazão IPH II. O método da Grade Regular é uma técnica de determinação do valor da precipitação do nó de uma grade com base na ponderação da distância entre o nó e a medida de chuva através da rede de pluviômetros ou pluviógrafos. Uma vez que todos os pontos da grade são estimados é feita uma relação entre o somatório dos valores das precipitações com o número de pontos da grade para obter o valor da precipitação média em área (NCRFC, 2011).

As séries das chuvas médias, como também, das chuvas medianas, podem ser estimadas com base nos valores nodais da grade obtidos após a interpolação com base na informação de amostras pontuais de uma rede de pluviômetros no interior e fora dos limites da bacia analisada. O uso da técnica da Validação Cruzada pode ser promissor como apoio para avaliar o desempenho de outros interpoladores e selecionar o melhor, pois em diversos trabalhos observou-se somente o uso do método do Inverso do Quadrado da Distância para estimar campos de precipitação e posteriormente gerar a chuva média. Sabe-se que a geração de campo de precipitações através da interpolação é uma tentativa de aproximação do campo “real” mediante o uso de modelo matemático determinísticos.

Neste trabalho, pretende-se avaliar a chuva média e a mediana determinada após a geração de campo de precipitações obtida por uma rede de pluviômetros e pluviógrafos consistidos, mediante a resposta de um modelo chuva-vazão. A hipótese implícita é que a chuva média calculada através de campo de precipitações mais próximo do “real” proporciona resultados de simulação de melhor desempenho, no que diz respeito à reprodução das séries de vazões.

Diversos trabalhos propuseram a utilização de modelos chuva-vazão para avaliar os campos de precipitação, sendo que o principal problema observado tem sido o desconhecimento do campo real de chuva. Todas as séries resultantes de vazão são confrontadas com dados de medidas reais de vazão. A justificativa é que os modelos de

transformação chuva vazão são uma aproximação da realidade e nenhum deles é capaz de representar plenamente o processo. Como o conhecimento do campo real de precipitação é uma meta impossível de ser alcançado, conclui-se que os estudos de sensibilidade não devem focar na busca de um campo de precipitações ideal, mas sim na análise de como uma chuva média em área, calculada a partir de uma base consistente de dados é transformada em escoamento (Andréssian et al., 2001).

Portanto, nesta pesquisa, pretende-se verificar o procedimento adequado para os casos com a presença de falhas na rede de pluviômetros analisados, avaliando a representatividade não apenas da chuva média, como também, da chuva mediana, diárias, a partir da resposta produzida por um modelo concentrado. As séries das precipitações médias e das medianas diárias podem ser obtidas, primeiramente, a partir do cálculo diretamente dados dos postos presentes no interior dos limites da bacia, sem fazer o preenchimento de falhas. Outra maneira utilizada que pode ser empregada é a espacialização foi mediante a espacialização da precipitação por interpolação de medidas pontuais presente no interior e fora dos limites da bacia. Neste caso, pretende-se utilizar uma grade regular com diferentes resoluções em função da escala analisada, e as estatísticas pontuais determinadas nos nós presentes no interior da bacia.

Os resultados das precipitações médias e medianas diárias nas escalas analisadas, obtidos pelos métodos descritos acima, serão utilizados como dados de entrada de um modelo chuva-vazão em diferentes escalas de bacias hidrográficas embutidas.

Existem diversos modelos chuva-vazão concentrados, bastante utilizados para simular o processo precipitação vazão (Ex.: Sacramento, HEC HMS, etc.). O modelo IPH II, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) na década de 70, possui uma versão atual denominada de WIN_IPH II (Bravo, et al., 2006a), que possibilita realizar a calibração do modelo de forma automática e manual. A otimização baseia-se funções monobjetivo e multiobjetivo, com o uso do algoritmo SCE-UA na calibração automática monobjetivo e do algoritmo MOCOM-UA utilizado na calibração automática multiobjetivo. Esta versão caracteriza-se por promover uma interface melhor entre o modelo e o usuário, através da apresentação dos resultados de diferentes interfaces em forma de gráficos. O qual é, portanto, o modelo natural escolhido para a pesquisa pretendida.

Portanto a partir dos resultados das vazões fornecidas pelo modelo nas diferentes escalas, o método estatístico pontual, media ou mediana, pretende-se avaliar, com base no melhor desempenho (Vazão observada x Vazão Simulada) pelo modelo IPH II, versão WIN_IPH II. A avaliação do desempenho deve mostrar: A representatividade na chuva média ou na chuva mediana determinadas diretamente dos postos presentes no interior da bacia, aqui definido de Cálculos Diretos; As diferenças de desempenho produzidas nas chuvas médias e nas medianas determinadas com base nos valores nodais da Grade Regular após a interpolação dos postos no interior e fora dos limites da bacia; e qual a estatística pontual terá sido mais adequada em função da escala da bacia hidrográfica. Além disso, faz parte da presente pesquisa uma análise de transferência de parâmetros do modelo, resultantes da melhor estatística pontual, entre uma escala maior para uma menor, para uso nos casos de indisponibilidade de dados de vazão.

2 OBJETIVOS

Este trabalho partiu da formulação das seguintes hipóteses:

- Em bacias menores há uma relativa homogeneidade das precipitações, o que pode favorecer o uso da média aritmética destas, para representação pontual do campo de precipitações;
- Em bacias maiores, cada série pluviométrica pode ser interpretada como uma realização aleatória do processo constituído pelas verdadeiras precipitações que teriam produzido as vazões que aconteceram na bacia, sendo a mediana dessas ocorrências a estatística menos afetada pelos eventos extremos locais.
- O interpolador utilizado na espacialização da precipitação pode ser uma alternativa para preencher as falhas e melhorar as estimativas das precipitações tanto a média quanto a mediana, na bacia.

O objetivo desta pesquisa é investigar qual a estatística pontual (média ou mediana) e qual o método de interpolação para a espacialização da precipitação diária que deu origem à melhor estimativa pontual da precipitação, para uso em modelos conceituais chuva-vazão do tipo concentrado, considerando-se diferentes escalas.

As etapas para atingir este objetivo podem ser resumidas em:

1. Eleição do melhor método de interpolação, utilizando a técnica da validação cruzada;
2. Espacialização da precipitação com o uso do melhor método de interpolação, e obtenção das séries médias e medianas diárias determinadas através dos valores nodais de grades regulares, com diferentes geometrias para cada escala de bacia analisada;
3. Obtenção das séries de precipitações médias e das medianas diárias calculadas diretamente dos postos no interior dos limites das bacias nas diferentes escalas;
4. A partir da precipitação média e mediana, nas duas formas experimentadas (itens 2 e 3), simulação do processo chuva-vazão utilizando o modelo concentrado de base conceitual (IPH II);

5. Realização de testes estatísticos dos erros das vazões, com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe e no erro de volume, para comparação dos resultados com os seguintes enfoques, nas diferentes escalas analisadas: interpolador x valores diretos; média x mediana.
6. Adicionalmente, avaliação da possibilidade de transferência de parâmetros do modelo IPH II entre escalas, para uso em casos de indisponibilidade de dados para calibração nas bacias menores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Precipitação

As formas mais comuns de precipitação são a chuva, a neve, o granizo, a geada e o orvalho. As precipitações podem ocorrer pelo encontro de massas de ar sob condições diferentes com interferência orográfica ou não, ou como resultado das variações a que está submetido um gás (vapor d'água) sujeito às variações de pressão e temperatura que ocorrem na atmosfera (termodinâmico). No clima brasileiro, a mais importante destas formas é a chuva (Biscaro, 2007).

A maneira utilizada com mais frequência para obter dados de precipitação é a construção e a manutenção de uma rede de postos pluviométricos localizados em posições geográficas específicas (Conti, 2002). Os principais aparelhos utilizados nesta coleta são o pluviômetro, e o pluviógrafo. A quantidade destes distribuídos ao longo de uma área deve ser suficiente para quantificar o fenômeno da precipitação.

O pluviômetro fornece o total precipitado ao final de um intervalo de tempo determinado quando um observador faz a leitura. A O.M.M. estipula que as leituras realizadas em um dia as 08 horas da manhã sejam atribuídas ao dia anterior. O pluviógrafo é um aparelho mecânico ou eletrônico e fornece dados de chuva acumuladas em intervalos de tempo programados que pode variar de um minuto a mais de 01 hora. Através do estudo e observação destes dados é possível avaliar não somente a intensidade e a duração da chuva, mas os totais precipitados, e a frequência e distribuição temporal (Camargo, 2001).

As chuvas de acordo com a forma de ocorrência podem ser classificadas em três tipos: as chuvas convectivas, as quais possuem características de pequena duração e grande intensidade, com abrangência em pequenas áreas; as chuvas frontais, os quais são menos intensas, de maior duração e abrangência em grandes áreas; as chuvas orográficas, os quais apresentam baixa intensidade, durações mais prolongadas e atuações sobre área médias (Garcez & Alvarez, 1988). A precipitação é uma variável hidrológica que apresenta alta variabilidade espacial e temporal. Esta característica pode ser evidenciada na aleatoriedade das medidas de precipitações nos postos distribuídos no interior da bacia analisa, principalmente com o aumento da escala. Necessita-se de técnicas para se obter o máximo aproveitamento das informações disponíveis para quantificar a chuva média no interior da

bacia (Oliveira & Chaudrh, 1995), de maneira representativa, e que produza boa resposta na saída dos modelos hidrológicos chuva-vazão.

Quando se pretende determinar o valor da chuva ocorrente na bacia, estimado através de medidas pontuais de pluviômetros e pluviógrafos, depara-se com algumas dificuldades, que podem produzir erros na saída dos modelos hidrológicos, sendo estas: a alta variabilidade espacial da precipitação; a quantidade de postos distribuídos em uma área; as falhas existentes nas séries pluviométricas (falhas nos aparelhos, no processamento dos dados e por perdas dos dados), o tipo de chuva, a área da bacia, dentre outros (Oliveira et al., 1998). Nestes casos são utilizadas técnicas para fazer o preenchimento das falhas das séries de precipitações, e técnicas para verificar a homogeneidade dos dados, reduzindo as inconsistências nas medidas pontuais.

3.2 Determinação da Chuva Média na Bacia Hidrográfica

A quantificação da precipitação média sobre os limites da bacia hidrográfica é uma das informações essenciais para os estudos hidrológicos (Dorninger et al., 2008). Mas, o ideal, é primeiramente, analisar a distribuição espacial da precipitação a partir de várias estações, pois o monitoramento pontual pode representar bem a chuva em área para bacias hidrográficas de pequena escala, mas não é o mesmo para bacias de grande escala (Bayraktar et al., 2005).

Existem dificuldades para se saber qual o valor da chuva, representativa do campo de precipitações realmente ocorrido na bacia hidrográfica. A determinação de sua distribuição em área contém as incertezas decorrentes dos métodos utilizados para quantificar essa distribuição. A distribuição da quantidade de chuva em área, a partir da medição por pluviômetros e pluviógrafos pode ser determinada com base no cálculo da média aritmética, ou através de métodos de interpolação, para exprimir do melhor modo o campo de distribuição da chuva na área. A medida pontual obtida pelos pluviômetros pode mostrar a incerteza própria dos processos aleatórios da precipitação (Bayraktar et al., 2005).

A variabilidade espacial e temporal do fenômeno chuva é grande, havendo uma enorme dificuldade de representação, especialmente das chuvas convectivas. Nas latitudes tropicais, as chuvas convectivas são da ordem de 50% do volume total precipitado. A chuva média em uma área, mesmo para as redes pluviométricas bem projetadas, não depende apenas da densidade de distribuição dos pluviômetros, mas também das características da área e do

mecanismo de produção da chuva. Particularmente, as chuvas convectivas apresentam alto padrão de variabilidade espacial e temporal que dificultam as análises e conclusões sobre a distribuição da chuva média em uma área (Travoti & Antonio, 2007).

Segundo Travoti & Antonio (2007), a intensidade da precipitação exhibe grande flutuação no espaço e no tempo. As medidas pontuais por pluviômetro mostram que os campos de chuva são altamente variáveis numa escala espacial que varia de alguns metros a centenas de quilômetros. Portanto, a representação de sua variabilidade no domínio do espaço e do tempo está sujeita a um alto grau de indeterminação.

Segundo Sant'anna Neto (1995), existem pequenas variações espaciais das chuvas, dadas em função da altimetria, da latitude e de outros fatores, devido basicamente à topografia. Mellart (1999) menciona que a distribuição da chuva ou da precipitação depende da topografia do local e do tipo de chuva, e da distância entre os postos que serão utilizados para a determinação da espacialização da precipitação.

Camargo et al. (2001) utilizaram os dados diários de precipitação pluvial de 19 estações meteorológicas do Estado de São Paulo, e concluíram que existe grande variabilidade espacial nas precipitações, tendo-se em conta os baixos valores do coeficiente de regressão, especialmente a partir de 20 quilômetros e nos meses de verão, quando há predomínio de chuvas convectivas. Os autores ainda sugerem a distância de 10 quilômetros como limite máximo de espaçamento entre os postos pluviométricos para poder se precaver na quantificação deste tipo de chuva com abrangência em pequenas áreas.

Portanto, observam-se alguns problemas que podem afetar os resultados na utilização da precipitação média como uma variável de entrada nos modelos hidrológicos concentrados, devendo-se ter em conta as características do sistema, representados pela distribuição das estações (Sen & Eljadid, et al, 2000), as dimensões da área e a periodicidade da chuva (Haberlandt, et al, 2007), e a complexidade do terreno (Dorninger, et al, 2008). Nos casos onde há influência da altitude e da irregularidade do terreno, os métodos mais utilizados são os geoestatísticos, especialmente aqueles que utilizam as técnicas de krigagem (Pardo-Igúzquiza, 1998). Mas, segundo Bayraktar (2005), os métodos mais utilizados para determinação da chuva média são o da Média Aritmética (Figura 3.1), o de Thiessen (Figura 3.2) e o das Isoietas (Figura 3.3).

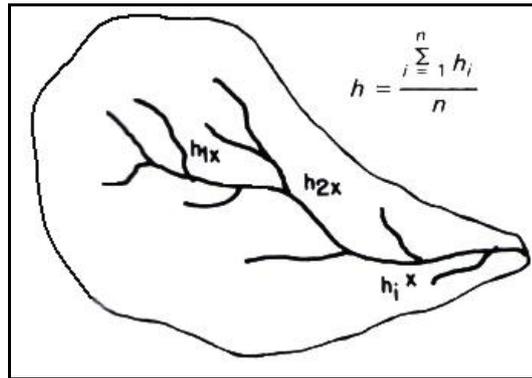


Figura 3. 1 Determinação da precipitação média na bacia com o uso da Média Aritimética.
 Fonte: Garcez & Alvarez (1988).

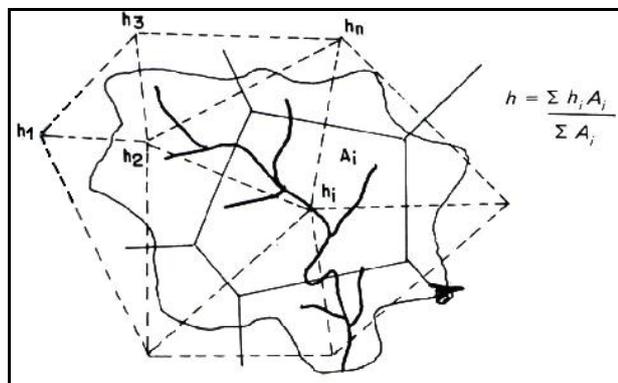


Figura 3. 2 Determinação da precipitação média na bacia com o uso do método dos Polígonos de Thiessen. Fonte: Garcez & Alvarez (1988).

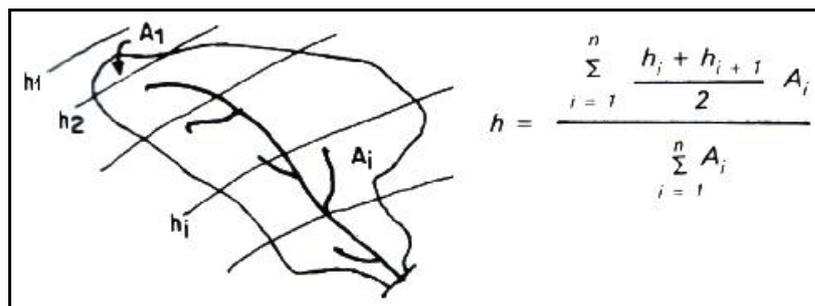


Figura 3. 3 Determinação da precipitação média na bacia com o uso do método das Isoietas.
 Fonte: Garcez & Alvarez (1988).

Os métodos tradicionais utilizados para a espacialização da precipitação e para a determinação da precipitação média no interior da bacia hidrográfica são descritos como: os gráficos (Ex: Isoietas), os geostatísticos (Kriging) e os interpoladores (Ex: Inverso do quadrado da distância, vizinho natural, triangulação linear, etc.). Têm sido realizadas

experiências computacionais com a estruturação de SIGs idealizando a espacialização da precipitação de maneira automatizada (Guenni & Hutchinson, 1998). Atualmente, métodos tradicionais têm sido associados ao uso do radar e de satélite na tentativa de proporcionar respostas mais rápidas e de boa precisão (Haberlandt, 2007).

A técnica específica MAPX, proposto pela NWS (National Weather Service), permite obter o valor da chuva média no interior dos limites da bacia mediante as estimativas de precipitação em centróides de Grid com resolução de 4Km x 4 Km, com base na informação do radar WSR-88D (Figura 3.4).

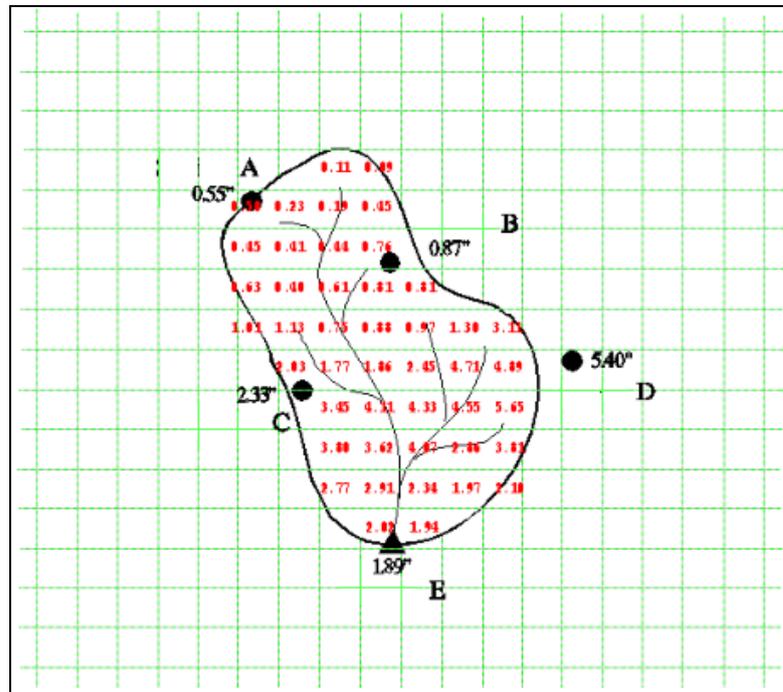


Figura 3. 4 Determinação da precipitação média no interior da bacia mediante os valores dos centróides das células proveniente da chuva de radar, e posteriormente comparada a chuva média interpolada por pluviômetros (NCRFC, 2011).

Pode ser citados trabalhos como o de Collischonn (2001), e o de Andreolli (2003), nos quais, utilizaram o método da ponderação da distância com o uso do interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IQD) no Aplicativo INTERPLU para estimar valores de chuva no centróide de células de 10 km x 10 km obtidos da discretização da bacia no modelo Chuva-Vazão MGB (Modelo de Grandes Bacias), em que apresentou resultados satisfatórios na saída do modelo (Figura 3.5).

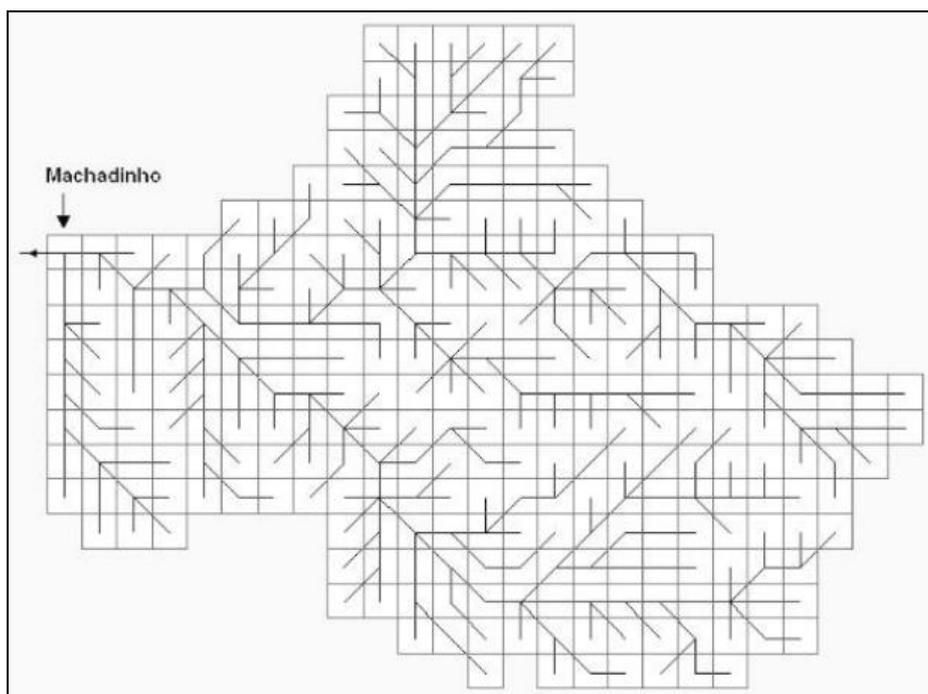


Figura 3. 5 Determinação da precipitação nos centróides das células de 10 km x 10 km, a partir da interpolação de uma rede de pluviômetros e pluviógrafos distribuídos em área, no modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias), Andreolli (2003).

A maneira aqui proposta para estimar a precipitação média na bacia é mediante a utilização de malhas ou grades. A chuva média é estimada com base nos nós da grade (interseção de linhas e colunas) determinados mediante a interpolação de dados pontuais (rede de pluviômetros) distribuídos no interior e fora dos limites da bacia hidrográfica analisada. O aumento ou a redução da quantidade de nós está em função da manipulação do numero de linhas e colunas adotadas. O resultado da precipitação média ou mediana pode ser determinado através dos valores dos nós da grade regular determinados pelo interpolador (Figura 3.6).

A precipitação média por este método é determinada pela relação entre o somatório dos valores das precipitações nos nós pelo total de nós distribuídos no interior dos limites da bacia (Figura 3.6). Enquanto que a mediana é o valor central destes mesmos nós utilizados para a determinação da precipitação média.

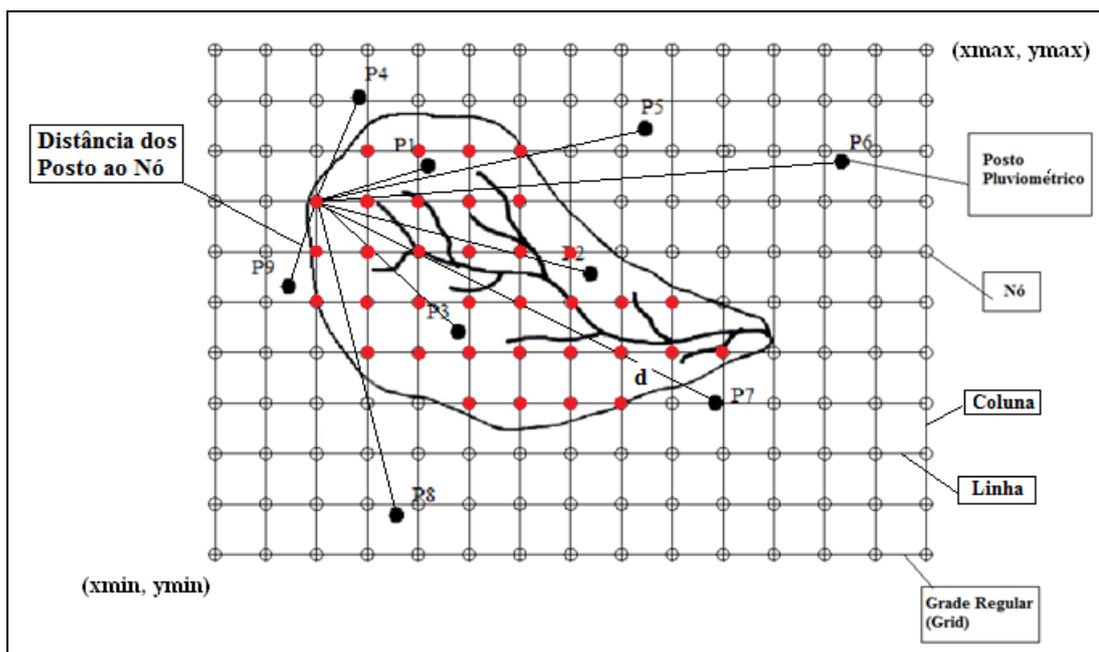


Figura 3. 6 Determinação da precipitação média com base nos valores nodais presentes no interior dos limites da bacia após a interpolação com base na informação da rede de pluviômetros e pluviógrafos.

3.3 Análise Espacial

A análise espacial é um processo pelo qual é possível separar um sistema nas suas partes, revelando a sua natureza e relações, de forma a determinar seus princípios gerais de comportamento (Krishna,2004). Os resultados da análise espacial podem ser visualizados em mapas que mostram relações geoespaciais, através de um mapa de campo que expressa a estimativa da variação espacial de uma determinada característica em estudo, em que é usado um conjunto limitado de amostras de campo.

Os mapas podem ser formados a partir de pontos de medição de precipitação em uma área, e a partir de um modelo de descrição espacial, que permite interpolar a superfície.

Para caracterizar os problemas de análise espacial, foram considerados dois tipos de dados, de acordo com Krishna(2004).

- Eventos ou padrões pontuais – fenômenos expressos através de ocorrências identificadas como pontos localizados no espaço, denominados processos pontuais (Ex: Postos pluviométricos distribuídos numa bacia hidrográfica).

- Superfícies contínuas – estimadas a partir de um conjunto de amostras pontuais, que podem estar regularmente ou irregularmente distribuídas. Usualmente, este tipo de dados é resultante de levantamentos de recursos naturais os quais incluem mapas geológicos, topográficos, ecológicos, fisiográficos, etc.

A partir destas duas considerações acima, relacionadas aos tipos de dados, verifica-se que, em ambos os casos, as operações de análise espacial lidam com dados ambientais. Em ambos os casos, a análise espacial envolve um conjunto de procedimentos encadeados, cuja finalidade é a escolha de um modelo que considere explicitamente os relacionamentos espaciais presentes no fenômeno natural.

No caso da análise de padrões de pontos, o objetivo é a própria localização espacial dos eventos em estudo. Para o caso de análise de superfícies, o objetivo é reconstruir a superfície a partir de medidas pontuais de amostras. Essas duas formas podem ser representadas espacialmente com a apresentação visual dos dados sob a forma de gráficos e mapas (Câmara, 2001).

As alternativas de representações geométricas são as seguintes (Câmara, 2001).

- *Ponto 2 D*: Um ponto em duas dimensões é um par ordenado (x,y) de coordenadas espaciais. Este ponto indica um local de ocorrência de um evento, como, por exemplo, a posição dos postos pluviométricos numa bacia hidrográfica.
- *Polígonos*: Um polígono é um conjunto de pares ordenados (x,y) de coordenadas espaciais, de tal forma que o último ponto seja idêntico ao primeiro. Numa situação real, pode ser exemplificados sendo os limites da bacia hidrográfica.
- *Amostras*: Consistem de pares ordenados (x,y,z) nos quais os pares (x,y) indicam as coordenadas geográficas e z indica o valor do fenômeno estudado para essa localização. Usualmente, as amostras estão associadas a levantamentos de campo, ou seja, altimétrica, dados de precipitação, concentração de substâncias químicas, etc.

- *Grade Regular (“Grid”)*: é uma matriz onde cada elemento está associado a um valor numérico, e a matriz associada a uma rede de superfície terrestre. A coordenada é iniciada pelo canto inferior esquerdo da matriz e, os valores numéricos espaçados regularmente nas direções horizontal e vertical (x,y).
- *Imagem*: é uma matriz onde cada elemento está associado a um valor inteiro (usualmente de 0 a 255), utilizada para visualização. Essa matriz é utilizada para apresentação gráfica de uma grade regular, onde os valores numéricos da rede são escalonados para intervalos de apresentação da imagem. Por exemplo, numa imagem, os maiores valores serão mostrados em níveis de cinza mais claro e os menores valores representados por um cinza mais escuro.

As geometrias associadas a pontos, amostras e polígonos apresentam-se na figura 3.7, assim como a grade regular (Grid). Usualmente, a referência geométrica dos dados está guardada nas coordenadas das estruturas de dados, que está associada a uma projeção cartográfica, referenciada pelos valores de latitude (coordenada Y) e longitude (coordenada X). Na figura 3.8 está apresentada uma superfície gerada pelo método da Triangulação Linear.

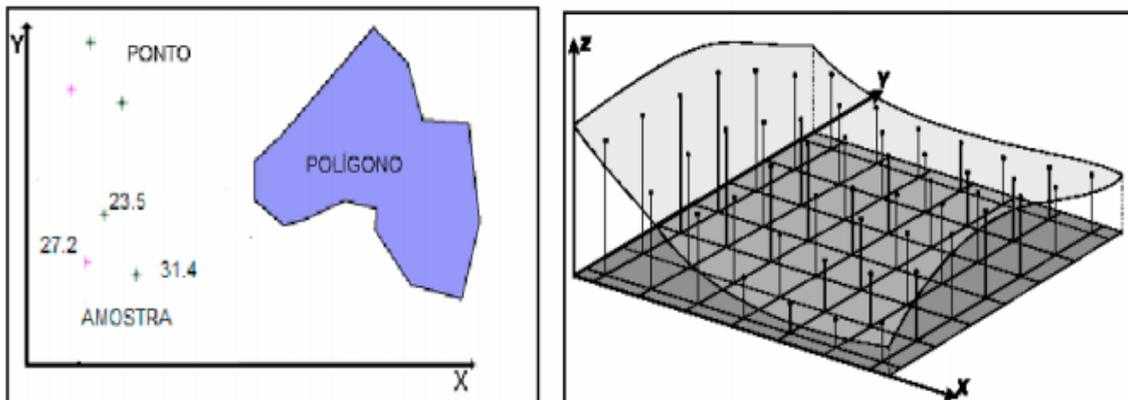


Figura 3. 7 Geometrias: pontos 2D, amostra e polígonos na esquerda, e a representação geométrica da grade regular na direita, adaptado de Câmara (2001).

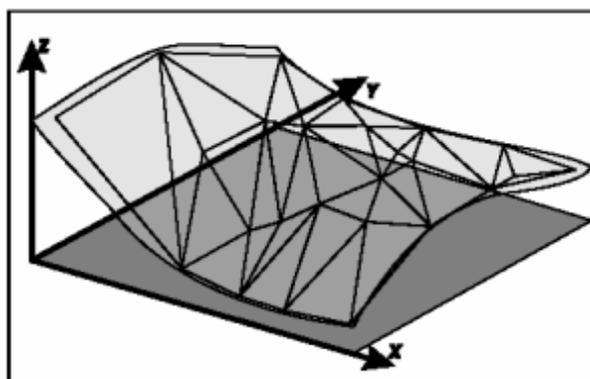


Figura 3. 8 Superfície e a malha regular obtida através do método da Triangulação, adaptado de Câmara (2001).

Outra forma de apresentação de superfície usual é quando os dados de entrada são organizados na forma de tabelas (x,y,z) , sendo x e y as coordenadas geográficas dos postos pluviométricos e z os valores das precipitações. O processo de interpolação é aplicado e produz a grade regular, sendo após, adicionado um polígono com os limites da área de estudo. O resultado é a superfície de forma aproximada do fenômeno da área de estudo.

O conceito interessante para a compreensão e a análise dos fenômenos espaciais é a dependência espacial. Geralmente, pode-se afirmar que a maioria das ocorrências espaciais naturais, apresenta uma relação entre si que depende da distância (Câmara, 2001). Sendo assim transmitido o princípio que os locais próximos a um posto pluviométrico têm uma maior probabilidade de apresentarem valores de precipitação próximos ao mesmo.

Os principais métodos encontrados nos SIGs focam-se na análise da relação espacial dos dados, com o ideal de resolver os problemas e dar respostas científicas. As operações realizadas por estes métodos disponíveis nos SIGs são: A interpolação de dados para a geração de isolinhas de valores (Ex: curvas de nível) e a geração de superfícies (Ex: Superfícies do Terreno, Superfície da Precipitação). Os métodos de interpolação do Inverso do Quadrado da Distância, a Triangulação Linear, e o método de Thiessen são bastante utilizados para análise espacial de dados principalmente no estudo da variabilidade espacial da precipitação.

3.3.1 Métodos de Interpolação

Na modelação de superfícies através da interpolação são usadas funções matemáticas, produzidas por modelos determinísticos. Estes modelos podem não representar os fenômeno

físico através do conjunto de fatores que estão na sua formação, pois o seu objetivo é de simplesmente interpolar espacialmente os valores observados (Soares, 2000).

Os modelos determinísticos de efeitos locais como o Vizinho natural, o Vizinho mais Próximo, a Triangulação e o Inverso Ponderado da Distância, calculam o valor de uma dada grandeza no espaço entre as amostras ou observações a partir de uma combinação linear dos valores observados. Estes métodos têm por base critérios geométricos para determinar a influência das amostras, isto é, a maior ou menor proximidade (uma distância euclidiana) dos valores observados ao ponto que se deseja estimar (Soares, 2000). São modelos que têm por objetivo quantificar a dependência espacial entre os valores das amostras, utilizando uma abordagem simples e expedita.

Estes métodos de interpolação, quando aplicados em pontos distribuídos numa superfície podem produzir resultados eficientes ou não. Deve-se avaliar qual o método de interpolação representou fielmente os dados originais mediante os seus resultados, bem como observa se a superfície estimada apresenta uma solução adequada (Landim, 2000).

Os métodos de interpolação descritos a seguir são: a Média e a Mediana; o Vizinho mais Próximo; a Triangulação Linear; o Inverso Ponderado da Distância; o Vizinho Natural.

a) A Média e a Mediana

Na análise estatística a Média e a Mediana são definidas como medidas de tendência central.

A média é um verdadeiro método de interpolação, mas muito simples. Neste método atribui-se o mesmo valor estimado a todos os pontos do espaço, sendo este valor estimado obtido da média aritmética de todos os valores amostrados no interior da região de interesse (Equação 3.3).

A média amostral é calculada como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.3)$$

A Mediana é a observação correspondente ao ponto médio de uma população. Para um conjunto onde o número de observações é ímpar, a mediana é o próprio valor central. Quando se tem número par por padrão a Mediana é a média aritmética dos dois valores centrais. A mediana divide uma população em duas partes iguais. Estes dois métodos foram aqui denominados de Cálculos Diretos, que consiste na determinação de chuvas médias ou medianas baseados em amostras pontuais presentes no interior dos limites da bacia.

b) Vizinho mais Próximo

Neste método simplesmente atribui-se o valor do ponto amostral mais próxima, ao nó da grade a ser estimado. Os resultados são diversos polígonos com o ponto amostral no interior (Figura 3.9). O mapa resultante do método do Vizinho mais Próximo assemelha-se ao método dos polígonos de Voronoi (Smith et al, 2009).

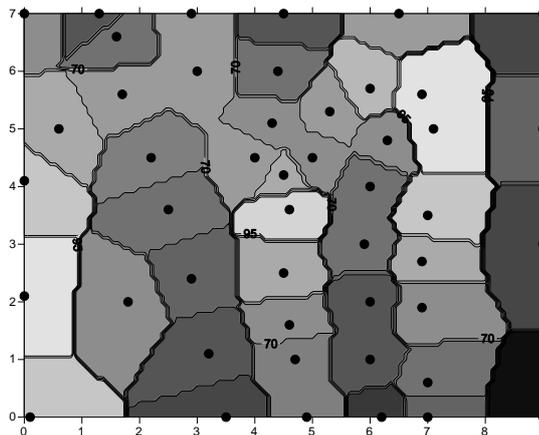


Figura 3. 9 Visualização do Método do Vizinho mais Próximo realizado a partir de dados pontuais, SURFER 8.0.

Segundo Smith et al, (2009), o método do Vizinho Natural é também utilizado para os seguintes casos: (i) espaçamento igual ou quase uniforme de dados de entrada de um arquivo da grade convertido com frequência espacial semelhante, (ii) quando não se deseja alterar os valores do pixel da grade de uma imagem, (iii) quando existe uma necessidade de preenchimento de valores ausentes em uma grade onde a maioria das células estão completas, e (iv), onde há preocupação com a continuidade do campo base e / ou expectativa de que as medidas na superfície possam representar os dados subjacentes. O método do vizinho mais próximo é normalmente utilizado para preenchimento de valores ausentes nos casos mencionados anteriormente.

c) Triangulação Linear

A triangulação linear é um método que divide a superfície da precipitação em triângulos contíguos não sobrepostos, tendo por vértices as amostras. Cada valor da medida de precipitação é guardado em cada vértice do triângulo, podendo acomodar conjuntos de dados distribuídos irregularmente ou de forma seletiva. O valor do ponto (nó da grade regular) é estimado por uma média ponderada dos 3 vértices do triângulo onde o mesmo está inserido (Figura 3.10). Os ponderadores a , b e c são calculados de acordo com a proximidade do ponto aos vértices, tendo-se por base a equação do plano definido pelos valores das amostras/vértices (Soares, 2000).

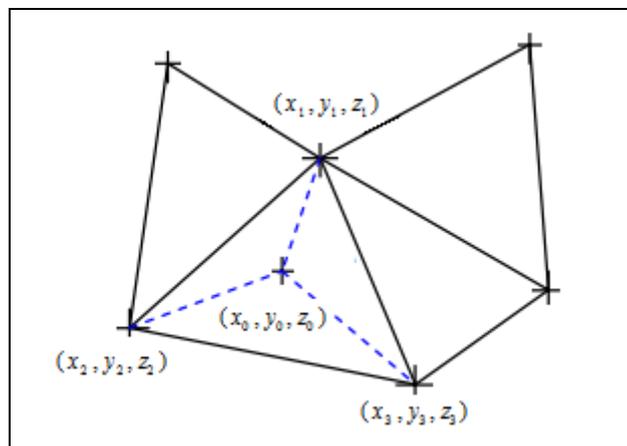


Figura 3. 10 Método de triangulação: o valor de x_0 é uma média ponderada de 3 amostras/vértices (x_1, x_2, x_3) do triângulo que contém x_0 , em que os ponderadores são proporcionais à distância de x_0 a cada um dos vértices, adaptado de Soares (2000).

O ponto x_0 de coordenadas (x_0, y_0, z_0) contido no triângulo é definido pelos pontos (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) e (x_3, y_3, z_3) , é calculado pela equação 3.4.

$$z_0 = ax + by + c \quad (3.4)$$

Os coeficientes a, b, c são obtidos pelo sistema de equações do plano que contém x_0 como mostra o sistema abaixo, representada pela equação 3.5. Os valores de z_1, z_2 e z_3 , por exemplo, podem ser representados por medidas pluviométricas, e valor de z_0 é um ponto no espaço a ser estimado.

$$\begin{cases} ax_1 + by_1 + c = z_1 \\ ax_2 + by_2 + c = z_2 \\ ax_3 + by_3 + c = z_3 \end{cases} \quad (3.5)$$

d) Inverso Ponderado das Distâncias

Este método é bastante utilizado para interpolar e gerar modelos digitais de terreno (MDT), e também, para fazer estudos do comportamento espacial e temporal da chuva a partir da espacialização da precipitação nas bacias hidrográficas. Neste método todos os pontos amostrados que estejam próximos a um ponto a ser estimado, contribuem com pesos inversamente proporcionais à sua distância (Soares, 2000). Com base na figura 3.11, os pontos amostrais mais próximos ao ponto que se deseja estimar são calculados pelo inverso da distância (quanto mais perto, maior a influência).

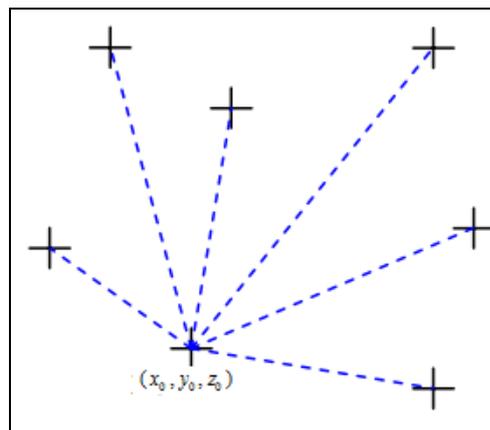


Figura 3. 11 Método do inverso ponderado das distâncias: o valor de x_0 é uma média ponderada das N amostras vizinhas, em que os ponderadores são determinados pelo inverso ponderado das distâncias de cada uma das amostras a x_0 , adaptado de Soares (2000).

Neste método o peso dado durante a interpolação é tal que a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade a ser estimada. Os pontos amostrados próximos à localização do nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante ao calcular o valor de um nó. A soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos é igual a 1 (Equação 3.6).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (3.6)$$

Onde Z é o valor interpolado para o nó da grade regular (Grid), Z_i é o valor do ponto amostrado vizinho ao nó, h_{ij} é a distância entre o nó da grade de Z_i , β é o expoente de ponderação (peso), n é o número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

Segundo Landim (2000), independentemente do expoente de ponderação ou peso (β) adotado, os resultados são variáveis, mas altamente tendenciosos para os valores dos pontos amostrados próximos ao ponto estimado. O expoente tem os seguintes efeitos sobre os resultados estimados: expoentes baixos (0 a 2), destacam anomalias locais; expoentes altos (3 a 5), suavizam anomalias locais; o expoente maior ou igual a 10, resultam em estimativas "poligonais" (planas); o expoente igual a zero resulta em estimativas de "média móvel"; o expoente igual a 2 é o inverso do quadrado da distância (IQD).

e) O Vizinho Natural

A interpolação com o método do Vizinho Natural cria pesos para cada um dos pontos de entrada com base em sua "área de influência" assumido. Estas áreas são determinadas através da geração de polígonos de Voronoi em torno de cada ponto de entrada (Smith, 2009). Os polígonos de Voronoi são construídos a partir da triangulação de Delaunay (Figura 3.12 a e b).

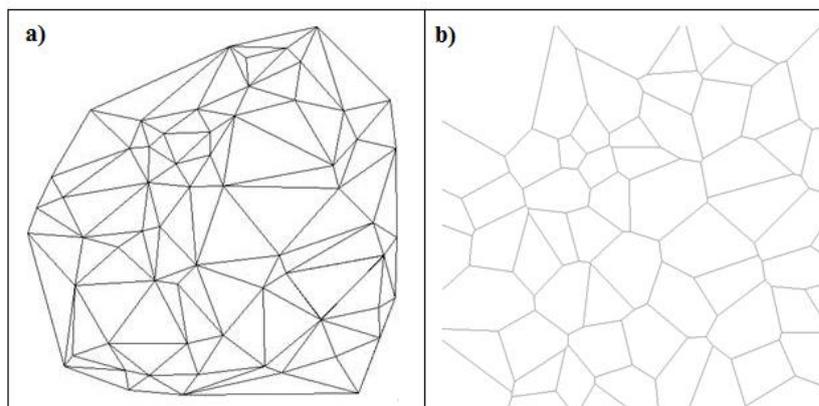


Figura 3. 12 Triangulação de Delaunay (a), Polígonos de Voronoi correspondentes, para um conjunto de pontos amostrais (b) (Smith, 2009).

As ponderações utilizadas na interpolação do método do vizinho natural são baseadas no conceito de coordenadas locais. As coordenadas locais definem a “vizinhança” ou a quantidade de influência que qualquer ponto amostral terá sobre o valor calculado no ponto a ser Interpolado (Ex. ponto P_n mostrado na Figura 3.13). Esta vizinhança é totalmente dependente da nova área de influência dos polígonos de Voronoi (Subconjunto mostrado na Figura 3.13), sob o ponto P_n a ser interpolado.

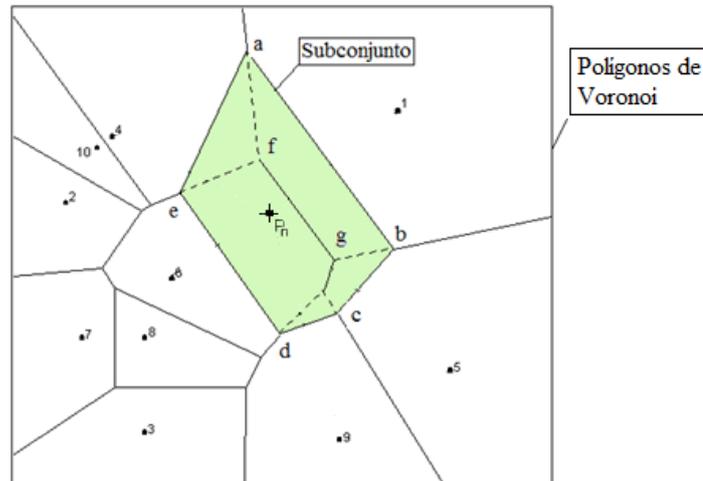


Figura 3. 13 Sobreposição de áreas de polígonos de Voronoi, utilizada no cálculo das coordenadas locais.

Para definir as áreas das coordenadas locais para o ponto de interpolação P_n (Representado por um ponto do Grid), a área de todos os polígonos de Voronoi na grade deve ser conhecida. Para determinar o ponto P_n da grade, faz-se novamente outra triangulação (TIN), juntamente com outro procedimento de polígonos de Voronoi correspondente ao ponto P_n , resultando em uma nova área de Voronoi (ver a nova área ou subconjunto, na Figura 3.13).

No subconjunto, somente os pontos das amostras próximas são usadas para formar o novo polígono de Voronoi, e os mesmos serão utilizados para interpolar o valor em P_n . Neste caso, apenas as áreas formadas pelos pontos 1, 4, 5, 6 e 9 terão maior influência no valor interpolado em P_n do que os demais pontos amostrais (Figura 3.13).

O peso do Vizinho Natural será calculado em função da área de influência do ponto 1, como é indicado na equação 3.7. Esta equação é aplicada para a área de influência formada pelas outras coordenadas locais 4, 5, 6 e 9, segundo a condição (Equação 3.8):

$$w_1 = \frac{A_{abfg}}{A_{abcde}} \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1. \quad (3.8)$$

A equação básica usada na interpolação do Vizinho Natural nos nós da grade, regular é mostrada na equação 3.9.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (3.9)$$

Onde Z é o valor interpolado para o nó da grade regular, Z_i é o valor do ponto amostrado vizinho ao subconjunto.

3.3.2 A Grade Regular e o Aplicativo SURFER 8.0 utilizado para estimar a precipitação média na bacia

A figura 3.14 representa uma bacia genérica, com postos de pluviômetros no seu interior e outro na proximidade do seu limite é feita uma analogia às situações encontradas em casos com a presença de falhas na rede de pluviômetros

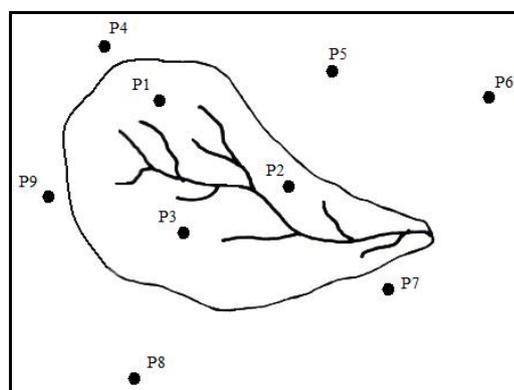


Figura 3. 14 Visualização da bacia hidrográfica genérica, com postos de medição de precipitação no seu interior e outros postos próximos ao seu limite, adaptado de Garcez & Alvarez (1998).

Os seguintes cenários em função do espaço e do tempo são:

- Cenário 1: Todos os postos pluviométricos com medidas de precipitação;
- Cenário 2.: Somente dois postos com medidas de precipitação no interior da bacia genérica (Ex: P1 e P2), e todos os postos circundantes com medidas de precipitação;
- Cenário 3: Somente um posto com medida de precipitação no interior da bacia (Ex: P3), mas com todos os postos circundantes apresentando medidas de precipitação;

A determinação da precipitação Média ou Mediana na bacia após a espacialização dos valores de precipitação pontuais pode ser mais adequado para utilizar no modelo hidrológico concentrado, pois pode representar melhor a distribuição da chuva na bacia tomando como base a informação de dados pontuais dentro e fora dos limites da bacia. Isso, comparado à determinação da chuva média ou mediana através do valor de um único posto localizado no interior da bacia.

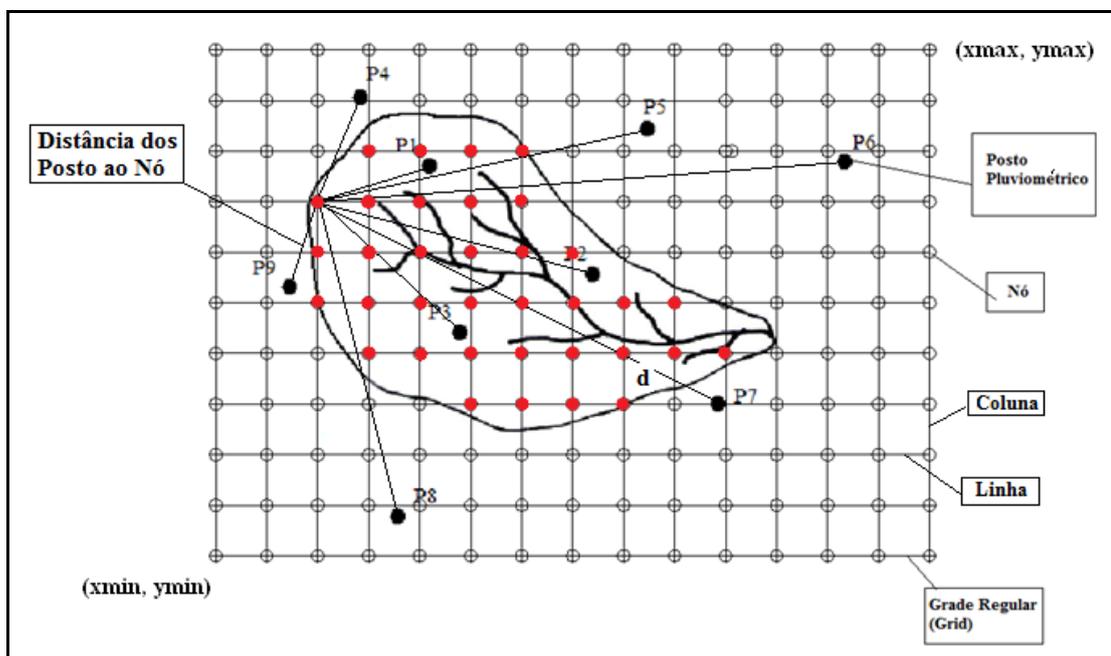


Figura 3. 15 Geração de campos de precipitação a partir de interpolação utilizando uma grade regular, adaptado de Garcez & Alvarez (1998).

Neste trabalho, o campo de precipitações será feito utilizando um método de interpolação para estimar os valores das precipitações nodais da grade regular ou “Grid” (Figura 3.15), e a

precipitação média ou mediana será calculada com base nos valores dos nós somente no interior da bacia (Figura 3.16), após a aplicação de técnicas do SIG.

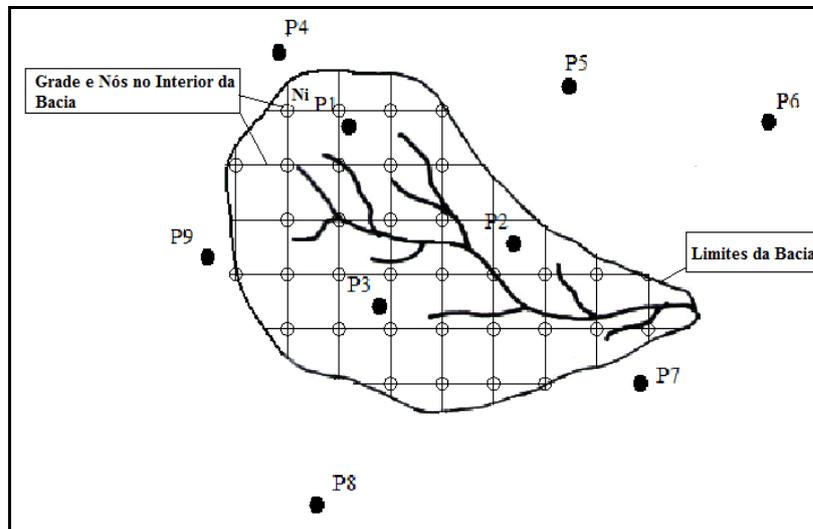


Figura 3. 16 A precipitação Média ou Mediana determinada somente para os nós da grade regular no interior da bacia genérica.

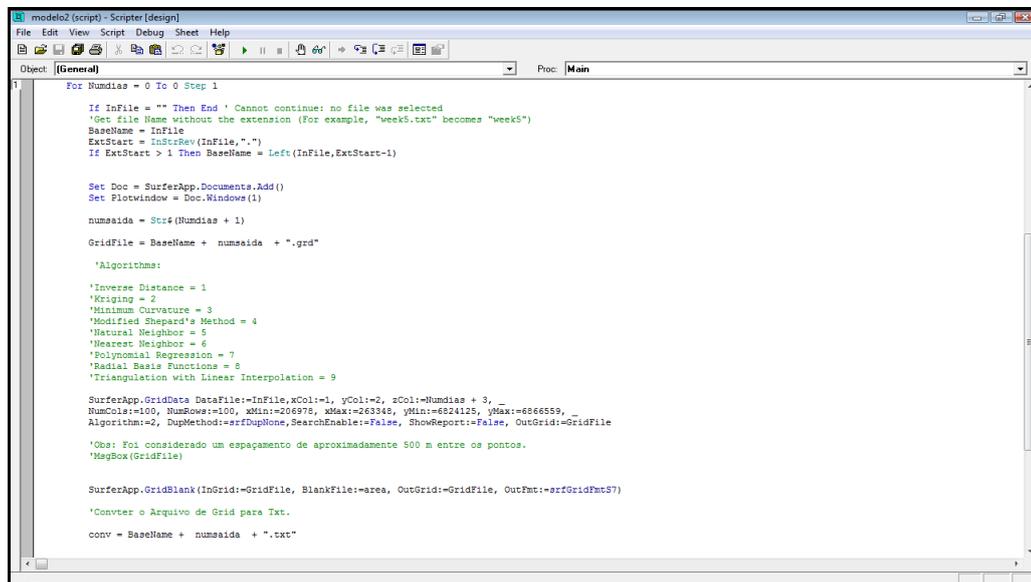
Este método, proposto para estimar a chuva média na bacia, evita a existência de lacunas, pois sempre haverá um valor médio diário de precipitação. Em certos casos, os métodos de interpolação podem identificar erros e preencher as falhas existentes em dados pontuais com inconsistências.

O SURFER 8.0 é o software utilizado nesta pesquisa para fazer a espacialização dos dados de maneira automatizada. Este dispõe de vários métodos de interpolação para espacializar ou criar superfícies a partir de uma grade regular (“Grid”), portanto a escolha do interpolador é uma etapa importantíssima neste processo. Os métodos de interpolação de interesse nesta pesquisa são: o vizinho mais próximo; a triangulação linear; o inverso do quadrado da distancia e o vizinho natural. Cada escala de bacia analisada irá possuir geometria da grade diferentes, sendo estas geometrias referentes ao número de linhas e colunas, que influencia no número de nós, e valores mínimos e máximos das coordenadas x , y da grade.

Estes interpoladores foram escolhidos por alguns destes serem adotados em diversos trabalhos para analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação numa região. Nesta pesquisa, a existência de falhas nos dados, a baixa densidade de postos e a longa distância das

informações entre os dados pontuais fornecidos pelos postos pluviométricos para algumas escalas, não favorecem o uso de métodos geoestatísticos que dependem de variogramas, que por sua vez, segundo Lamdin (2000), dependem de uma alta quantidade de amostras pontuais não muito espaçadas para produzir bons resultados.

O SURFER 8.0 permite operações que podem ser controladas automaticamente por “scripts”. Na informática, o termo “scripts” é frequentemente utilizado para designar uma sequência de comandos e tarefas a ser executada, sendo, no SURFER 8.0 um arquivo texto contendo uma sequência de instruções de procedimentos para ser realizada (Figura 3.17). O objetivo do uso do script neste caso é o de automatizar tarefas repetitivas, que seria na geração de espacialização de precipitação diária para um período de mais de 20 anos. Além disso, os scripts permitem integrar os recursos de vários programas, como abrir o arquivo de dados das precipitações no Microsoft Excel, e transferir este arquivo para o SURFER 8.0. No caso desta pesquisa, foi criada uma sub-rotina para utilizar as ferramentas do SURFER 8.0 com o intuito de gerar uma espacialização da precipitação, utilizando o conceito de grade regular, e assim, determinar a chuva Média e/ou a Mediana dos valores no interior da bacia (Figura 3.17).



```
modelo2 (script) - Scripter [design]
File Edit View Script Debug Sheet Help
Object: [General] Proc: Main
1 For Numdias = 0 To 0 Step 1
  If InFile = "" Then End ' Cannot continue: no file was selected
  'Get file Name without the extension (For example, "week5.txt" becomes "week5")
  BaseName = InFile
  ExtStart = InStrRev(InFile, ".")
  If ExtStart > 1 Then BaseName = Left(InFile, ExtStart - 1)

  Set Doc = SurferApp.Documents.Add()
  Set Plotwindow = Doc.Windows(1)

  numsaida = Str$(Numdias + 1)

  GridFile = BaseName + numsaida + ".grd"

  'Algorithms:
  'Inverse Distance = 1
  'Kriging = 2
  'Minimum Curvature = 3
  'Modified Shepard's Method = 4
  'Natural Neighbor = 5
  'Nearest Neighbor = 6
  'Polynomial Regression = 7
  'Radial Basis Functions = 8
  'Triangulation with Linear Interpolation = 9

  SurferApp.GridData DataFile=InFile, xCol=1, yCol=2, zCol=Numdias + 3, _
  NumCols=100, NumRows=100, xMin=206978, xMax=263348, yMin=6824125, yMax=6866559, _
  Algorithm=2, DupMethod=srfDupNone, SearchEnable=False, ShowReport=False, OutGrid=GridFile

  'Obs: Foi considerado um espaçamento de aproximadamente 500 m entre os pontos.
  MsgBox(GridFile)

  SurferApp.GridBlank(InGrid=GridFile, BlankFile=area, OutGrid=GridFile, OutFmt=srfGridFmt57)

  'Converter o Arquivo de Grid para Txt.
  conv = BaseName + numsaida + ".txt"
```

Figura 3. 17 Programa Scripter que permite a automação dos processos de interpolação no SURFER 8.0.

Estes scripts são escritos em uma linguagem de programação que é compatível com o Visual Basic for Applications. O programa Scripter é um aplicativo externo do SURFER 8.0, que fornece um ambiente completo para escrever, executar e depurar os scripts (sequência de

comandos e tarefas), que permite utilizar todas as ferramentas do SURFER 8.0 através de objetos na linguagem em Visual Basic de maneira automatizada (Figura 3.17).

Na tabela 3.1 são apresentadas as ferramentas para análise espacial disponíveis no SURFER 8.0.

Tabela 3. 1 Ferramentas encontradas no SURFER 8.0 para análise espacial dos dados aplicados na grade regular (Grid).

Operação espacial	Descrição
Dados de entrada para gerar a grade	Arquivos de entrada em formato xls, txt e dat
Métodos de Interpolação	Inverso da distância, vizinho natural, vizinho mais próximo, triangulação linear.
Operações de sobreposição	Operadores de dados: pontos (comando digitalize), polígonos (arquivo em extensão bln) Operações booleanas: pontos dos nós da grade dentro ou fora do polígono (comando Grid-blanking)
Conversão de arquivos	Arquivos de grd (Grid) para binário, dat ou txt
Operações Aritméticas	Cálculo aplicado entre grades regulares (+,-,*,/), (comando Grid-Math).
Reposição e substituição	Cálculo de valores das células nos arquivos dat ou txt que reflete a combinação de valores de células vizinhas, resultante de procedimentos realizados na grade (comando Grid-Residuals).
Estatística descritiva não espacial	Estatística aplicada aos resultados nas células obtida por procedimentos realizados na grade (Ex: Média, Mediana, Máximo, Mínimo, Desvio Padrão, etc.)

3.4 Modelos Hidrológicos

3.4.1 Aspectos Gerais

Um modelo, segundo Tucci (2005), é a representação simplificada de algum objeto ou sistema, numa forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Um modelo matemático, por sua vez, é um conjunto de equações que é utilizado para representar de forma simplificada o comportamento de um sistema físico mais complexo. Um

sistema é uma estrutura qualquer com procedimentos particulares que, a partir de um estímulo, gera uma resposta. O objetivo da modelagem é avaliar, de maneira coerente, quais as possíveis respostas de um sistema a partir de certos estímulos, utilizando para isto uma representação simplificada do comportamento ou da estrutura e das transformações internas deste mesmo sistema (Machado, 2005).

Devido à complexidade da natureza física, o modelo leva em consideração algumas simplificações dos fenômenos existentes no processo. Entretanto, estas simplificações não devem invalidar os resultados obtidos pelo modelo, sendo que as diferenças entre a realidade física do sistema e a do modelo devem ser aceitáveis para os fins almejados. Isto justifica a simplificação dos sistemas e a sua conseqüente utilização.

Quando as equações do modelo procuram reproduzir os principais processos envolvidos no ciclo hidrológico, e nestas equações os parâmetros atribuídos no modelo possuem significado físico, estes são denominados de modelos conceituais. Esses modelos apresentam, em geral, uma estrutura complexa e um grande número de parâmetros. Estes parâmetros podem ser reduzidos ou não, e apresentar, em certos casos resultados satisfatórios.

3.4.2 Classificação dos Modelos

Os modelos apresentam as seguintes classificações, segundo Clarke (1973), Maidment (1993) e Tucci (2005), sendo estas: estocásticos ou determinísticos; empíricos ou conceituais; contínuos ou discretos; concentrados ou distribuídos; estacionários ou dinâmicos.

O modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Se não forem aplicados os conceitos de probabilidade durante a elaboração do modelo, este é denominado de determinístico. Assim sendo, o modelo é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída.

Os modelos são ditos empíricos, quando utilizam relações baseadas apenas em observações. A sua abrangência é especificada para aquela região para a qual as relações foram estimadas. Os modelos empíricos em certos casos não possibilitam fazer extrapolações confiáveis.

Já os modelos conceituais são baseados em processos, sendo em geral mais complexos que os empíricos, pois eles procuram descrever os principais processos físicos que envolvem

determinado fenômeno estudado. Os fenômenos naturais variam continuamente no tempo e no espaço, podendo ser representados por modelos discretos. A escolha do intervalo ou passo de tempo no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. A precisão dos resultados pode ser melhorada com a redução do intervalo de tempo, mas isso exige maior custo em processamento computacional, o que, antigamente, era importante.

Os modelos ainda podem ser classificados como concentrados, os quais consideram a uniformidade de todas as variáveis de entrada na área estudada, e os distribuídos, em que considera a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. Quando a discretização do espaço é feita, cada elemento representa a homogeneidade existente em toda a área da bacia. Modelos distribuídos mais realistas consideram também a existência da relação espacial entre os elementos vizinhos.

Os modelos classificados como estacionários descrevem o fenômeno em determinado momento, e os parâmetros não variam com o tempo. Enquanto que, para os modelos dinâmicos, os parâmetros são função do tempo.

3.4.3 Aplicação dos Modelos

Os modelos chuva-vazão são ferramentas de abordagem dos processos do ciclo hidrológico de maneira simplificada, com o ideal de avaliar qual é a resposta em termos de vazão de uma dada bacia hidrográfica em função da precipitação e das outras variáveis. Esses modelos podem descrever os processos que ocorrem na bacia em função da precipitação, evaporação, etc.

Como os modelos apresentavam muitos parâmetros para serem utilizados na modelagem hidrológica, na década de 70, recorreu-se à modelagem de processos hidrológicos com os parâmetros mais importantes. Dessa simplificação era possível obter resultados equivalentes aos dos modelos que representam quase todos os processos, devido à pequena sensibilidade dos parâmetros. Logo após, seguindo essa linha, surgiram os modelos com menor número de funções e parâmetros como o IPH II, seguindo o princípio de parcimônia dos parâmetros, e mais eficientes para o uso na engenharia.

O modelo IPH II foi desenvolvido pelo IPH/UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulica/Universidade Federal do Rio Grande do Sul), no final a década de 70, com o objetivo de aplicação em projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas. O modelo IPH II é definido como um modelo determinístico - conceitual, para simulação chuva-vazão. O IPH II tem como uma de suas características, uma interface simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseado em metodologias bem difundidas. O modelo é constituído dos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação de escoamento; propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos (Tucci, 2005), representando o modelo chuva vazão do tipo concentrado.

O modelo baseia-se num algoritmo de separação de escoamento, desenvolvido com uso da equação da continuidade em combinação com a equação de Horton, e uma função empírica para a percolação, desenvolvida por Berthelot em 1970. Este algoritmo foi aplicado para compor o modelo precipitação-vazão às bacias dos rios Capivari (Santa Catarina), Cauca (Colombia) e Chasqueiro (RS), pelos respectivos autores, Berthelot em 1972, Sanchez em 1972 e Munoz e Tucci em 1974 (apud Tucci, 2005), e apresentou resultados convincentes. Os referidos algoritmos foram utilizados em conjunto, com a consideração das perdas, do escoamento superficial e do escoamento subterrâneo. O algoritmo de escoamento foi modificado, para apresentar um número mínimo de parâmetros, e o modelo foi implementado por Tucci e Campana em 1993 (apud Tucci, 2005).

3.4.4 Calibração dos Modelos

A calibração é uma das etapas consideradas nos modelos hidrológicos, pois visa determinar os valores dos parâmetros do modelo, para que os valores calculados se aproximem aos resultados medidos em campo. Esta calibração pode ser por tentativa e erro ou automática.

O método da calibração por tentativa e erro consiste em testar diferentes conjuntos de parâmetros até alcançar um vetor de valores dos parâmetros que resulte numa representação mais próxima da resposta natural da bacia hidrográfica para aquela precipitação. Este método exige a experiência do usuário do modelo, pois a correta interpretação dos parâmetros proporciona a convergência dos valores para um nível de precisão desejada.

O método da calibração automática, em geral, consiste na busca de um vetor adequado de parâmetros, mediante métodos matemáticos de otimização. A otimização é realizada a partir da minimização ou maximização de uma função-objetivo baseada nos erros entre as séries de vazão observada e simulada. A função-objetivo é a representação numérica desta diferença, entre os valores das vazões observadas e os das vazões calculadas pelo modelo, e a calibração consiste na busca de um vetor de parâmetros representativo, com o ideal de encontrar o ponto ótimo desta função. A cada iteração, o algoritmo calcula o novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então se verifica a convergência e encerra-se o processo iterativo (Collischonn e Tucci, 2003).

A versão WIN_IPH II (Bravo, et al., 2006a) do modelo IPH II., possibilita realizar a calibração do modelo de forma automática, além da manual, com base em dois métodos numéricos de otimização: monobjetivo e multiobjetivo. O algoritmo SCE-UA é utilizado na calibração automática monobjetivo e o algoritmo MOCOM-UA é utilizado na calibração automática multiobjetivo. Esta versão tem características de promover uma interface melhor entre o modelo e o usuário, através da apresentação dos resultados de diferentes interfaces em forma de gráficos e animações (Bravo, et al., 2007)

3.5 Modelo IPH II

3.5.1 Descrição do Modelo IPH II

O modelo IPH II é um modelo conceitual que simula o processo chuva-vazão, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseia-se nos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação de escoamento; propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos.

Os parâmetros que compõem o modelo são:

R_{\max} - Capacidade máxima do reservatório de interceptação (mm);

I_o - Capacidade de infiltração para $t=0$ (mmh^{-1});

I_b - Capacidade de infiltração mínima (mmh^{-1});

h - Parâmetro de decaimento da infiltração no solo (adm);

K_{sup} - Parâmetro de propagação do escoamento superficial (h);

K_{sub} - Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo (h);

t_c - tempo de concentração da bacia (h);

$AIMP$ - Porcentagem de área impermeável na bacia (%).

3.5.2 O Algoritmo de Perdas por Evaporação e Intercepção

No solo, a precipitação que atingiu a sua superfície, parte do volume da chuva é perdida por evaporação e outra por intercepção. A evaporação potencial é atendida pela precipitação quando o seu valor for inferior a esta, e em caso contrário, a evaporação potencial não satisfeita é atendida pelo reservatório de intercepção, que representa a cobertura vegetal e as depressões (Figura 3.18, (b)). Quando o reservatório está no seu limite mínimo, a parcela de evaporação potencial passa a ser atendida pela água contida no solo, através da relação linear como mostra a figura 3.18 (a) e a equação 3.10.

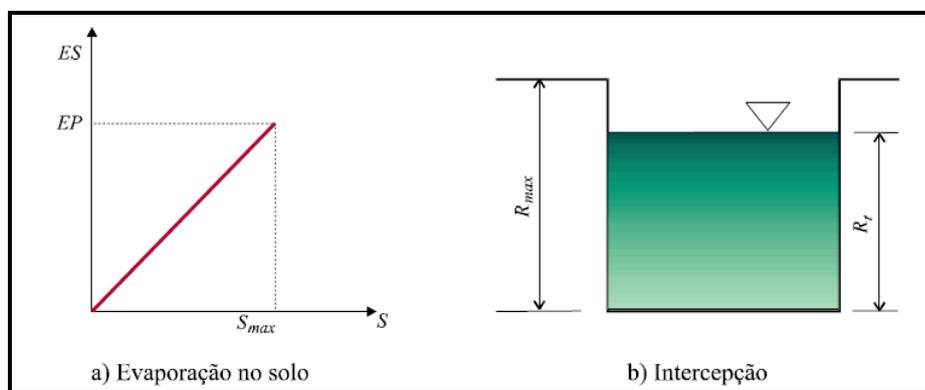


Figura 3. 18 Perdas por Evaporação no Solo e Intercepção (Mine, 1998).

$$ES_t = \frac{EP_t S_t}{S_{max}} \quad (3.10)$$

Onde ES_t é a evaporação do solo no tempo t , EP_t é a evaporação potencial, S_t é a umidade do solo, S_{max} é o teor máximo de umidade do solo.

Quando a precipitação é maior que a evaporação potencial, a diferença é retida por interceptação até que a sua capacidade máxima seja satisfeita (Figura 3.18 (b)). A precipitação restante é então utilizada no algoritmo de infiltração (Algoritmo de separação dos escoamentos) para o cálculo dos volumes superficial infiltrado e percolado.

3.5.3 Algoritmo de Separação dos Escoamentos

A parcela da precipitação resultante, após passar pelo algoritmo de perdas, pode gerar escoamento superficialmente ou infiltrar no subsolo e percolar para o aquífero (Figura 3.19). O algoritmo de separação de escoamentos baseia-se no uso da equação da continuidade em combinação com a equação de Horton, e uma função empírica para a percolação desenvolvida por Berthelot em 1970 (Tucci, 2005).

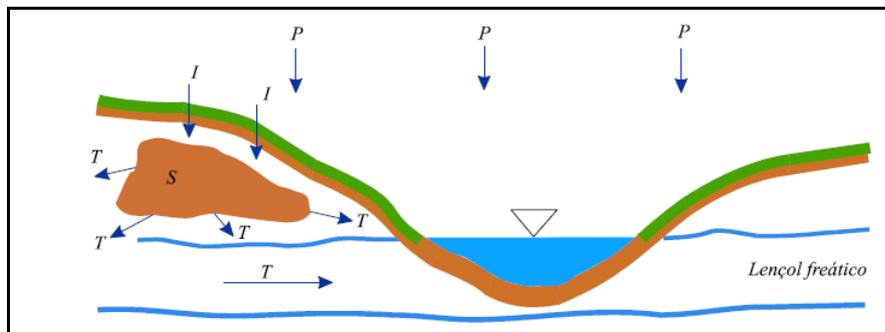


Figura 3. 19 Continuação na camada superior do solo (Mine, 1998).

A equação da continuidade é aplicada para descrever o processo que ocorre na camada superficial do solo, conforme figura 3.19 e a equação 3.11, sendo adaptadas as equações 3.12 e 3.13.

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (3.11)$$

A infiltração é dada pela equação de Horton para determinar a capacidade de infiltração do solo, e é descrita pela equação 3.12.

$$I = I_b + (I_o - I_b)h^t \quad (3.12)$$

Onde I é a capacidade de infiltração no tempo t , I_b é a capacidade de infiltração mínima, I_o é a capacidade de infiltração para $t=0$, h é igual a e^{-k} , k é o parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo, e e é a base dos logaritmos neperianos.

A percolação da camada superior do solo é definida pela equação 3.13.

$$T = I_b(1 - h^t) \quad (3.13)$$

Substituindo as equações 3.12 e 3.13 na equação 3.11 e integrando, resulta na equação 3.14.

$$S = S_o + \frac{I_o}{\ln h}(h^t - 1) \quad (3.14)$$

Onde S_o é o estado de umidade do solo quando inicia a percolação, I_o é a capacidade de infiltração correspondente.

O termo h^t é isolado nas equações 3.12 e 3.13 e é substituída na equação 3.14, resultando nas seguintes equações:

$$S = a_t + b_t I \quad (3.15)$$

$$S = a_t + b_t T \quad (3.16)$$

Onde T é a percolação.

$$a_t = \frac{-I_o^2}{\ln h(I_o - I_b)} \quad (3.17)$$

$$b_t = \frac{-I_o}{\ln h(I_o - I_b)} \quad (3.18)$$

No caso de $a_t = 0$; a equação 3.18 é modificada resultando na equação 3.19:

$$b_t = \frac{-I_o}{\ln h(I_b)} \quad (3.19)$$

As equações 3.15 e 3.16 associam o estado de úmida do solo com a infiltração e a percolação.

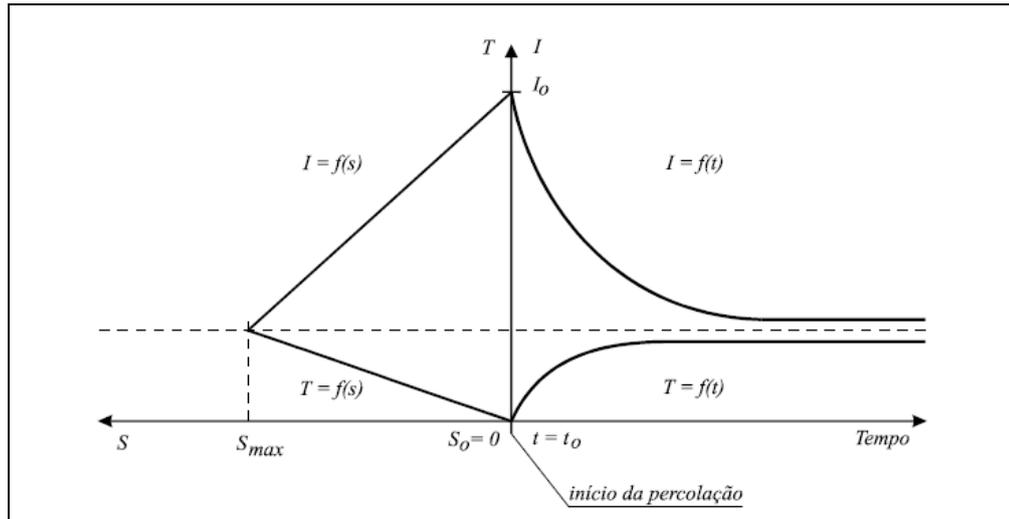


Figura 3. 20 Representação das funções do algoritmo de infiltração (Mine, 1998).

Podem ocorrer duas situações no cálculo dos volumes superficial e percolado, sendo que uma delas compreende duas alternativas. A precipitação utilizada em todos os cálculos é a que resulta da aplicação do algoritmo de perdas.

Caso I - Se $P_t > I_t$, a precipitação é maior do que a capacidade de infiltração no intervalo de tempo igual a t, como mostra a figura 3.21 (a), O volume infiltrado é dado pela integral, no intervalo de tempo $[0, \Delta t]$ da equação de Horton, conforme apresentado na equação 3.20.

$$V_i = I_b \Delta t - \frac{(I_t - I_b)}{\ln h} (h^{\Delta t} - 1) \quad (3.20)$$

O volume de escoamento superficial é

$$V_e = P \Delta t - V_i \quad (3.21)$$

O volume percolado é obtido por ,

$$V_p = S_t - S_{t+1} + V_i \quad (3.22)$$

No intervalo seguinte, os valores de I_{t+1} , S_{t+1} e T_{t+1} são calculados pelas equações 3.12, 3.13 e 3.14, respectivamente.

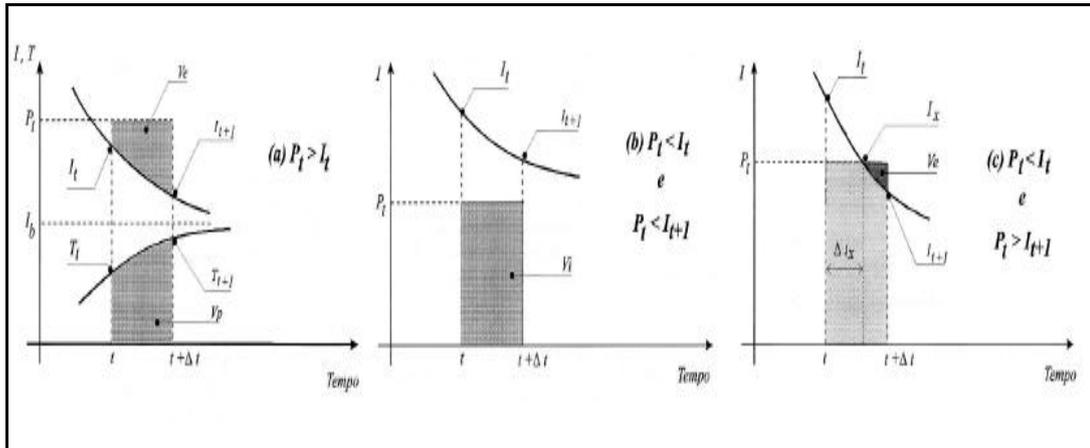


Figura 3. 21 Situações encontradas no algoritmo de infiltração (Tucci, 1998).

Caso II – Se a precipitação P_t é menor do que a capacidade de infiltração I_t e a P_{t+1} menor que I_{t+1} (Figura 3.21, (b)). Neste caso, considera-se que todo o volume infiltra. Substituindo a equação 3.16, T em função de S , na equação de continuidade, e resolvendo a equação diferencial da continuidade para o intervalo de tempo t , $t+1$, resulta na equação 3.23.

$$S_{t+1} = S_t e^{\frac{-\Delta t}{bt}} + P_t b t \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{bt}} \right) \quad (3.23)$$

Utilizando a equação 15 é possível determinar I_{t+1} através de S_{t+1} e verificar se a premissa acima é verdadeira ($I_{t+1} > P_{t+1}$). Sendo verdadeira não haverá escoamento superficial e $V_e = 0$, e o valor do volume percolado V_p pode ser determinado pela equação 3.22.

Utilizando o modelo para simulação da série contínua de eventos, neste caso resulta uma modificação ao método original. Assim, como as variáveis do modelo utilizam valores médios para a capacidade de infiltração, durante períodos de pequena precipitação ($P < I$) pode existir escoamento superficial em alguns setores da bacia devido a variabilidade de I . Para considerar este fator foi inserido o seguinte:

$$Cr_t = \frac{\left(\frac{P_t}{I_t}\right)^2}{\left(\frac{P_t}{I_t} + \text{alfa}\right)} \quad (3.24)$$

Onde Cr é um coeficiente que representa a percentagem de precipitação que esco superficialmente e alfa é um parâmetro do modelo.

O volume de escoamento superficial é dado por:

$$V_e = P_t \cdot Cr_t \quad (3.25)$$

Caso III – Se a precipitação P_t é menor do que a capacidade de infiltração I_t e a P_{t+1} é maior que I_{t+1} , como mostra a figura 3.21, (c). Após o cálculo da capacidade de infiltração verifica-se que, dentro do intervalo, a curva de infiltração cruza a da precipitação, criando duas situações distintas. Para encontrar o ponto x da figura 3.21 (c), divide-se o intervalo em duas partes. Na primeira, a equação de continuidade tem como entrada toda a precipitação (parcela do volume que chega neste ponto) como na equação 3.23. Nesta equação o intervalo de tempo é Δt_x . No ponto x , S_x é determinado considerando $I = P$, através da equação 3.15. O intervalo de tempo Δt é obtido da equação 3.23, resultando na equação 3.26:

$$\Delta t_x = \frac{2bt(S_x - S_t)}{2b_tP - S_x - S_t} \quad (3.26)$$

Sendo conhecidos os intervalos $[0, \Delta t_x]$ e $[\Delta t_x, \Delta t]$, o primeiro é tratado como o caso II e o segundo como o caso I.

O valor de S_{\max} é obtido pelo uso da equação 3.15 para $I = I_b$, ou seja, quando o solo atinge o grau de saturação, resultando:

$$S_{\max} = -\frac{I_o}{\ln h} \quad (3.27)$$

3.5.4 Propagação Superficial e Subterrânea

O escoamento superficial é calculado com base no método de Clark. Este método utiliza o histograma tempo-área (HTA) para representar o efeito de translação e o reservatório linear simples para o amortecimento (Figura 3.22).

$$P_t = \sum_{i=1}^t V_{e_{t-i+1}} f_i \quad (3.28)$$

Onde P_t é a precipitação efetiva, $V_{e_{t-i+1}}$ é o volume escoado superficialmente, e f_i é a ordenada i do histograma tempo-área.

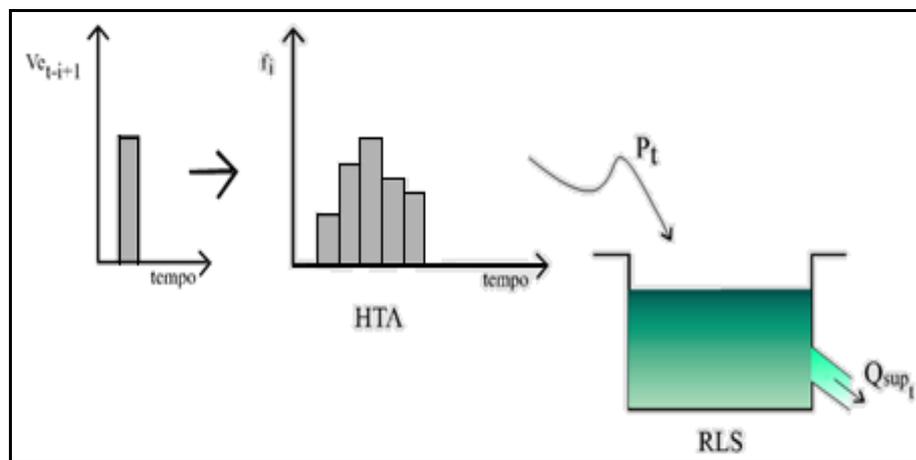


Figura 3. 22 Método de Clark (Mine, 1998).

O histograma tempo-área pode ser determinado através do conhecimento detalhado da bacia hidrográfica. Quando não existem informações suficientes para tanto, pode-se utilizar o histograma tempo-área sintética, que é obtido admitindo-se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto em estudo à seção principal. Considera-se a área de contribuição relacionada ao tempo de percurso pelas seguintes equações:

$$A_c = aT'^n, \quad 0 < T' < \frac{1}{2}; \quad (3.29)$$

$$A_c = 1 - a(1 - T')^n, \quad \frac{1}{2} < T' < 1 \quad (3.30)$$

Onde A_c é a área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total, T' é o tempo em unidades do tempo de concentração t_c , n é o coeficiente que varia com a forma da bacia;

$$a = 0,5^{1-n}. \quad (3.31)$$

O histograma tempo-área é dividido em K intervalos onde as ordenadas são:

$$f_i = (A_{c_i} - A_{c_{i-1}}), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (3.32)$$

Para levar em conta o efeito do armazenamento, o hidrograma resultante do uso do histograma tempo-área é simulado através de um reservatório linear simples que considera

$$S = K'Q \quad (3.33)$$

Onde S é o armazenamento de um reservatório fictício, K' é o parâmetro do reservatório, Q é a vazão de saída do reservatório fictício.

Substituindo a equação 3.33 na equação da continuidade, representada pela equação 3.34, resulta na equação 3.35.

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (3.34)$$

Onde I é a vazão de entrada no reservatório fictício.

$$K' \frac{dQ}{dt} + Q = I \quad (3.35)$$

A solução da equação 3.35 para um impulso unitário instantâneo:

$$q(t) = \frac{1}{K'} e^{-\frac{t}{K'}} \quad (3.36)$$

Onde $q(t)$ é a ordenada do hidrograma unitário instantâneo.

Na propagação do escoamento superficial, utiliza-se a equação de convolução, na qual o hidrograma unitário instantâneo é dado pela equação 3.36 e as entradas são precipitações em intervalos discretos Δt , resultando para a vazão superficial dada pela equação 3.37.

$$Q_{\text{sup}} = Q_{\text{sup},i-1} e^{-\frac{-\Delta t}{K_{\text{sup}}}} + P_i \left(1 - e^{-\frac{-\Delta t}{K_{\text{sup}}}} \right) \quad (3.37)$$

Onde Q_{sup_t} é a vazão de escoamento superficial no tempo t , K_{sup} é a constante de recessão do escoamento superficial, P_t é a precipitação efetiva no tempo t obtido a partir da equação 3.28.

A propagação do escoamento subterrâneo é calculada pela equação 3.37 com substituição do parâmetro K_{sup} por K_{sub} (coeficiente de recessão), e a variável P_t substituída por V_p , pois o volume percolado é a entrada para o aquífero.

Nos casos onde o valor de V_p é muito pequeno, o escoamento subterrâneo é calculado pela equação 3.38 com parâmetros e variáveis apropriadas converge para a equação de depleção do escoamento no subsolo.

$$Q_{sup} = Q_{sup_{-1}} e^{\frac{-\Delta t}{K_{sup}}} \quad (3.38)$$

O fluxograma do modelo é apresentado na figura 3.17 e representa o processo de cálculo em um intervalo de tempo.

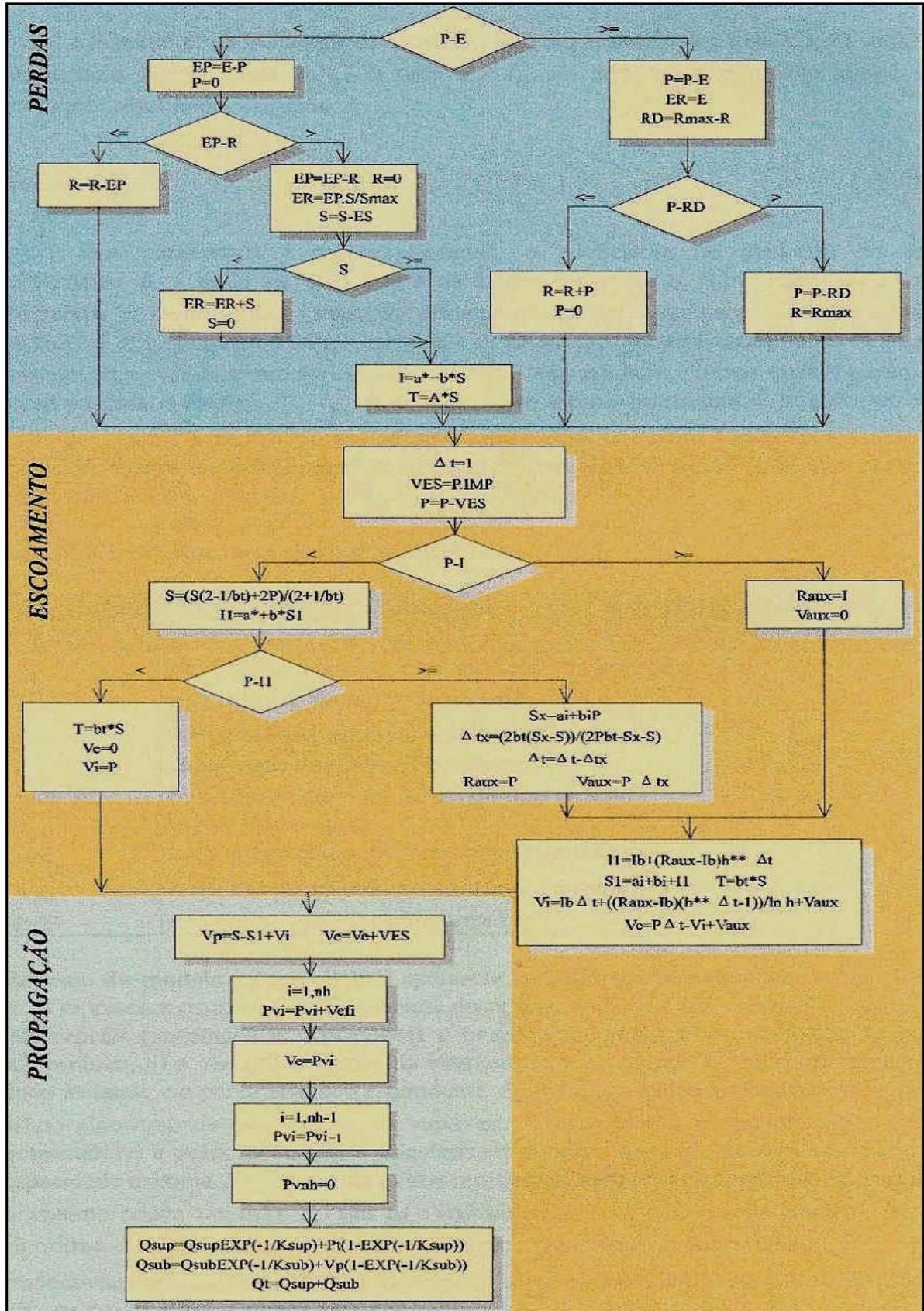


Figura 3. 23 Fluxograma de cálculo do modelo IPH II (Mine, 1998).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Bacia e Dados

4.1.1 Escolha da Bacia de Estudo

Para este estudo foi escolhida a bacia do rio Ijuí, com uma área de abrangência de 10.000 Km², que tem as sub-bacias com exutórios denominados de Ponte Mística (9426 Km²), Santo Angelo (5.414 Km²), Potiribu (629 Km²), Taboão (80 Km²), Turcato (19,4 Km²), todas embutidas (Figura 4.1).

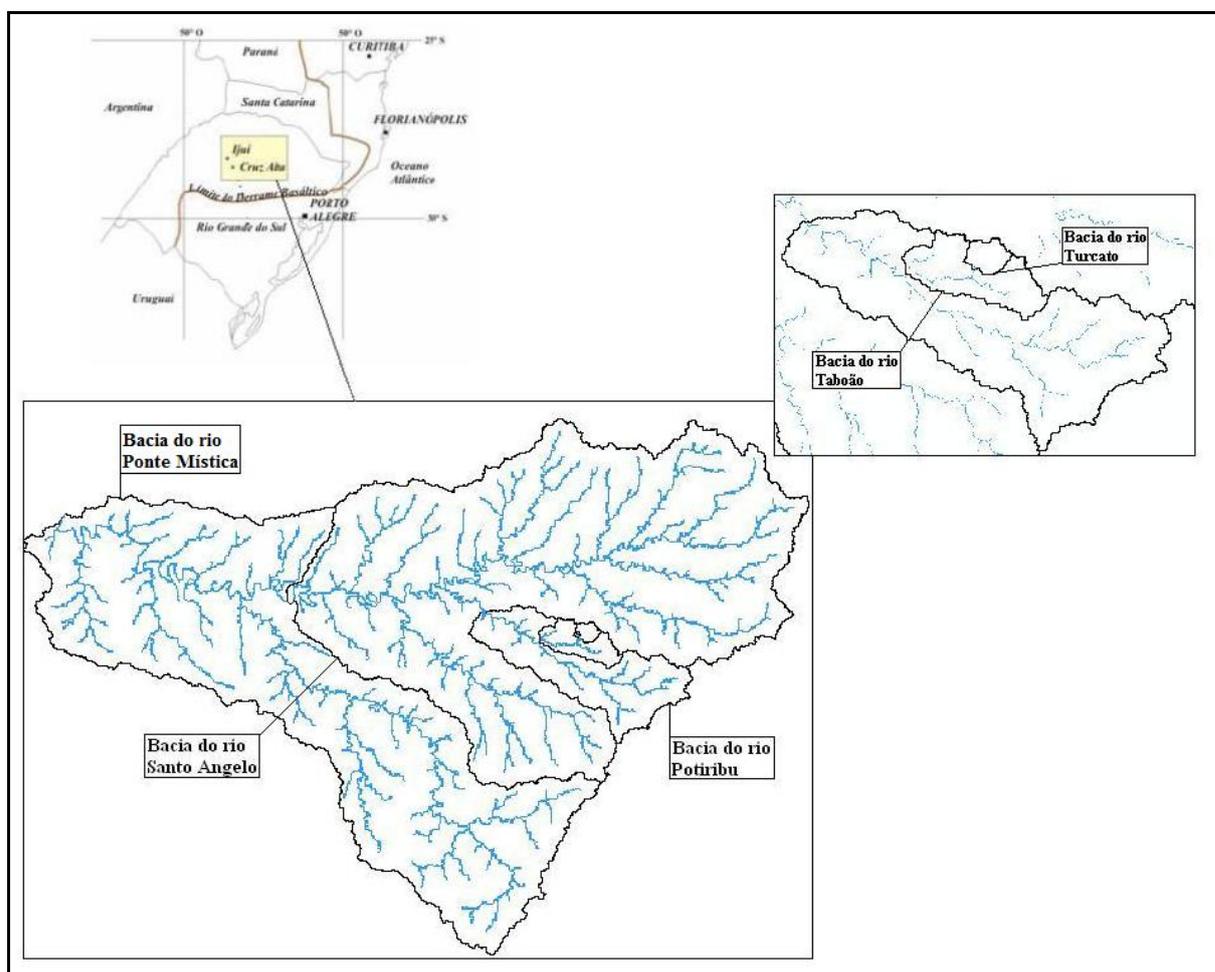


Figura 4. 1 Região de estudo: Bacia do rio Ijuí, nos postos fluviométricos da Ponte Mística, Santo Ângelo, Potiribu Taboão e do Turcato.

Esta bacia foi escolhida, pois vem sendo monitorada pelo IPH desde 1989, e dispõe de um banco de dados hidrológicos de mais de 20 anos, o que é raro para pequenas bacias no Brasil (Castro et al., 2010). As informações utilizadas deste banco de dados foram as séries de

medição de precipitação obtidas através dos pluviômetros e pluviógrafos distribuídos no interior da bacia do Taboão e da sua sub-bacia do Turcato, assim como as séries de vazões no exutório destas duas bacias.

A bacia do rio Potiribu, que é uma sub-bacia do rio Ijuí, foi escolhida como representativa de uma área do planalto basáltico sul americano que abrange 1 milhão de Km², em termos de relevo, tipo de solo, regime de precipitação, e uso do solo essencialmente agrícola (Borges e Bordas, 1990). Atualmente, esta bacia é uma das monitoradas pelo projeto em rede CLIMASUL, juntamente com outras 4 bacias na Região Sul do Brasil.

A bacia do rio Ijuí encontra-se sobre o planalto médio gaúcho com altitudes entre 420 e 700 m. O relevo é composto por coxilhas com declividades suaves entre 3 e 15%. Esse planalto é situado sobre rochas basálticas, formadas por sucessivas camadas, alternadas com camadas de arenito Botucatu, que variam de alguns metros de profundidade até uma centena de metros, onde a água pode se acumular e escoar horizontalmente.

Sobre este planalto, os solos são bastante úmidos graças ao regime abundante de precipitações e constitui solos bem desenvolvidos e profundos, podendo atingir até mais de 15m. A maioria do solo da região é classificada como latossolos roxos, latossolos vermelho-escuros e terras roxas estruturadas. Apesar de ser um solo argiloso (mais de 60% argila), ele apresenta uma forte drenagem devido aos microagregados formados em todo o perfil resultando em maior macro-porosidade (Castro, 1996).

O clima da região da bacia, segundo Beltrame (2000), está dentro da classificação mesotérmica branda superúmido, sem seca (Cfa), assim descrita por Koppen: Cfa – temperatura média das máximas superior a 22 °C e a média das mínimas entre – 3 e 18 °C, sendo julho o mês mais frio (13 – 14 °C) e janeiro o mês mais quente (24°C). A média das máximas é de 32 °C e a média das mínimas fica em torno de 8 °C.

A floresta primitiva é a Mata Atlântica e a Mata Araucária. Esta região é caracterizada por uma agricultura com dois ciclos de cultura por ano: Soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno.

O uso do solo nas bacias foi marcante no período de monitoramento da bacia. Entre 1989 e 1994 a área das bacias estudadas tinha como prática o plantio convencional com

terraço e plantio em curvas de níveis. Desde o final da década de 80, a região começava a adotar o plantio direto, mas foi no período de plantio de 1994 que houve uma completa alteração para o plantio direto, que ocorre até hoje (Castro et al., 2000).

As práticas agrícolas usualmente utilizadas na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul são:

- Conservacionista ou Convencional – utiliza o terraceamento e o plantio seguindo as curvas de nível, para direcionar o escoamento e evitar a erosão e o dano às culturas a camada superficial do solo é revolvida com arado. Esse tipo de plantio tende a criar melhores condições para a infiltração, nas chuvas de baixa ou média intensidade, mas quando ocorre o rompimento do terraço nas cheias maiores a água pode provocar ravinas na direção da maior declividade do escoamento.
- Plantio direto – esse tipo de plantio não revolve a terra, é realizado diretamente sobre a superfície do solo acima dos resíduos do plantio anterior. Antes do plantio, os resíduos da colheita anterior são picados e colocados na superfície do solo, onde são secos com a ajuda de produtos químicos. No momento do plantio, são abertos sulcos no solo onde os grãos são colocados. Nessa forma de plantio, a tendência é que praticamente toda a água se infiltre, e o escoamento ocorra predominantemente na camada sub-superficial. Esse tipo de plantio pode gerar problemas em áreas com grande declividade ($> 15\%$), pois o escoamento sub-superficial, ao brotar na superfície pode gerar erosão regressiva como voçoroca. Em declividades mais suaves ($< 5\%$) a erosão é reduzida já que o escoamento superficial é mínimo (Goldenfum et al., 2008).

A bacia do rio Ijuí situa-se a norte-noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas $27^{\circ}45'$ e $26^{\circ}15'$ de latitude Sul e $53^{\circ}15'$ e $56^{\circ}45'$ de longitude Oeste, abrangendo 20 municípios, com uma área de drenagem de 10.649,13 Km² e com 337.249 habitantes (www.unijui.tche.br). Seus principais formadores são os rios: Ijuizinho, Conceição, Potiribu, Caxambu, Faxinal, Fiúza e Palmeira. As atividades econômicas desta bacia, de maneira geral, estão ligadas ao setor primário, predominando as lavouras de soja. Alguns municípios desta bacia apresentam também os setores secundários e/ ou terciários mais desenvolvidos. Destacam-se neste setor os municípios de Ijuí, Santo Ângelo e Cruz Alta este último divisor de águas entre as bacias do Ijuí e do Jacuí. Esta bacia apresenta também potencialidade de

geração de energia hidrelétrica, inventariada no "Inventário Hidrelétrico da Sub-bacia 75" - Convênio SOPSH/ DRH/ CRH-RS-SEMC/ CEEE - Outubro de 2000. O comitê de gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí foi criado pelo Decreto Estadual nº 40.916, de 30/07/2001.

A bacia do Taboão possui uma área de 80 Km² nela engloba a bacia do rio Turcato, que tem uma área de 19,4 Km². É uma bacia predominantemente agrícola, com um pouco de criação de gado e a cidade de Pejuçara, ocupa uma área de aproximadamente 10% desta bacia. Apresenta declividade média de 2,2 %. Na bacia, existe pouca vegetação, alguns bosques e mata galeria.

4.1.2 Medidas Pluviométricas

Os postos pluviométricos com dados disponíveis identificados na bacia do rio Ijuí são apresentados na Tabela 4.1 e representados na Figura 4.2. Esses postos foram extraídos das séries históricas encontradas disponíveis no site da Hidroweb da ANA (Agencia Nacional de Águas) e foram considerados consistidos para uso nesta pesquisa.

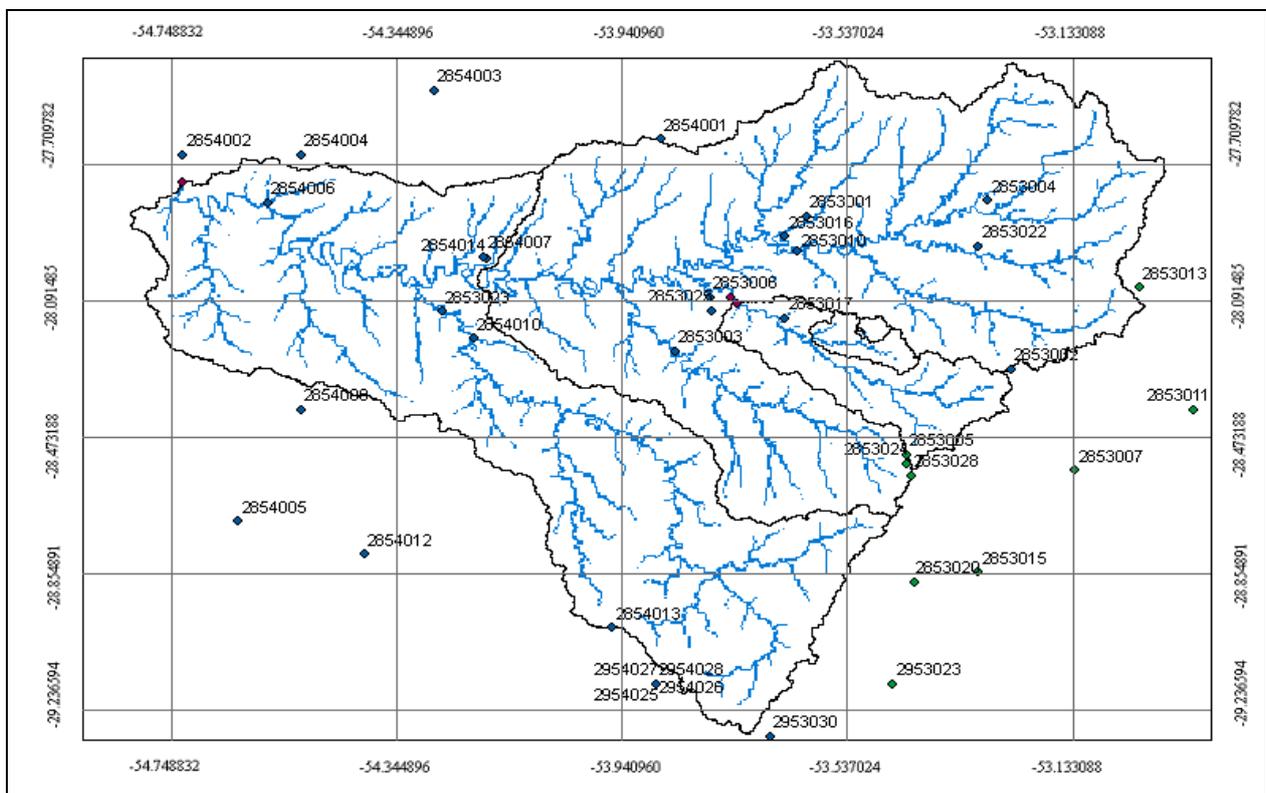


Figura 4. 2 Visualização dos postos pluviométricos disponíveis na Hidroweb.

Tabela 4. 1 Descrição dos Postos Pluviométricos da bacia do rio Ijuí e proximidade.

Código	Nome	Long (s)	Lat (O)
02753005	Palmeira as Missões 83880	-53°26'00''	-27°53'00''
02754010	Esquina Araújo	-54°06'59''	-27°58'05''
02853002	Belisário	-53°27'00''	-28°29'00''
02853003	Conceição	-53°58'15''	-28°27'18''
02853005	Cruz Alta 83912	-53°36'42''	-28°37'28''
02755001	Porto Lucena	-55°01'21''	-27°51'16''
02853006	Ijuí	-53°55'00''	-28°22'00''
02853010	Passo Faxinal	-53°46'48''	-28°17'21''
02853011	Ponte Santo Antônio	-53°10'00''	-28°33'00''
02853012	Saldanha Marinho	-53°05'00''	-28°23'00''
02853013	Santa Barbara do Sul	-53°15'00''	-28°21'00''
02853015	Três Capões	-53°30'00''	-28°49'00''
02853022	Pananbi Pindorama 83910	-53°30'00''	-28°17'00''
02853023	Condor	-54°19'55''	-28°23'21''
02853026	Chapada	-53°03'58''	-28°03'31''
02853027	Ibiruba 83932	-53°07'00''	-28°37'00''
02853028	Anderson Clayton	-53°36'17''	-28°39'31''
02854001	Boa Vista	-53°59'33''	-28°06'25''
02854002	Cerro Largo	-54°44'00''	-28°08'00''
02854003	Girua	-54°20'37''	-28°01'35''
02854005	Passo Major Zeferino	-54°38'52''	-28°44'01''
02854006	Passo Viola	-54°36'08''	-28°12'38''
02854007	Santa Angelo 83909	-54°16'00''	-28°18'00''
02854011	São Luiz Gonzaga 83907	-54°58'00''	-28°24'00''
02854012	Coimbra	-54°27'07''	-28°47'16''
02854013	São Bernardo	-54°04'04''	-28°54'30''
02854014	Santo Angelo-Ipagro	-54°15'45''	-28°18'13''
02855002	Passo do Sarmiento	-55°19'11''	-28°12'43''
02855001	Garruchos	-55°38'13''	-28°11'16''
02855005	Faz. Santa Cecília do Butuí	-55°40'27''	-28°59'23''
02855007	Santo Antônio das Missões	-55°13'51''	-28°29'33''
02953017	Santa Maria	-53°43'12''	-29°43'27''
02953030	Tupancireta	-53°49'9''	-29°5'8''
02954004	Ernesto Alves	-54°44'8''	-29°21'58''
02954005	Furnas do Segredo	-54°30'7''	-29°21'32''
02954007	Jaguari	-54°41'20''	-29°29'25''
02954019	Quevedos	-54°41'	-29°21'5''
02954020	Santiago	-54°51'21''	-29°11'12''
02954030	Florida	-54°35'54''	-29°15'6''
02954031	Esquina Lima (S. Barbara)	-54°30'34''	-29°44'0''
02955002	Cachoeira Santa Cecília	-55°28'31''	-29°11'46''
02955006	Ponte do Miracatu	-55°17'28''	-29°27'33''
02955007	Unistalda	-55°9'4''	-29°25'1''
02955008	Manoel Viana	-55°29'9''	-29°35'38''

As séries históricas de precipitação dos postos pluviométricos da ANA apresentam início de medição desde o ano de 1963. Nesta pesquisa, o período de interesse é a partir do ano de 1989 e os períodos com dados dos postos apresentados na tabela 4.1 são de 22/08/1989 a 31/08/2007 e de 01/12/2007 a 31/12/2010. Nas séries históricas dos pluviômetros da tabela 4.1, os períodos com falhas ocorrem entre 01/09/2007 e 30/11/2007.

Na bacia do Taboão (80 Km²), os pluviômetros e pluviógrafos foram instalados em novembro de 1989, de maneira a cobrir esta bacia, na qual a bacia do Turcato é embutida (Castro et al 2000), como mostra a figura 4.3. A tabela 4.3 apresenta a relação dos postos pluviométricos, já consistidos, com suas coordenadas e períodos de funcionamento. Eles podem ser localizados na figura 4.3.

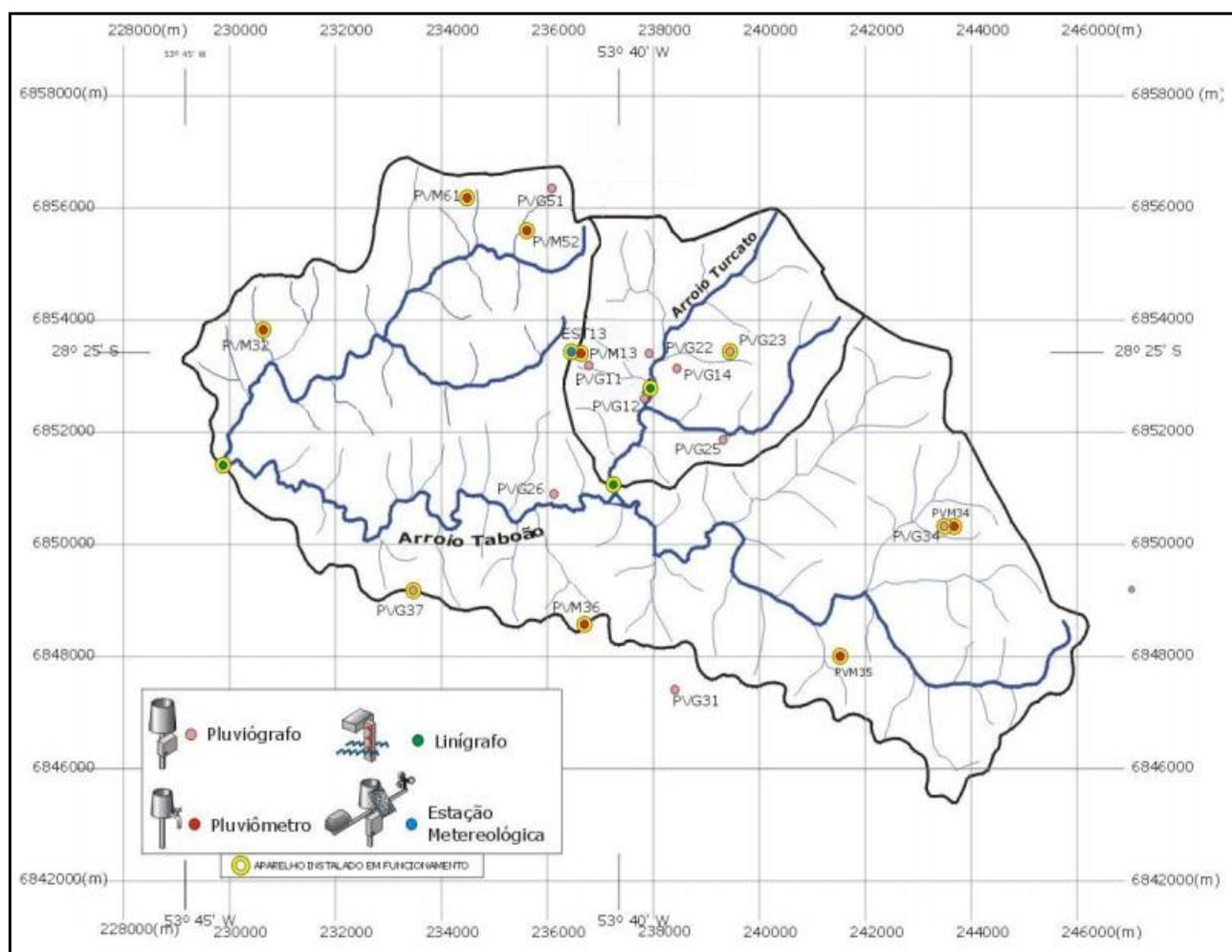


Figura 4. 3 Visualização da posição dos pluviômetros e pluviógrafos na bacia do rio Taboão e das suas sub-bacias Turcato e Donato (Goldenfun, 2005).

Tabela 4. 2 Descrição dos pluviômetros (PM) e pluviógrafos (PG) na sub-bacia do rio Taboão e na sua sub-bacia do Turcato do projeto Potiribu.

Código	Nome	Long. (O)	Lat. (S)	Período com dados	
				Início	Fim
PM 13	Alto Donato	53°41'14''	28°25'06''	29/06/1990	28/05/2004
PM 21	Pejuçara Norte	53°38'57''	28°24'11''	02/01/1990	01/05/1996
PM 24	Turcato Central	53°40'17''	28°24'55''	08/11/1989	
PM 32	Tincão do Jesus	53°44'34''	28°24'52''	12/12/1990 31/07/2007	29/01/2005
PM 34	Alto Taboão	53°36'12''	28°27'21''	17/12/1990	15/04/1997
		53°27'10''	28°26'53''	21/05/1999 14/03/2008	29/09/2005
PM 35	Velha Estrada Cruz Alta	53°38'19''	28°27'46''	17/12/1990 05/03/1995 01/08/2007	30/08/1994 26/05/2004 29/11/2009
PM 36	Granja das Castanheiras	53°38'19''	28°27'49''	01/01/1991 29/06/2008	26/05/2004
PM 52	Baixa Divisa	53°41'55''	28°24'08''	02/11/1989 10/08/2007	27/06/2004
PM 61	Santa Lúcia	53°42'35''	28°23'39''	11/11/1989	01/12/1990
		53°37'13''	28°26'55''	02/01/1990	26/05/2004
PM 62	Granja Santa Catarina	53°43'37''	28°25'04''	23/12/1990	08/06/1992
PVG 11	Donato Cental	53°41'13''	28°25'15''	27/06/1990	25/04/1991
				25/04/1991	17/01/1996
PVG 12	Baixo Donato	53°40'35''	28°25'35''	07/11/1989	14/12/1990
PVG 14	Baixo Donato	53°40'12''	28°25'18''	14/12/1990	03/08/1993
		53°40'31''	28°25'09''	18/04/1994	30/06/1999
PVG 22	Alto Turcato	53°39'53''	28°24'02''	10/11/1989	30/09/1995
PVG 23	Pejuçara Cidade	53°39'14''	28°25'05''	21/08/1989	04/12/1992
				14/01/1993	15/11/1993
				17/12/1994	18/07/1997
				22/10/1998	08/05/2006
PVG 25	Pejuçara Leste	53°39'41''	28°26'00''	22/05/1990	05/11/1992
				05/11/1992	10/02/1996
PVG 26	Baixo Turcato	53°41'39''	28°26'00''	08/11/1989	21/12/1995
EST 12	Estação Meteorológica	53°41'10''	28°24'50''	21/05/1999	17/04/2004
PVG 51	Euzébio	53°42'55''	28°26'54''	12/09/1989	01/02/1998
PVG 37	Foz Taboão Castanheira	53°39'19''	28°26'40''	10/01/1991	09/04/1994
				14/01/2000	11/09/2005
PVG 31	Fazenda três irmãos	53°41'39''	28°26'29''	28/05/1989	12/05/1994

Os pluviômetros inicialmente instalados eram todos da marca japonesa Tamaya, com anel de 20 cm de diâmetro ($\pi \cdot 100 \text{ cm}^2$ de área de interceptação), colocados a uma altura de 1,50 m do solo. Os observadores, todos voluntários, fazem a leitura de volume de água acumulada do aparelho diariamente, em princípio às 8h da manhã. Conforme normas internacionais, este valor é sempre atribuído ao dia anterior. Os pluviógrafos são de vários tipos e marcas. Inicialmente todos eram mecânicos, com funcionamento através de tambores com sistema de sifão e relógio, onde eram colocados rolos de papéis no tambor, 1 vez por dia, 1 vez por semana ou 1 vez por mês, conforme a escala temporal do aparelho. Os gráficos eram recolhidos e trazidos para o IPH onde eram digitalizados e processados.

Os aparelhos mecânicos já estavam antigos e sua vida útil já estava ultrapassada, e frequentemente apresentavam problemas, como atraso no relógio, papel enrolado, etc. (Medeiros et al, 2003). Em maio de 1999, com recursos de um financiamento do FINEP, para o projeto RECOPE-REHIDRO os aparelhos mecânicos foram substituídos por eletrônicos com registros em “data loggers” em intervalos de tempo programados para 10 minutos.

Os aparelhos atualmente em operação na bacia são de dois tipos:

- pluviômetros do tipo Ville de Paris com anel de 20 cm de diâmetro, colocado a uma altura de 1,50 m. Estes equipamentos são operados por observadores locais, voluntários. A leitura é realizada às 8 horas da manhã, sendo o valor lido datado como do dia anterior.
- pluviógrafos digitais com data logger e sensor tipo caçamba com precisão de 0,2 mm. A precipitação é armazenada em intervalos de 10 minutos, no período do evento. Nos dias sem chuvas o datalogger registra apenas a data e o valor zero economizando memória. Desta forma, a capacidade de armazenamento do pluviógrafo passa a ser de vários meses. Estes equipamentos são operados por técnicos do IPH/UFRGS que transferem mensalmente os dados do datalogger utilizando um microcomputador portátil. Atualmente existem várias marcas de pluviógrafos e loggers na bacia, como Novus, HOBO, IPH.

A Tabela 4.3 mostra um estudo feito por Medeiros (2003) para analisar os dados disponíveis para cada um dos postos pluviométricos e pluviográficos da bacia do rio Taboão e

da sub-bacia do rio Turcato. (Ver a localização dos postos na figura 4.3). Os quadrinhos da tabela com coloração cinza indicam um ano inteiro sem dados, enquanto que os quadrinhos com valores indicam o número de uns meses com dados. Observa-se que grande parte das estações apresenta mais de 20% de falhas no período de funcionamento, sendo que 04 postos (11, 22, 25 e 37) têm mais de 50% de falhas. Deve-se salientar, no entanto, que os postos que apresentam maior percentagem de falhas são exatamente os que funcionaram por um curto período de tempo. Os postos com série histórica superior a 10 anos, mais importantes do ponto de vista de caracterização hidrológica, apresentam percentual de falhas entre 11% (posto 52) e 28% (posto 35).

Tabela 4. 3 Inventário mensal dos dados de pluviometria disponíveis do projeto Potiribu, adaptado de (Medeiros 2003):

ano	Postos																				
	11	12	13	14	21	22	23	25	26	31	32	33	34	35	36	37	51	52	61	62	63
1990	10	2			1	9	1		1	3							1	3	2		
1991	3		2	4	2	6	1		0	4	3	5	2	4	7	5	0	1	1	3	4
1992	3		1	8	3	7	2		5	1	1		5	5	2	10	2	1	0		10
1993	3		0	8	3	11	4	8	3	2	0		0	1	0	8	3	0	0		5
1994	8		0	7	1	9	5	9	10		3		1	6	1		2	3	2		2
1995	10		1	1	0		5	11	8		3		2	5	4		0	0	0		
1996			1	2	1		4				2		0	3	0		0	0	2		
1997			2	4			9				0		1	2	1		1	1	2		
1998			0	1			11				3		1	1	3		4	0	3		
1999			3							1			3	2	5		5	0	2		
2000			2								2		9	6	5		6	6	5		
2001			5								2		3	4	3		5	2	4		
2002			1								2		1	1	1		12	0	2		
% falhas	51	17	13	36	13	70	39	78	38	21	15	42	19	28	22	64	26	11	16	25	44

Com relação a períodos contínuos de dados sem falhas, pode-se verificar que praticamente nenhuma estação tem mais de 02 (dois) anos de série contínua. Apenas o posto 52 conta com uma série de 5 anos de dados (de 1995 a 1999) com falha em apenas um mês.

No caso das estações pluviográficas eletrônicas, tem sido registrado mais de 15% de falhas em todos os postos, sendo que a estação meteorológica, por possuir um maior número de sensores e, portanto, ser um equipamento mais complexo, apresenta um percentual de falhas bem elevado (50%).

4.1.3 Medidas Fluviométricas

A série histórica de vazão do posto fluviométrico da bacia do rio Ijuí, no posto fluviométrico Ponte Mística, apresenta o código 75320000, e a posição do seu exutório nas

coordenadas Latitude -28.1814 Oeste e Longitude -54.7383 Sul. A bacia do rio Ijuí, no posto fluviométrico Santo Angelo apresenta o código 75230000, e a posição do seu exutório nas coordenadas Latitude -28.3553 Oeste e Longitude -54.2683 Sul. Enquanto que a série de vazão da sua sub-bacia do rio Potiribu, no posto fluviométrico Ponte Nova do Potiribu, possui o código 75185000 e coordenadas do exutório na posição Latitude -28.3772 Oeste e Longitude -53.8756 Sul (Figura 4.4). Estas séries estão disponíveis no banco de dados na hidroweb. As Figuras 4.5 a 4.7 mostram as séries destas três bacias.

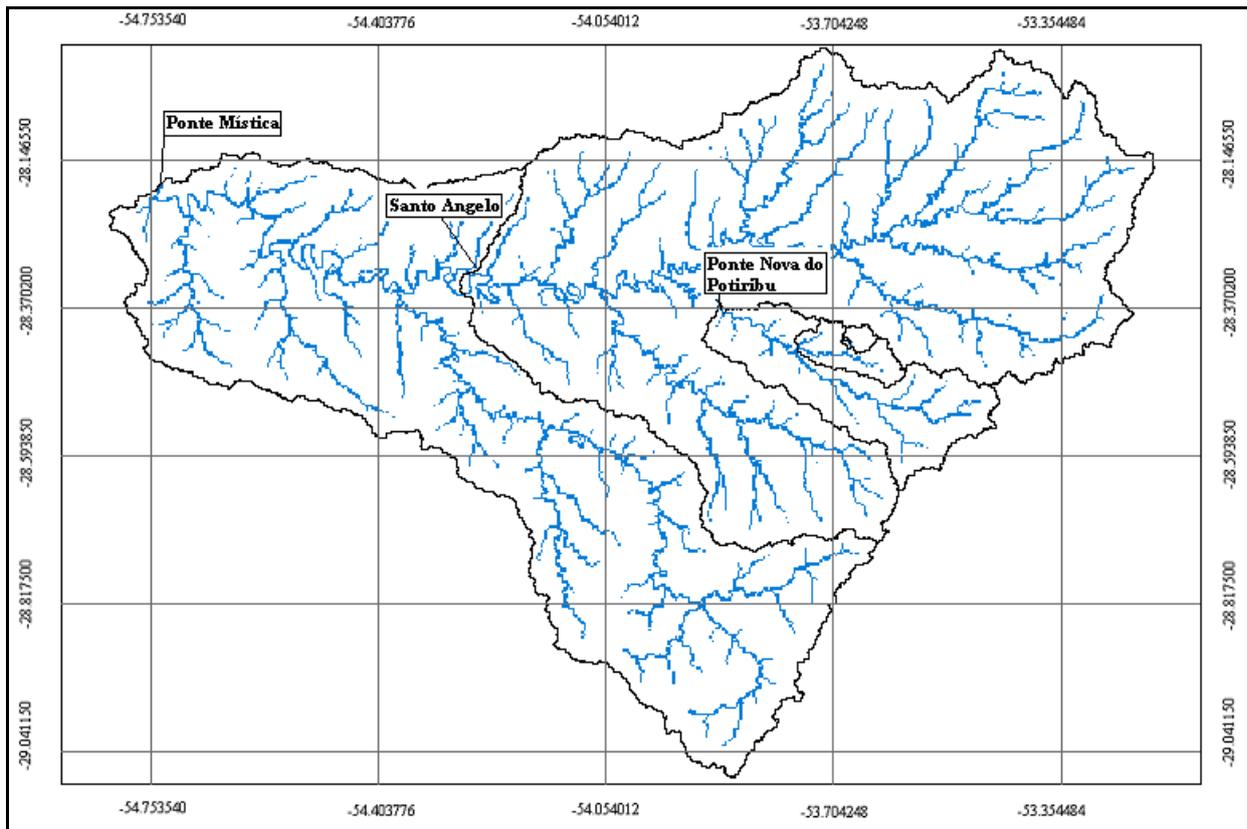


Figura 4. 4 Visualização dos postos fluviométricos das sub-Bacias do rio Ijuí, nos exutórios Ponte Mística, Santo Angelo e Ponte Nova do Potiribu.

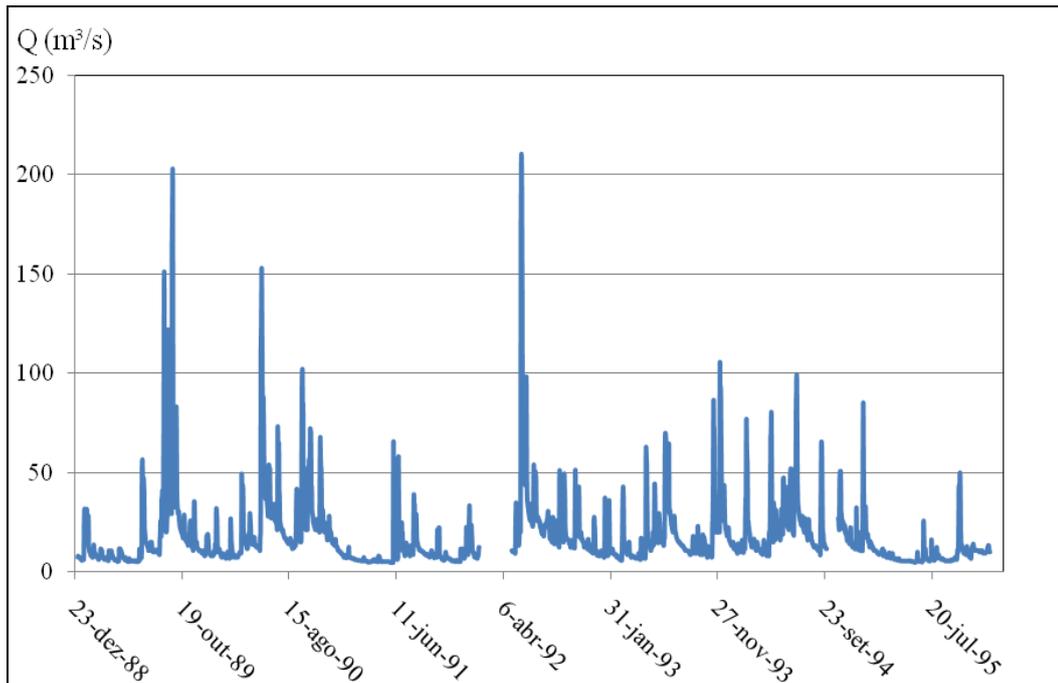


Figura 4. 5 Visualização da série de vazões da bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Potiribu no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.

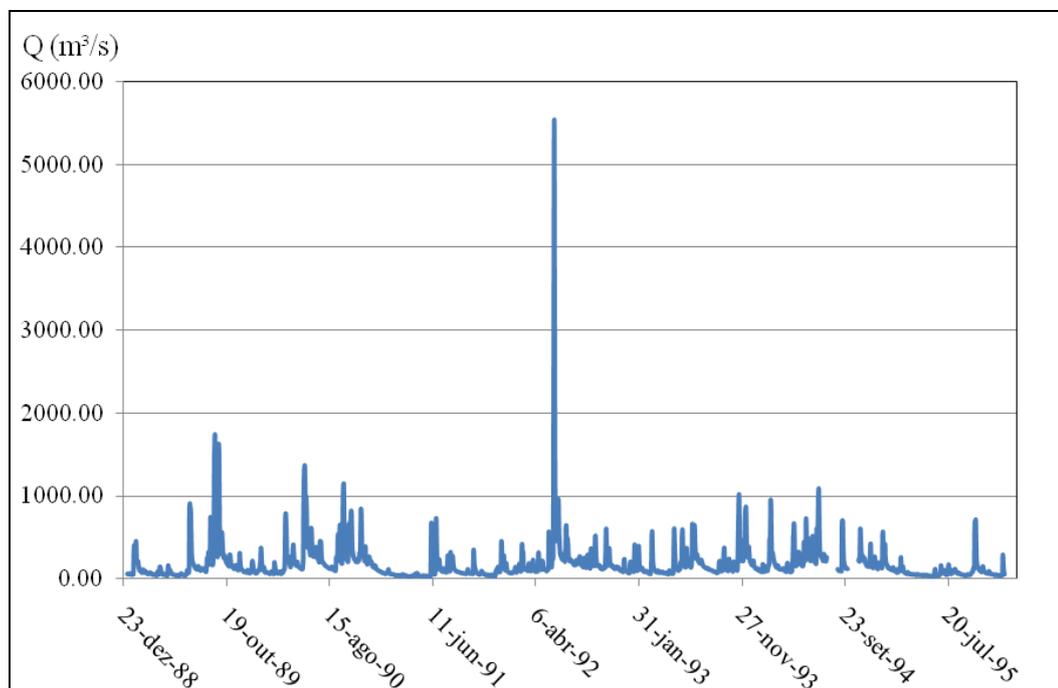


Figura 4. 6 Visualização da série de vazões do rio Ijuí no posto fluviométrico do Santo Angelo no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.

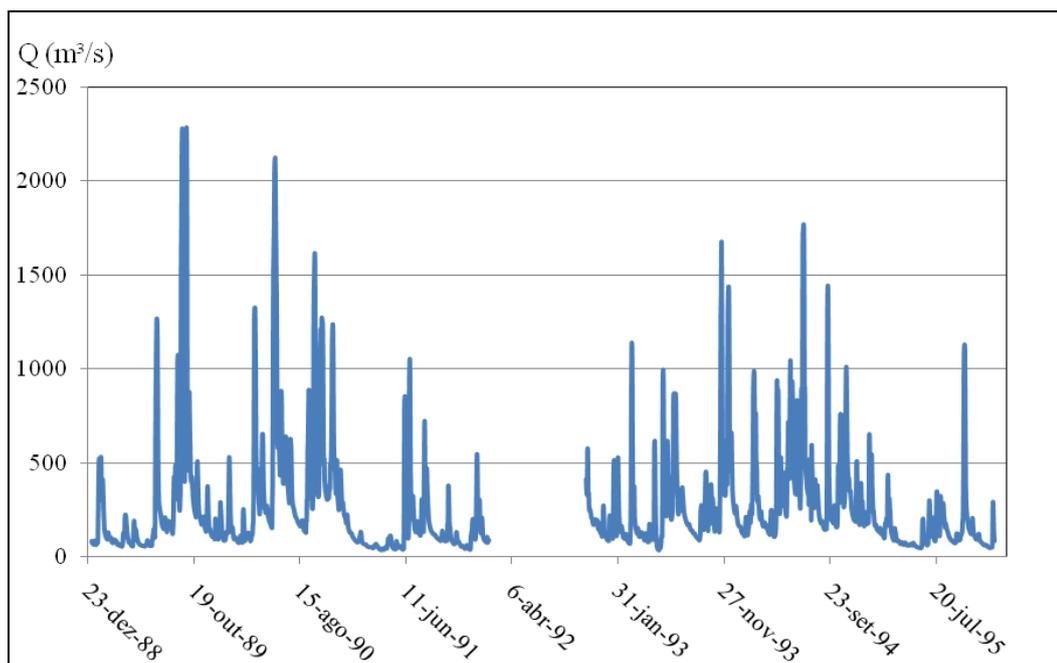


Figura 4. 7 Visualização da série de vazões do rio Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística no período de 02/01/1989 a 31/12/1995.

A tabela 4.4 mostra as características desses 3 postos fluviométricos.

Tabela 4. 4 Descrição dos Postos Fluviométricos da ANA.

Código	Nome	Área (Km ²)	Long. (O)	Lat. (S)	Período com Dados	
					Início	Fim
75320000	Ponte Mística	9426	-54°44'18''	-28°10'53''	15/09/1958	31/01/1992
					01/05/1992	31/07/2009
75230000	Santo Angelo	5414	-54°16'06''	-28°21'19''	15/09/1958	31/01/1992
					01/05/1992	31/07/2009
75185000	Ponte Nova do Potiribu	629	-53°52'32''	-28°22'38''	03/09/1963	31/01/1992
					01/05/1992	31/12/1995

As bacias do Taboão e do Turcato apresentam a localização dos seus exutórios como mostra a tabela 4.5 e a figura 4.3.

Tabela 4. 5 Descrição dos Postos Fluviométricos do Projeto Potiribu.

Nome	Área (Km ²)	Long. (O)	Lat. (S)	Início	Fim
Taboão	80	-53°45'25''	-28°26'11''	22/08/1989	2010
Turcato	19,5	-53°40'51''	-28°25'32''	22/08/1989	2010

4.1.4 Dados de Evaporação

A série de evaporação foi utilizada também como dado de entrada ao modelo hidrológico chuva-vazão. Esta série foi obtida pelos registros diários do Evaporímetro de Piché retirada do banco de dados da estação climatológica INMET, que apresenta a seguinte localização, como mostra a tabela 4.6. Segundo Tucci (2009), os resultados obtidos pelo evaporímetro. Os resultados da série produzida pelo evaporímetro de Piché foram comparados à série obtida com o uso do método de Penman, no qual, observou-se pouca discrepância entre o comparativo dos dois valores (evaporímetro x Penman).

Tabela 4. 6 Localização da Estação Meteorológica.

CODIGO	NOME	LONG. (S)	LAT. (O)	Início	Fim
2853005	Cruz Alta	53° 36' 00''	28° 38' 00''	02/01/1978	22/10/2010

4.2 Métodos

O modelo IPH II é um modelo hidrológico concentrado, o qual não considera a variabilidade espacial das variáveis evaporação e precipitação da bacia hidrográfica. Neste trabalho, o dado pluviométrico fornecido ao modelo foi a chuva média e a mediana na bacia, correspondentes à representação da uniformidade espacial da precipitação por estas duas estatísticas pontuais. A chuva média e a mediana nas bacias analisadas foram determinadas por dois métodos: o primeiro, através da espacialização da precipitação, utilizando uma grade regular com diferentes geometrias para cada bacia analisada, com os valores nodais desta grade estimados pelo método de interpolação selecionado, após a utilização da técnica da validação cruzada (Item 4.2.1). O campo de precipitações resultante foi gerado com base nos valores pontuais medidos através de pluviômetros e pluviógrafos existentes no interior e fora da bacia hidrográfica (Item 4.2.2); e o outro método de determinação da chuva média e da mediana na bacia será com base nos valores diretos dos pluviômetros e/ou pluviógrafos presentes no interior da bacia (Item 4.2.3).

4.2.1 Eleição do Melhor Método de Interpolação (Etapa 1)

O método para avaliar se o interpolador apresentou resultados satisfatórios pode ser mediante o uso da técnica da Validação Cruzada. As séries das precipitações Médias e das

Medianas diárias serão obtidas pelo método de interpolação que melhor aproximou os valores de precipitações estimadas com as observadas nos postos de medição escolhidos para o uso da técnica.

Segundo Davis (1997) e Olea (1999), a validação cruzada surgiu como uma adaptação da técnica estatística não paramétrica de avaliação cruzada de um conjunto de dados. A validação retira um valor do conjunto de dados e estima-o com os parâmetros a serem usados na interpolação dos pontos não amostrados.

Para proceder ao método da validação cruzada de maneira automatizada utilizando as ferramentas do SURFER 8.0, deve-se criar uma sub-rotina no Scriptor. A sub-rotina criada utiliza como dados de entrada o arquivo em txt convertido do arquivo xls (planilha eletrônica do Excel 2007), das séries das precipitações dos pluviógrafos e pluviômetros sem a série do posto a ser analisado, logo após, devem ser informadas na sub-rotina no Scriptor as coordenadas deste posto em UTM. O procedimento realizado pela sub-rotina é a formação de uma grade de quatro pontos distanciados em 0,001 m sobreposto na posição do pluviômetro retirado da amostragem, e a interpolação se encarrega de determinar os resultados neste ponto (Figura 4.8). Posteriormente o arquivo é convertido de grd para dat e é feito um cálculo da Média dos valores dos 4 nós a partir do uso de funções do próprio Scriptor denominadas “WksStatistics” ou estatísticas da planilha (Figura 4.9). O resultado fica armazenado como leitura no próprio Scriptor (Figura 4.10). A sub-rotina encontra-se no Anexo I.

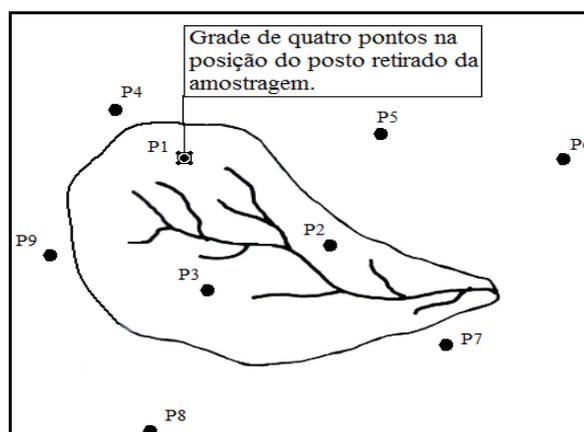


Figura 4. 8 Grade de quatro pontos espaçados em 0,001m na posição do pluviômetro retirado da amostragem para a posterior interpolação.

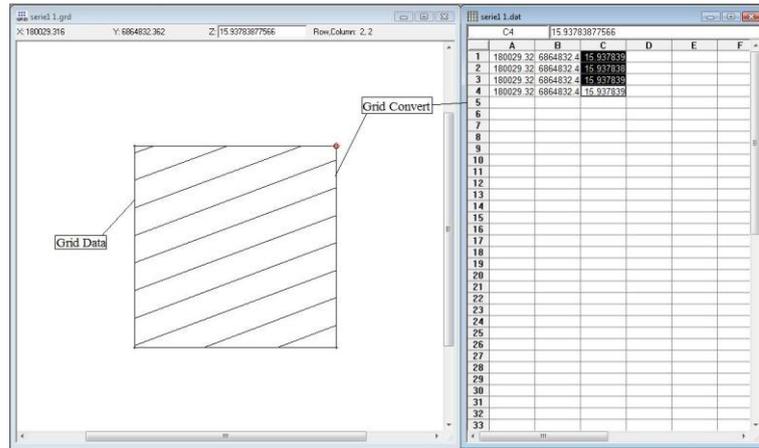


Figura 4. 9 Visualização do arquivo grd criado pela ferramenta Grid Data na Esquerda, e do arquivo dat convertido do grd pela ferramenta Grid Convert.

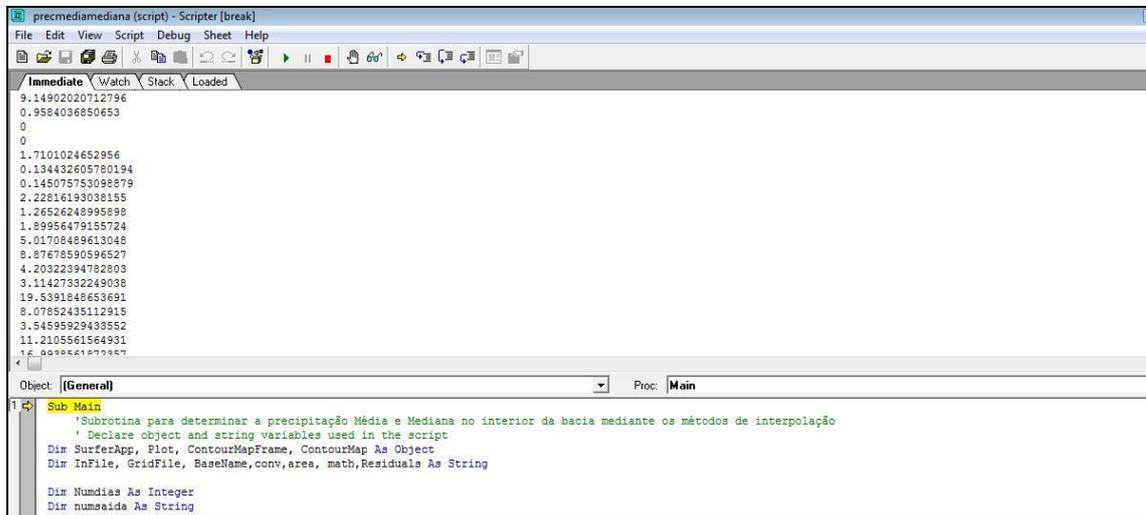


Figura 4. 10 Visualização do local onde foram armazenados os resultados.

Os resultados produzidos pela interpolação foram analisados, e o melhor método de interpolação foi avaliado através do cálculo do coeficiente de correlação (Equação 4.1) e da raiz do erro médio quadrático (Equação 4.2). Estes índices estatísticos foram propostos por Willmot (1981) para fazer a validação de modelos.

$$R = \frac{\text{cov}(P_o, P_c)}{S_{obs} \cdot S_{cal}} \quad (4.1)$$

Onde R é o coeficiente de correlação, $cov(P_o, P_c)$ é a covariância, S_{obs} e S_{cal} são as variâncias de P_o e P_c ,

$$REM_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(p_{o_i} - p_{c_i})^2}{N}} \quad (4.2)$$

Onde REM_Q é a raiz do erro médio quadrático, p_{o_i} e p_{c_i} são os valores das precipitações observadas e estimadas no dia i , e N é o número total de dias analisados.

Os postos pluviométricos e pluviográficos selecionados para a aplicação da validação cruzada estão localizados no interior dos limites da bacia do rio Taboão e das suas sub-bacias Turcato e do Donato, como mostra a figura 4.11.

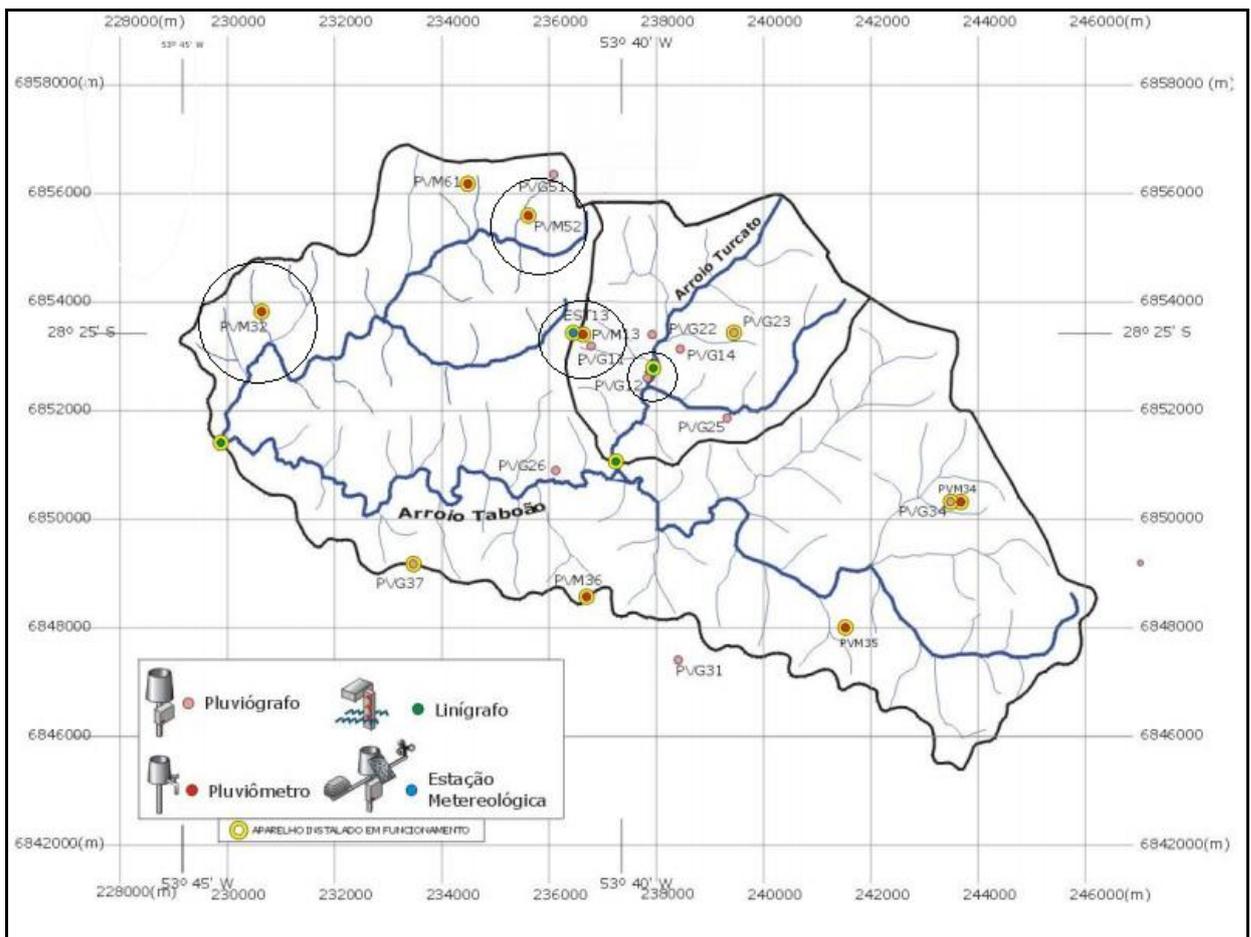


Figura 4. 11 Postos presentes na bacia do Taboão utilizados na validação cruzada.

Os postos circulados na figura 4.11 foram os Pluviômetros 13 (PVM 13), 32 e 52 (PVM 32 e PVM 52), e os Pluviôgrafos 12 (PVG12) e o 23 (PVG 23), e os Pluviômetros 32 e 52 (PVM 32 e PVM 52), sendo estes posicionados nos interior dos limites da bacia do Arroio Taboão.

Os outros postos também selecionados estão presentes no interior dos limites da bacia do rio Ijuí e na sua sub-bacia do Santo Angelo e do rio Potiribu como mostra a figura 4.12. As séries das precipitações destes postos foram retiradas respectivamente da planilha eletrônica (arquivo de entrada do aplicativo Scriptor, Anexo I) e foram estimados os seus valores por interpolação.

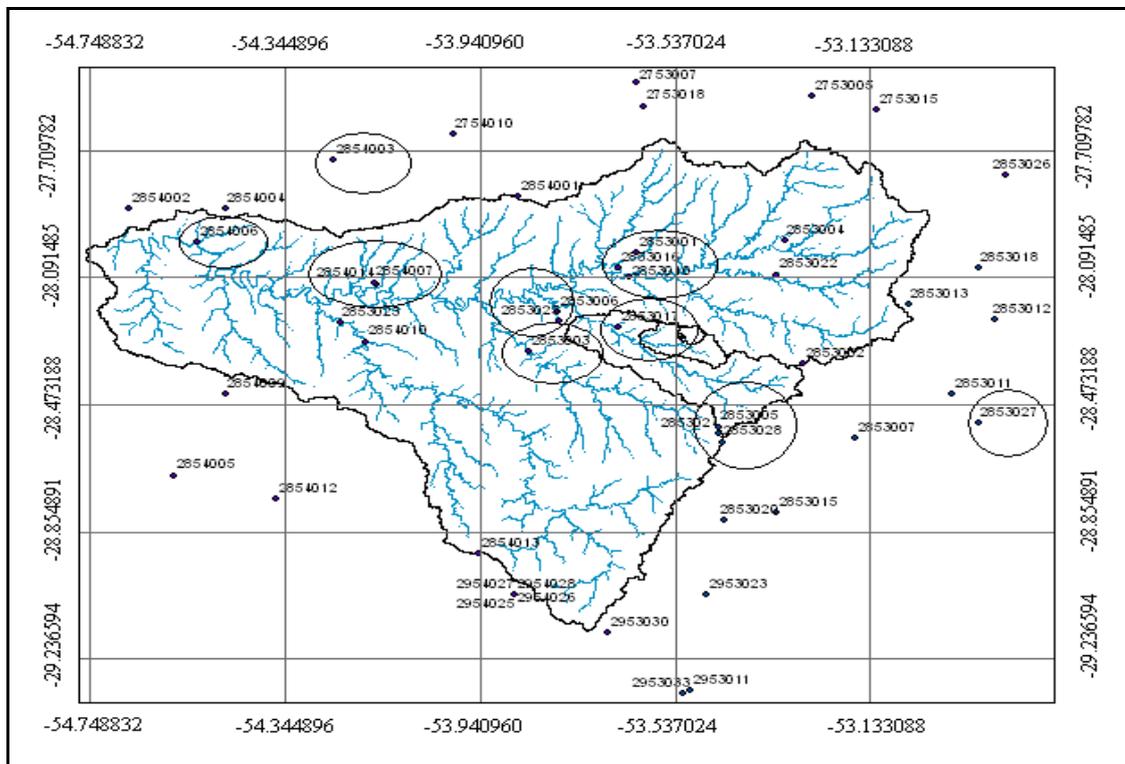


Figura 4. 12 Postos pluviométricos na bacia do rio Ijuí e na sua sub-bacia Santo Angelo e Potiribu utilizados na validação cruzada.

Os postos circulados na figura 4.12 mostram os postos pluviométricos selecionados para o uso da validação cruzada. Estes correspondem aos Pluviômetros (PVM) 2853005, 2853028, presentes no interior da bacia do rio Potiribu. Outros postos escolhidos, presentes no interior dos limites da bacia do rio Ijuí, correspondem aos Pluviômetros (PVM), 2853001, 2853003, 2853010, 28530023, 2854006, 2854014, além de outros pluviômetros fora do seu limite, sendo estes, os pluviômetros 2853027 e 2854003. O período analisado foi de

27/06/1990 a 31/05/1993, que representa o mesmo período adotado para a validação cruzada nos pluviômetros do Potiribu. Os cálculos dos índices estatísticos foram aplicados nos dias sem falhas nas séries de precipitações destes postos. O total de arquivos de entrada para a sub-rotina foi de 14, a condição de cada um destes arquivos de entrada é a inexistência da série das precipitações dos pluviômetros ou pluviógrafos escolhido. Na sub-rotina foram informados as coordenadas em UTM e o tipo de Interpolador para estimar o valor da precipitação na posição do posto a ser analisado (Anexo II).

4.2.3 Espacialização da Precipitação com o Melhor Interpolador (Etapa 2)

A seguir estão descritas as etapas para a determinação da precipitação Média e da Mediana mediante a espacialização utilizando o método de interpolação selecionado após a aplicação da técnica da validação cruzada. Sendo estas etapas:

- Coleta das séries dos pluviômetros e pluviógrafos na área da bacia do rio Potiribu fornecidos por Castro et al. (2010), com a adição dos pluviômetros disponíveis no banco de dados da Hidroweb ANA (Agência Nacional de Águas) localizados nas bacias do rio Potiribu e Ijuí e proximidades;
- Elaboração de planilhas Eletrônicas no Microsoft Excel versão 2007, sendo na primeira Coluna (A) e na segunda coluna (B) as coordenadas x e y em UTM de todos os postos pluviométricos e pluviográficos na bacia do rio Ijuí, e nas demais colunas as séries de precipitação diárias para o período de 01/01/1989 até 31/12/2010 (Figura 4.13), esta figura mostra o padrão de arquivo de entrada do procedimento de cálculo da espacialização exigida pelo software SURFER 8.0;
- Preparação da sub-rotina no programa Scripter em linguagem Visual Basic (Anexo II), para a espacialização da precipitação diária mediante os métodos de interpolação, utilizando uma grade regular de maneira automatizada para cada bacia e sub-bacia, e posteriormente para ser calculadas as chuva Média e a Mediana nos valores nodais no interior de cada uma das bacias. Os resultados da chuva Média e da Mediana serão armazenados no próprio programa Scripter;

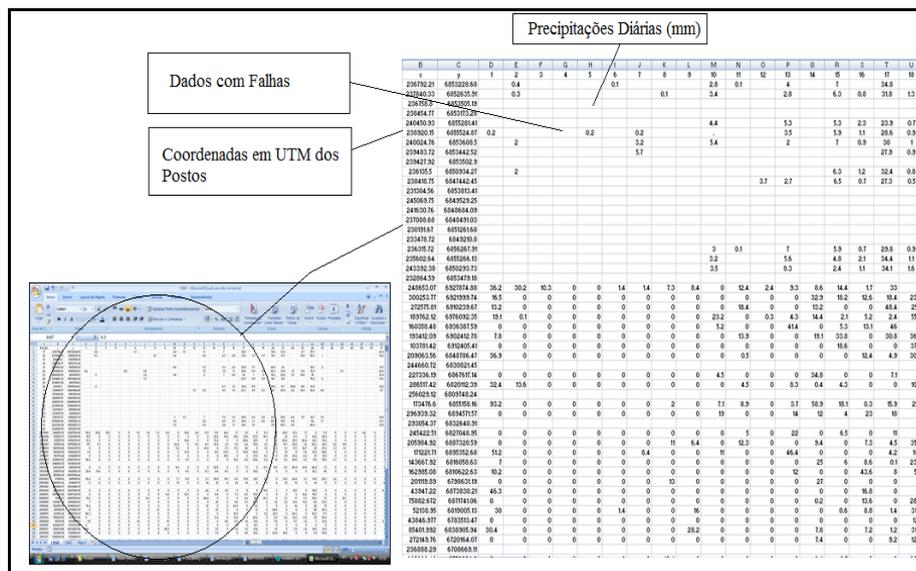


Figura 4. 13 Visualização das séries de precipitação diárias com falhas dos postos das Bacias do Taboão, Turcato e Donato mês de agosto de 1989.

Com o uso da sub-rotina criada no Scriptor, procede-se a automatização das seguintes tarefas:

- 1) Entrada de arquivos em extensão txt e bln.
- 2) Geração da grade regular e a determinação dos valores nodais mediante o método de interpolação (Ferramenta Grid Data).
- 3) Eliminação dos valores nodais fora dos limites da bacia (Ferramenta Grid Blanking).
- 4) Criação de um arquivo dat a partir do arquivo grd resultante desta etapa 3.
- 5) Aplicação das ferramentas Grid Math e Grid Residuals no arquivo resultante da tarefa 3, para eliminar o valor da constante 1,701E+38 da grade atribuída aos nós fora do limites da bacia.
- 6) Aplicação de estatísticas do SURFER 8.0 na planilha em extensão .dat resultante da tarefa 5 para o cálculo da precipitação média ou mediana.

A sub-rotina utiliza como dado de entrada o arquivo em extensão txt convertido do Microsoft Excel 2007, no padrão como mostrado a figura 4.17, sendo fornecidas ao SURFER 8.0, as coordenadas UTM X, Y e o Z (medida de precipitação diária) das séries dos pluviômetros e pluviógrafos, os limites mínimos e máximos da grade regular para posteriormente espacializar a precipitação. Outro dado de entrada que deve ser fornecido é os limites da bacia em extensão .bln (Figura 4.14) devem ser fornecidos para considerar no

cálculo da chuva Média ou Mediana somente os valores nodais da Grade Regular no Interior dos limites da bacia .

A figura 4.14 mostra o arquivo em formato bln. Este arquivo foi produzido a partir da conversão dos limites das bacias em formato dxf. do Autocad 2000 através do programa Dxf2xyz, que por sua vez foi obtido da exportação de uma imagem em Vector no Idrisi Andes, oriunda do SRTM. O interesse da obtenção desses limites neste trabalho é para possibilitar a seleção dos dados dos valores obtidos nos nós da grade interpolada no interior da área. Este arquivo em extensão bln é o limite da bacia representado por um polígono no plano X e Y com diversos pontos em coordenadas UTM.

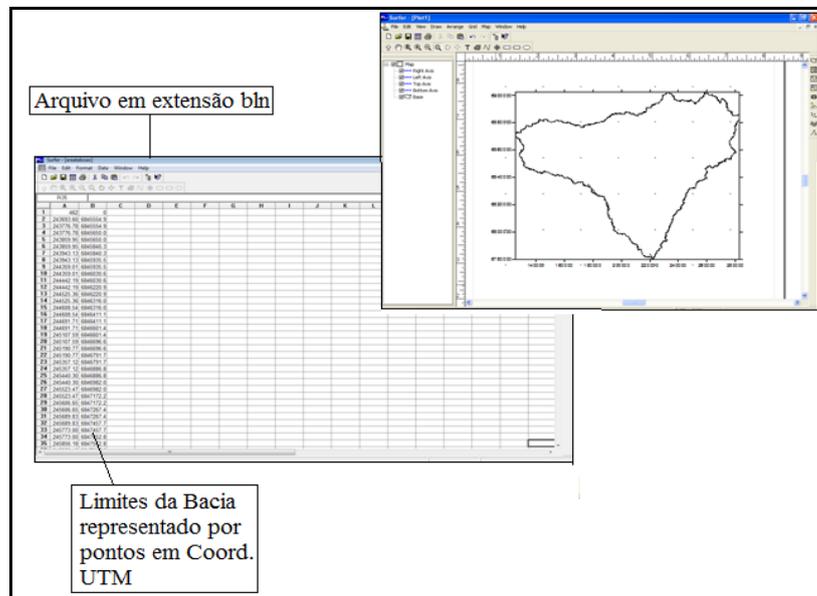


Figura 4. 14 Visualização dos limites da bacia do rio Ijuí, na esquerda mostra o arquivo em extensão bln, e na direita mostra a visualização deste arquivo no SURFER 8.0.

A grade regular (ferramenta Grid Data) é formada a partir dos seguintes arquivos e informações: o arquivo em txt com as coordenadas UTM X, Y e o Z (medida de precipitação diária); a informação das dimensões mínimas e máximas nos eixos X e Y em coordenadas UTM da grade regular, o tipo de algoritmo (Ex: Inverso do Quadrado da Distância); a quantidade de linhas e colunas, por exemplo, 100 linhas e 100 colunas produzindo 10.000 nós com espaçamento de 200 m (Figura 4.15a).

A ferramenta Grid Blanking é utilizada para obter os valores dos nós, resultante da interpolação, somente no interior da bacia. Esta ferramenta necessita do arquivo em bln (limites da bacia) e o arquivo de grd (grade regular). O resultado deste procedimento é uma grade com valores nodais no interior da bacia proveniente da interpolação, e o valor dos nós fora da área de interesse correspondendo a constante com valor de $1.70E+38$ (Figura 4.15 b).

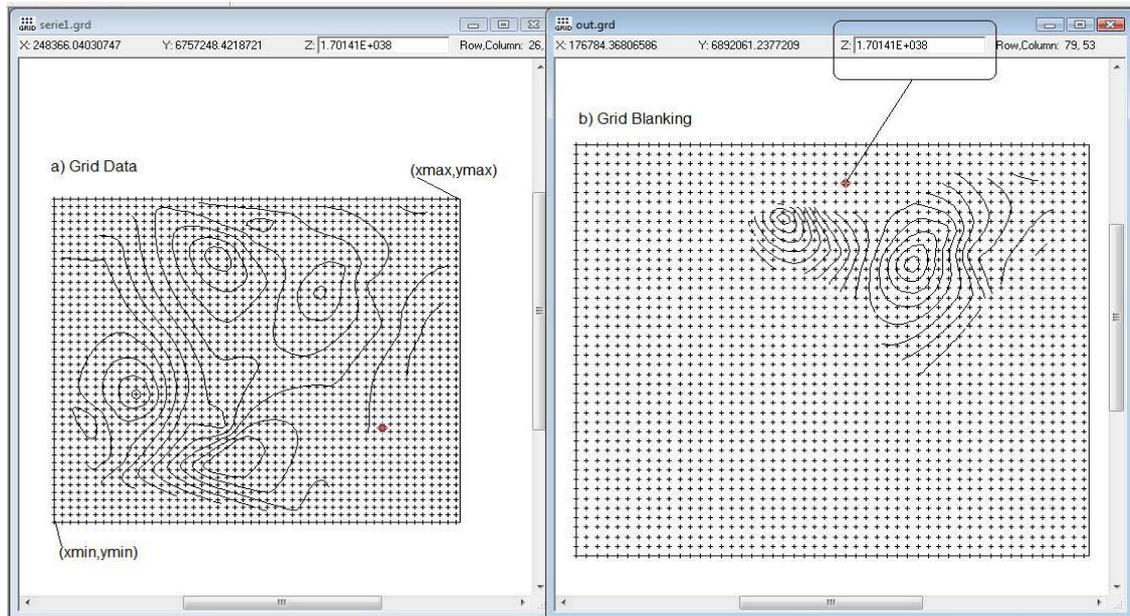


Figura 4. 15 Visualização da grade regular resultante da ferramenta Grid Data (a), da grade regular resultante da ferramenta Grid Blanking (b).

Esta sub-rotina é utilizada neste trabalho para calcular a chuva média a partir dos valores dos nós no interior da bacia, portanto é necessário eliminar o valor da constante $1.70E+38$, resultante do procedimento da ferramenta Grid Blanking (Ver Figura 4.15 b). Este cálculo só é possível quando o arquivo grd é convertido para dat, os resultados são as coordenadas em UTM dos nós com os seus respectivos valores sem exceção (Figura 4.16 c), não permitindo o cálculo da chuva media. O artifício utilizado para eliminar esta constante é a partir da aplicação de ferramentas no próprio arquivo de grd (grade regular), primeiramente, utiliza-se a ferramenta Grid Math (Figura 4.16 b), para promover a subtração de duas grades idênticas obtidas da ferramenta Grid Blanking. O resultado é uma grade com zeros no interior do limite e o valor da constante $1.70E+38$. Este arquivo é posteriormente convertido em extensão dat. O valor da constante é eliminado quando aplicado a ferramenta Grid Residuals.

A ferramenta Grid Residuals utiliza o arquivo dat resultante da conversão da grade regular da ferramenta Grid Blanking (Figura 4.16 a), mais o arquivo em grd gerado pela ferramenta Grid Math (Figura 4.16 b). O resultado do procedimento Grid Residuals é a eliminação do valor da constante 1.70E+38, e a locação dos valores dos nós somente no interior da bacia na grade para a coluna D do próprio arquivo dat resultante da ferramenta Grid Math (Figura 4.16 c).

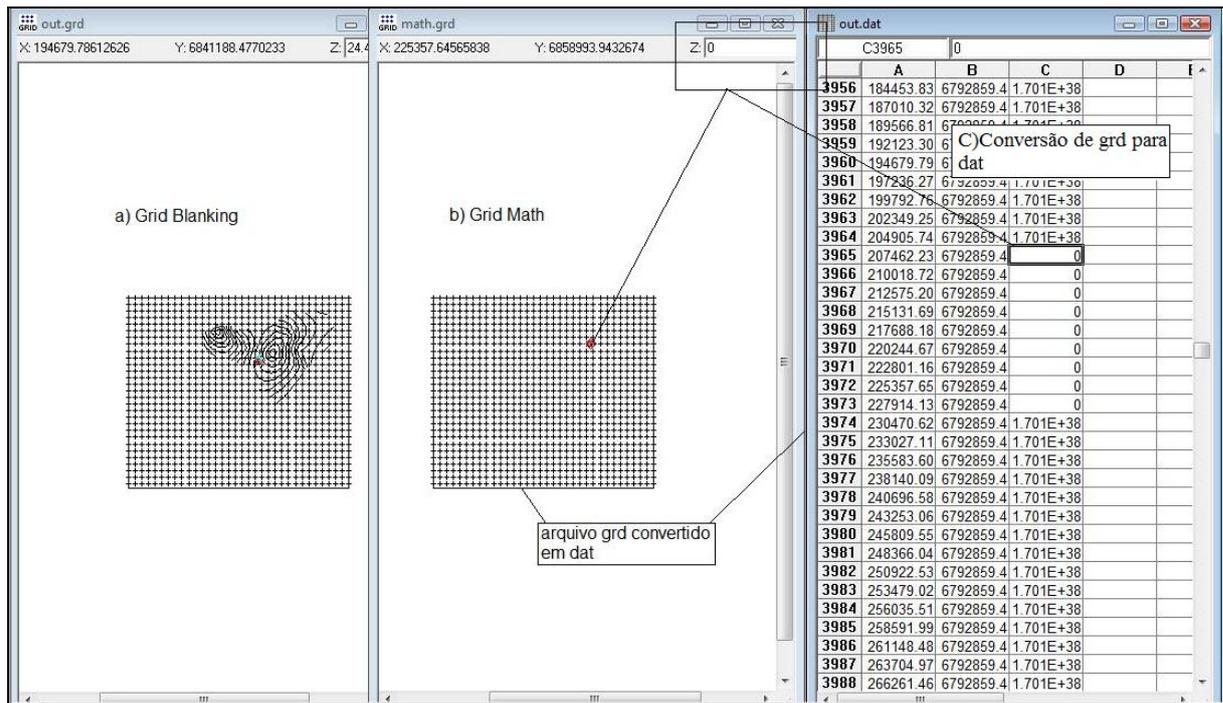


Figura 4. 16 Ferramenta Grid Blankin (a), e a Ferramenta Grid Math (b). Conversão da grade (grd) em arquivo dat (c).

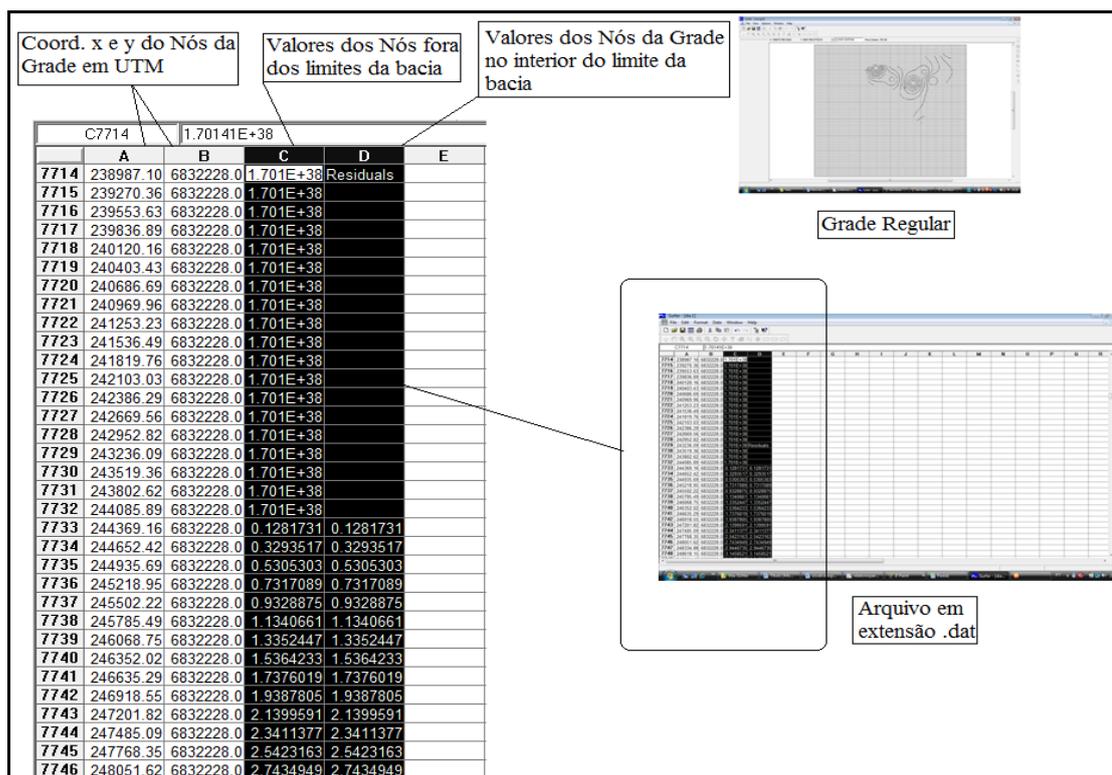


Figura 4. 17 Visualização dos valores dos nós no interior da bacia do rio Ijuí em extensão .dat, e o cálculo dos Resíduos na coluna D da planilha, onde foi eliminada a constante 1.70E+38.

Os valores da chuva média e da chuva mediana no interior da bacia são estimados a partir do uso de funções do próprio Scriptor, denominadas de estatísticas da planilha (“WksStatistics”). Este procedimento de cálculo da chuva média é realizado diretamente na coluna D do arquivo dat proveniente da ferramenta Grid Residuals. Os resultados do “WksStatistics” ficam armazenados como leitura no programa e podem ser copiados e colados em arquivos txt ou xls (Figura 4.18), podendo ser copiados para outras extensões. É possível obter-se as séries de precipitações a partir da espacialização da chuva para longos períodos.

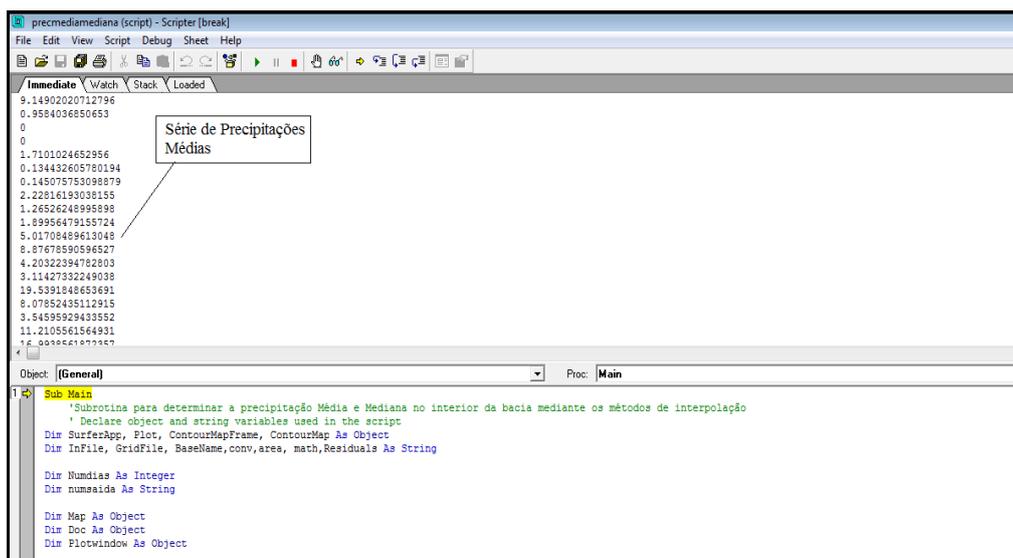


Figura 4. 18 Local onde as séries foram armazenadas para posterior exportação.

O procedimento de automatização resulta em espacializações nos períodos de 01/01/1989 à 31/09/2009, para o cálculo da precipitação média e mediana aplicado nos nós no interior da bacia, nas diferentes escalas, com a utilização do método de interpolação que melhor representou os dados de precipitações.

4.2.3 Determinação da Precipitação Média ou Mediana Obtidas Diretamente das Séries (Etapa 3)

Para o cálculo das chuvas Média e Mediana das precipitações obtidas diretamente da série de precipitações com falhas na planilha eletrônica do Microsoft Excel 2007, utilizando funções fornecidas pelo próprio software, a chuva média em cada bacia será a média aritmética dos valores e a chuva Mediana o valor central eliminando os extremos. Os cálculos são feitos somente em função dos postos pluviométricos e pluviográficos presentes no interior de cada bacia nas diferentes escalas (Figura 4.19).

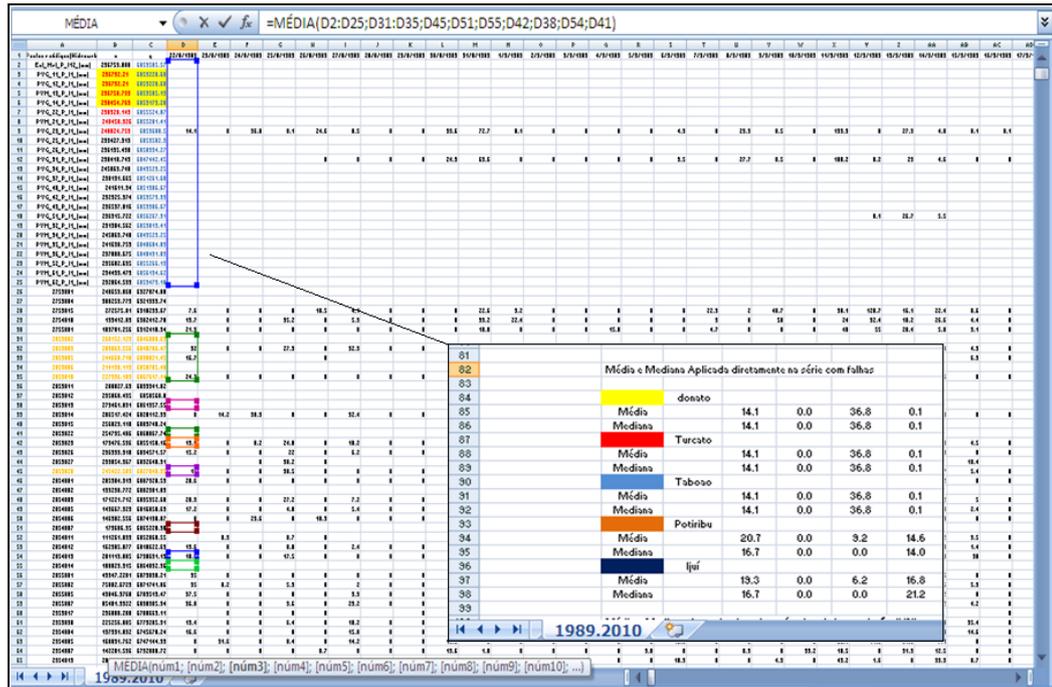


Figura 4. 19 Função Média calculada nos postos presentes no interior da bacia.

4.2.4 Definição dos Dados de Entrada para Simulação do Processo Chuva-Vazão (Etapas 4 e 5)

O modelo IPH II foi a ferramenta utilizada neste trabalho para avaliar as séries das precipitações pontuais Médias e Medianas a partir da comparação das vazões calculadas e observadas. Os dados de entrada deste modelo são a chuva, e a evaporação. A função da vazão no modelo é para o processo de otimização dos parâmetros. Os locais de estudo são as Bacias do Ijuí, do Santo Angelo, do Potiribu, e a bacia do Taboão e do Turcato. Os períodos escolhidos para a simulação serão em função das séries de vazão sem a presença de falhas devido a limitações na aceitação de dados de entrada do modelo.

Para o uso do Modelo IPH II utilizando a versão Win_IPH 2 elaborado por Bravo et al. (2007) nas diferentes escalas, serão válidas as seguintes observações:

- Condições iniciais: O valor inicial dado para a percolação foi o mesmo dado para a vazão de base, e para a vazão superficial fornecida ao modelo será em função da vazão inicial registrada na série. Estes valores serão estimados por tentativa, para se ajustar ao valor observado numérico e gráfico.

- Tempo de deslocamento: Na versão Win_IPH II, os valores dos tempos de concentração são fixos, sendo valores iguais a 1 ou 2 dias. Neste caso foi considerado o valor do tempo de concentração de 2 dias para as sub-bacias do rio do Ijuí nos postos fluviométricos Ponte Mística e do Santo Angelo, e o intervalo de 1 dia para a bacia do Potiribu e para as suas sub-bacias do Taboão e do Turcato. Estes valores foram adotados com base nas formulas de Kirpich e Dooge.
- Escoamento superficial: para o histograma tempo-área sintético foi adotado o coeficiente igual a 2 para a sub-bacia da Ponte Mística e do Santo Angelo, Taboão e do Turcato. de 1.5 para a bacia do rio Potiribu. Estes valores foram adotados com base na forma das bacias.
- Impermeabilização: A taxa de área impermeável utilizada foi igual a 15 %
- Discretização temporal: o intervalo de tempo da simulação será de 1440 min que corresponde a 1 dia.
- O Coeficiente de Eficiência para avaliar o desempenho do modelo foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe. Este coeficiente possui a tendência de valorizar as maiores vazões (os picos), por ser baseado no desvio quadrático.

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_c)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q})^2} \quad (4.5)$$

Onde Q_o é a vazão observada, Q_c é a vazão calculada, \bar{Q} é a vazão média observada.

O coeficiente de eficiência de Nash-sutcliffe é uma medida de associação entre as vazões previstas e observadas, e o seu valor varia no intervalo de $-\infty$ a 1. Se o valor do coeficiente for igual a 1, evidencia que existe uma correlação perfeita na amostra: não haverá diferença entre os valores simulados e os observados.

- Comparação de volumes: para avaliar o desvio geral do volume

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_c) - \sum(Q_o)}{\sum(Q_o)} \quad (4.6)$$

Onde Q_o é a vazão observada, Q_c é a vazão calculada.

Para a definição dos parâmetros R_{\max} , K_s , K_{sub} , I_b e I_o , adotou-se os intervalos dos valores sugeridos na literatura, como nos trabalhos de Collischonn e Tucci, (2003), com o objetivo de evitar que o processo de calibração leve a valores dos parâmetros destituídos de significado físico, pois os valores irreais podem conduzir a um bom ajuste na calibração, mas sem significado hidrológico. Esses intervalos são apresentados na Tabela 4.7. Na versão do Win_IPH2 estes limites são encontrados antes do uso da calibração automática. A calibração utilizada nesta pesquisa foi o Algoritmo SCE-UA.

Tabela 4. 7 Limites dos Parâmetros que serão utilizados na calibração do Modelo IPH II (Fonte: Collischonn e Tucci, 2003).

Parâmetro	Unidade	Valor Mínimo	Valor Máximo
R_{\max}	<i>mm</i>	0.0	20.0
K_s	Δt^{-1}	0.01	10.0
K_{sub}	Δt^{-1}	30.0	40.0
I_b	<i>mm</i> . Δt^{-1}	0.1	10
I_o	<i>mm</i> . Δt^{-1}	10.0	300.0
h	-	0.0	1.0
Alf	-	0.01	20.0

4.2.5 Transferência dos Parâmetros do Modelo nas diferentes Escalas (Etapa 6)

Esta etapa da pesquisa possui a finalidade de mostrar, após a obtenção dos parâmetros do modelo IPH II resultante da melhor estimativa pontual, a possibilidade da transferência direta de parâmetros de escalas maiores para as escalas menores, a possibilidade de obtenção de séries de vazões para os casos de indisponibilidade de medidas fluviométricas em bacias embutidas.

O método, com o uso do modelo Win_IPH II, consiste em adotar os parâmetros resultantes da melhor estatística pontual da escala maior, e modificar os dados de entrada compatíveis com a escala menor, sendo estes dados: área da bacia; o coeficiente de forma do Histograma tempo-área; o tempo de concentração; as condições iniciais de percolação, a vazão subterrânea e vazão superficial; e as series de precipitações e evaporações.

Os parâmetros transferidos seguiram a seguinte ordem nas diferentes escalas para simulação do modelo:

- Bacia da Ponte Mística para as bacias do Santo Angelo, Portibu, Taboão e do Turcato
- Bacia do Santo Ângelo para as bacias do Potiribu, Taboão e do Turcato.
- Bacia do Potiribu para as bacias do Taboão e do Turcato
- Bacia do Taboão para a do Turcato.

O Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe foi utilizado para avaliar o desempenho das vazões simuladas com os parâmetros da bacia maior, comparados, aos valores das vazões verdadeiramente medidas nas bacias menores.

5.0 RESULTADOS

5.1 Avaliação do desempenho dos interpoladores

A validação cruzada é um método que possui o interesse em mostrar o desempenho do interpoladores utilizados na pesquisa e selecionar o melhor, através do comparativo dos valores das precipitações calculadas por interpolação com o valor das precipitações verdadeiramente medida, na posição do posto analisado, para sucessivos dias. As estatísticas utilizadas para avaliar este desempenho foram a Raiz do Erro Médio Quadrático (*REM_Q*) e o Coeficiente de Correlação (*R*). Estes índices estatísticos foram mencionados no item 4.2.2. Os métodos avaliados foram o Vizinho mais Próximo, a Triangulação Linear, o Inverso do Quadrado d na Distância e o Vizinho Natural.

A tabela 5.2 mostra a estatística da raiz do erro médio quadrático (*REM_Q*) e o Coeficiente de Correlação (*R*), obtidos mediante a comparação dos resultados do valor do posto pluviométrico, retirados da amostragem com os valores encontrados, utilizando-se os métodos de interpolação: Inverso do Quadrado da Distância (*IQD*); Vizinho Natural (*VN*); Vizinho mais Próximo (*VP*); Triangulação Linear (*TL*).

Tabela 5. 1 Resultado da Validação Cruzada para os métodos de interpolação analisados.

Postos Verificados	IQD		VN		VP		TL	
	<i>REM_Q</i>	<i>R</i>	<i>REM_Q</i>	<i>R</i>	<i>REM_Q</i>	<i>R</i>	<i>REM_Q</i>	<i>R</i>
<i>PVG12</i>	9.0	0.71	8.5	0.74	9.9	0.66	8.5	0.74
<i>PVM13</i>	15.1	0.40	14.9	0.42	16.8	0.29	15.0	0.41
<i>PVG23</i>	6.2	0.89	6.5	0.89	6.5	0.89	7.1	0.86
<i>PVM32</i>	1.8	0.62	1.0	0.65	1.1	0.64	1.9	0.50
<i>PVM52</i>	4.0	0.88	4.0	0.87	4.0	0.86	4.2	0.86
<i>PVM2853003</i>	6.6	0.47	4.3	0.65	9.2	0.14	5.9	0.47
<i>PVM2853005</i>	7.3	0.79	7.4	0.80	7.9	0.80	7.7	0.78
<i>PVM2853010</i>	12.1	0.38	11.7	0.46	16.1	0.18	12.4	0.44
<i>PVM2853023</i>	10.8	0.58	12.4	0.52	15.2	0.45	13.7	0.49
<i>PVM2853027</i>	2.2	0.75	2.2	0.70	2.2	0.67	2.2	0.67
<i>PVM2853028</i>	8.1	0.79	7.9	0.80	9.3	0.73	8.3	0.77
<i>PVM2854003</i>	9.4	0.69	8.4	0.78	8.7	0.78	8.7	0.74
<i>PVM2854006</i>	10.6	0.58	11.6	0.54	12.7	0.51	11.7	0.54
<i>PVM2854014</i>	12.9	0.53	12.3	0.55	15.2	0.45	14.2	0.48

Com base nos resultados da tabela 5.1, o PVM 13 e o PVM 2853010 apresentaram coeficientes de correlação abaixo de 0,40. Estes podem estar com inconsistência ou os métodos de interpolação não representaram bem os valores verdadeiramente medidos. Os demais pluviômetros e pluviógrafos com coeficientes de correlação satisfatórios, acima de 0,45, justificam-se pela maior quantidade de informação (ver as figuras 5.1 e a 5.2), com o maior número de postos próximos ao pluviômetro analisado na validação cruzada.

O Inverso do Quadrado da Distância e o Vizinho Natural foram os métodos de interpolação que apresentaram menor Raiz do Erro Médio Quadrático e maior Coeficiente de Correlação com base no total de postos analisados pela técnica da validação cruzada. Os resultados estão evidenciados na tabela 5.1 e na figura 5.1. O método do vizinho natural foi o escolhido para gerar o campo de precipitações com o uso da grade regular mediante o cálculo dos valores nodais da mesma, para posteriormente determinar a série das chuvas médias e das medianas diárias.

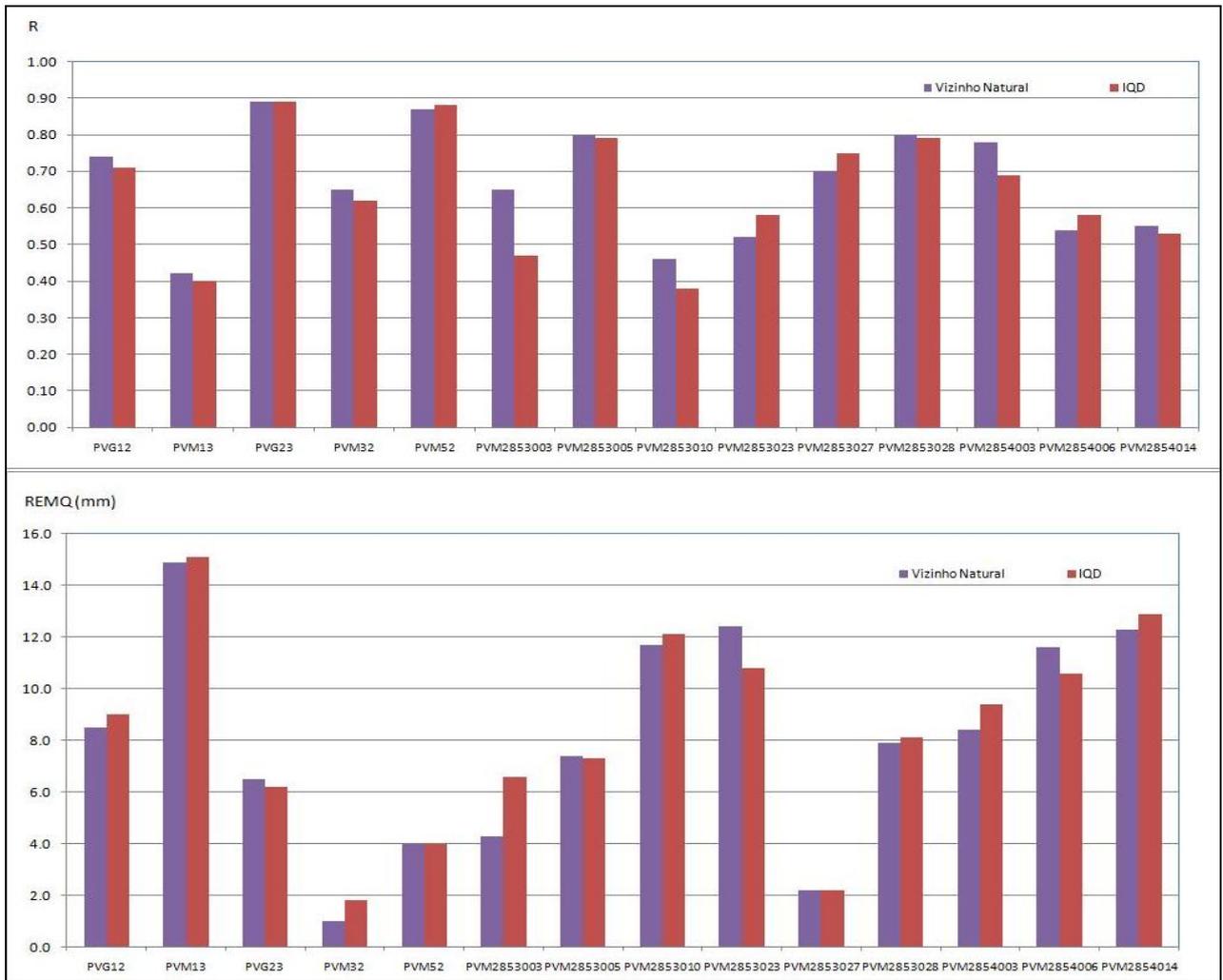


Figura 5. 1 Histograma do REMQ e do R obtidos dos valores da tabela 5.1.

. Pode-se dizer que o método do Vizinho Natural apresentou melhores resultados na maior parte dos pluviômetros e pluviógrafos analisados em comparação ao método do Inverso do Quadrado da Distância em um total de nove dos quatorze postos analisados (Figura 5.2).

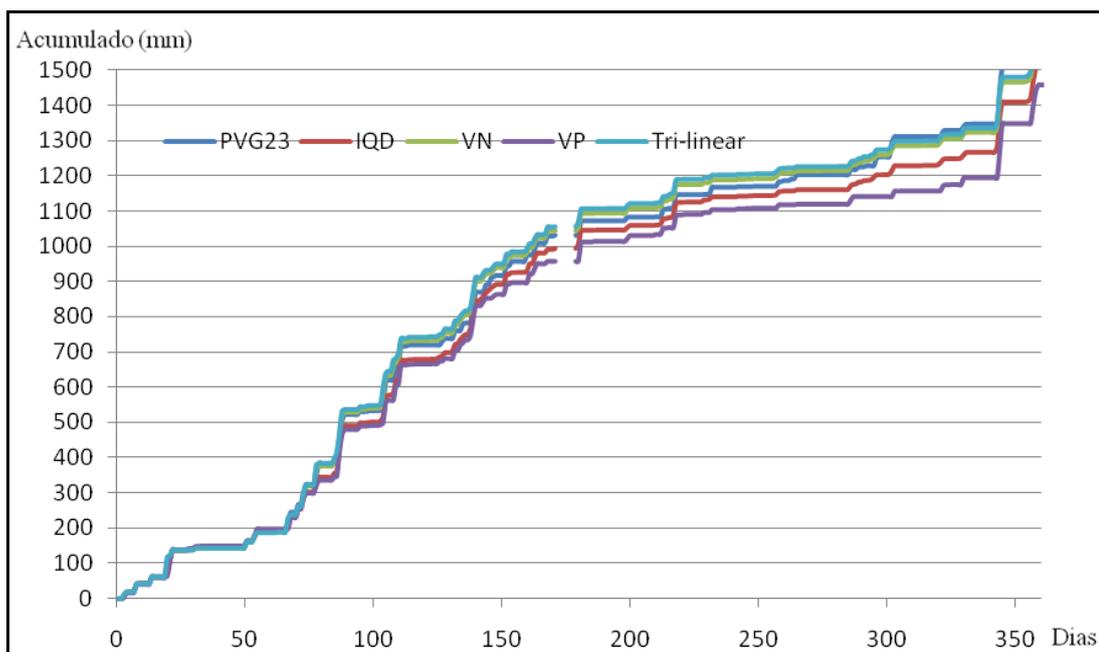


Figura 5. 2 Precipitações acumuladas estimadas e medida no PVG 23 no período de 360 dias iniciado em 27/06/1990.

Esta sub-rotina, mostrada no Anexo I, pode ser uma ferramenta também utilizada para fazer análise de consistência, ou para o preenchimento de falhas de postos pluviométricos, como mostra a figura 5.2. Esta figura mostra o valor das precipitações acumuladas calculadas pelos diferentes métodos de interpolação e o valor acumulado das precipitações medidas no posto pluviográfico 23 retirado da amostragem. Os dias não chuvosos, com base na figura, possuem o comportamento no gráfico semelhante a linhas retas na horizontal e os dias com falhas, como é o caso do intervalo de 150 a 200 dias, apresentaram interrupções no gráfico. Este intervalo com interrupção poderia ser obtido mediante o preenchimento das falhas com o uso dos métodos de interpolação, mas para poder ser feita a comparação entre as chuvas acumuladas medidas pelo pluviógrafo com as chuvas acumuladas obtidas pelos interpoladores, após o intervalo de 150 a 200 dias, foram desconsiderados na elaboração do gráfico os valores obtidos por interpolação para os dias com falhas neste intervalo. Nesta pesquisa, observou-se, com base na figura 5.2, que os métodos de interpolação conseguiram representar bem os valores acumulados calculados, em comparação aos valores medidos acumulados após a aplicação da técnica da Validação Cruzada. Isto mostra que esta técnica pode ser utilizada para fazer o preenchimento e a análise de consistência de dados de precipitação medida por postos pluviométricos e pluviográficos.

O método do Inverso do quadrado da distância foi bastante utilizado em diversos trabalhos para interpolação de pluviômetros, como por exemplo, no estudo de Andreolli (2003). A partir do resultado da Validação Cruzada nesta pesquisa, mostra-se a possibilidade de explorar o uso do método do Vizinho Natural para a interpolação pelo método da ponderação da distância tanto para o cálculo da precipitação em centróides de células de modelos distribuídos, como para a determinação da precipitação em nós de grades regulares para posterior cálculo das precipitações médias na bacia para uso em modelos do tipo concentrado.

5.2 Definição da Geometria das Grades nas Diferentes Escalas (Etapa 2)

A análise desta etapa consiste em definir o número de linhas e colunas da grade nas diferentes escalas. Com base na Tabela 5.2, o valor da precipitação média utilizando o interpolador Vizinho Natural correspondeu a 4,62 mm, para o número de linhas e colunas de 50, totalizando 2500 nós para a bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística (Figura 5.3).

Tabela 5. 2 Resultado das precipitações médias com o interpolador Vizinho Natural para diferentes resoluções da Grade Regular, no dia 30/07/1990.

Ijuí (Ponte Mística)			
Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	MédiaVN (mm)
20	20	100	4.80
25	25	250	4.81
30	30	900	4.78
35	35	1225	4.64
40	40	1600	4.67
45	45	2025	4.66
50	50	2500	4.62
55	55	3025	4.59
60	60	3600	4.62
65	65	4225	4.59
70	70	4900	4.64
75	75	5625	4.61
80	80	6400	4.60
85	85	7225	4.60
90	90	8100	4.60
100	100	10000	4.59

O comparativo do valor de 4,62 mm comparado à resolução de 100 linhas e 100 colunas, com valor de chuva média de 4,59 mm, produz um erro superior de 0,65 %. Ao adotar a grade com resolução de 50 x 50 é possível obter resultados próximos à grade de resolução de 100 x 100, no qual, reduziu de maneira significativa o tempo de processamento para obter as séries de precipitações médias mediante o uso da sub-rotina apresentada no Anexo II.

A dimensão, o número de linhas e colunas da grade regular definida para a bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística está apresentada na tabela 5.3, e a visualização desta grade na figura 5.3.

Tabela 5. 3 Descrição da geometria da Grade Regular para a bacia da bacia do Ijuí no posto Ponte Mística.

Bacias	Geometrias da Grade							Espaçamento (m)	
	Xmin	Ymin	Xmáx	Ymáx	Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	Direção x	Direção y
Ponte Mística	123048	6777830	287820	6904821	50	50	2500	3363	2592

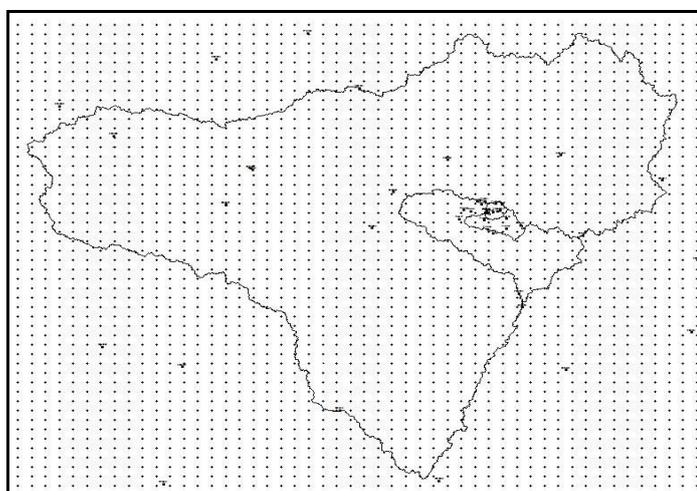


Figura 5. 3 Grade com resolução de 50 x 50 abrangendo os limites da bacia do Ijuí no posto Ponte Mística.

A geometria da grade regular para a bacia do Ijuí no Posto Santo Ângelo está apresentada na tabela 5.4 e a visualização desta grade está apresentada na figura 5.4.

Tabela 5. 4 Descrição da Geometria da Grade Regular para a bacia do Ijuí no posto Santo Ângelo.

Bacias	Geometrias da Grade							Espaçamento (m)	
	Xmin	Ymin	Xmáx	Ymáx	Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	Direção x	Direção y
Sto Angelo	1785601	6818276	282626	6902406	50	50	2500	2124	1717

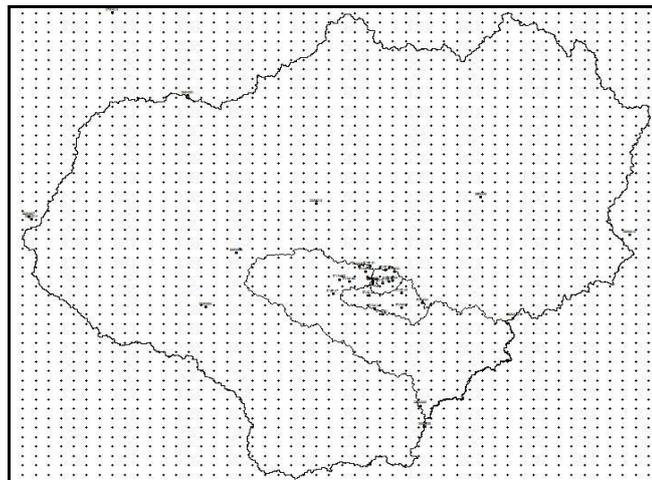


Figura 5. 4 Grade com resolução de 50 x 50 abrangendo os limites da bacia do Santo Ângelo.

A geometria da grade regular para a bacia do Ijuí no posto Potiribu está apresentada na tabela 5.5 e a visualização desta grade está apresentada na figura 5.5.

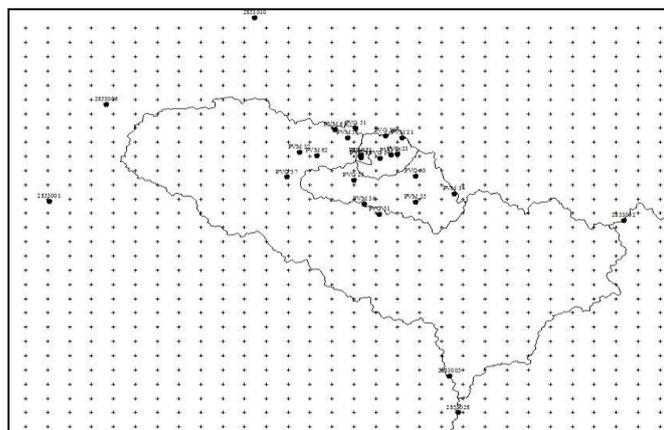


Figura 5. 5 Grade com geometria de 40 x 40 abrangendo os limites da bacia do rio Ijuí no posto Potiribu.

Tabela 5. 5 Descrição da resolução da Grade Regular para a bacia do rio Ijuí no posto Potiribu.

Bacias	Geometrias da Grade						Espaçamento (m)		
	Xmin	Ymin	Xmáx	Ymáx	Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	Direção x	Direção y
Potiribu	206978	6824125	263348	6866559	40	40	1600	1445	1088

A geometria da grade regular para a bacia do Taboão está apresentada na tabela 5.6 e a visualização desta grade está apresentada na figura 5.6.

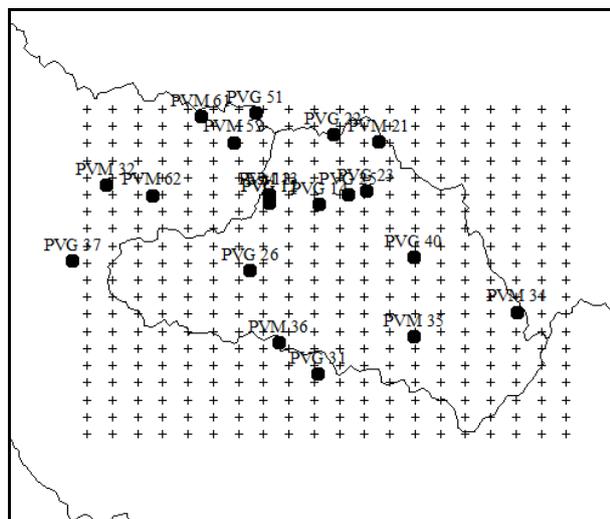


Figura 5. 6 Grade com resolução de 20 x 20 abrangendo os limites da bacia do rio Taboão.

Tabela 5. 6 Descrição da Geometria da Grade Regular para a bacia do rio Taboão.

Bacias	Geometrias da Grade						Espaçamento (m)		
	Xmin	Ymin	Xmáx	Ymáx	Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	Direção x	Direção y
Potiribu	230680	6845408	246723	6856397	20	20	400	844	578

A geometria da grade regular para a bacia do Turcato está apresentada na tabela 5.7 e a visualização desta grade está apresentada na figura 5.7.

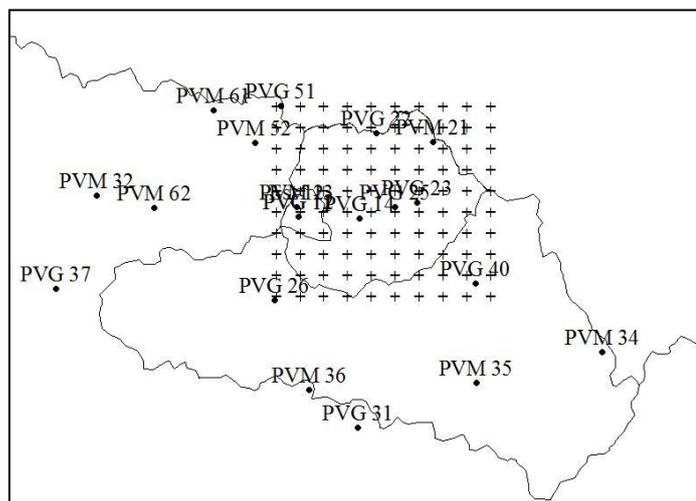


Figura 5. 7 Grade com resolução de 10 x 10 abrangendo os limites da bacia do rio Taboão.

Tabela 5. 7 Descrição da geometria da Grade Regular para a bacia do rio Taboão.

Bacias	Geometrias da Grade							Espaçamento (m)	
	Xmin	Ymin	Xmáx	Ymáx	Nº Linhas	Nº Colunas	Nº Nós	Direção x	Direção y
Potiribu	236186	6851028	242018	6856240	10	10	100	648	579

Bryce et al. (1997), observaram a variação dos parâmetros do modelo concentrado Sacramento, em função da chuva média estimada por diferentes geometrias de grade com dimensões de 2Km², 5 e 10 Km² utilizando dados de uma rede de pluviômetros e da informação de dados de radar. Aqui na pesquisa, não foi avaliada a sensibilidade dos parâmetros do modelo IPH II em função da modificação das geometrias das grades regulares para estimar a precipitação média. Considerou-se que ocorre uma pequena divergência dos valores de uma grade de 50 x 50 e outra 100 x 100, ver tabela 5.2, mas a pesquisa abre a possibilidade de estudos referentes à sensibilidade dos parâmetros do modelo IPH II em função da chuva média mediante a modificação destas geometrias.

5.3 Análise das precipitações obtidas por Interpolação com o Vizinho Natural e pelos Cálculos Diretos

As figuras 5.8 a 5.10 mostram três situações diárias identificadas nas séries dos pluviômetros distribuídos na bacia da Ponte Mística, e que são situações semelhantes identificadas nas suas sub-bacias, que podem ter ocasionado problemas na estimativa das chuvas médias e medianas obtidas por cálculos diretos e na mediana obtida pela interpolação. Os valores das precipitações diárias medidas no interior da bacia mostrada nas figuras 5.8 a 5.10 estão encontrados na parte superior das tabelas 5.8 a 5.10. Na parte inferior destas tabelas

são mostrados os resultados da chuva média e da mediana determinadas por cálculos diretos e por interpolação utilizando o vizinho natural.

No caso I a média e a mediana calculada diretamente dos postos no interior da bacia apresentam valores próximos aos determinados pela interpolação, ao qual se acredita que as chuvas determinadas pelos dois métodos podem representar o volume de precipitações ocorrente na bacia (Figura 5.8 e Tabela 5.8).

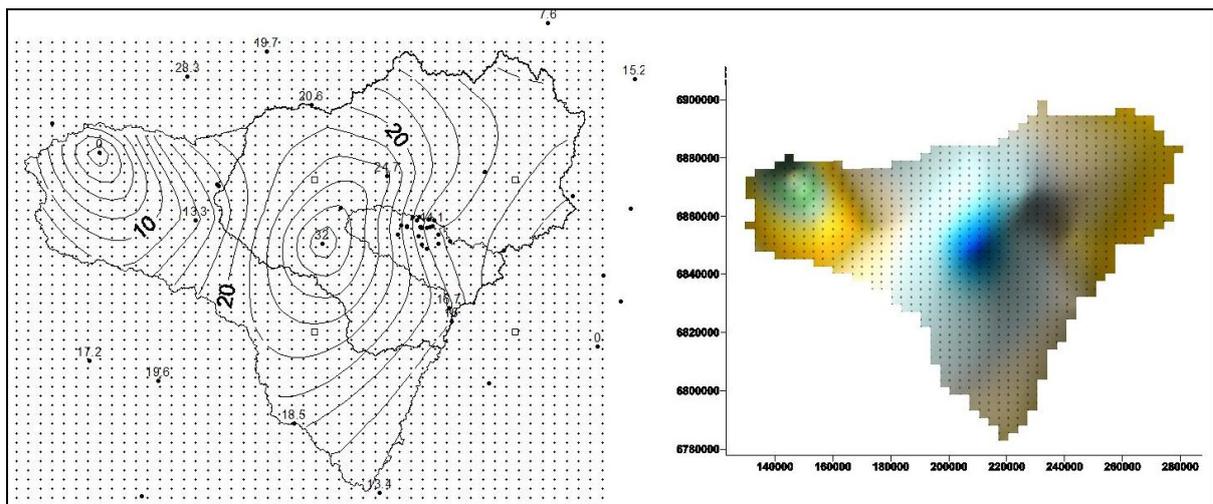


Figura 5. 8 Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 22/08/1989, caso I.

Tabela 5. 8 Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 22/08/1989, Caso I.

Medidas de chuva nos postos no interior da bacia (mm)	
PVG 23	14.1
PVM 02853003	32
PVM 02853005	16.7
PVM 02853010	24.7
PVM 02853014	0
PVM 02853023	13.3
PVM 02853028	16
PVM 02854013	18.5
Médiacd (mm)	16.9125
Medianacd (mm)	16.35
Médiavn (mm)	16.5105
Medianavn (mm)	16.519

No caso II, as falhas existentes e a maior quantidade de postos com medidas iguais a zero no interior da bacia produziu chuvas medianas correspondentes a zero e as chuvas médias afetadas pelos valores extremos quando estas foram determinadas pelos cálculos diretos (Tabela 5.9 e Figura 5.9). Pode-se dizer que a chuva mediana pode não representa bem os volumes de chuva na bacia ocasionando baixo desempenho do modelo chuva-vazão.

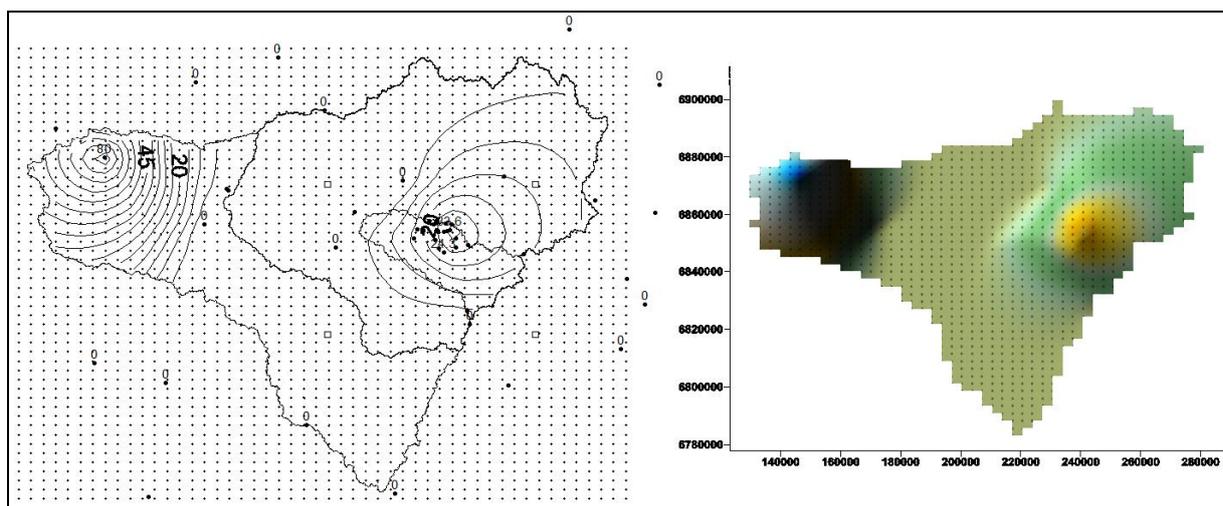


Figura 5. 9 Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 30/08/1989, caso II.

Tabela 5. 9 Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 30/08/1989, Caso II.

Medidas de chuva nos postos no interior da bacia (mm)	
PVM 02854006	80
PVM 02854013	0
PVM 02854023	0
PVM 02853014	0
PVM 02853010	0
PVG 23	33,3
PVG 31	24,3
PVM 02853003	0
Médiacd (mm)	17,21
Medianacd (mm)	0
Médiavn (mm)	10,11
Medianavn (mm)	2,30

No caso III são identificadas, na maioria dos pluviômetros no interior da bacia, medidas iguais a zero. A interpolação, por considerar valores dos postos fora dos limites da bacia, pode produzir uma chuva média com valor irreal (Tabela 5.10 e Figura 5.10).

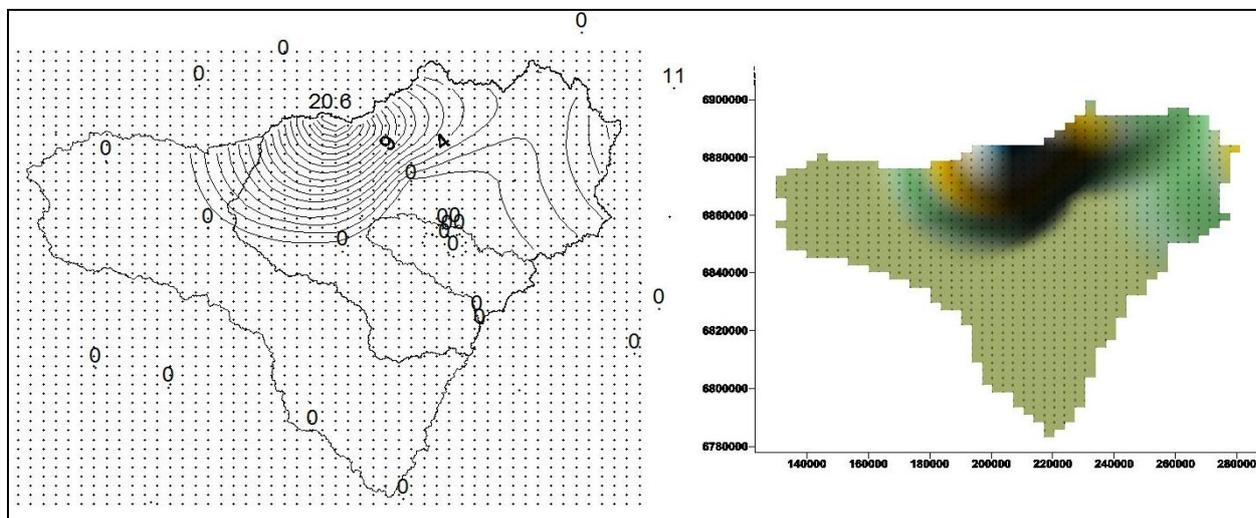


Figura 5. 10 Grade Regular, Isolinhas e a superfície de precipitações para o dia 20/10/1989, caso III.

Tabela 5. 10 Medidas de precipitação no interior da bacia e valores de chuvas médias e medianas determinada pelos Cálculos Diretos (CD), e pelo interpolador Vizinho Natural (VN) com a Resolução da Grade de 50 x 50, no dia 20/10/1989, Caso III.

Medidas de chuva nos postos no interior da bacia (mm)	
PVG 23	0
PVG 31	0
PVM 02853003	0
PVM 02853005	0
PVM 02853010	0
PVM 02853014	0
PVM 02853023	0
PVM 02854006	0
PVM 02853013	0
Médiacd (mm)	0
Medianacd (mm)	0
Médiavn (mm)	2,5
Medianavn (mm)	0

A figura 5.11 mostra as precipitações médias e medianas acumuladas determinadas pelos Cálculos Diretos e pelo interpolador Vizinho Natural. Os resultados mostram as precipitações determinadas pelo método de interpolação apresentaram valores superiores comparado aos cálculos diretos, ao qual, são validas as observações dos casos II a III. A chuva média é afetada pela falhas, enquanto que a chuva mediana é afetada pelas falhas e pelas medidas de precipitações iguais a zero em boa parte dos pluviômetros presentes no interior da bacia produzindo baixos valores de chuvas acumuladas comparado aos outros métodos.

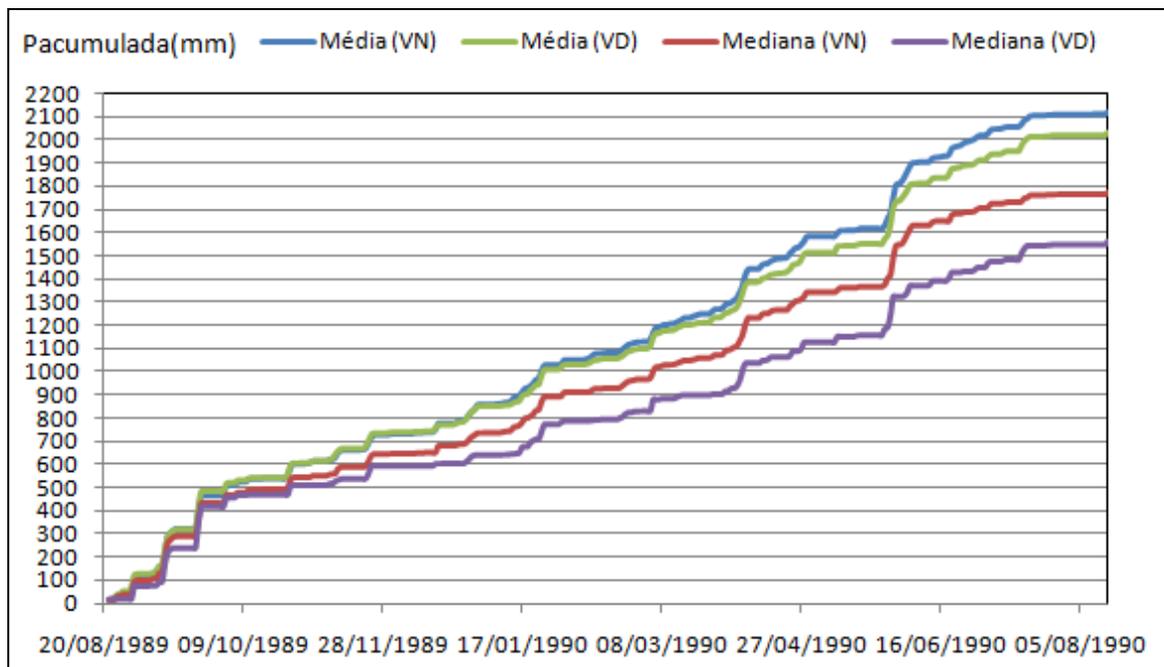


Figura 5. 11 Precipitações Médias e Medias Acumuladas determinadas com o uso do interpolador Vizinho Natural e.pelos Cálculos Diretos. No período de 22/08/1989 a 05/08/1990 na área de drenagem do posto fluviométrico Ponte Mística.

5.4 Teste das séries das chuvas médias e das medianas no modelo IPH II

Esta etapa da pesquisa consiste em testar as séries das precipitações médias e medianas obtidas através da espacialização da precipitação utilizando o método do Vizinho Natural juntamente com as séries obtidas através dos Cálculos Diretos no Modelo chuva-vazão IPH II, com o intuito de verificar qual a melhor estatística pontual nas diferentes escalas.

A eleição da melhor estatística pontual foi avaliada com base nos resultados obtido da função objetivo Nash-Sutcliffe no processo de calibração, mediante o uso da calibração

mono-objetivo SCE-UA implementada na versão Win_IPH 2, como também, no resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe resultante do comparativo dos hidrogramas simulados pelo modelo com os observados numa série de verificação.

As bacias analisadas foram a bacia do rio Íjuí, no exutório denominado de Ponte Mística, e as suas sub-bacias nos exutórios Santo Ângelo, Potiribu, Taboão e Turcato. A sub-rotina utilizada para gerar o campo de precipitações utilizando a grade regular, e posterior cálculo da chuva média e mediana com base nos valores nodais da grade regular encontra-se no Anexo II.

5.4.1 Teste na bacia do Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística

As figuras 5.12 a 5.19 mostram as séries das vazões calculadas (Linhas Azul), as séries das vazões medidas no exutório Ponte Mística (Linha Preta), mais as séries das precipitações médias e medianas calculadas com base nos valores nodais da grade regular e pelos cálculos diretos, ver a parte superior destas figuras.

Na calibração do modelo foi escolhido o período de 02/01/1989 a 31/01/1992. Os parâmetros obtidos na calibração do modelo foram verificados no período de 01/01/1995 a 24/01/1998. O mesmo período na calibração e na verificação foi adotado para as precipitações médias e as medianas obtidas pela interpolação com o Vizinho Natural e pelos Cálculos Diretos.

Os resultados das vazões simuladas, com os parâmetros obtidos da calibração, mediante o uso da calibração mono-objetivo SCE-UA, utilizando as estatísticas pontuais determinadas pelo método do Vizinho Natural estão mostrados nas figuras 5.12 a 5.14. No modelo, modificaram-se as séries das chuvas médias e medianas obtidas pela **interpolação** pelas estimadas utilizando os **cálculos diretos** (Figuras 5.13 e a 5.15). As séries da evaporação e da vazão foram mantidas as mesmas para questões de comparativo do desempenho do modelo para as diferentes entradas de precipitações dos dois métodos mencionados (Tabela 5.11).

Os parâmetros resultantes da calibração com o uso das estatísticas pontuais a partir de 10 execuções estão evidenciados na tabela 5.12. Este número de execuções foi baseado nos estudos de Collischonn & Tucci (2003) para avaliar se o algoritmo SCE-UA encontrou o ótimo global, no qual, neste estudo com o número de 10 execuções percebeu-se a pouca

variação dos parâmetros do modelo. O que se pode dizer que o algoritmo atingiu o ótimo global para as variáveis de entrada (Chuva, Evaporação) e a variável vazão utilizada na otimização dos parâmetros. A função objetivo utilizada foi Nash-Sutcliffe.

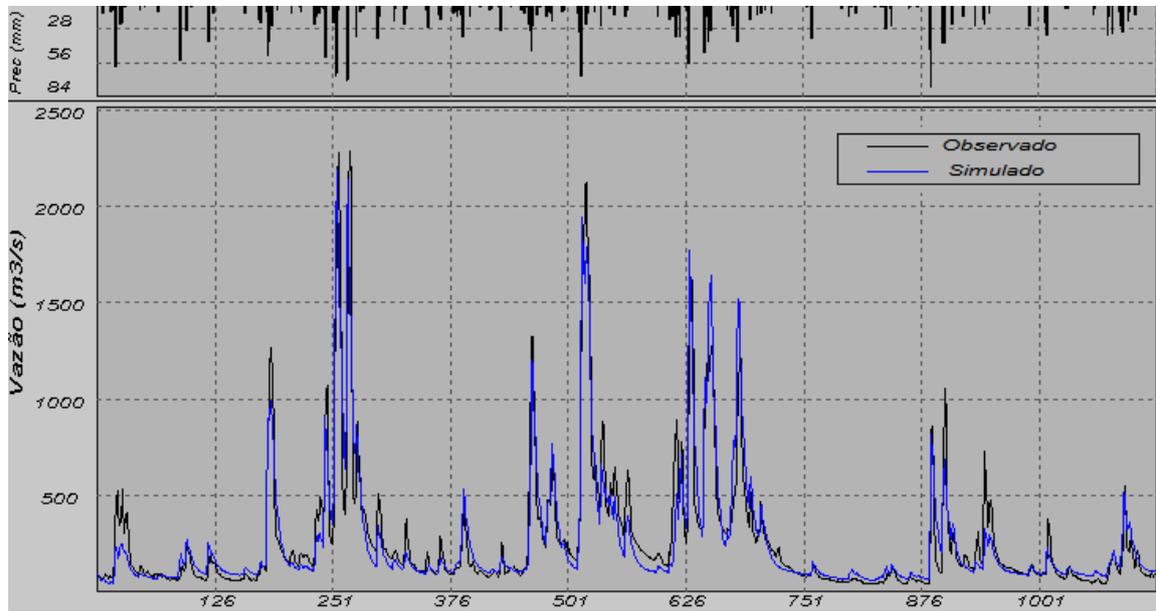


Figura 5. 12 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.

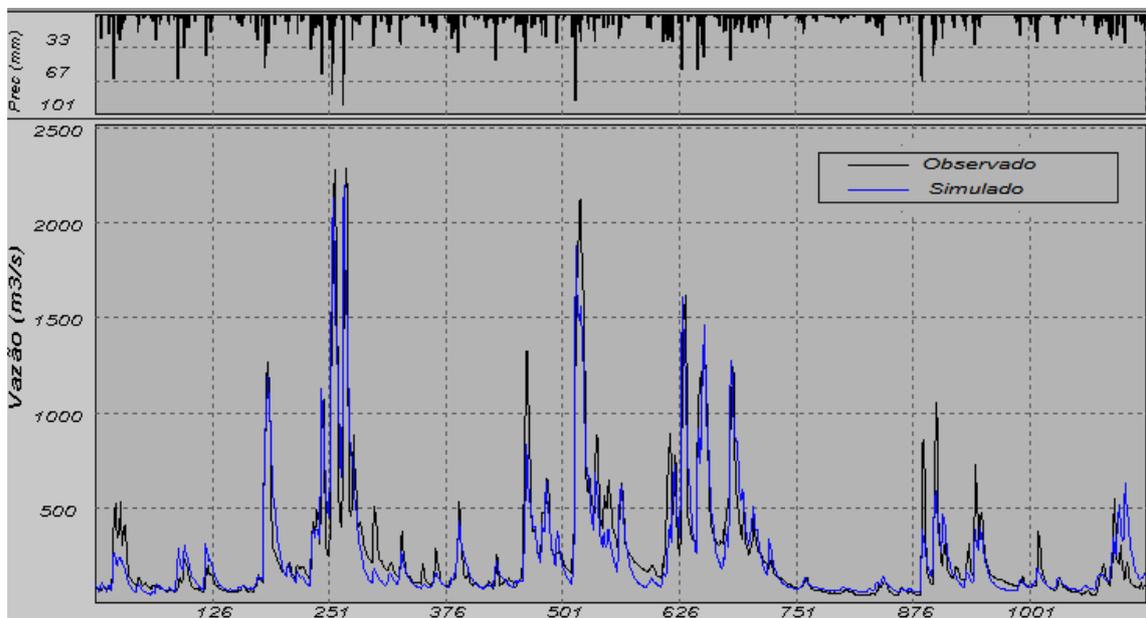


Figura 5. 13 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística

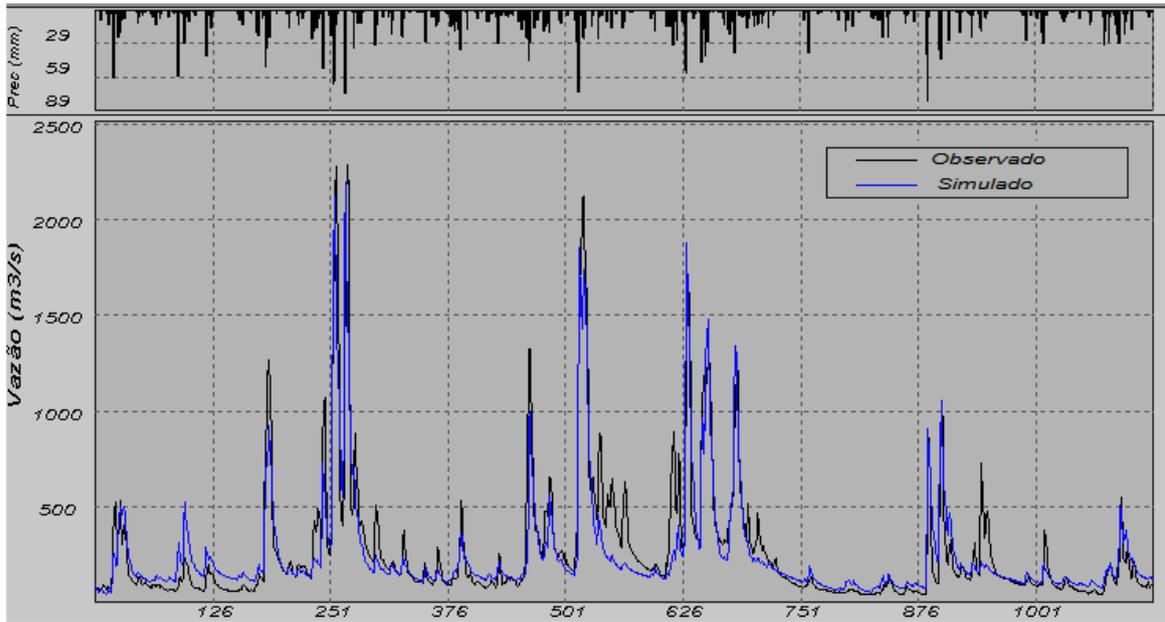


Figura 5. 14 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.

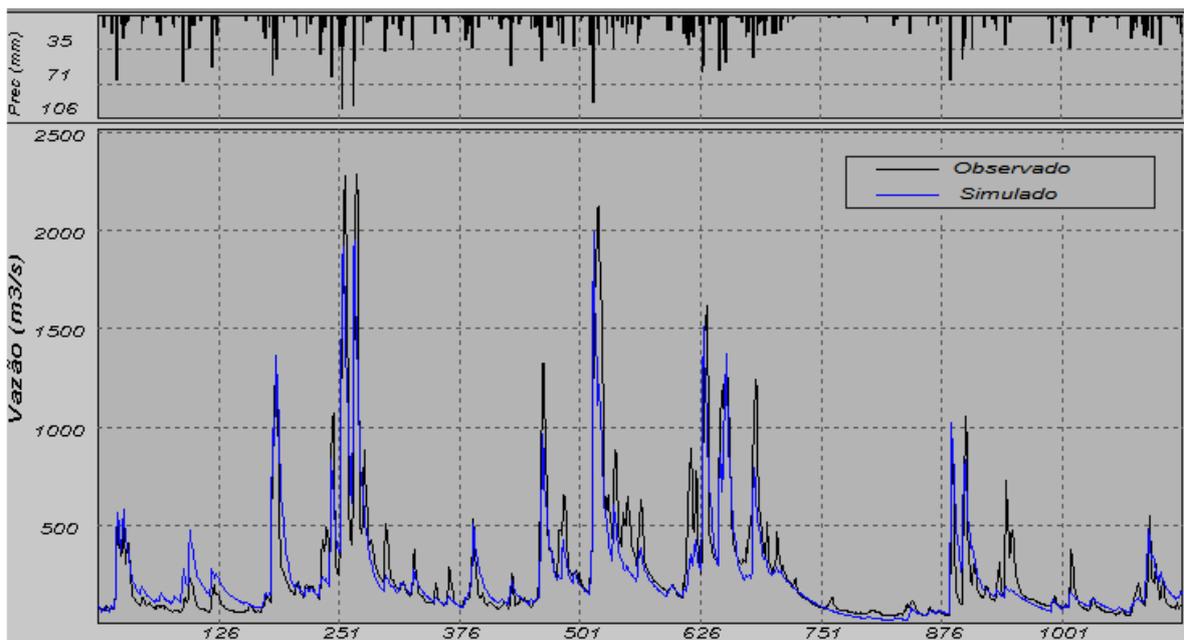


Figura 5. 15 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Ponte Mística.

As figuras 5.16 e a 5.18 mostram as vazões calculadas pelo modelo no processo de verificação, com uso dos parâmetros obtidos do processo de calibração. As entradas foram as

séries de verificação das chuvas médias e medianas utilizando o método do Vizinho Natural mais a série de evaporação.

As figuras 5.17 e a 5.19 mostram as vazões calculadas pelo modelo com as séries de verificação com as chuvas médias e medianas determinadas por Cálculos Diretos. A série de evaporação foi mantida a mesma que foi utilizada pelas séries dos interpoladores. Assim como, as séries de vazão.

As séries de vazões de verificação foram utilizadas neste procedimento para avaliar o desempenho do modelo a partir das vazões simuladas para o conjunto de parâmetros obtidos da calibração com as estatísticas pontuais de entrada (Interpolador x Cálculos diretos), como mostra a tabela 5.12. O coeficiente de Nash-Sutcliffe e o Erro de Volume foram as estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho neste processo de verificação entre as vazões simuladas pelo interpolador e pelos cálculos diretos com as vazões reais.

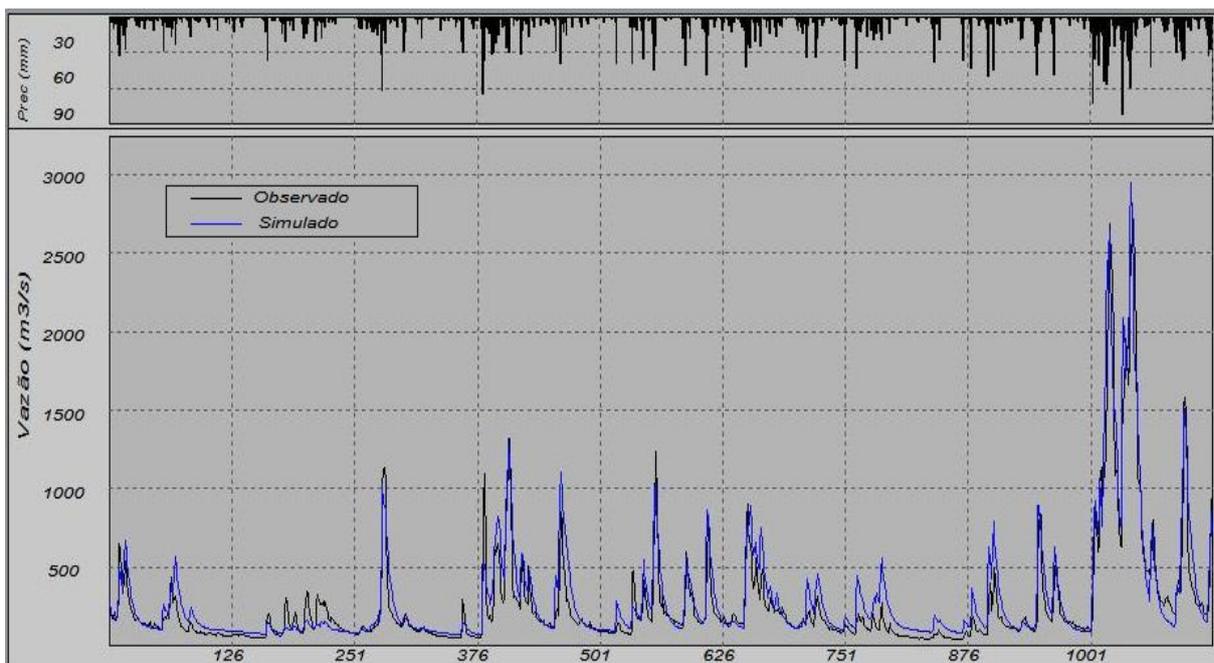


Figura 5. 16 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva média obtida por interpolação, no posto fluviométrico Ponte Mística.

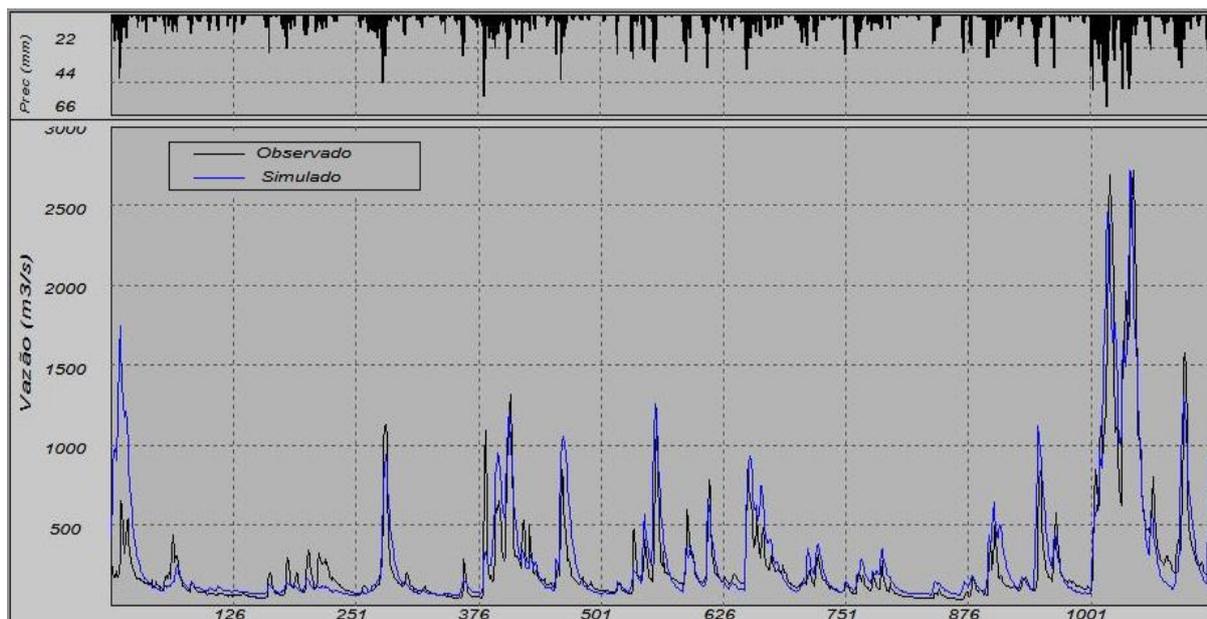


Figura 5. 17 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Diretos, no posto fluviométrico Ponte Mística.

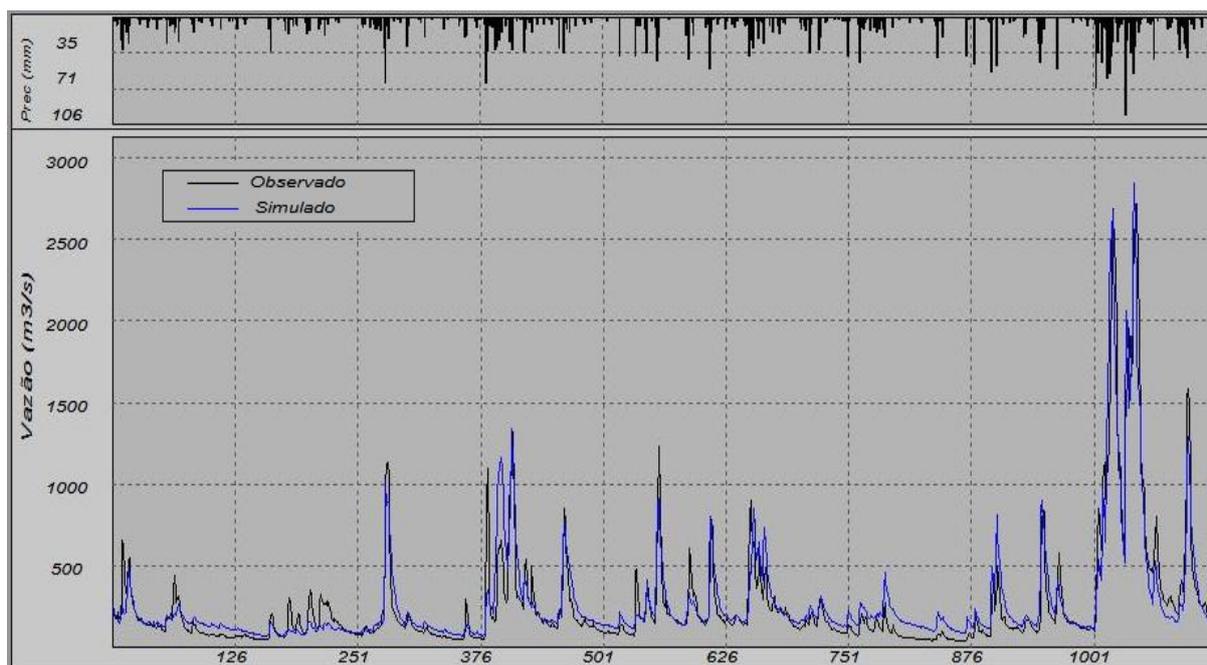


Figura 5. 18 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação, no posto fluviométrico Ponte Mística.

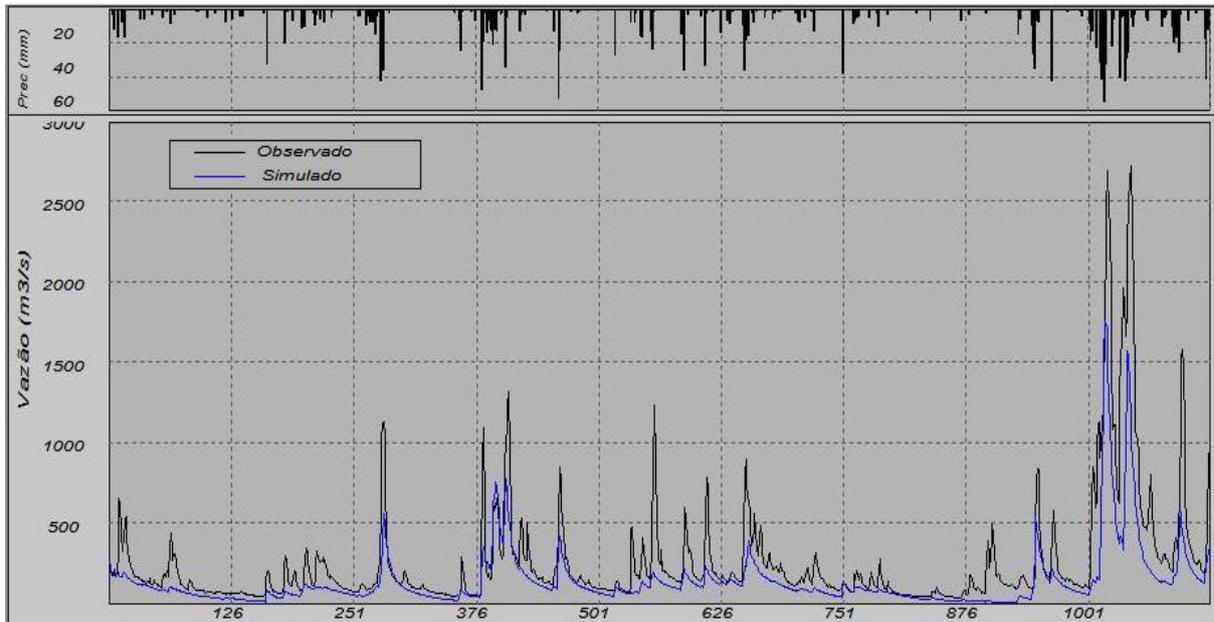


Figura 5. 19 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 01/01/1995 a 24/01/1998 utilizando a chuva mediana obtida pelos Cálculos Diretos, no posto fluviométrico Ponte Mística.

A tabela 5.11 mostra o desempenho do modelo IPH II mediante o comparativo das vazões simuladas e as observadas, utilizando como entrada as séries das chuvas médias e das medianas utilizando o método do vizinho natural, e as obtidas por cálculos diretos. O desempenho foi avaliado com base nos valores do coeficiente de Nash- Sutcliffe (NS), como também pelo erro de volume (ΔV). Os parâmetros dos modelos obtidos no processo de calibração pelos dois métodos estão apresentados na tabela 5.7..

Tabela 5. 11 Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD), da bacia da Ponte Mística

Métodos	Calibração		Verificação	
	NS	ΔV	NS	ΔV
Média (VN)	0,88	-1,69	0,88	16,4
Mediana (VN)	0,85	-5,54	0,87	7,07
Média (CD)	0,84	-5,32	0,73	15,68
Mediana (CD)	0,80	-7,28	0,54	-45,43

Com base na visualização das figuras 5.12 a 5.15, as quais mostraram os resultados das séries na calibração e na verificação produzido pelo modelo, no caso da chuva média, esta, quando determinada pela interpolação, apresentou melhor desempenho tanto na calibração, como NS de 0,88, quanto na verificação comparado ao cálculo direto (Tabela

5.11), com o coeficiente de NS igual a 0,88. A chuva média obtida pelo cálculo direto é afetada pelos valores extremos das medidas dos postos pluviométricos, como também, pelas falhas, ocasionando valores superiores nos picos e valores inferiores nas recessões. Os valores do NS para este método resultou em 0,84 na calibração e 0,73 na verificação.

Tabela 5. 12 Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), da Ponte Mística.

Parâmetros	Média (VN)	Mediana (VN)	Média (CD)	Mediana (CD)
Io	115,8305	161,4828	264,6449	86,5919
Ib	1,0188	1,6516	0,7164	2,6707
H	0,7373	0,3490	0,5148	0,1912
Ks	5,8568	5,0889	6,4548	5,8941
Ksub	18,3868	32,9268	85,4009	36,9481
Rmax	8,5220	0,0000	0,0001	0,0000
Alfa	12,9368	19,9985	19,9990	0,7573

Este estudo mostrou que a chuva mediana obtida por cálculos diretos foi afetada pelos valores de medição da precipitação igual a zero, em boa parte dos pluviômetros posicionados no interior da bacia, no qual foram produzidas chuvas medianas correspondentes a zero. Isso mostra que a mediana acaba não sendo uma estatística representativa do volume de chuva quando utilizada nos cálculos diretos, pois a mesma não refletiu a ocorrência dos volumes, o que ocasionou a não representação dos picos do hidrograma (Figura 5.19).

No processo de calibração, a busca da melhor função objetiva para produzir o bom desempenho promoveu resultados satisfatórios do coeficiente de NS com o uso das estatísticas pontuais determinadas pelos cálculos diretos e pelo interpolador, como mostrou a tabela 5.6. Observou-se que as incertezas dos dados das séries de chuvas medianas, assim como as incertezas das variáveis evaporação e vazão, são compensadas nos parâmetros, no processo de calibração.

O problema do uso da mediana é amenizado quando a mesma é aplicada em um campo de precipitações gerado com base nos valores nodais da grade regular (ver a figura 5.18). Os coeficientes de NS para as séries de chuvas medianas foram de 0,85 na calibração e 0,87 na verificação.

Segundo Burnash (1995), umas das críticas dadas ao uso da calibração automática, é que com o intuito de produzir um bom valor da função objetivo pode acarretar em um conjunto de parâmetros conceitualmente absurdos, ou inválidos. Além disso, estes parâmetros podem não representar bem o melhor comportamento da bacia. Nesta pesquisa pode-se dizer que a melhor estatística pontual pode levar a um bom valor da função objetivo e com resultados de parâmetros do modelo satisfatórios.

A calibração com o uso do algoritmo SCE-UA mostrou-se eficiente, mas acabou resultando em valores no parâmetro R_{max} igual a zero, devido à busca do bom valor da função objetivo Nash-Sutcliffe, como foram os casos das chuvas medianas determinadas pelo método do Vizinho natural, e das chuvas médias e as medianas determinadas pelos Cálculos Diretos. Isto pode ser justificado devido à falta de representatividade destas estatísticas nos volumes de precipitação ocorrentes na bacia.

O melhor resultado do modelo, na calibração e na Verificação ocorreu com o uso da chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural com NS de 0,88, sendo esta estimativa pontual mais representativa nesta escala, não sendo descartado o uso também da mediana determinada após a espacialização. O coeficiente de verificação indica que o modelo é adequado para a utilização, com NS superior a 0.75. Uma estimativa de precipitação pontual representativa pode conduzir a um conjunto de parâmetros do modelo IPH II no processo de calibração com resultados satisfatórios, sendo que os resultados dos parâmetros podem ainda ser ajustados manualmente no processo de calibração manual.

5.4.2 Teste na bacia do Ijuí no posto fluviométrico Santo Ângelo

Para a calibração do modelo foi escolhido o período de 02/01/1989 a 31/01/1992. Os parâmetros obtidos na calibração deste foram verificados no período de 12/01/2002 a 30/12/2003. Estes períodos de calibração e verificação foram adotados para as precipitações médias e as medianas obtidas pela interpolação e pelos cálculos diretos.

As figuras 5.20 e a 5.22 mostram os resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando os parâmetros provenientes da calibração, com as séries das chuvas médias e medianas com o método do Vizinho Natural, e na figuras 5.21 e a 5.23 são mostradas os resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando os parâmetros provenientes da

calibração utilizando as séries das chuvas médias e das medianas determinadas por Cálculos Diretos, para a mesma série de evaporação como entrada, e de vazão fornecida para a calibração dos modelos utilizando estas estéticas pontuais de entrada.

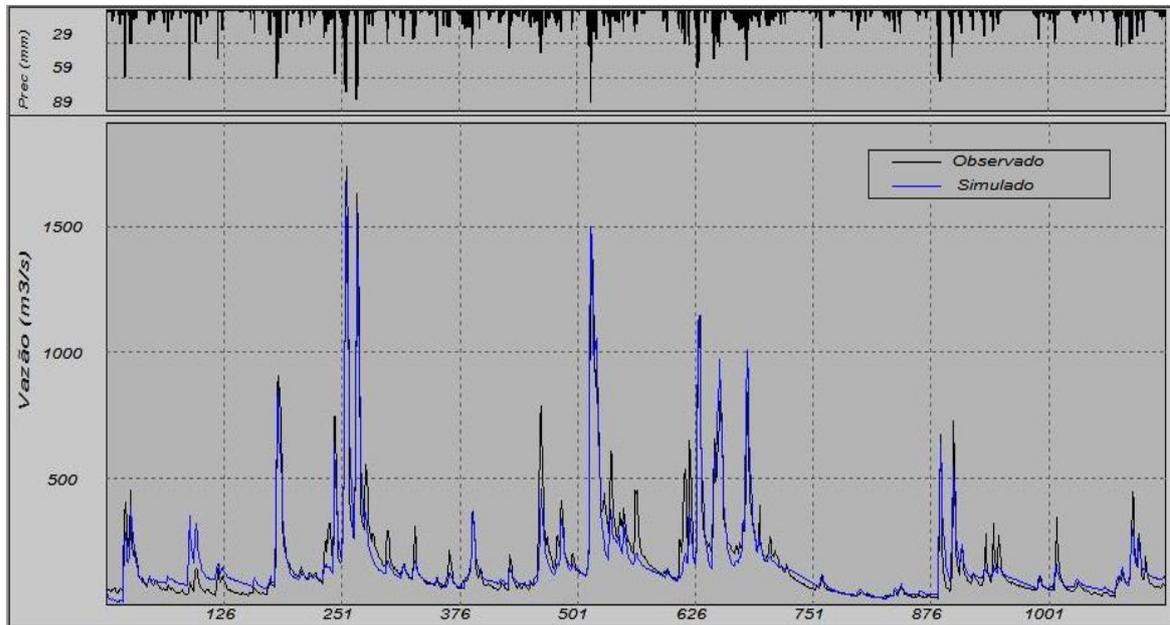


Figura 5. 20 Calibração do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtidas por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

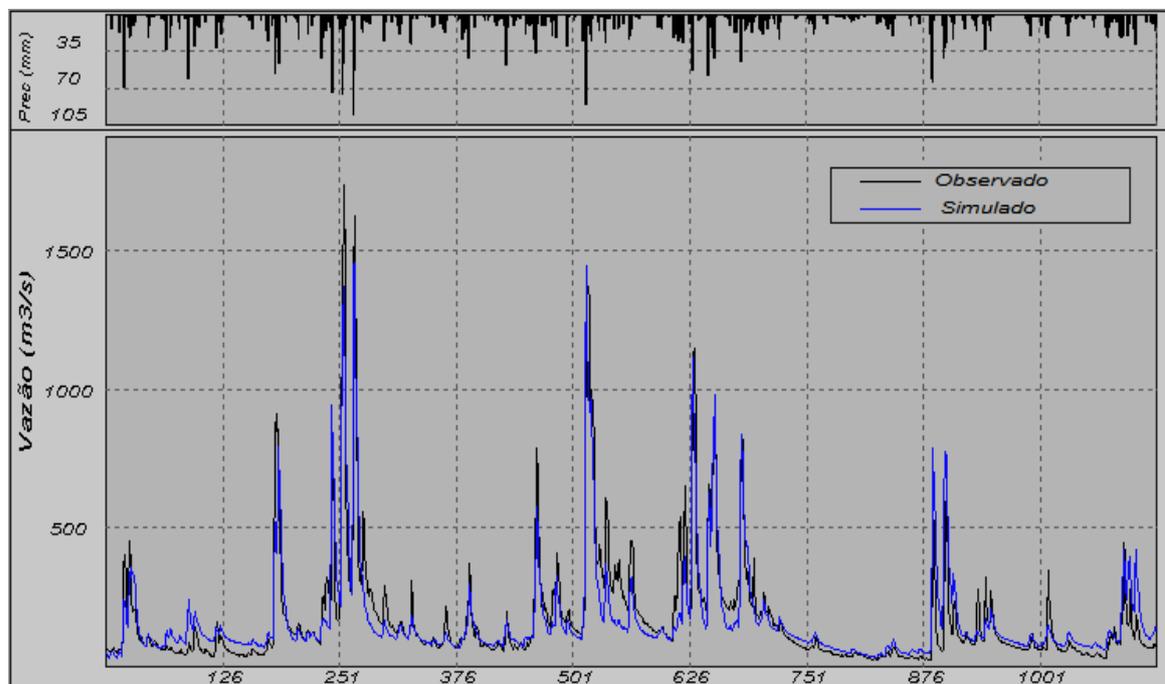


Figura 5. 21 Calibração do Modelo IPH II com a série de precipitações médias pelos cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

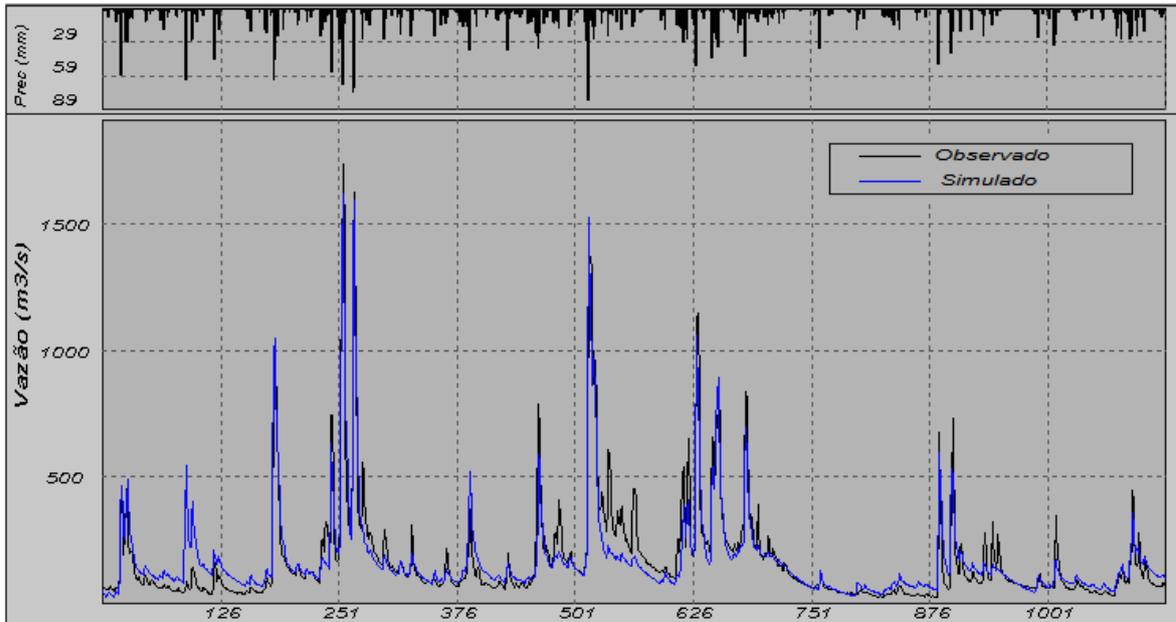


Figura 5. 22 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtidas por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

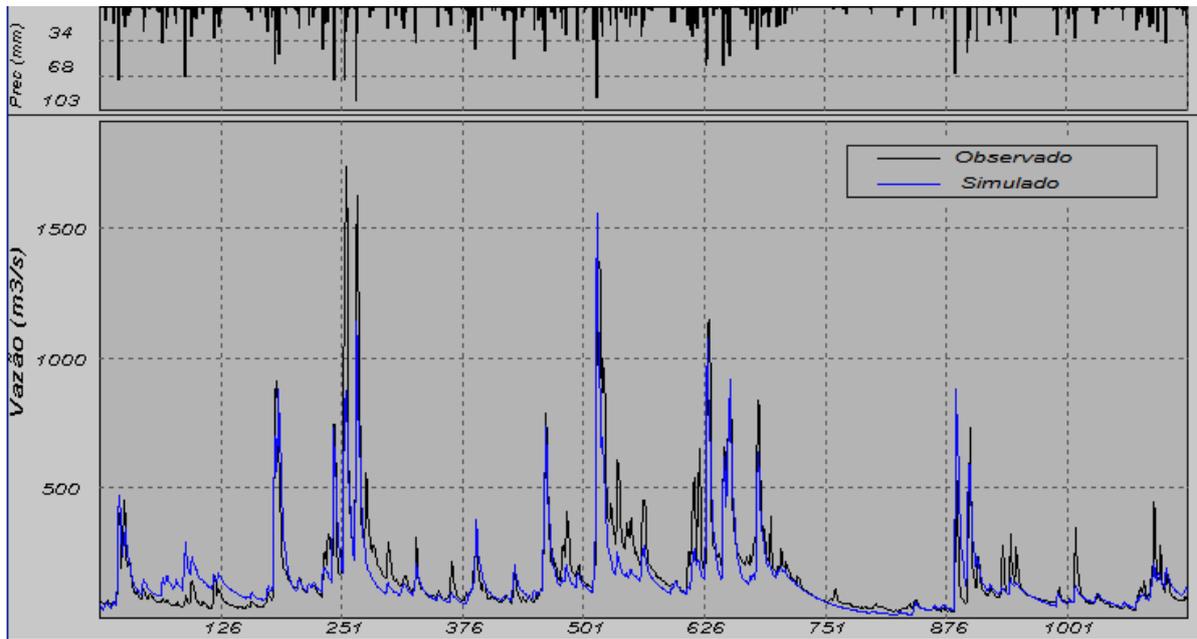


Figura 5. 23 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtidas por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

As figuras 5.24 e a 5.26 mostram as séries das vazões calculadas e as observadas na série de verificação, com os parâmetros obtidos do processo de calibração do modelo

utilizando as chuvas médias e as medianas com o método do Vizinho Natural, e nas figuras 5.25 e 5.27 são mostrados os resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas, determinadas por Cálculos Diretos.

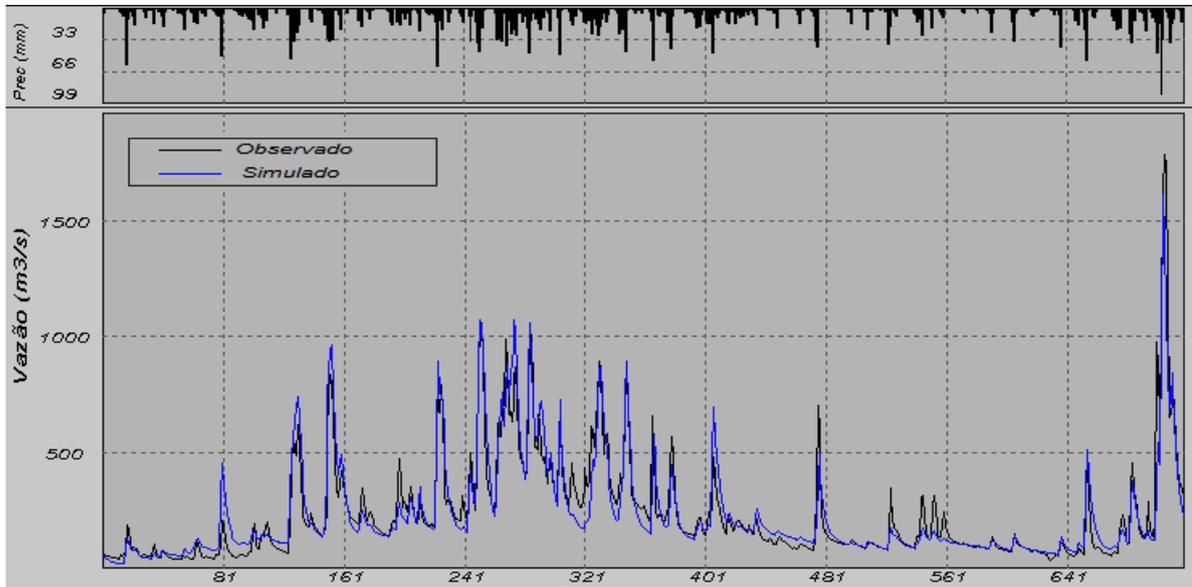


Figura 5. 24 Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

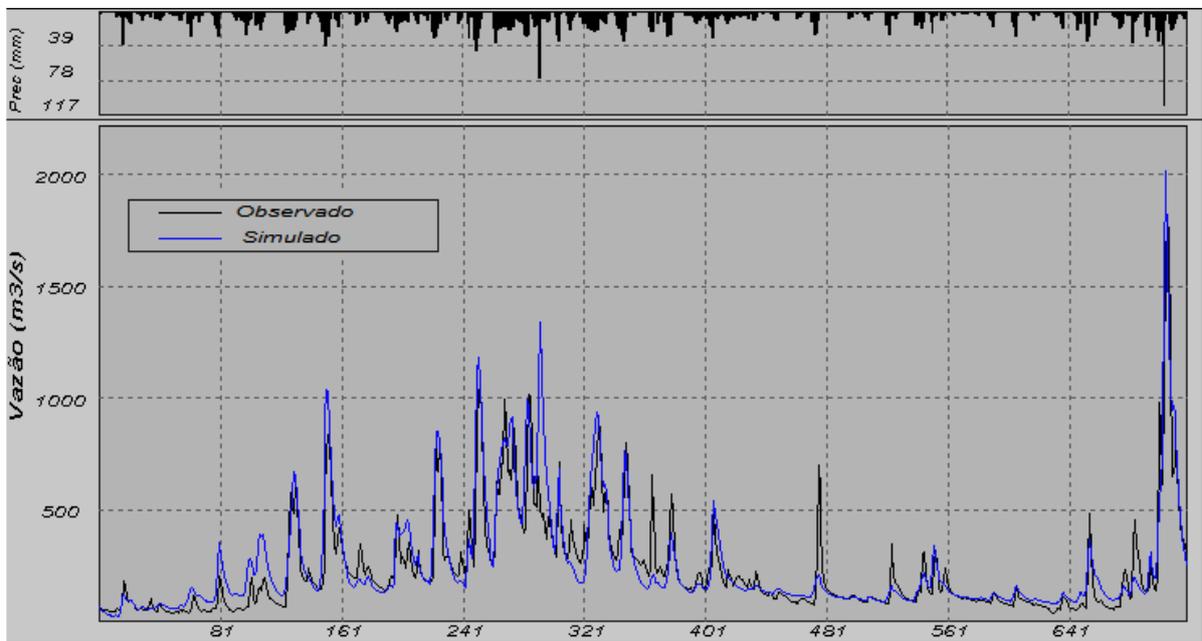


Figura 5. 25 Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

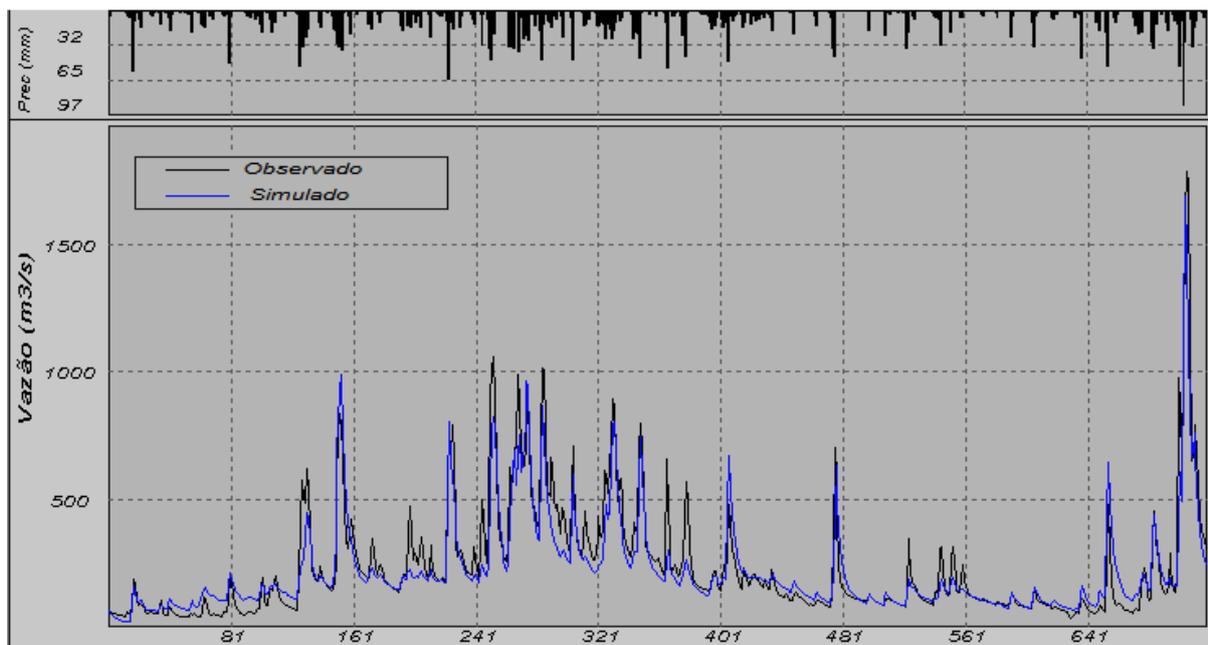


Figura 5. 26 Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

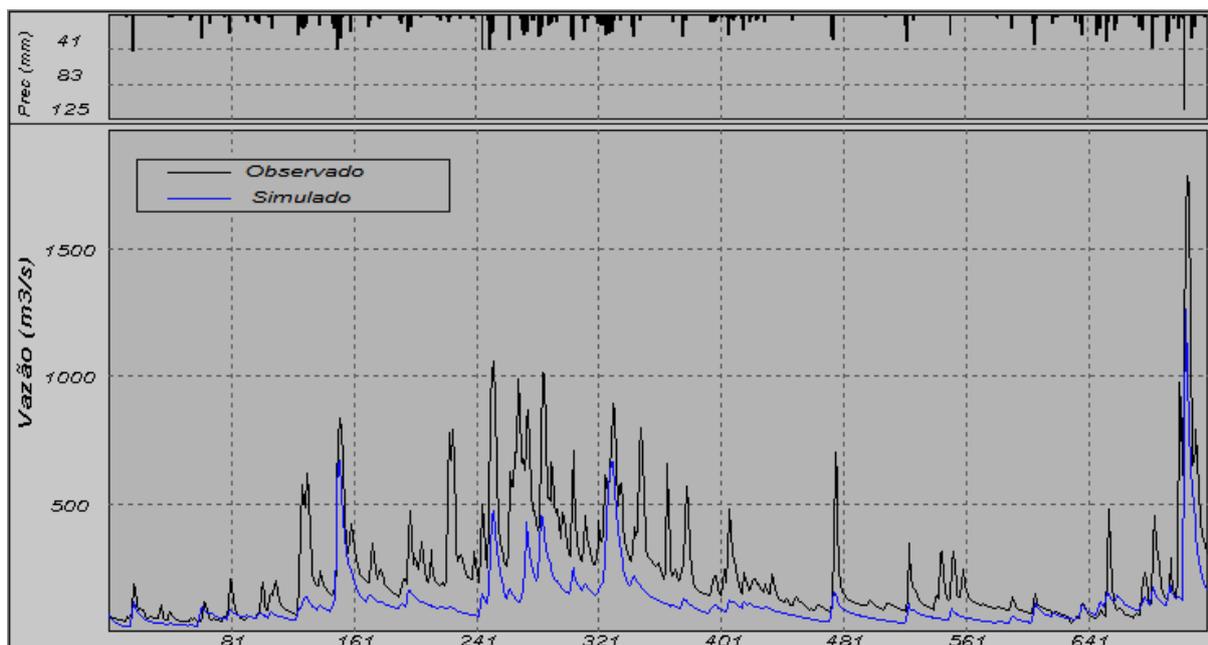


Figura 5. 27 Verificação do Modelo IPH II com a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 12/01/2002 a 30/12/2003, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

A tabela 5.13 mostra o desempenho do modelo IPH II mediante o comparativo das vazões simuladas e as observadas utilizando como entrada as séries das chuvas médias e as

medianas utilizando o método do vizinho natural, e as obtidas por cálculos diretos, a tabela 5.14 mostra os parâmetros para os dois métodos.

Tabela 5. 13 Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e o dos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Santo Ângelo.

Métodos	Calibração		Verificação	
	NS	ΔV	NS	ΔV
Média (VN)	0,89	-1,98	0,88	1,12
Mediana (VN)	0,87	0,61	0,87	-12,34
Média (CD)	0,84	-0,18	0,79	7,85
Mediana (CD)	0,77	-9,29	0,32	-50,17

Com base na visualização das figuras 5.20 a 5.23, que mostram os resultados das séries na calibração e na verificação produzido pelo modelo, no caso da chuva média, esta, quando determinada pela interpolação, apresenta melhor desempenho tanto na calibração quanto na verificação comparado ao cálculo direto (Tabela 5.13), com o coeficiente de NS igual a 0,88. A chuva média obtida pelo cálculo direto é afetada pelos valores extremos das medidas dos postos pluviométricos, ocasionando valores superiores nos picos e valores inferiores nas recessões. Os valores do NS foram de 0,84 na calibração e de 0,73 na verificação para as séries de chuva média proveniente deste método.

Tabela 5. 14 Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas, determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Santo Ângelo.

Parâmetros	Média (VN)	Mediana (VN)	Média (CD)	Mediana (CD)
Io	62,0427	66.1435	114.331	84,6514
Ib	2,7601	5,3161	2,2988	4,3785
H	0,61737	0,26449	0,33845	0,1249
Ks	3,4574	3,0767	3,9514	3,8984
Ksub	28,6663	33,1211	47,7748	40,6267
Rmax	8,9911	0,0001	0,0001	0,0000
Alfa	1,4989	0,4496	2,0999	0,9306

O parâmetro Rmax, que representa a capacidade máxima de armazenamento por interceptação, resultou em valores nulos no processo de calibração do modelo. Isso ocorreu para a chuva mediana determinada pelo interpolador, assim com, para as chuvas médias e as

medianas determinadas pelos cálculos diretos. A chuva mediana obtida por cálculo direto foi afetada pelos valores dos pluviômetros com medidas de precipitação igual a zero no interior dos limites da bacia, no qual produziu chuvas iguais a zero em boa parte dos dias analisados conduzindo a ao baixo desempenho no processo de verificação dos parâmetros (Figura 5.27). Isso confirma o mesmo que aconteceu na escala analisada anteriormente, quando foi feita a análise da mediana obtida por cálculos diretos. Esta estatística pontual acaba não sendo uma estatística representativa. O desempenho do coeficiente de NS do modelo, para a chuva mediana, nesta escala, foi de 0,77 na calibração e 0,32 na verificação, além disso, a chuva mediana por este método apresentou alto erro de volume correspondendo a - 50,17 na verificação.

O resultado dos parâmetros foi semelhante ao observado ao que ocorreu na Ponte Mística. A calibração com o uso do algoritmo SCE-UA mostrou-se eficiente, mas acabou resultando em valores no parâmetro R_{max} igual a zero, devido a busca do bom valor da função objetivo Nash-Sutcliffe, como foram os casos das chuvas medianas determinadas pelo método do Vizinho natural, e das chuvas médias e das medianas determinadas pelos Cálculos Diretos (Tabela 14). Isto pode ser justificado pela falta de representatividade destas estatísticas no volumes de precipitação ocorrentes na bacia.

O método de calibração SCE-UA produziu valores iguais a zero do parâmetro que representa a interceptação, tanto para a chuva mediana determinada pelo método do Vizinho natural, como para as chuvas médias e as medianas determinadas pelos cálculos diretos. Os parâmetros R_{max} e o I_0 foram afetados, como o ocorrido na escala anteriormente analisada, mas apresentaram melhores resultados com a chuva média determinada pelo método de interpolação com o NS de 0,88 na verificação. A chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural foi a estatística pontual mais representativa para esta escala, não sendo também descartado o uso da mediana pelo mesmo método com NS de 0,87.

5.4.3 Teste na bacia do Potiribu

O período da calibração do modelo para a bacia do rio Potiribu foi 02/01/1989 a 31/01/1992. Os parâmetros obtidos na calibração do modelo foram verificados no período de 01/05/1992 a 30/05/1994. O mesmo período na calibração e na verificação foi adotado para as precipitações médias e medianas obtidas pela interpolação e pelos cálculos diretos.

As figuras 5.28 e a 5.30 mostram os resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando os parâmetros provenientes da calibração, com as séries das chuvas médias e medianas com o método do Vizinho Natural, e na figuras 5.29 e a 5.31 são mostradas os resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando os parâmetros provenientes da calibração utilizando as séries das chuvas médias e das medianas determinadas por Cálculos Diretos, para a mesma série de evaporação como entrada, e de vazão fornecida para a calibração dos modelos utilizando estas estéticas pontuais de entrada.

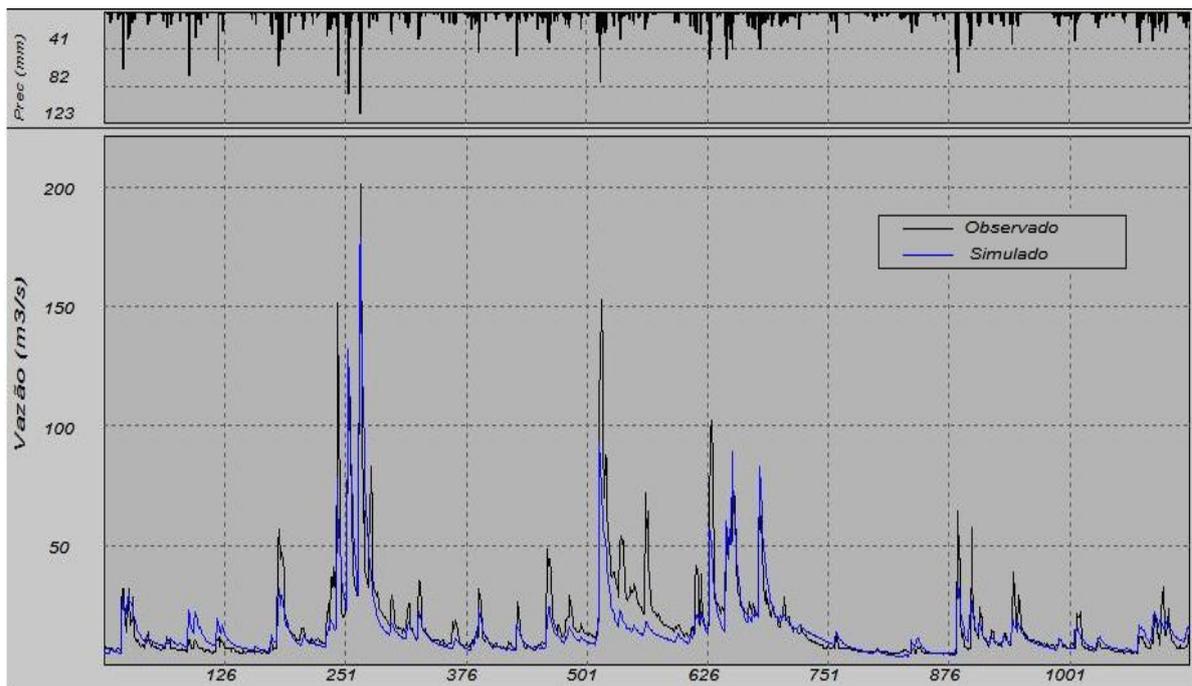


Figura 5. 28 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.

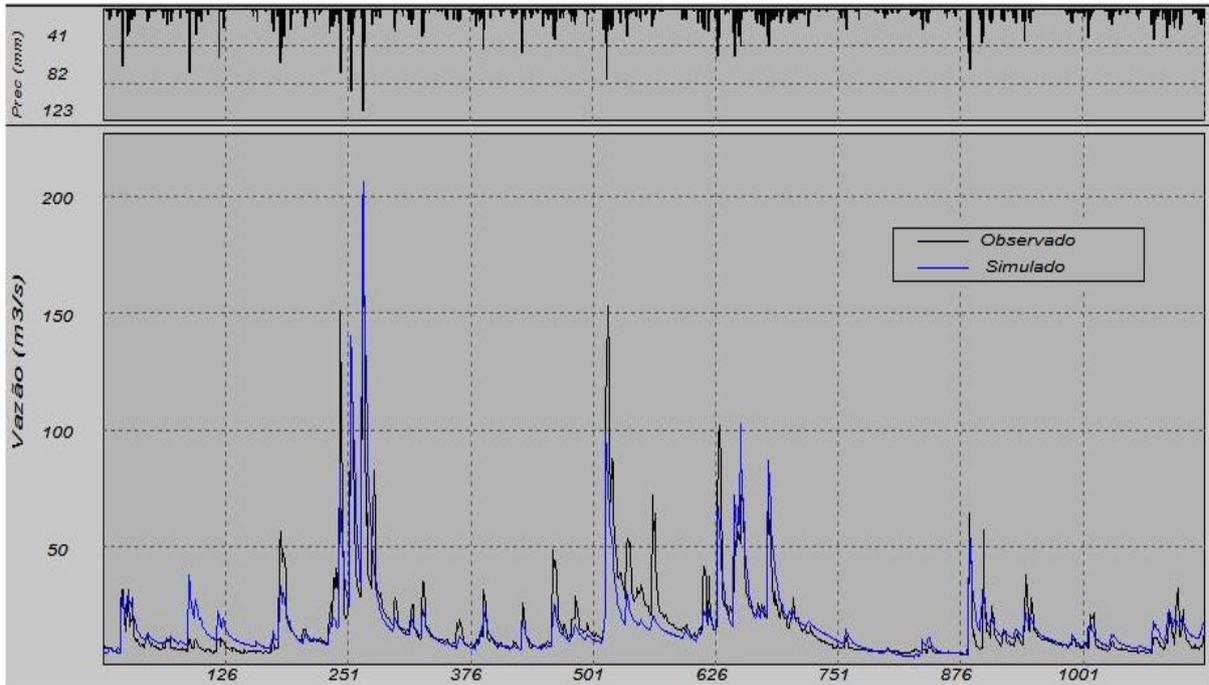


Figura 5. 29 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.

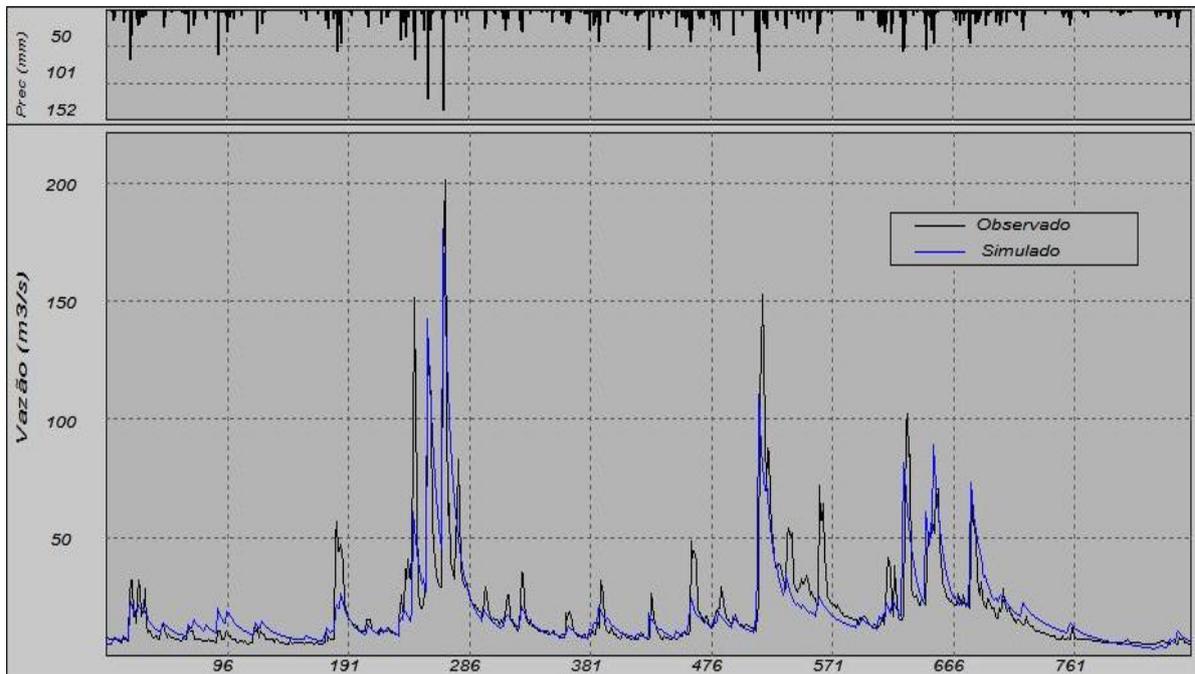


Figura 5. 30 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.

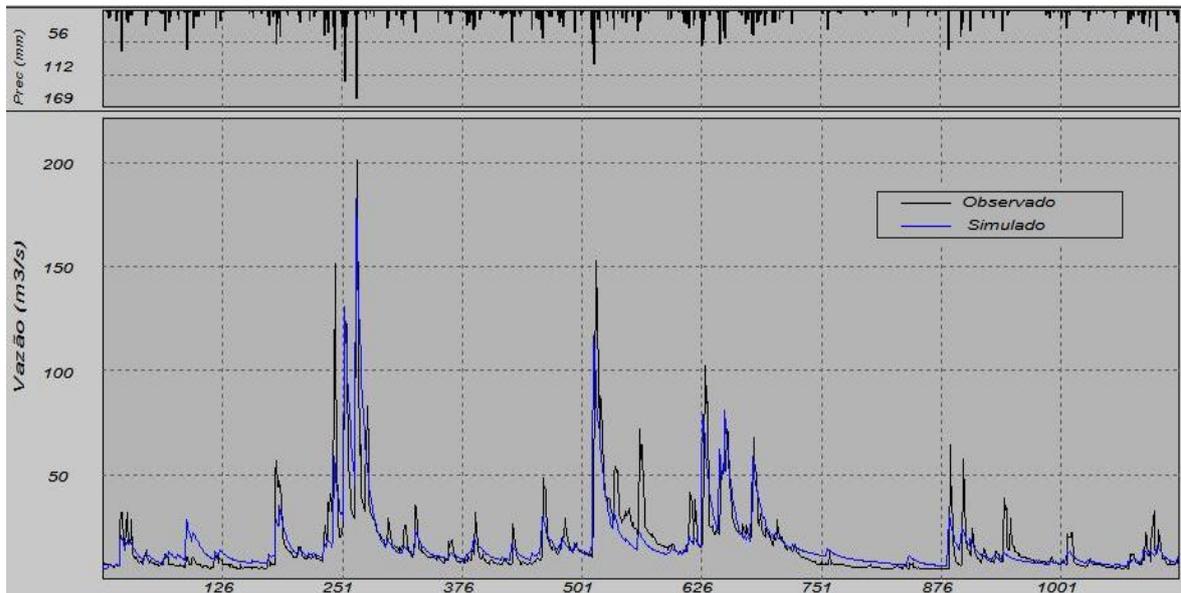


Figura 5. 31 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, na bacia do Potiribu.

As figuras 5.32 e a 5.34 mostram as séries das vazões calculadas e as observadas na série de verificação, com os parâmetros obtidos do processo de calibração do modelo utilizando as chuvas médias e as medianas com o método do Vizinho Natural, e nas figuras 5.33 e a 5.35 são mostradas o resultados das vazões calculadas pelo modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas, determinadas por Cálculos Diretos.

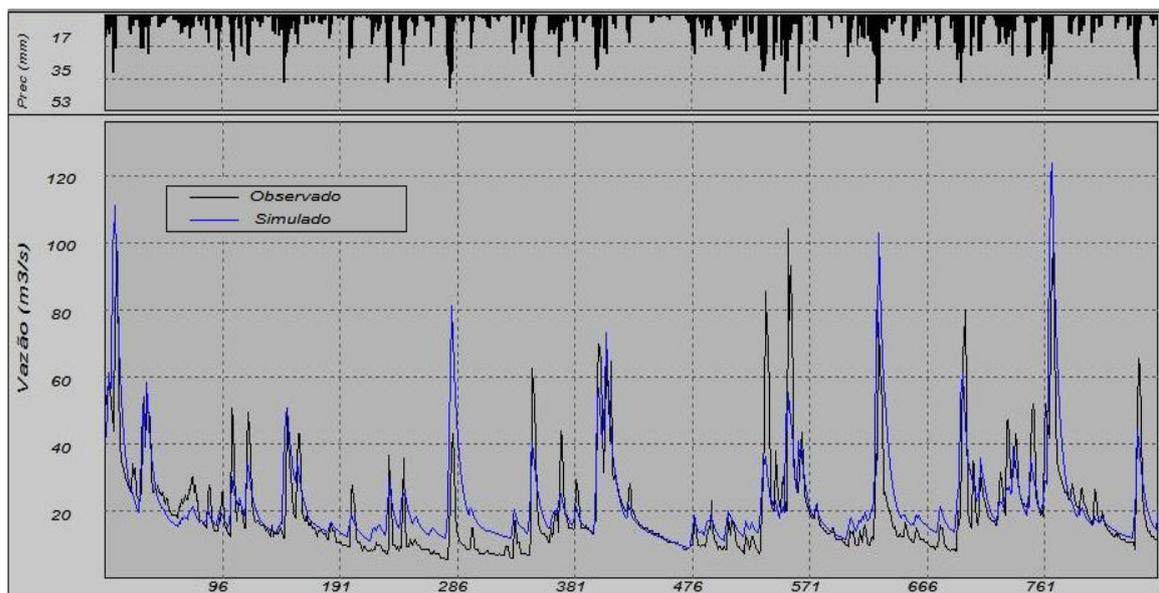


Figura 5. 32 Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por interpolação, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.

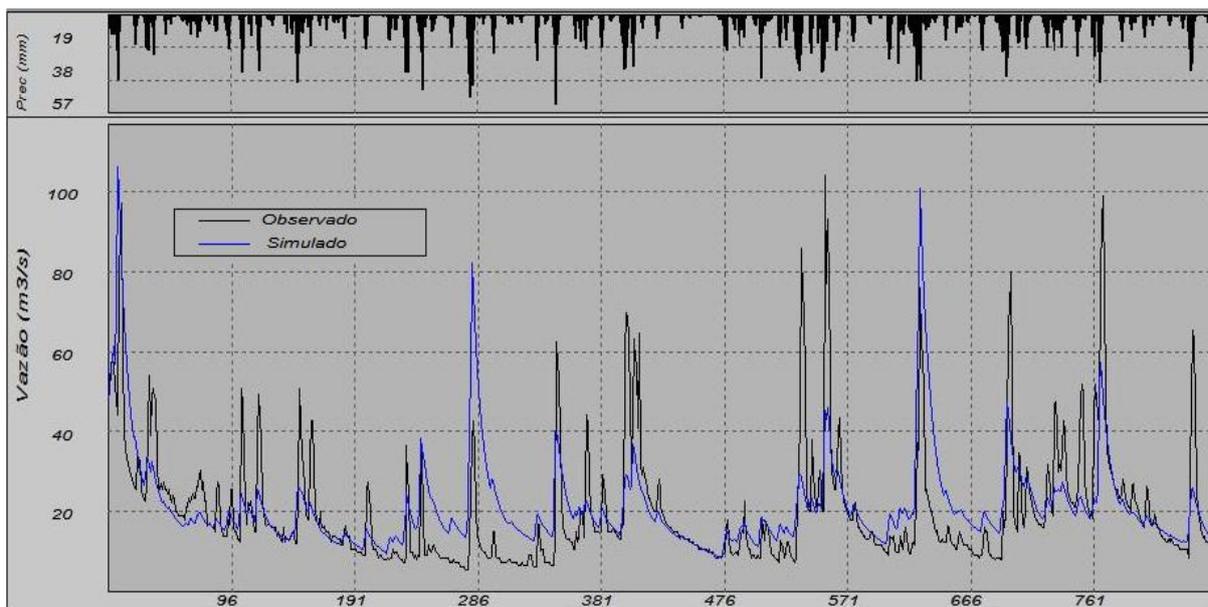


Figura 5. 33 Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.

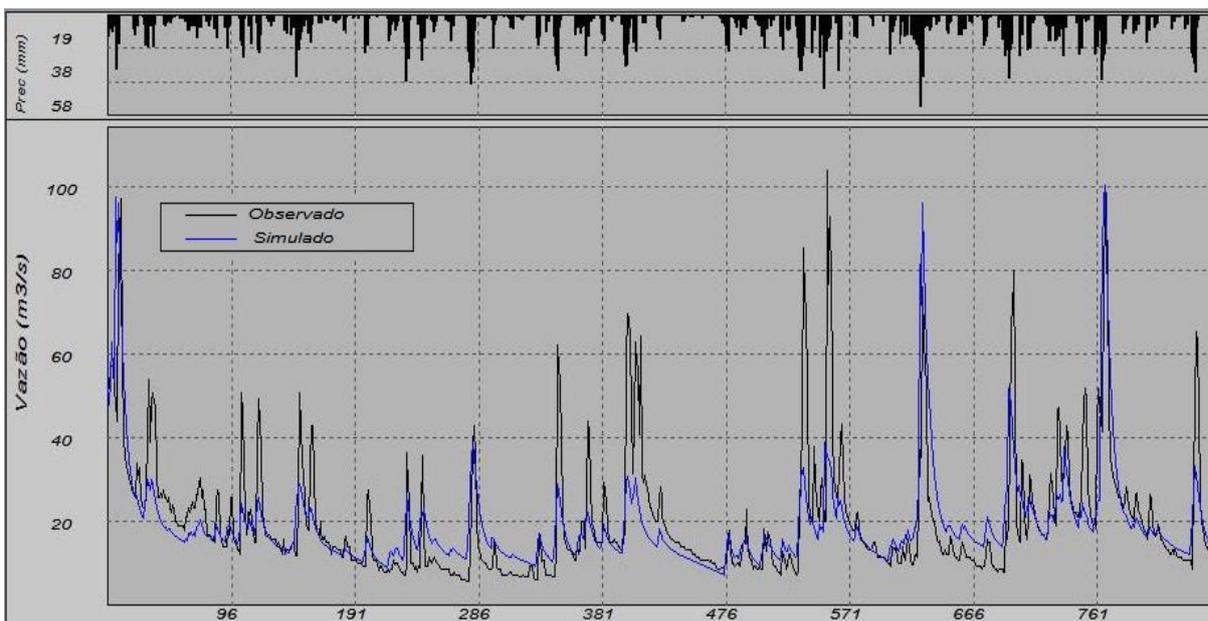


Figura 5. 34 Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por interpolação, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.

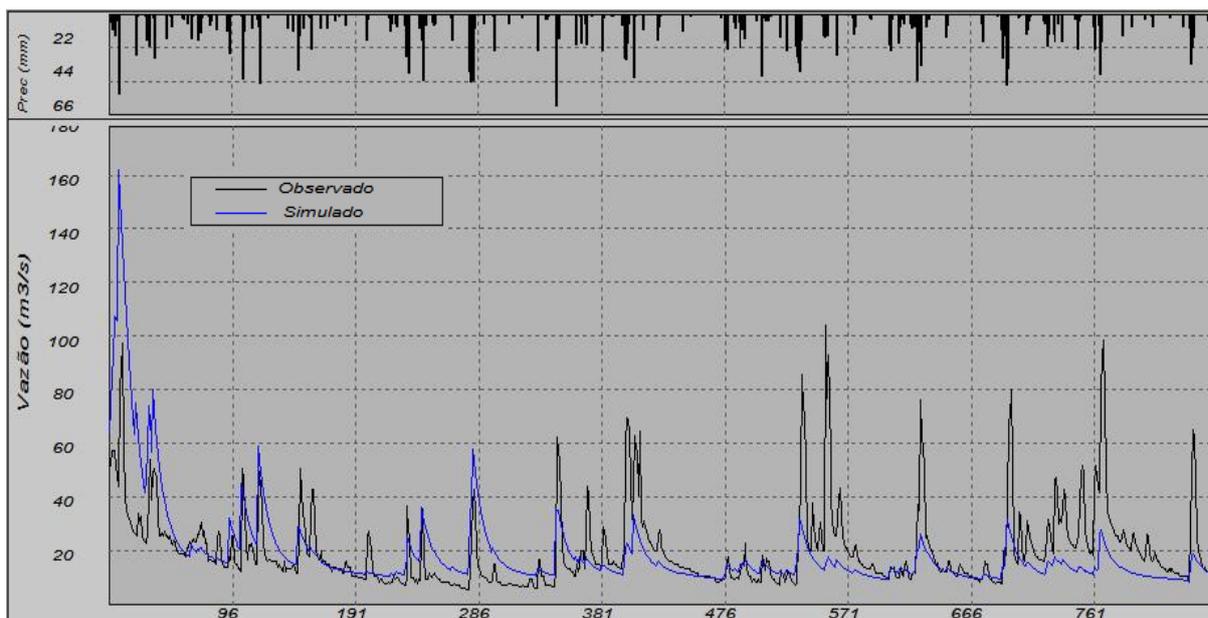


Figura 5. 35 Verificação do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 01/05/1992 a 30/05/1994, na bacia do Potiribu.

A tabela 5.15 mostra o comparativo do desempenho do modelo utilizando como dados de entrada as séries das chuvas médias e as medianas utilizando o método do vizinho natural com as chuvas determinadas pelos cálculos diretos. A tabela 5.16 mostra os parâmetros dos dois métodos.

Tabela 5. 15 Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (VD), na bacia do Potiribu.

Métodos	Calibração		Verificação	
	NS	ΔV	NS	ΔV
Média (VN)	0,75	-11,12	0,55	12,53
Mediana (VN)	0,75	-0,44	0,53	-4,67
Média (CD)	0,72	0,25	0,38	6,38
Mediana (CD)	0,71	1,00	-0,14	-5,16

Com base na Tabela 5.16, observou-se que a série da chuva média determinada pelo interpolador apresentou melhor desempenho na calibração, com NS de 0,75, comparado ao NS de 0,72 das séries da chuva média obtida pelos cálculos diretos. Na verificação a chuva determinada pelo interpolador também foi melhor, com NS de 0,55, comparado ao NS de 0,38 da chuva média obtida pelos cálculos diretos. A chuva mediana obtida pela interpolação apresentou melhor desempenho, com NS de 0,75, comparada à chuva mediana determinada por cálculos diretos, com o coeficiente NS 0,71 na calibração, e com NS e de 0,53 a -0,14 na

verificação. Na verificação dos parâmetros nenhum dos métodos analisados conseguiu representar bem os picos do hidrograma em certos períodos, e da mesma forma com as recessões para certos períodos das séries de vazões analisadas.

Tabela 5. 16 Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas, determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (VD), na bacia do Potiribu.

Parâmetros	Média (VN)	Mediana (VN)	Média (VD)	Mediana (VD)
Io	94,4172	90,6772	86,7080	88,7130
Ib	2,3610	2,6660	2,7671	2,2319
H	0,7319	0,7193	0,6505	0,9077
Ks	5,3027	5,0939	7,7508	8,4427
Ksub	13,0746	14,8085	28,4009	10,0001
Rmax	9,0000	7,48960	2,7000	7,4731
Alfa	0,0075	0,13200	0,0026	3,3386

Com a redução da escala da bacia ocorre um aumento nas incertezas dos dados. Estas são compensadas nos parâmetros do modelo no processo de calibração, apresentando bom desempenho do modelo para as estatísticas pontuais determinadas pelos cálculos diretos e pelo interpolador. Apesar disso, a chuva média obtida pela interpolação apresentou melhor resultado nesta escala analisada com o NS de 0,55 na verificação. Os parâmetros como o Io, Ksub, Rmax e o Alfa variaram pouco para as estatísticas pontuais determinadas pelos dois métodos, apresentando valores próximos.

5.4.4 Teste na bacia do Taboão

O período da calibração do modelo para a bacia do rio Taboão foi de 12/08/2002 a 30/12/2003. Os parâmetros obtidos na calibração do modelo foram verificados no período de 04/02/2008 a 18/12/2008. O mesmo período na calibração e na verificação foi adotado para as precipitações médias e as medianas obtidas pela interpolação e pelos cálculos diretos

As figuras 5.36 e a 5.38 mostram os resultados na calibração do modelo utilizando as séries das chuvas médias com o método do Vizinho Natural, e as figuras 5.37 e 5.39 mostram os resultados na calibração do modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas, determinadas por Cálculos Diretos.

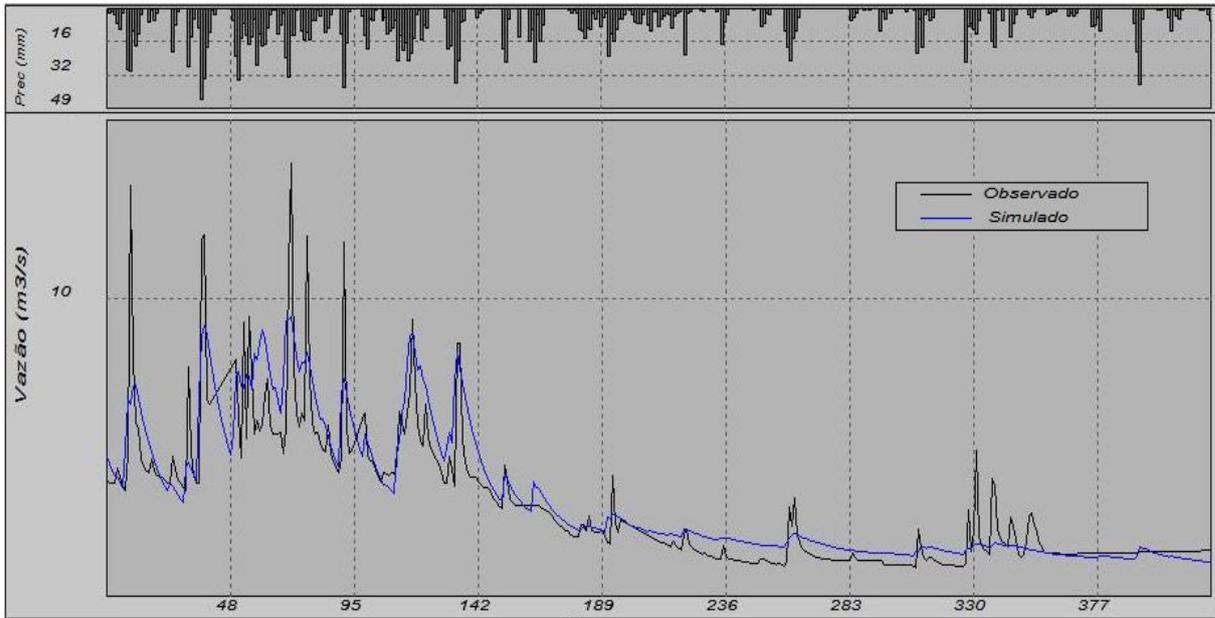


Figura 5. 36 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.

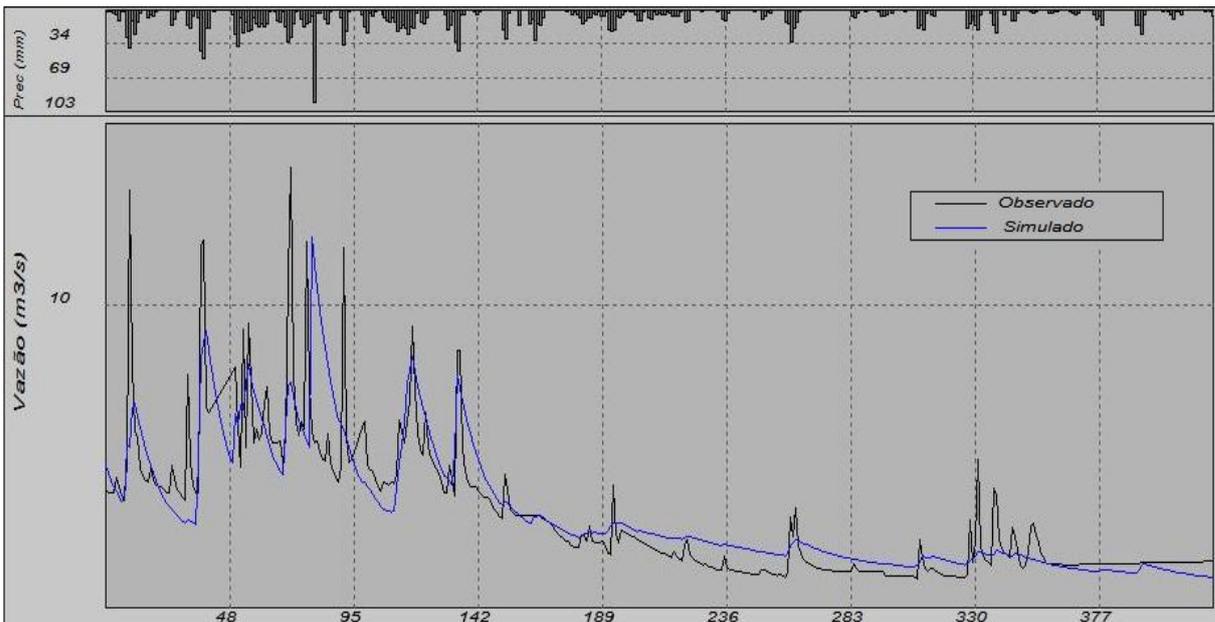


Figura 5. 37 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.

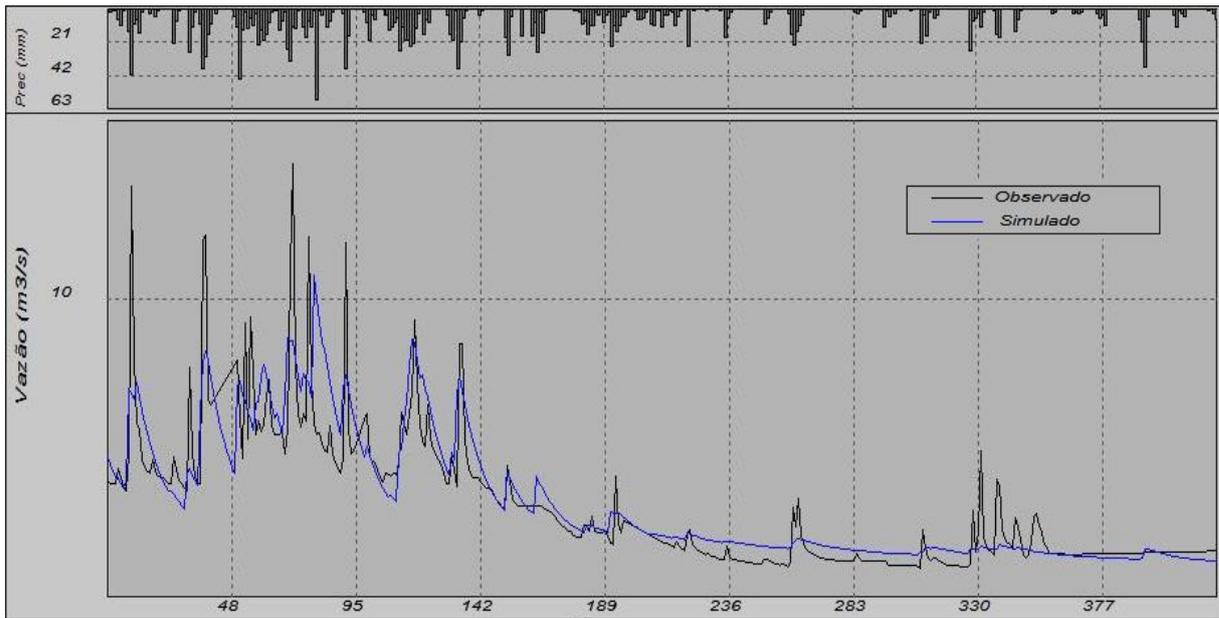


Figura 5. 38 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações mediana obtida por interpolação, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.

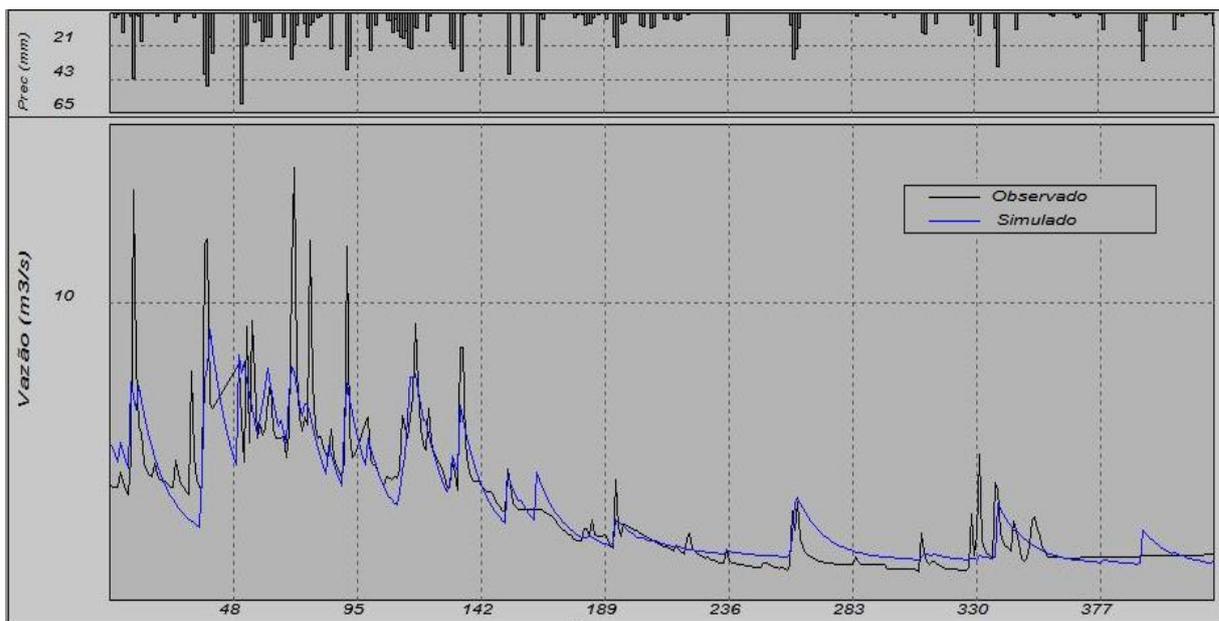


Figura 5. 39 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003 na bacia do Taboão.

As figuras 5.40 e 5.42 mostram as séries de verificação resultantes dos dados da calibração do modelo utilizando as chuvas médias e as medianas com o método do Vizinho Natural, e na figura 5.41 e a 5.43 são mostradas os resultados da verificação do modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas determinadas por Cálculos Diretos.

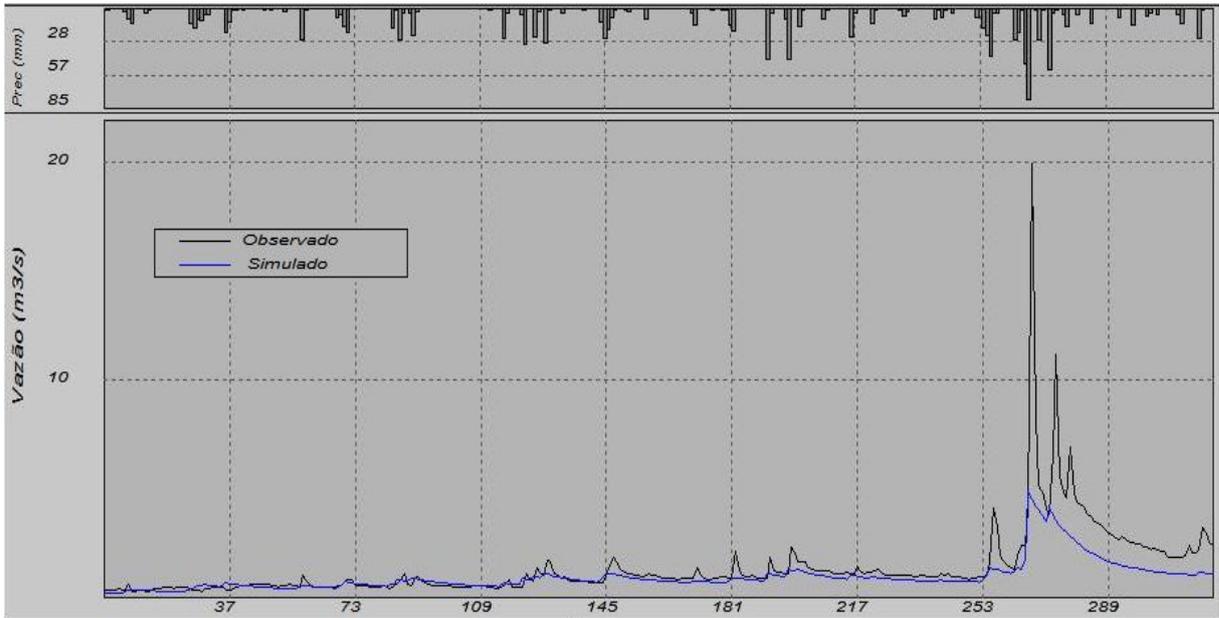


Figura 5. 40 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva média obtida por interpolação na bacia do Taboão.

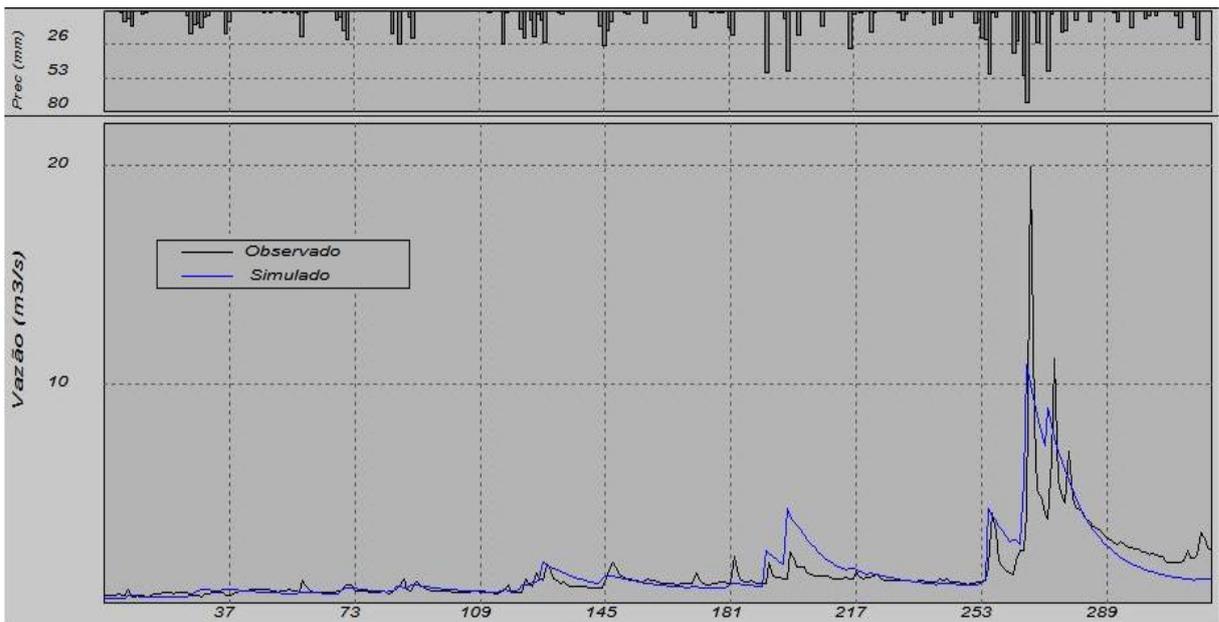


Figura 5. 41 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Direto na bacia do Taboão.

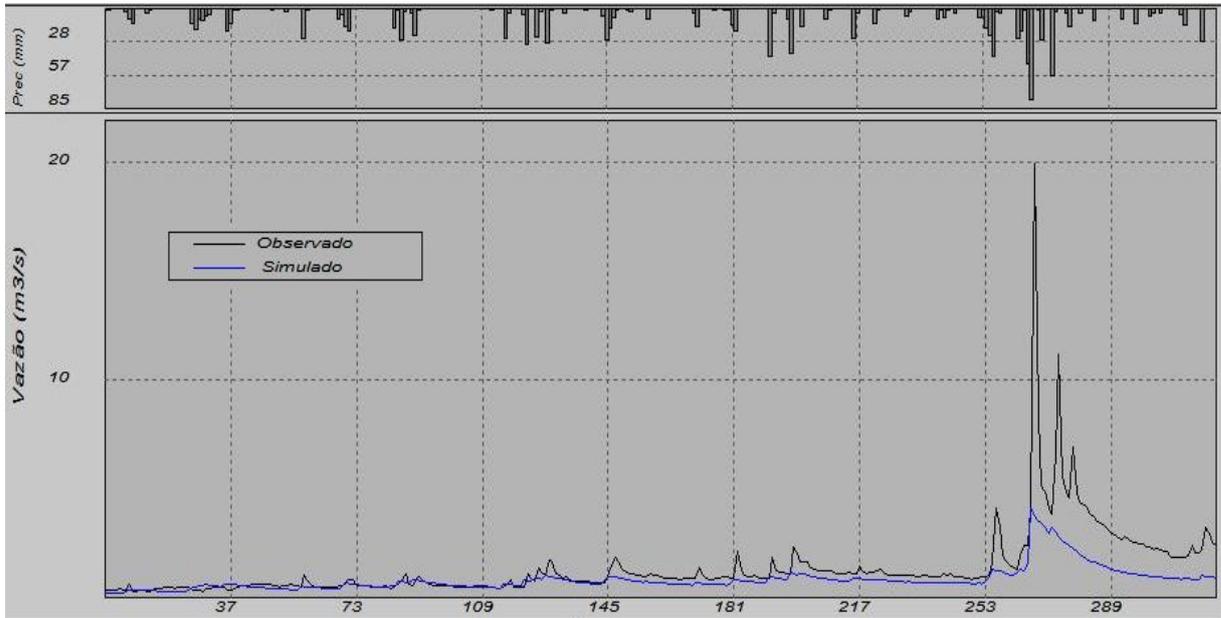


Figura 5. 42 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Taboão.

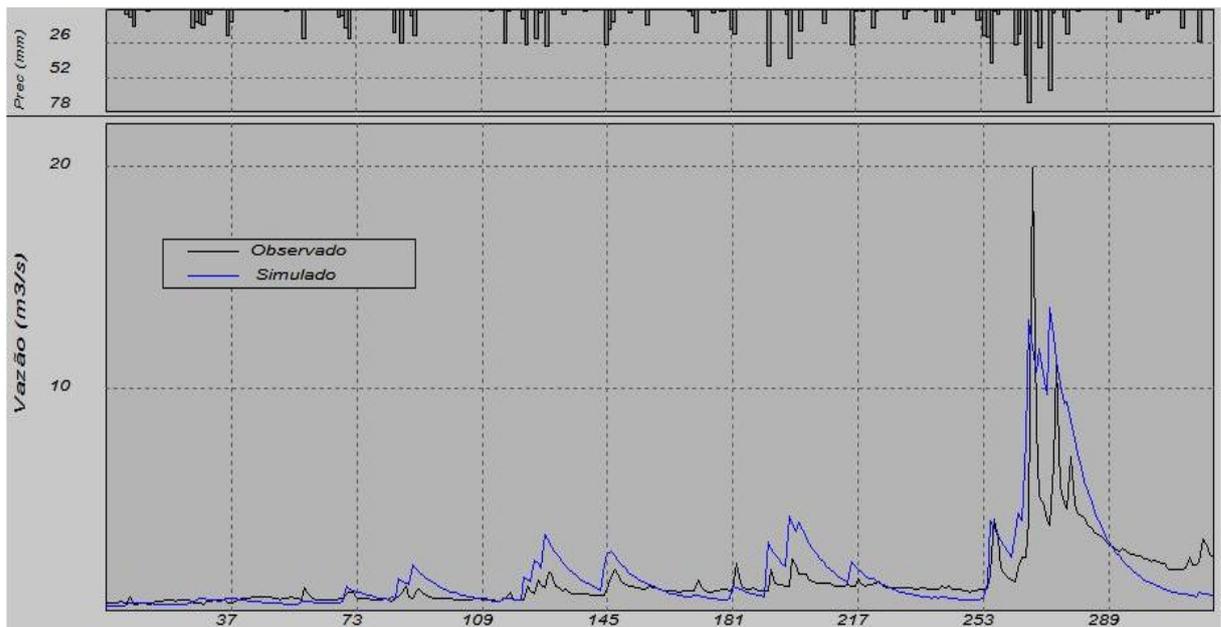


Figura 5. 43 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 04/02/2008 a 18/12/2008 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Taboão.

A tabela 5.17 mostra o comparativo do desempenho do modelo, utilizando-se como dado de entrada as séries das chuvas médias e as medianas, pelo método do vizinho natural com as chuvas determinadas pelos cálculos diretos. A tabela 5.18 mostra os parâmetros dos dois métodos.

Tabela 5. 17 Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD), na bacia do Taboão.

Métodos	Calibração		Verificação	
	NS	ΔV	NS	ΔV
Média (VN)	0,78	6,86	0,47	-29,99
Mediana (VN)	0,68	2,53	0,35	-39,44
Média (CD)	0,75	4,04	0,61	5,69
Mediana (CD)	0,78	-0,34	0,20	24,20

Tabela 5. 18 Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Taboão.

Parâmetros	Média (VN)	Mediana (VN)	Média (CD)	Mediana (CD)
Io	73,8987	83,7821	36,6433	27,0798
Ib	2,3472	2,1753	6,4809	1,4283
H	0,90470	0,9267	0,18295	0,5305
Ks	9,999	9,999	10,00	10,000
Ksub	10,0007	10,0047	145,0148	491,4138
Rmax	4,1427	3,3611	8,999	0,000
Alfa	0,01	0,01	0,011	0,01

Observa-se, com base na tabela 5.17, que a chuva média determinada pelo interpolador apresentou melhor desempenho, com NS de 0,78, na calibração comparada à chuva média obtida pelos cálculos diretos, com NS de 0,75, mas apresentou pior desempenho na etapa de verificação dos parâmetros, com NS de 0,47, comparado ao NS de 0,61 da chuva média determinada pelos cálculos diretos. Isso mostra que tanto podem ter ocorrido incertezas na estimativa da precipitação média obtida pelo interpolador, como também, podem ter ocorrido incertezas nas séries de evaporação. A chuva mediana obtida pela interpolação resultou no melhor desempenho, com NS de 0,68, comparada a chuva mediana determinada por cálculos diretos, com NS de 0,78, além disso, na etapa de verificação nenhum dos dois métodos não apresentou bom desempenho. Nesta escala a chuva média determinada pelo cálculo direto apresentou melhores resultados após o processo de verificação dos parâmetros. Com base nos resultados dos parâmetros encontrados na tabela 5.18, a insuficiência de volume de chuva mediana obtida pelos cálculos diretos resultou em valores de Rmax igual a zero e altos valores do coeficiente de recessão (Ksub) no processo de calibração. Outra observação, com base na tabela 5.18 é que deve ter ocorrido uma proximidade dos valores de precipitação média e

mediana determinadas pelo interpolador que produziu resultados com valores quase iguais para alguns parâmetros do modelo.

5.4.5 Teste na bacia do Turcato

O período da calibração do modelo para a bacia do rio Potiribu foi de 26/05/1999 a 22/03/2000. Os parâmetros obtidos na calibração do modelo foram verificados no período de 23/03/2000 a 13/08/2001. O mesmo período na calibração e na verificação foi adotado para as precipitações médias e as medianas obtidas pela interpolação e pelos cálculos diretos

A figura 5.44 e a 5.46 mostram os resultados na calibração do modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas com o método do Vizinho Natural, e a figura 5.45 e a 5.47 mostram os resultados na calibração do modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas determinadas por Cálculos Diretos.

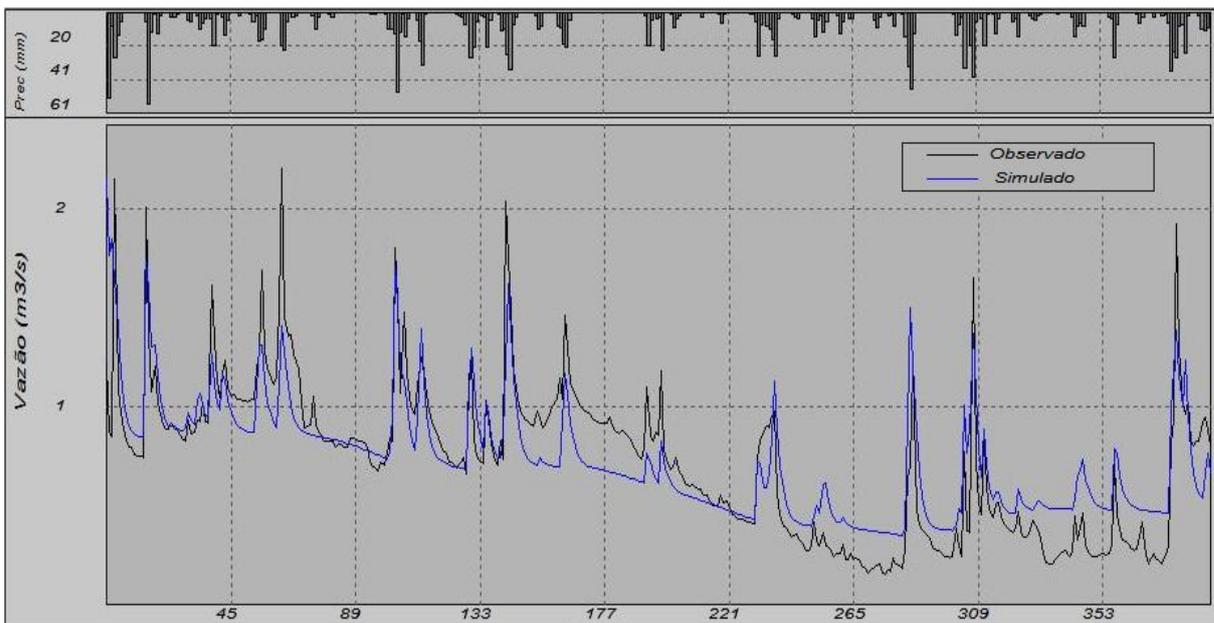


Figura 5. 44 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias por interpolação, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.

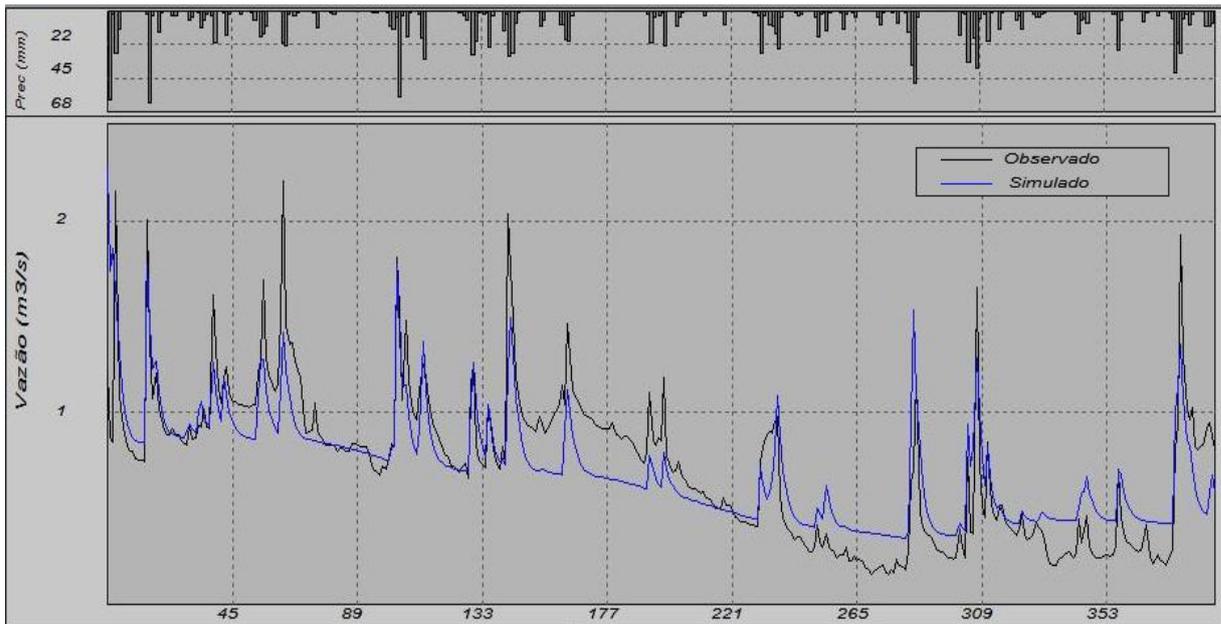


Figura 5. 45 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações médias obtida por cálculos diretos, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.

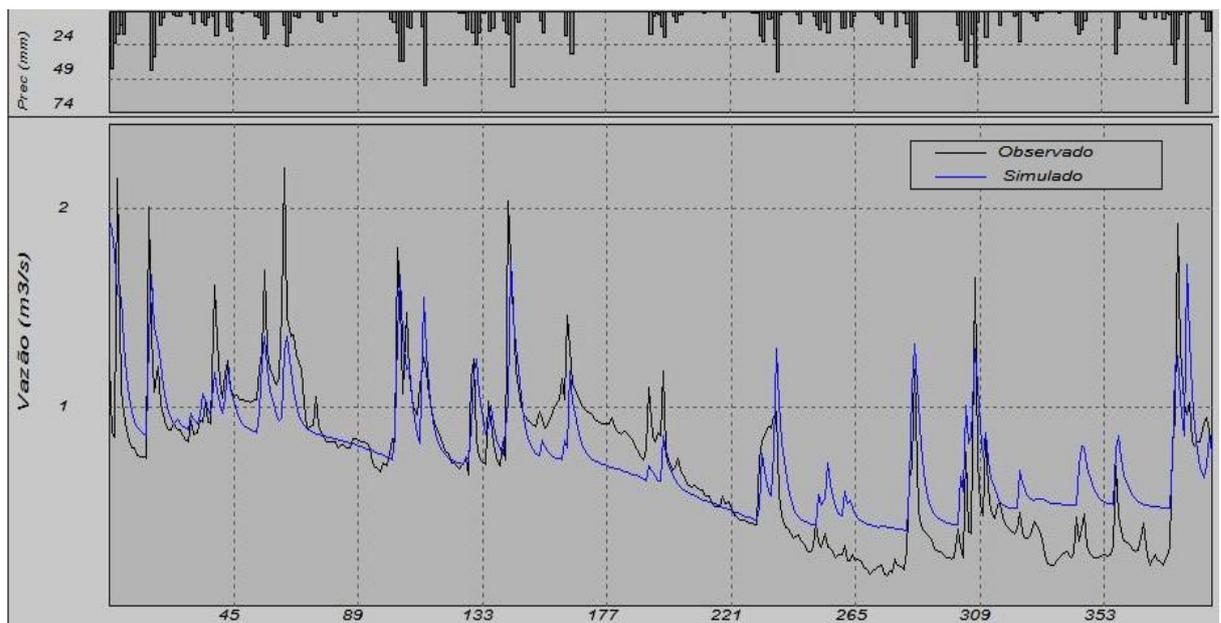


Figura 5. 46 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações mediana obtida por interpolação, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.

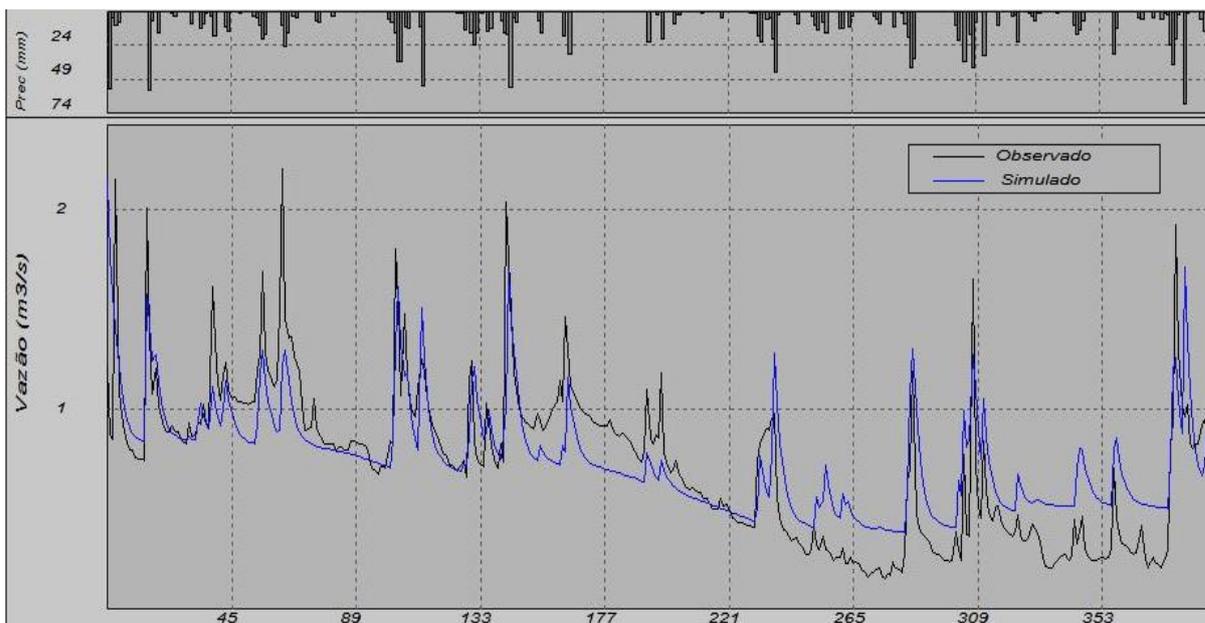


Figura 5. 47 Calibração do Modelo IPH II utilizando a série de precipitações medianas obtida por cálculos diretos, no período de 26/05/1999 a 22/03/2000 na bacia do Turcato.

A figura 5.48 e a 5.50 mostram as séries de verificação resultante dos dados da calibração do modelo utilizando as chuvas médias e as medianas com o método do Vizinho Natural, e a figura 5.49 e a 5.51 são mostradas o resultados da verificação do modelo utilizando as séries das chuvas médias e das medianas determinadas por Cálculos Diretos.

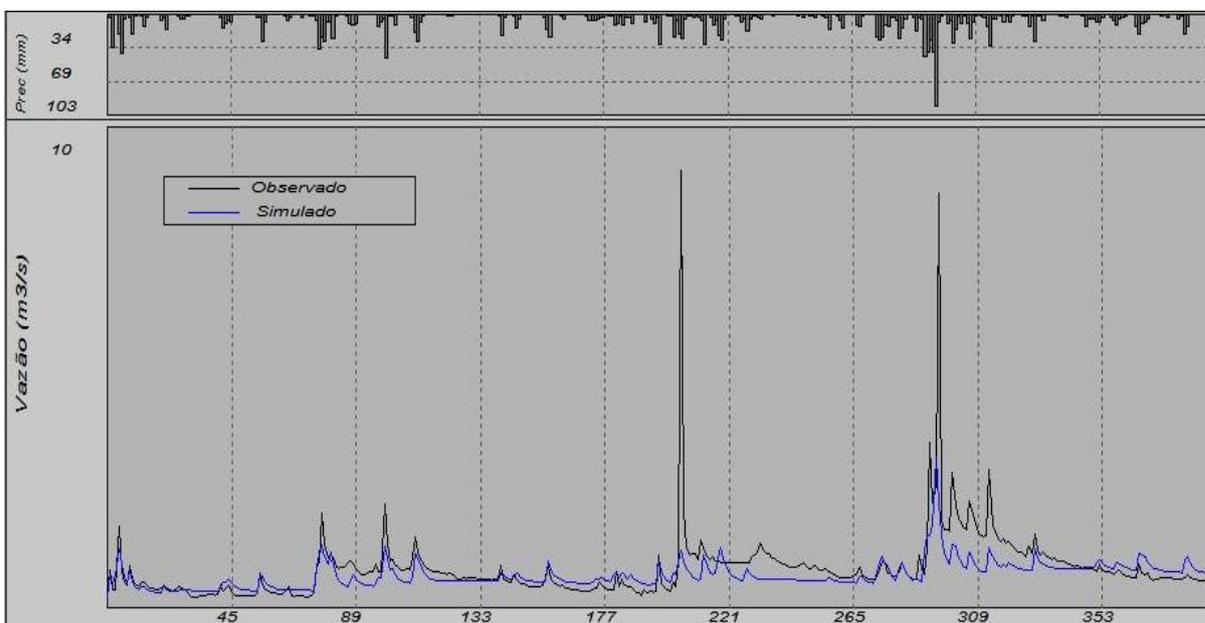


Figura 5. 48 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva média obtida por interpolação na bacia do Turcato.

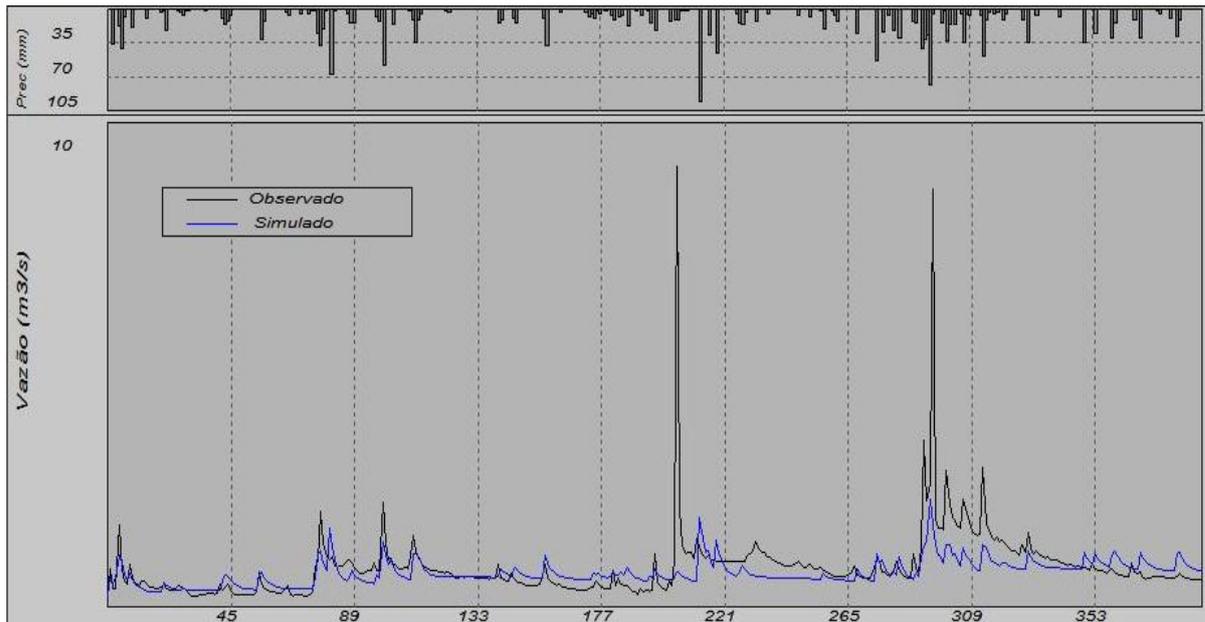


Figura 5. 49 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva média obtida pelos Cálculos Direto na bacia do Turcato.

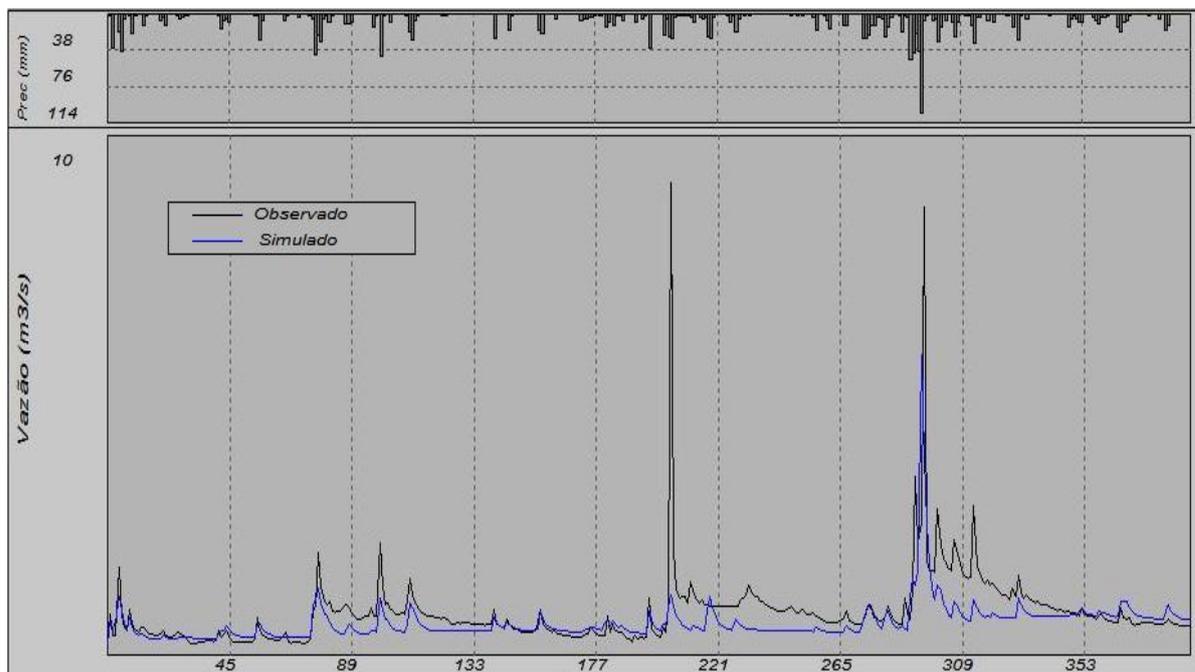


Figura 5. 50 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/03/2000 a 13/08/2001 utilizando a chuva mediana obtida por interpolação na bacia do Turcato.

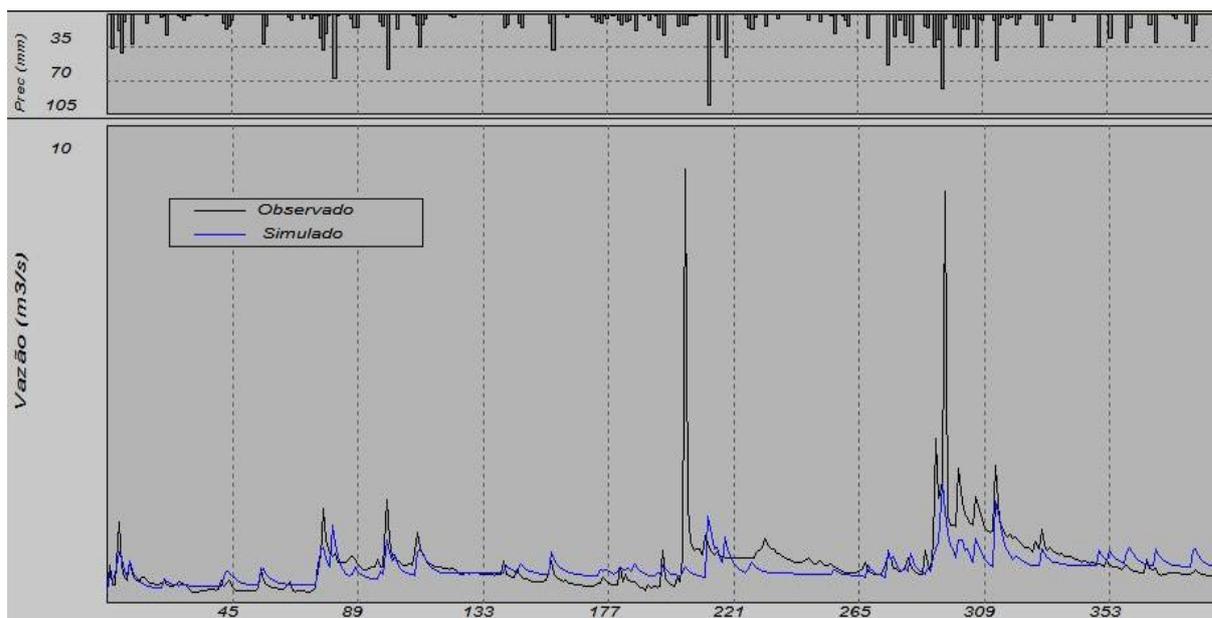


Figura 5. 51 Verificação dos parâmetros do Modelo no período de 23/07/2008 a 23/01/2009 utilizando a chuva mediana obtida por cálculos diretos na bacia do Taboão.

A tabela 5.19 mostra o comparativo do desempenho do modelo utilizando como dado de entrada as séries das chuvas médias e as medianas utilizando o método do vizinho natural com as chuvas determinadas pelos cálculos diretos. A tabela 5.20 mostra os parâmetros dos dois métodos.

Tabela 5. 19 Resultados do desempenho do modelo na calibração e na verificação utilizando o método do Vizinho Natural (VN) e os Cálculos Diretos (CD) na bacia do Turcato.

Métodos	Calibração		Verificação	
	NS	ΔV	NS	ΔV
Média (VN)	0,70	2,23	0,30	-15,93
Mediana (VN)	0,70	-1,12	0,29	-23,18
Média (CD)	0,60	6,62	0,22	-13,10
Mediana (CD)	0,61	4,63	0,25	11,08

A chuva média e a chuva mediana determinadas pelo interpolador apresentaram melhor desempenho na calibração e na verificação comparadas à chuva média e à chuva mediana obtida pelos cálculos diretos. Os dois métodos resultaram em baixo desempenho na verificação. Isso pode evidenciar que a metodologia utilizada não apresenta bons resultados para pequenas bacias, ou que os dados de evaporação não estão consistentes, com base nos resultados da tabela 5.19. Os parâmetros resultantes da calibração apresentaram valores

próximos ao limite superior. Isso ocorreu para os parâmetros como I_0 , com valor próximo a 300 mm/dia e o $R_{máx}$, com valor igual a 9 mm (Tabela 20).

Tabela 5. 20 Valores dos parâmetros obtidos na calibração utilizando as chuvas médias e as medianas determinadas pelo Vizinho Natural (VN) e pelos Cálculos Diretos (CD), na bacia do Turcato.

Parâmetros	Média (VN)	Mediana (VN)	Média (CD)	Mediana (CD)
I_0	299,9998	299,9977	299,9974	299,9993
I_b	5,2067	5,2275	4,7894	4,6190
H	0,4757	0,4897	0,46843	0,4774
K_s	1,9765	2,0776	2,5299	2,6133
K_{sub}	42,4355	51,1821	39,3786	41,6050
R_{max}	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000
Alfa	1,9999	19,9996	2,3891	19,9986

5.4.6 Análise do Efeito da Escala no Desempenho do Modelo IPH II

A abordagem dada foi no sentido de avaliar a sensibilidade do modelo concentrado chuva-vazão, IPH II, para quatro alternativas de entradas de precipitações pontuais, sendo estas, as chuvas médias e as medianas, por interpolação e por cálculos diretos, mas os dados de evaporação e de vazão para a calibração do modelo. A informação utilizada para estimar estas estimativas pontuais foi mediante uma rede densa de postos distribuídos e presentes no interior de cinco escalas de bacias hidrográficas embutidas. A eleição da melhor estatística pontual foi definida com base nos resultados dos parâmetros do modelo resultante da calibração, do coeficiente de Nash-Sutcliffe e do erro de volume.

Com base nos resultados dos itens 5.4.1 a 5.4.5, a melhor estatística pontual foi a chuva média determinada pelo interpolador Vizinho Natural. Na tabela 5.21 pode-se observar a redução do coeficiente de Nash-Sutcliffe nas diferentes escalas.

Tabela 5. 21 Redução do Coeficiente de Nash-Sutcliffe nas diferentes escalas, utilizando-se a chuva média obtida pelo Vizinho natural como entrada no modelo Concentrado IPH II.

Simulações	Ponte Mística (9426 Km ²)	Sto Ângelo (5414 km ²)	Potiribu (629 Km ²)	Taboão (80 Km ²)	Turcato (19,5 Km ²)
Calibração	0,88	0,89	0,75	0,78	0,70
Verificação	0,88	0,88	0,55	0,47	0,30

A observação dada com relação à tabela 5.21 é referente ao desempenho do modelo nas bacias do Taboão (80 Km²) e do Turcato (19,5 Km²). Faures et al. (1995) mencionaram nos seus estudos que o efeito da variabilidade espacial das chuvas na modelagem do escoamento é, certamente, dependente de escala. Andréassian et. al, (2001), sugeriram que uma amostra maior é necessária para tirar conclusões gerais relativas às relações possíveis entre o tamanho da bacia e a precisão das chuvas estimadas em área para garantir bons resultados na modelagem. As amostras das séries de vazão usadas para o estudo das bacias do Taboão e do Turcato para a calibração e para a verificação dos parâmetros foram insuficientes para permitir uma investigação sobre a natureza desta dependência.

Segundo Andréassian et. al. (2001), o comportamento indesejável dos parâmetros, ocorrido na calibração, pode ser por consequência das incertezas nas estimativas de evaporação ou por limitações estruturais do modelo. Nesta pesquisa, as limitações do modelo podem ter ocorrido referente ao intervalo de tempo em dias adotado na modelagem do processo chuva-vazão para as bacias do Taboão (80 Km²) e do Turcato (19,5 Km²). O baixo desempenho do modelo, para esta escala temporal diária, talvez não seja compatível ao tempo de resposta para formação dos picos do hidrograma no instante em que ocorre a precipitação no interior dos limites da bacia. Por ser uma bacia com pequena escala, o intervalo de tempo em horas pode ser mais adequado para a simulação do processo chuva-vazão e para ser adotado no tempo de concentração. A estimativa de evaporação pelo evaporímetro de piché pode também produzir baixo desempenho no modelo (Tucci, 2009).

5.5 Transferência direta dos parâmetros nas escalas

Esta etapa possui a finalidade de mostrar a resposta do modelo a partir da transferência direta de parâmetros de escalas maiores para as escalas menores, pois é uma maneira de obtenção de resultados para casos de indisponibilidade de dados de vazão.

Deve ser levado em conta que os valores dos parâmetros, por exemplo, da bacia da Ponte Mística, foram obtidos pelo processo de calibração monoobjetivo SCE-UA para os dados de entrada correspondente à chuva média determinada pelo Vizinho Natural, vazão e a evaporação. Adotar a transferência de parâmetros da bacia da Ponte Mística para as outras bacias com escalas menores é o mesmo que admitir a uniformidade do comportamento físico em toda a bacia, sendo estes: a intercepção representada pelo R_{max} ; a capacidade de

infiltração, o estado de umidade do solo e a percolação, representados pelos parâmetros I_o e I_b , como também, os coeficientes de recessão K_s e K_{sub} , e a percentagem de precipitação que escoo superficialmente representada pelo parâmetro Alfa.

O processo de calibração promove a compensação nos parâmetros do modelo devido às incertezas nos dados de entrada, ou seja, fazer a transferência de parâmetros pode ser o mesmo que não admitir a heterogeneidade espacial dos processos hidrológicos, que possuem comportamentos distintos de acordo com a escala do sistema. A tabela 5.22 evidencia a divergência dos valores dos parâmetros do modelo nas diferentes escalas, proveniente do processo de calibração.

A tabela 5.22 mostra os parâmetros resultantes do processo de calibração, obtidos com o uso das séries das chuvas médias determinado pelo método do Vizinho Natural. Estes foram utilizados para fazer a análise da transferência de parâmetros das escalas maiores para as escalas menores. Esta transferência foi feita somente com a chuva média com o método do Vizinho Natural, pois foi a chuva que produziu melhor desempenho das vazões simuladas pelo modelo nas diferentes escalas.

Tabela 5. 22 Parâmetros utilizados para a análise da transferência de escalas.

Parâmetros	Média (VN)				
	Ponte Mística	Santo Angelo	Potiribu	Taboão	Turcato
I_o	115,8305	62,0427	94,4172	73,8100	299,9998
I_b	1,0188	2,7601	2,3610	2,3472	5,2067
H	0,7373	0,61737	0,7319	0,90470	0,4757
K_s	5,8568	3,4574	5,3027	9,9999	1,9765
K_{sub}	18,3868	28,6663	13,0746	10,0007	42,4355
Rmax	8,5220	8,9911	9,0000	4,1427	9,0000
Alfa	12,9368	1,4989	0,0075	0,0100	1,9999

As figuras 5.52 a 5.55 mostram os resultados das vazões calculadas na bacia do Santo Ângelo, Potiribu, Taboão e do Turcato utilizando os parâmetros da bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Ponte Mística obtidos no processo de calibração com o uso da chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural. No modelo Win_IPH II foram modificados os dados de entrada, como a área da bacia, o coeficiente de forma do Histograma tempo-área, o

tempo de concentração, as condições iniciais de percolação, a vazão subterrânea e a vazão superficial, e as series de precipitações médias obtidas pelo método do Vizinho Natural.

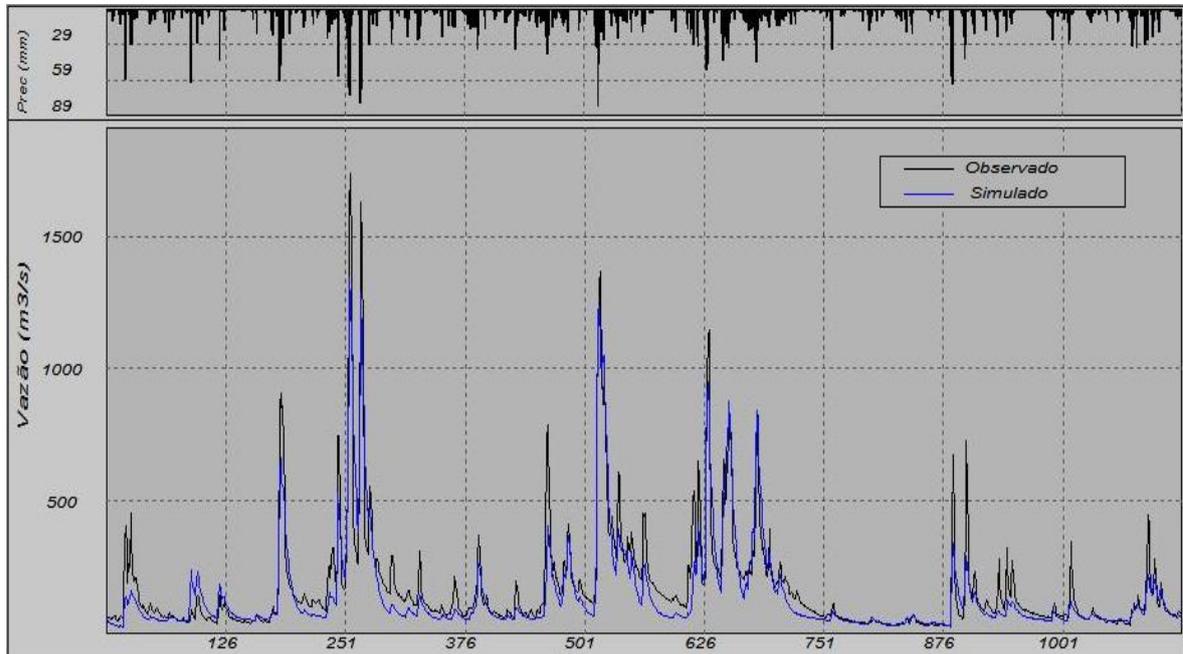


Figura 5. 52 Vazão calculada e observada na bacia do Santo Angelo, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.

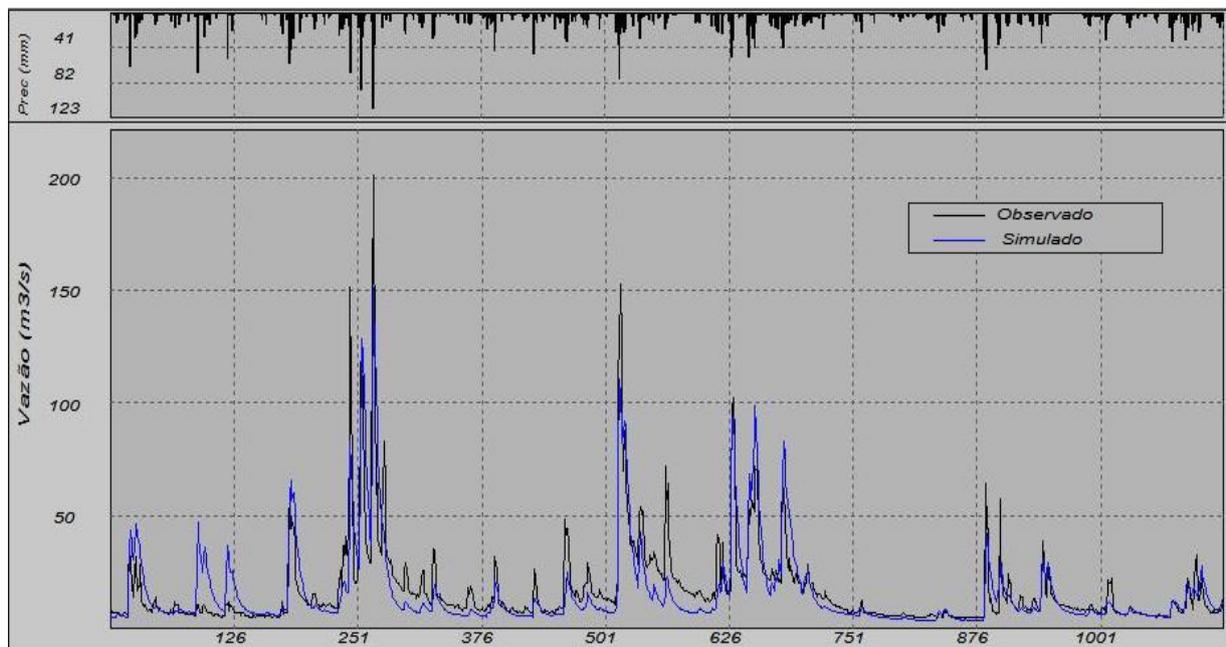


Figura 5. 53 Vazão calculada e observada na bacia do Potiribu, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.

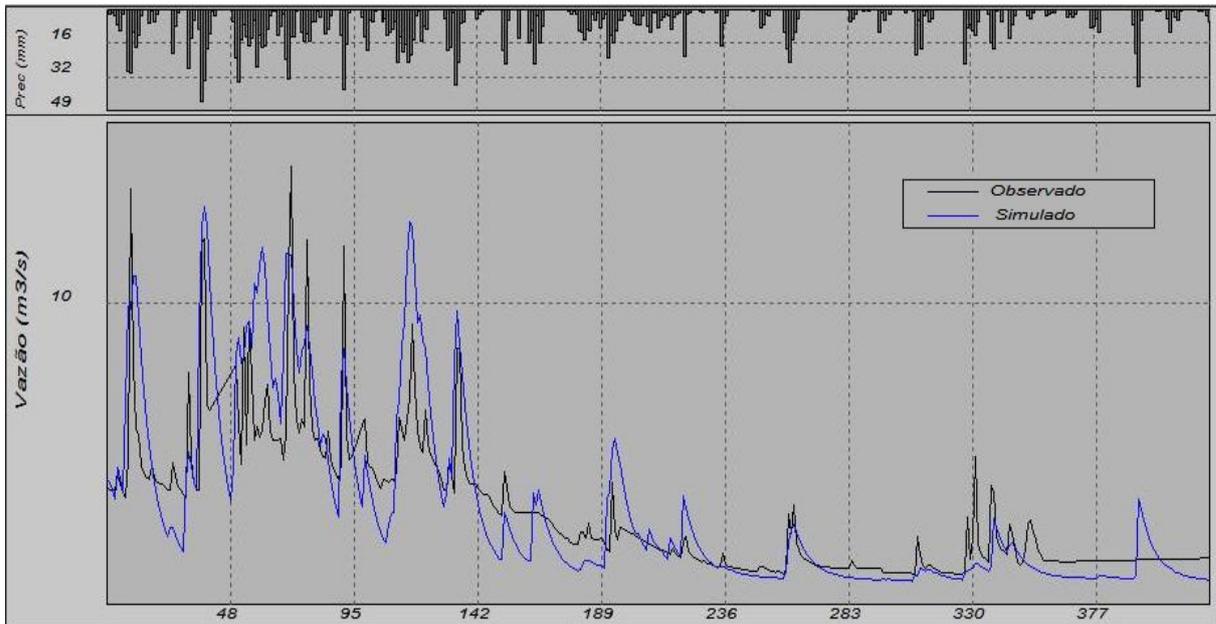


Figura 5. 54 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.

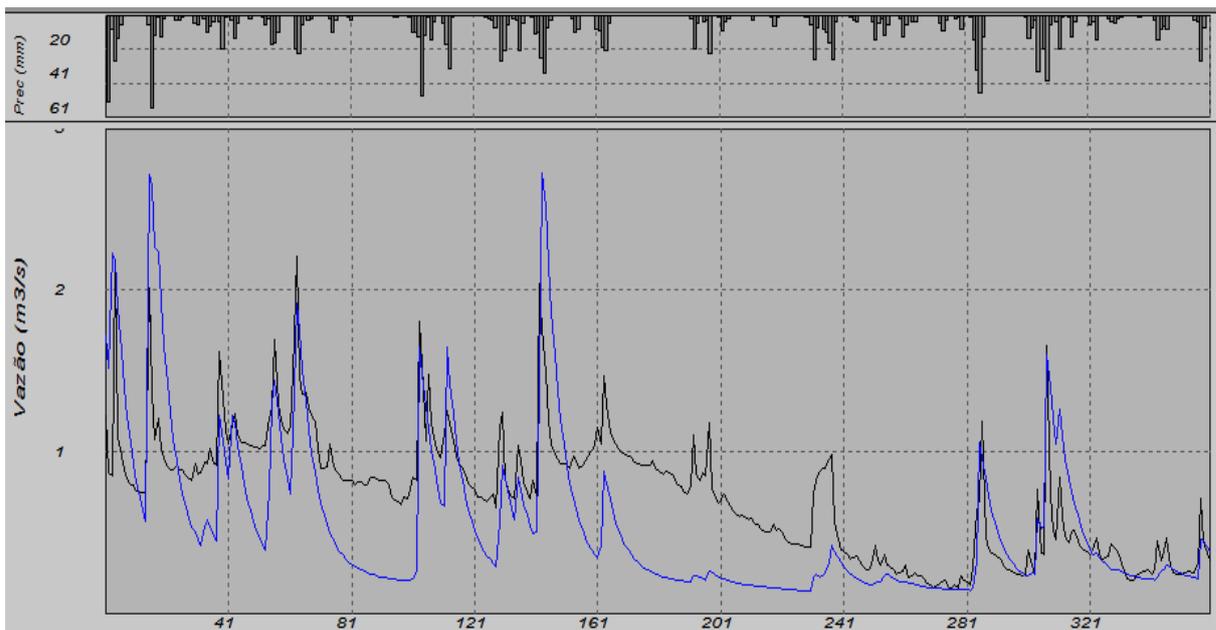


Figura 5. 55 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001, por transferência dos parâmetros do posto fluviométrico Ponte Mística.

O desempenho do resultado das vazões calculadas e observadas mediante a transferência dos parâmetros está apresentado na Tabela 5.23.

Tabela 5. 23 Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com a transferência de parâmetros da bacia do rio Ponte Mística para as sub-bacias.

Bacias	<i>NS</i>	ΔV
Santo Angelo	0,84	-14,82
Potiribu	0,75	6,57
Taboão	0,52	3,00
Turcato	-0,14	-23,07

Os resultados da Tabela 5.23, mostram que houve a redução do desempenho das vazões calculadas na transferência dos parâmetros da bacia do rio Ijuí para as bacias do Potiribu, Taboão e do Turcato. O melhor desempenho é evidenciado na bacia do rio Ijuí no posto fluviométrico Santo Ângelo.

As figuras 5.56 a 5.58 mostram os resultados das vazões calculadas na bacia do Potiribu, Taboão e do Tucarto utilizando os parâmetros da bacia do rio Ijuí em Santo Ângelo obtidos no processo de calibração com o uso da chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural. No modelo Win_IPH II foram modificados os dados de entrada como a área da bacia, o coeficiente de forma do Histograma tempo-área, o tempo de concentração, as condições iniciais de percolação, vazão subterrânea e vazão superficial, e as series de precipitações médias obtidas pelo método do Vizinho Natural.

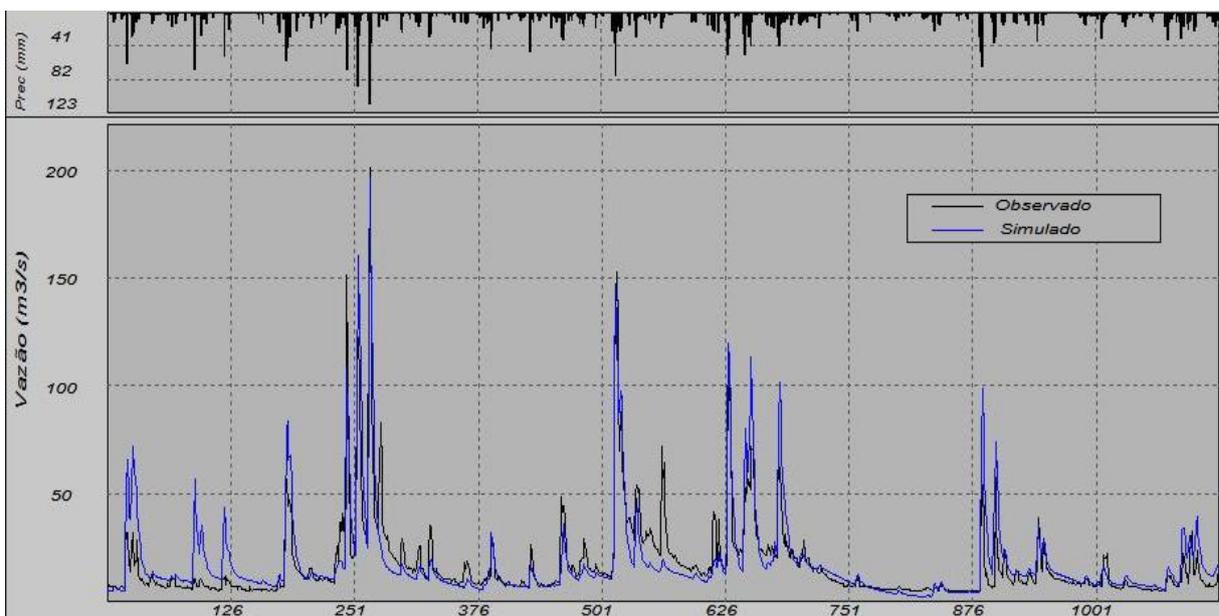


Figura 5. 56 Vazão calculada e observada na bacia do Potiribu, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

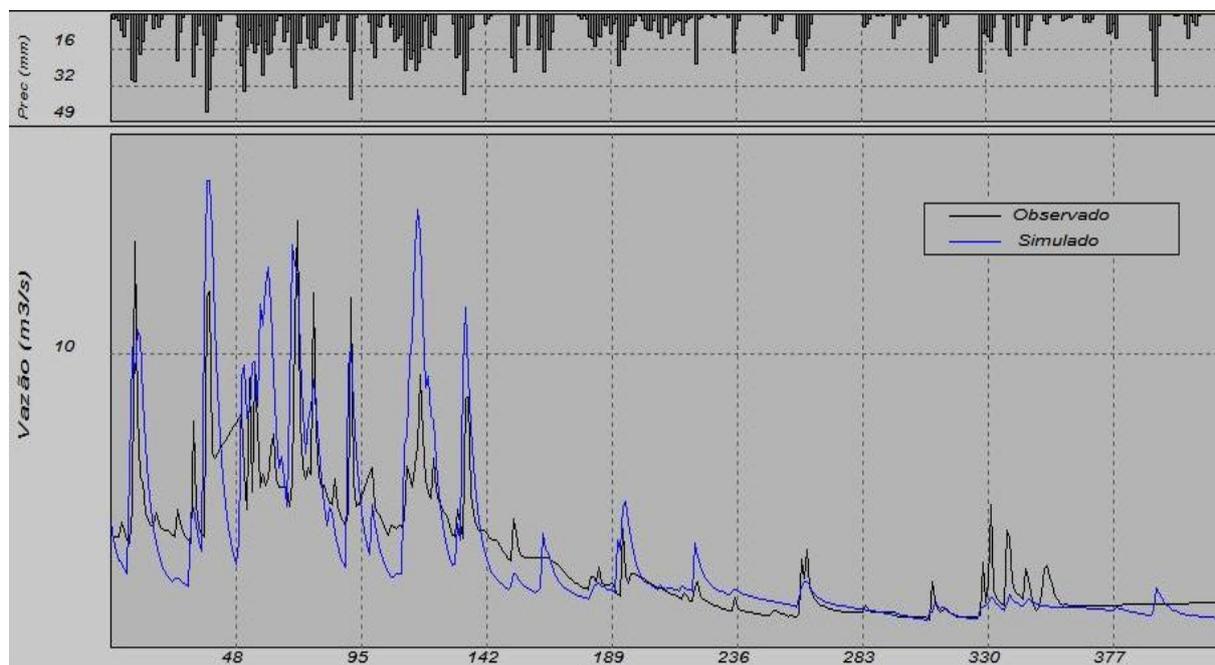


Figura 5. 57 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003.

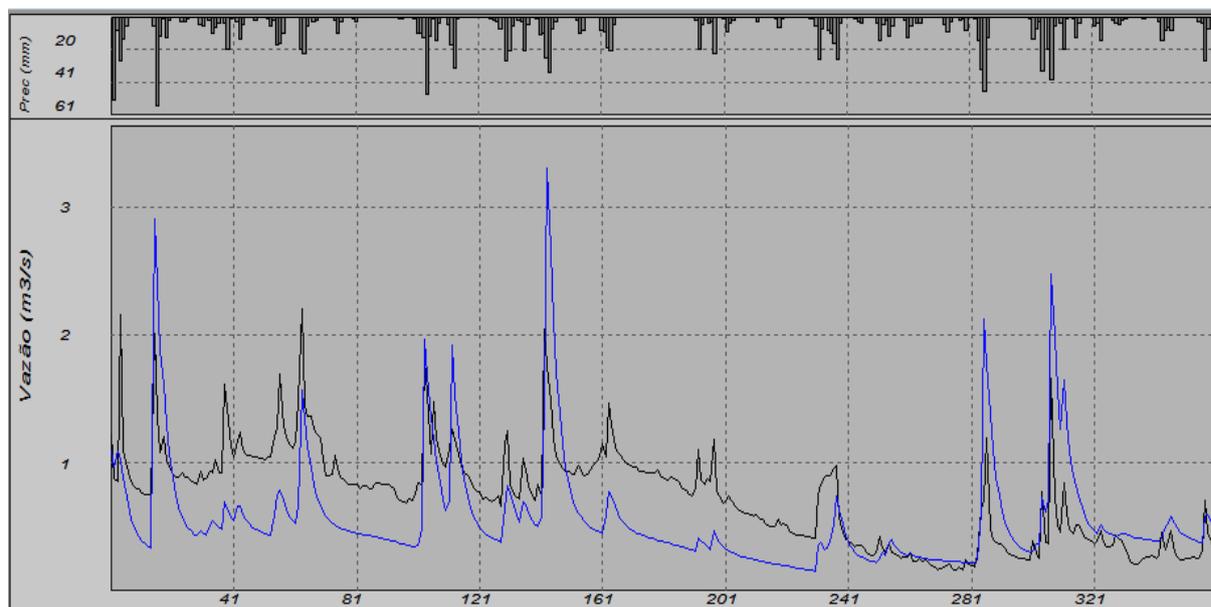


Figura 5. 58 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.

O desempenho do resultado das vazões calculadas e observadas mediante a transferência dos parâmetros está apresentado na Tabela 5.24.

Tabela 5. 24 Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com a transferência dos parâmetros da bacia do rio Santo Ângelo para as sub-bacias.

Bacias	<i>NS</i>	ΔV
Potiribu	0,72	6,62
Taboão	0,42	5,09
Turcato	-0,18	-21,77

A tabela 5.24 mostra o melhor desempenho do modelo para a bacia do rio Potiribu, com os parâmetros transferidos da bacia do rio Ijuí em Santo Ângelo obtidos do processo de calibração.

As figuras 5.59 e a 5.60 mostram os resultados das vazões calculadas na bacia do Taboão e do Turcato utilizando os parâmetros da bacia do rio Potiribu obtidos no processo de calibração com o uso da chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural. No modelo Win_IPH II foram modificados os dados de entrada como a área da bacia, o coeficiente de forma do Histograma tempo-área, o tempo de concentração, as condições iniciais de percolação, a vazão subterrânea e a vazão superficial, e as series de precipitações médias obtidas pelo método do Vizinho Natural.

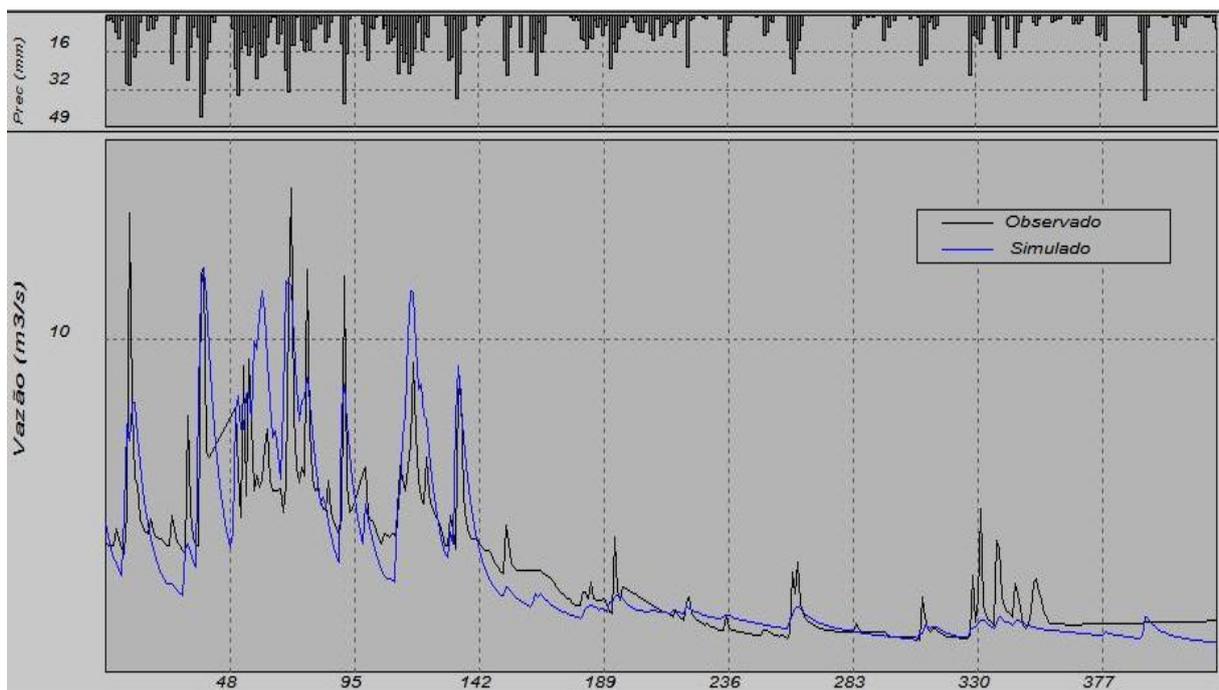


Figura 5. 59 Vazão calculada e observada na bacia do Taboão, no período de 12/08/2002 a 30/12/2003.

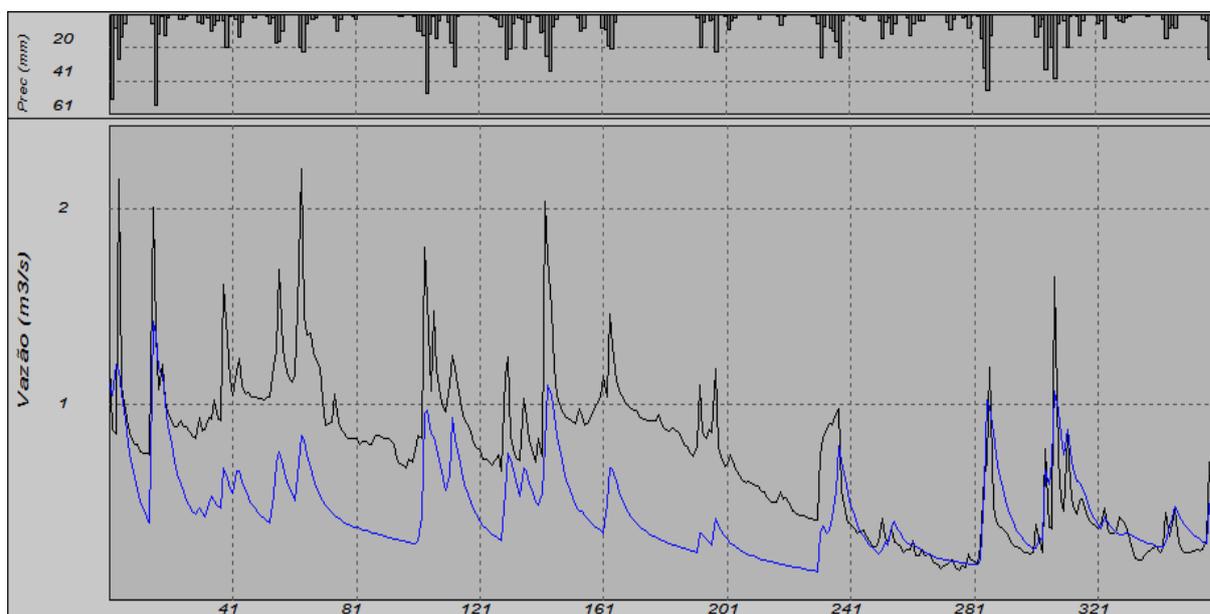


Figura 5. 60 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.

O desempenho dos resultados das vazões calculadas e observadas mediante a transferência dos parâmetros está apresentado na Tabela 5.25.

Tabela 5. 25 Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com os parâmetros da bacia do rio Potiribu.

Bacias	<i>NS</i>	ΔV
Taboão	0,67	-1,34
Turcato	-0,11	-37,21

Os resultados da Tabela 5.25 mostram que houve a melhora do desempenho das vazões calculadas para a bacia do Taboão mediante o uso dos parâmetros da bacia do Potiribu obtidas no processo de calibração.

A figura 5.61 mostra as vazões simuladas na bacia do Turcato utilizando os parâmetros da bacia do rio Taboão obtidos no processo de calibração, com o uso da chuva média determinada pelo método do Vizinho Natural. No modelo Win_IPH II foram modificados os mesmos dados de entrada, como explicado nos casos anteriores: a área da

bacia, o coeficiente de forma do Histograma tempo-área, o tempo de concentração, as condições iniciais de percolação, a vazão subterrânea e a vazão superficial.

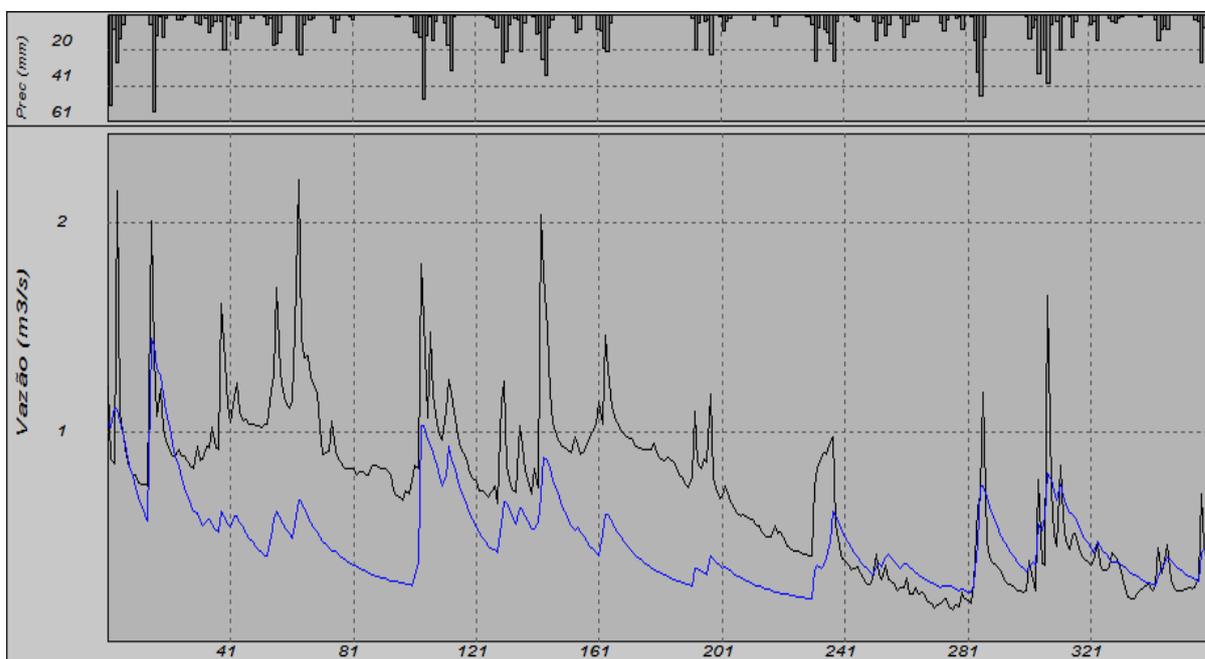


Figura 5. 61 Vazão calculada e observada na bacia do Turcato, no período de 23/03/2000 a 13/08/2001.

A Tabela 5.26 mostra o resultado do desempenho da transferência dos parâmetros do Taboão para o Turcato.

Tabela 5. 26 Desempenho dos resultados das vazões calculadas pelo modelo com os parâmetros da bacia do rio Taboão.

Bacias	NS	ΔV
Turcato	-0,06	-33,47

Os resultados das tabelas 5.23 a 5.26 mostraram que o desempenho das vazões observadas e calculadas é melhorado quando a transferência dos parâmetros da escala maior é transferida para uma menor com proporções de áreas com valores próximos. Como é o caso, da transferência da bacia Ponte Mística (9426 Km²) para a bacia Santa Ângelo (5414 Km²), com NS de 0,84, da bacia do Santo Ângelo (5414 Km²) para a bacia do Potiribu (629 Km²), com NS de 0,72, e da bacia do Potiribu (629 Km²) para a bacia do Taboão (80 Km²), com NS de 0,67. Porém, parece haver um limite de área para esta transferência de parâmetros, pois do Taboão (80 km²) para o Turcato (19,5 km²) não apresentou bons resultados.

A Tabela 5.27 mostra os valores do coeficiente de NS nas diferentes escalas resultante da transferência dos parâmetros. Devido ao baixo desempenho da transferência dos parâmetros das quatro escalas para a bacia do Turcato, a mesma não foi considerada na figura. O processo de transferência de parâmetros entre escalas, tomando-se como base a bacia Ponte Mística, resultou em resultados satisfatórios até a bacia do Potiribu (629 Km²), ao qual, apresentou o NS de 0,72. Seria interessante fazer um teste dos parâmetros da bacia Ponte Mística com uma bacia embutida com área entre a bacia do Santo Ângelo a do Potiribu para verificar se o coeficiente de NS apresentaria valores entre 0,84 a 0,72. Tomando-se como base a bacia do Santo Ângelo também é satisfatória até a bacia do Potiribu, com o NS de 0,72. Não houve bons resultados da transferência da bacia do Taboão para a bacia do Turcato, na qual resultou no NS de 0,06.

Tabela 5. 27 Valores do Coeficiente de Desempenho de Nash-Sutcliffe provenientes do processo de transferência direta de parâmetros do Modelo IPH II.

Bacias	Sto. Ângelo (5414 Km ²)	Potiribu (629 Km ²)	Taboão (80 Km ²)	Turcato (19,5 Km ²)
Ponte Mística (9426 Km ²)	0,84	0,75	0,52	- 0,14
Sto. Ângelo (5414 Km ²)		0,72	0,42	- 0,18
Potiribu (629 Km ²)			0,67	- 0,11
Taboão (80 Km ²)				- 0,06

Em estudos anteriores de regionalização de vazões nestas bacias foram observadas similaridades espaciais nas bacias de meso escala na bacia do rio Ijuí, com pequena variabilidade espacial das variáveis e funções obtidas (IPH, 1991). Silva Junior et al. (2003), avaliou as extrapolações superiores da regionalização de vazões utilizando as sub-bacias do rio Ijuí (meso escala) e duas sub-bacias do rio Uruguai (macro escala) à jusante da confluência do rio Ijuí, e extrapolações inferiores de regionalização de vazões das sub-bacias do rio Potiribu. Os autores observaram a representatividade da bacia a partir dos bons resultados obtidos, e os mesmos escolheram estas bacias para o estudo de regionalização, por serem consideradas como representativas do planalto basáltico, uma região que se estende por 230.000 Km², segundo análises de Borges & Bordas (1990), que inclui quase toda a bacia do rio Uruguai, ao qual a bacia do Ijuí é uma sub-bacia.

A representatividade da bacia do Ijuí também foi observada neste estudo, mediante a transferência de parâmetros das bacias maiores para as bacias menores apresentando bons resultados no coeficiente de Nash-Sutcliffe até uma escala de 80 Km². Estudo semelhante para explorar a possibilidade de transferir os valores da calibração para sub-bacias representativas foi realizado por Xiaoli et al. (2009). Estes autores utilizaram o modelo chuva-vazão conceitual concentrado, HBV, calibrado no rio Dongjiang, e transferiram os parâmetros do modelo para 13 sub-bacias. Os métodos utilizados para a estimativa da precipitação média foram a média aritmética e os polígonos de Thiessen. Os resultados da transferência direta de parâmetros resultaram em valores médios do coeficiente de desempenho de Nash-Sutcliffe de 0,72 para o total de 13 sub-bacias com áreas entre 37,2 a 2091 Km².

Os resultados da tabela 5.27 mostraram o menor desempenho do coeficiente de Nash-Sutcliffe na transferência de parâmetros da bacia do Taboão (80 Km²) e do Turcato (19,5 Km²). As justificativas podem ser em função da insuficiência das amostras das séries de vazão usadas para o estudo destas bacias, das deficiências das estimativas de evaporação ou por limitações estruturais do modelo (Intervalo de tempo utilizado).

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões referentes às etapas da pesquisa

A etapa 1 da pesquisa mostrou a possibilidade da utilização da técnica da Validação Cruzada para avaliar o desempenho de quatro métodos de interpolação, sendo que o método do Vizinho Natural foi o que apresentou melhor desempenho. O interpolador Vizinho Natural apresentou melhor coeficiente de correlação (R^2) e menor valor da raiz do erro médio quadrático (REMQ), comparado ao método do Inverso do Quadrado da Distância, no total de nove dos quatorze postos analisados. Isso mostra a possibilidade de explorar mais o método do Vizinho Natural para a interpolação de postos de pluviômetros para estimar a precipitação em nós de grade regular, ou para estimar a precipitação em pontos presentes nos centróides de células formadas na discretização de modelos distribuídos, pois nos estudos é evidenciado o uso do método do Inverso do Quadrado da Distância.

A etapa 2 consistiu em espacializar a precipitação com o uso do método de interpolação. Logo após, foram obtidas as séries das chuvas médias e medianas diárias determinadas através dos valores nodais de grades regulares, com diferentes geometrias para as sub-bacias do rio Ijuí. Observou-se que estas estatísticas pontuais (Média e a Mediana), determinadas pelo interpolador, foram menos afetadas pelas falhas existentes na rede de pluviômetros, comparadas às estatísticas pontuais obtidas pelos cálculos diretos (Etapa 3), além disso, foi evidenciado que o uso da mediana não eliminou os valores extremos nas medidas de precipitação dos postos pluviométricos. Os resultados mostraram que a chuva mediana foi afetada por valores correspondendo a zero na medida dos postos no interior dos limites da bacia, produzindo valores baixos ou iguais a zero do volume de chuva representativa na bacia, para ser fornecida como variável de entrada para o modelo IPH II.

A etapa 4 da pesquisa consistiu em simular o processo chuva-vazão utilizando o modelo IPH II para quatro variáveis de entrada de precipitação (as chuvas médias e as medianas obtidas por interpolação e pelo cálculo direto), simulados em cinco escalas para avaliar a melhor estatística pontual. Os testes estatísticos dos erros das vazões foram executados com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe e no erro de volume, como mencionado na a etapa 5 desta pesquisa. Os resultados mostraram que a chuva média obtida pelo interpolador apresentou melhores desempenhos, tanto no processo de calibração e de

verificação dos parâmetros, como também, nas diferentes escalas. Os resultados também mostraram que a estimativa de precipitação com o uso da média obtida pelo interpolador levou a um conjunto de parâmetros do modelo IPH II no processo de calibração, com o algoritmo SCE-UA, com resultado satisfatório comparado às outras estatísticas pontuais. As chuvas medianas, por subestimarem o volume de chuva ocorrentes na bacia, acabaram produzindo parâmetros do modelo com perda de significado físico, levando à perda de eficiência no processo de verificação.

A etapa 6 avaliou a possibilidade de transferência de parâmetros do modelo IPH II entre escalas, para uso em casos de indisponibilidade de dados para calibração nas bacias menores. Os resultados mostraram que o desempenho das vazões observadas e calculadas é mais aceitável quando a transferência dos parâmetros da escala maior é transferida para uma menor, com área proporcionalmente não muito diferente. Como foram os casos de transferência da bacia Ponte Mística (9426 Km²) para a bacia Santa Ângelo (5414 Km²), com NS de 0,84, da bacia do Santo Ângelo (5414 Km²) para a bacia do Potiribu (629 Km²), com NS de 0,72, e da bacia do Potiribu (629 Km²) para a bacia do Taboão (80 Km²), com NS de 0,67. Por sua vez, o limite de área para esta transferência de parâmetros fica evidenciado pelo exemplo da transferência do Taboão (80 km²) para o Turcato (19,5 km²), a qual não apresentou bons resultados. Os resultados das transferências foram satisfatórios devido à representatividade existente na bacia do rio Ijuí.

Observou-se, pela análise das transferências de escala, em contraposição aos resultados de verificação com as séries amostradas diferentes, que a transferência espacial resultou melhor que a transferência temporal.

Este resultado pode ser uma consequência, por um lado, da homogeneidade espacial da bacia (não sendo, portanto, possível a generalização), e, por outro, das alterações temporais dos fenômenos meteorológicos (Ex.: “El niño”, sazonalidades, etc.), e dos processos de modificação do uso do solo.

As alterações temporais fazem que uma calibração prévia não se mostra adequada a uma verificação sucessiva, dependendo do grau de alterações dos fenômenos e processos.

6.2 Recomendações

A sub-rotina presente no Anexo I foi utilizada para a aplicação da técnica da Validação Cruzada. Esta permite explorar o desempenho de mais interpoladores, além dos analisados nesta pesquisa, como também, a possibilidade de analisar o desempenho de métodos geoestatísticos.

A sub-rotina presente no Anexo II foi utilizada para determinar a precipitação média na bacia com base nos valores dos nós da grade regular, estimados a partir da interpolação de uma rede de pluviômetros e pluviógrafos. Seria interessante avaliar a sensibilidade do modelo concentrado IPH II a partir da chuva média obtida da informação de precipitação estimada por satélites provenientes do uso de técnicas do sensoriamento remoto. E, a partir disso, analisar esta estatística pontual nas diferentes escalas, como também, fazer testes de regionalização de parâmetros do modelo de escalas maiores para menores.

Além disso, como o tempo de concentração do Turcato simulado possui valor de 1 dia, testes futuros são recomendáveis, utilizando dados de pluviógrafos, para avaliar o desempenho na simulação com o modelo IPH II para intervalos menores, para analisar a origem das dificuldades observadas com as simulações aqui encontradas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; USART-SANCHEZ, I. & LAVABRE, J. *Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models*. Journal of Hydrology 206, pp. 206-223, 2001.

ANDROLLI, I. *Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica*, dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

BAYRAKTAR, H.; TURALIOGLU F. S. & XEN, Z.. *The estimation of average areal rainfall by percentage weighting polygon method in Southeastern Anatolia Region, Turkey*. Atmospheric Research, 73, pp. 149-160, 2005.

BELTRAME, L. F. de S. (coord.), 2000. *Consistência de Dados Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai, Sub-Bacia 75*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

BISCARO, G. A., *Meteorologia Agrícola Básica*, UNIGRAF, Gráfica e Editora União Ltda. 1º edição, 2007.

BORGES, A.L. & BORDAS, M.P., *Escolha de bacias representativas e experimentais para estudo da erosão no planalto basáltico sulamericano* In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISAS SOBRE CONSERVAÇÃO DE SOLO, 1990, Londrina, Anais.

BRAVO, J.M.; ALASSIA, G. G. P.; COLLISCHONN, W.,; TASSI, R.; MELLER, A. & TUCCI, C. E. M.. *Manual de usuário do WIN_IPH2*. Versão 1.0. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 62 pg., 2006a.

BRAVO, J.M.; ALASSIA, G. G. P.; COLLISCHONN, W.,; TASSI, R.; MELLER, A. & TUCCI, C. E. M.. *Manual de conceitos do WIN_IPH2*. Versão 1.0. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 27 pg., 2006b.

BRAVO, J. m., et al. *Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17. 2007, São Paulo. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

BRYCE D., Finnerty; Michael B. Smitha; Dong-Jun Seo; Victor Korena and Glenn E. Moglen, b, 2 *Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs*, Received 23 September 1996; Revised 3 June 1997; accepted 12 June 1997. Available online 15 January 1999.

BURNASH, R. J. C. 1995, *The NWS river forecast system catchment modelling*. In: Singh, V. J. (editor) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch. 1130 p.

CÂMARA, P.; MONTEIRO, A. M.; FUCKS, S. D. & CARVALHO. M., *Análise Espacial e Geoprocessamento*, <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/cap1-introd.pdf>., 2001.

CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O.; PEDRO JUNIOR, M. J. & BRDIN, L. *Variabilidade espacial e temporal de dados termoplúviométricos diários da rede de estações meteorológicas do Instituto Agrônomo*. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, XII. Anais, Volume I, Pág. 207- 208, Fortaleza, 2001.

CAMARGO, R, *Observações de superfícies efetuadas na estação meteorológica*, Departamento de Ciências Astronômicas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Astronômicas, EFSP, 2001.

CASTRO, N. M. R., 1996. *Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grande culture du plateau basaltique du sud du Brésil (Rio Grande do Sul)*. 224p. Tese (doutorado) - Université Louis Pasteur, Strasbourg.

CASTRO, N. M.; CHEVALIER, P. & GOLDENFUM, J.. *Projeto Potiribu, atualização 1989-1998 – dados básicos de fluviometria e pluviometria (com anexos)*. IPH: UFRGS, Revista Recursos Hídricos, Vol. 35, Janeiro de 2000.

CASTRO, N. M., CHEVALIE & GOLDENFUM, J.. *Funcionamento Hidrossedimentológico de uma terra roxa estruturada ao longo do ciclo cultural sob chuvas simuladas (Projeto Potiribu – RS)*. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2., Gramado. P. 456-465, 1996

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. & MAYS, L. W., 1988. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

CLARKE, R. T., 1973, *A Review of Some Mathematical Models Used in Hydrology with Observation on their Calibration and Use*, Journal of Hydrology, v. 19, pp. 1-20.

COLLISCHONN, W & TUCCI, C. E. M., *Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos RBRH, v. 8, n. 3, p.27-39, jul/set 2003.

CONTI, G. N., *Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de mestrado, IPH-UFRGS, 2002.

DAVIS, S. B., *Use and abuses of Cross Validation: Mathematical Geology*, V. 19, nº. 3, p 249-258, 1997.

DORNINGER, M.; SCHNEIDER, S. & STEINACKER, R.. *On the interpolation of precipitation data over complex terrain*. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Published

online, May, 26, 2008 <<http://www.springerlink.com/content/m313072103810k22/fulltext.pdf>>.

FAURES, J. M.; GOODRICH, D.C.; WOOLHISER, D. A & SOROOSHIAN, S., 1995, *Impact of small-scale spatial variability on runoff modeling*. J. Hydrol, 173, 309 -326.

FIEDLER, F. R.. *Simple, practical method for determining station weights using Thiessen polygons and isohyetal maps*. J. Hydrol. Eng. 8 (4), 219– 221, 2003.

GARCEZ, L. N. & ALVAREZ, G. N., *Hidrologia*. 2. Ed., 291 p. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1988 .

GIRARDI, R., V.; CASTRO, N. DE, PINHEIRO; A., GOLDENFUM, J. A. & SILVEIRA, A. L. L. DA. *Avaliação do efeito de escala em características de precipitação e vazão em sub-bacias embutidas da bacia do Potiribu – RS*. Submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos em julho de 2009, 12 p..

GOLDEFUN, J. A.; Castro N. M. R.; Merten G., Pinheiro A.; Paiva E. M. C. Dias de; FERNANDES C. V. S.; GASTALDINI M. C. C.; PAIVA J. B. Dias de , DORNELES F.; MINELLA J. P. G.; OPPIA L. F.; KAUFMAN V. & CARON C. F.. *Projeto Matasul: Rede de Pesquisa em Bacias Representativas e Experimentais no Bioma Mata Atlântica, na região Sul do Brasil*. In: Relatório parcial 01.2008.81p. disponibilidade irrestrita.. Chamada pública edital MCT/FINEP/CTHIDRO bacias representativas 04/2005 Convênio FAURGS-UFRGS-MATASUL.

GOODRICH, D. C.; Faures, J. M.; Woolhiser, D. A.; Lane, L. J. and Sorooshian, S., 1995. *Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability*, J. Hydrol. 173, 283-308.

GUENNI, L. & HUTCHINSON, M. F.. *Spatial interpolation of the parameters of a rainfall model from ground-based data*. Journal of Hydrology, 212–213, pp. 335–347, 1998.

HABERLANDT, U.. *Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event*. Journal of Hydrology. 332, 144–157p. 2007.

IPH (1991), *Regionalização de Vazões do Rio Grande do Sul*, CEEE/IPH 3 volumes.

KRISHNA, G., *Spatial Analysis & Modelling*, <http://www.gisdevelopment.net/technology/gis/techi0039.htm> UH. 2004

LANDIM, P. M. B., *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. UNESP/campus de Rio Claro, Departamento de Geologia Aplicada - IGCE– Laboratório de Geomatématica – Texto Didático 02, 2000

MACHADO, F. W.. *Modelagem Chuva-Vazão Mensal utilizando Redes Neurais Artificiais*. (Dissertação de Mestrado), 156 f., 2005. UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Recursos Hídricos e Ambiental.

MAIDMENT, D.R. *GIS and hydrologic modeling*. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; teyaert, .T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.

MCT/FINEP/Ação transversal Chamada pública – Previsão de Clima e tempo 04/2008.

MEDEIROS, J. D. F., GOLDENFUM, J. A., CASTRO, N.M.R.. *Problemas operacionais observados no monitoramento hidrológico de pequenas bacias rurais embutidas*. In: 15o Simpósio brasileiro de Recursos hídricos. Curitiba. Novembro 2003.

MENDIONDO, E. M. & TUCCI, C. E. M.. *Escalas Hidrológicas. I: Conceitos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 2, n 2, jul/dez 1997, 21-44.

MINE, M. R. M. *Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias*. Tese Doutorado. 146 f., 1998, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Recursos Hídricos e Ambiental.

MOREIRA, A. I.. *Modelagem Chuva-vazão com dados de Radar e Pluviômetros*. (Dissertação de Mestrado), 99 f., 2007. UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Recursos Hídricos e Ambiental.

NEARY, V. S.; HABIB, E. ; FLEMING, E. and ASCE, M., *Hydrologic Modeling with NEXRAD Precipitation in Middle Tennessee*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 9, No. 5, September, 2004.

NCRFC. (2011), *Point Precipitation Measurement, Areal Estimates and Relationships to Hydrologic Modeling*, acesso: 4 de abril, 2011.

<http://www.crh.noaa.gov/ncrfc/content/documents/mapterms.php>

OLEA, R. (1999) *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 303 pp.

OLIVEIRA, J. N. & CHAUDRH, F. H. *Métodos Geostatísticos na determinação de isoietas a partir de dados pluviométricos*. XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e II Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Recife. 1995. Anais de congresso, v. 1, p. 13-19.

PARDO-IGÚZQUIZA, E.. *Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography*. International Journal of Climatology, V. 18, n. 9, pp. 1031-1047, 1998.

PRICE, D. T.; MCKENNEYB, D. W. & NALDERC, I. A.. *A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. Agricultural and Forest Meteorology*, 101 pp. 81–94, 2000.

PROJETO RECOPE/REHIDRO – Sub-rede 1: *Monitoramento de bacias hidrográficas e processamento de dados*. Título do projeto: Variabilidade Espaço-temporal dos Processos Hidrossedimentológicos. Fevereiro de 2003. coordenador Joel Goldenfum.

Relatório Anual sobre a H Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul e Inventário Hidrelétrico da sub-bacia 75, http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_uruijui.asp, 2000.

SANT'ANNA NETO, J. H. *As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica*. São Paulo (Tese de doutoramento apresentada ao depto de geografia da FFLCH/USP), 1995

SEN, Z. & ELJADID, A. G.. *Automated average areal rainfall calculation in Libya*. *Water Resources Management*, 14, pp. 405-416, 2000.

SILVA JÚNIOR, O. B.; Bueno, E. O.; Tucci, C. E. M. & Castro, N. M. R. *Extrapolação espacial na regionalização de Vazões*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 8, nº 1, jan/mar 2003, 21-27.

SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F. & LONGLEY, A. P., *A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, 3º Edition, 2009.

SOARES, A., 2000, *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente* (Lisboa: IST Press)

SURFER. *User's Guide*. Golden Software Inc. USA. 2008.

REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S. & PILOTTO, J.E. *Daily rainfall variability at a local scale (1.000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge*. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.52, no 1, p.43-9, 1995.

TRAVOTI, L. R. & ANTONIO, M. A., *A influência da variabilidade e a incerteza na medida da chuva por radar e pluviômetrona água disponível no solo*. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5035-5042.

TUCCI, C. E. M. *Simulação no gerenciamento de recursos hídricos*. In: BARTH, F.T. et al. *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987. Cap3.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. da UFRG/ ABRH: 2009, 4.ed .

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 2005.

WILLMOTT, C.J. *On the validation of models*. Physical Geography, v.2, p.184-194, 1981.

XIAOLI Jin; Chong-yu Xu; Qi Zhang and Yongqin David Chen. *Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south China*. Quaternary International 208 (2009) 129–137

ANEXO I – SUB-ROTINA PARA APLICAÇÃO DA VALIDAÇÃO CRUZADA

Sub Main

'Subrotina para a aplicação da Técnica da Validação Cruzada

'Declarando as variáveis

Dim SurferApp As Object

Dim InFile, GridFile, BaseName,conv As String

Dim Numdias As Integer

Dim numsaida As String

' Criando um SURFER application

Set SurferApp = CreateObject("Surfer.Application")

' Não visualizar o aplicativo SURFER 8.0

SurferApp.Visible = False

' Entrada com Arquivo em formato .xls(Excel 95,97),.txt ou .dat

InFile = GetFilePath("", "DAT;TXT;CSV;XLS", CurDir(), "Select data file", 0)

'Loop para interpolação diária

For Numdias = 0 To 1300 Step 1

If InFile = "" Then End '

BaseName = InFile

ExtStart = InStrRev(InFile, ".")

If ExtStart > 1 Then BaseName = Left(InFile, ExtStart-1)

Set Doc = SurferApp.Documents.Add()

Set Plotwindow = Doc.Windows(1)

numsaida = Str\$(1)

GridFile = BaseName + numsaida + ".grd"

'Tipo de algoritmo analisado

'(Substituir o valor numérico do interpolador desejado em Algorithm:=)

'Inverse Distance = 1

```

'Natural Neighbor = 5
'Nearest Neighbor = 6
'Triangulation with Linear Interpolation = 9
'Coordenadas dos Postos utilizados para a aplicação da Validação Cruzada
'Pvg12=xMin:=236792.210, xMax:=236792.211, yMin:=6853228.678, yMax:=6853228.679
'Pvm13=xMin:=236758.799, xMax:=236758.800, yMin:=6853505.194, yMax:=6853505.195
'Pvm23=xMin:=240024.759, xMax:=240024.760, yMin:=6853608.498, yMax:=6853608.499
'Pvg31=xMin:=238418.749,xMax:=238418.750, yMin:=6847442.451,yMax:=6847442.452
'Pvm32=xMin:=231304.562,xMax:=231304.563, yMin:=6853813.413,yMax:=6853813.414
'Pvg37=xMin:=230191.665,xMax:=230191.666, yMin:=6851261.684,yMax:=6851261.685
'Pvm52=xMin:=235602.635, xMax:=235602.636, yMin:=6855266.125, yMax:=6855266.126
'Pvm2853003=xMin:=209063.556, xMax:=209063.557, yMin:=6848786.468, yMax:=6848786.469
'Pvm2853010=xMin:=227336.188, xMax:=227336.189, yMin:=6867617.138, yMax:=6867617.139
'Pvm2853023=xMin:=173476.596, xMax:=173476.597, yMin:=6855158.164, yMax:=6855158.165
'Pvm2853027=xMin:=293054.367, xMax:=293054.368, yMin:=6832640.913, yMax:=6832640.914
'Pvm2853028=xMin:=245422.509, xMax:=245422.510, yMin:=6827048.954, yMax:=6827048.955
'Pvm2853005=xMin:=244660.718, xMax:=244660.719, yMin:=6830821.448, yMax:=6830821.449
'PVm2854003=xMin:=171221.712, xMax:=171221.713, yMin:=6895352.683, yMax:=6895352.684
'PVm2854006=xMin:=146382.556, xMax:=146382.557, yMin:=6874198.066, yMax:=6874198.067
'PVm2854014=xMin:=180029.315, xMax:=180029.316, yMin:=6864832.361, yMax:=6864832.362
' Intepolação nas coordenadas do posto retirado da amostragem
'Obs: Substituir as coordenadas em xMin:=, xMax:=, yMin:=, yMax:=
SurferApp.GridData DataFile:=InFile,xCol:=1, yCol:=2, zCol:=Numdias + 3, _
NumCols:=2, NumRows:=2,xMin:=180029.315, xMax:=180029.316, yMin:=6864832.361, yMax:=6864832.362,
-
Algorithm:=9,DupMethod:=srfDupNone,SearchEnable:=True, ShowReport:=False, OutGrid:=GridFile
'Conversão da Extensão.GRD para .DAT
conv = BaseName + numsaida + ".dat"

```

```
SurferApp.GridConvert(InGrid:=GridFile, OutGrid:=conv, OutFmt:=srfGridFmtXYZ)
'Cálculo da Média aplicado em quatro pontos
SurferApp.Documents.Add srfDocWks
Dim Wks As Object
Set Wks = SurferApp.Documents.Open(FileName:=conv)
Dim WksRange As Object
Set WksRange = Wks.Columns(Col1:=1, Col2:=3)
Dim WksStatistics As Object
Set WksStatistics = WksRange.Statistics
Debug.Print WksStatistics.Mean(3)
SurferApp.Documents.CloseAll
Next
End Sub
```

ANEXO II – SUB-ROTINA PARA O CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA E DA MEDIANA APÓS A ESPACIALIZAÇÃO COM O USO DA GRADE REGULAR

Sub Main

'Sub-rotina para determinar da precipitação Média e da Mediana no interior da bacia

'com base nos valores nodais da grade regular com uso de métodos de interpolação

'Declarando variáveis

Dim SurferApp As Object

Dim InFile, GridFile, BaseName,conv,area, math As String

Dim Numdias As Integer

Dim numsaida As String

' Criando um SURFER application

Set SurferApp = CreateObject("Surfer.Application")

SurferApp.Visible = False

' Entrada com Arquivo em formato .xls(Excel 95,97),.txt ou .dat

InFile = GetFilePath("", "DAT;TXT;CSV;XLS", CurDir(), "Select data file", 0)

' Entrada com os Limites da Bacia em .bln

area = GetFilePath("", "DAT;TXT;CSV;XLS;BLN", CurDir(), "Select data file", 0)

For Numdias = 0 To 1300 Step 1

If InFile = "" Then End

BaseName = InFile

ExtStart = InStrRev(InFile, ".")

If ExtStart > 1 Then BaseName = Left(InFile, ExtStart-1)

numsaida = Str\$(1)

GridFile = BaseName + numsaida + ".grd"

'Algorithms:

'Inverse Distance = 1

'Kriging = 2

'Minimum Curvature = 3

'Modified Shepard's Method = 4

'Natural Neighbor = 5

'Nearest Neighbor = 6

'Polynomial Regression = 7

'Radial Basis Functions = 8

'Triangulation with Linear Interpolation = 9

'Geometrias da Grade

'NumCols:=50, NumRows:=50, xMin:=123048.08, xMax:=287820.51, yMin:=6777830.16, yMax:=6904820.95
(Ijuí)

'NumCols:=50, NumRows:=50, xMin:=178560.95, xMax:=282626.27, yMin:=6818275.80, yMax:=6902405.64
(Santo Angelo)

'NumCols:=40, NumRows:=40, xMin:=206978, xMax:=263348, yMin:=6824125, yMax:=6866559 (Potiribu)

SurferApp.GridData DataFile:=InFile, xCol:=1, yCol:=2, zCol:=Numdias + 3, _

NumCols:=50, NumRows:=50, xMin:=178560.95, xMax:=282626.27, yMin:=6818275.80, yMax:=6902405.64, _

Algorithm:=5, RBBasisType:=4, RBRSquared:=2, DupMethod:=srfDupNone, SearchEnable:=True,
ShowReport:=False, OutGrid:=GridFile

SurferApp.GridBlank(InGrid:=GridFile, BlankFile:=area, OutGrid:=GridFile, OutFmt:=srfGridFmtS7)

'Extensões em que os arquivos serão salvos

conv = BaseName + numsaida + ".dat"

math= BaseName + numsaida + numsaida + ".grd"

'Conversão da Extensão .GRD para .DAT

SurferApp.GridConvert(InGrid:=GridFile, OutGrid:=conv, OutFmt:=srfGridFmtXYZ)

'Gerando grades com zeros no interior da grade

SurferApp.GridMath(Function:="C=A-B", InGridA:=GridFile, InGridB:=GridFile, OutGridC:=math,
OutFmt:=srfGridFmtS7)

'Eliminação dos valores da constante $1.74e+38$ e armazenamento do resultado na quarta coluna

SurferApp.Documents.Add srfDocWks

SurferApp.GridResiduals(InGrid:=math, DataFile:=conv, xCol:=1, yCol:=2, zCol:=3, ResidCol:=4)'Saída em
extensão em .dat

```
SurferApp.ActiveDocument.Save
'Preparação para o cálculo da média e mediana
Dim Wks As Object
Set Wks = SurferApp.Documents.Open(FileName:=conv)
Dim WksRange As Object
Set WksRange = Wks.Columns(Col1:=1, Col2:=4)
Dim WksStatistics As Object
Set WksStatistics = WksRange.Statistics
Debug.Print WksStatistics.Mean(4)
'Debug.Print WksStatistics.Median(4)
SurferApp.Documents.CloseAll
Next
End Sub
```