

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA COM USO DE
DOIS MODELOS CHUVA-VAZÃO PARA
ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM
PEQUENAS BACIAS COM PEQUENA AMOSTRAGEM
DE VAZÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marilia Ferreira Tamiosso

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA COM USO DE DOIS
MODELOS CHUVA-VAZÃO PARA ESTIMATIVA DE
DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM PEQUENAS BACIAS COM
PEQUENA AMOSTRAGEM DE VAZÃO**

Marilia Ferreira Tamiosso

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

Orientadora: Prof.^a Jussara Cabral Cruz

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ferreira Tamiosso, Marília
AVALIAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA COM USO DE DOIS MODELOS
CHUVA-VAZÃO PARA ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA
EM PEQUENAS BACIAS COM PEQUENA AMOSTRAGEM DE VAZÃO /
Marília Ferreira Tamiosso.-2012.
97 p.; 30cm

Orientador: Jussara Cabral Cruz
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2012

1. modelagem hidrológica I. Cabral Cruz, Jussara II.
Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA COM USO DE DOIS
MODELOS CHUVA-VAZÃO PARA ESTIMATIVA DE
DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM PEQUENAS BACIAS COM
PEQUENA AMOSTRAGEM DE VAZÃO**

elaborada por
Marilia Ferreira Tamiosso

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Jussara Cabral Cruz, Dra.
(Presidente/Orientadora)

Masato Kobiyama, Dr. (UFSC)

Francisco Rossarolla Forgiarini, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo carinho, incentivo e apoio em minhas decisões, em especial a meus pais, Valtair e Vera, minha irmã Camila e minhas avós Maria e Rosa;

Ao meu namorado Maurício pelo carinho, compreensão e companheirismo;

À professora Jussara Cabral Cruz, minha orientadora, por acreditar em minha capacidade, por sua amizade, ensinamentos e oportunidades durante o período no grupo de pesquisa;

Ao professor Geraldo Lopes da Silveira, pela amizade e ensinamentos transmitidos desde os tempos de bolsista à nível de Graduação.

Ao professor André Luiz Lopes da Silveira, pelas ideias e contribuições a este trabalho;

Aos professores do PPGEC em Recursos Hídricos e Saneamento, pelos conhecimentos transmitidos;

Às funcionárias da secretaria do PPGEC, Deise e Marília, pela presteza e auxílio referente a assuntos administrativos;

Aos colegas do grupo GERHI pelos momentos de convívio e amizade, em especial à Pamina Lampert, Pedro Pasotini, Fabiana Perotto, Ana Carla Gindri, Elisandra Maziero e Edner Baumhardt, que contribuíram para a execução deste trabalho;

À CAPES pela bolsa de estudos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

AValiação do Método Silveira com uso de dois Modelos Chuva-Vazão para Estimativa de Disponibilidade Hídrica em Pequenas Bacias com Pequena Amostragem de Vazão

AUTORA: MARILIA FERREIRA TAMIOSSO

ORIENTADORA: JUSSARA CABRAL CRUZ

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 24 de agosto de 2012.

A falta de dados hidrológicos em pequenas bacias gera incertezas que comprometem o gerenciamento dos recursos hídricos. A atual rede hidrometeorológica do Brasil contempla praticamente as grandes bacias hidrográficas, dificultando a calibragem de modelos hidrológicos da forma convencional, que normalmente necessita um longo período de monitoramento. Agravando o problema, tem-se o fato de que a maioria dos estudos de regionalização hidrológica não possuem aplicabilidade para pequenas bacias. Neste contexto, Silveira (1997) desenvolveu uma metodologia alternativa para essa demanda, que se baseia na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado com uma amostragem reduzida de vazões – no mínimo três, em período de estiagem. Assim, seu uso é adequado para determinar uma curva de permanência confiável em seu ramo inferior dando subsídios para a gestão de recursos hídricos. Como a utilização da metodologia vem crescendo, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade dessa metodologia para estimativa de vazões medianas e mínimas utilizando dois modelos chuva-vazão em bacias com dados escassos. Para atingir o objetivo do trabalho foram estudadas quatro bacias com pequenas áreas de drenagem e diferentes uso do solo, duas localizadas próximas ao campus da UFSM (Santa Maria/RS) e outras duas no município de Rosário do Sul/RS. A essas bacias foi aplicada a metodologia desenvolvida por Silveira, utilizando dois modelos chuva-vazão diferentes: i) MPB2, modelo simplificado desenvolvido na própria metodologia Silveira; e ii) IPH2. Para isso, a partir de uma série observada de vazões, foram selecionados períodos de estiagens – seis dias sem chuva (três dias intercalados com medição de vazão). Com essas amostras ajustaram-se os modelos chuva-vazão para posterior geração da curva de permanência resultante de cada ajuste. Assim, a curva de permanência resultante de cada evento foi comparada com a curva de permanência da série inteira observada, através de análises estatísticas e determinação de intervalos de confiança. Como principal resultado da análise, todas as bacias apresentaram um erro de estimativa pequeno com 90% de confiança, na determinação das vazões com 90% e 95% de permanência, que são comumente utilizadas em processos de outorga de direito de uso. Portanto, a metodologia testada gerou resultados satisfatórios para dar subsídios à gestão. Como os dois modelos chuva-vazão mostraram resultados aceitáveis para determinação das vazões mínimas, sugere-se adotar o MPB2, que consiste em um modelo simplificado e de fácil aplicação, enquanto o modelo IPH2 exige maior cautela de utilização, conforme considerações descritas nesta dissertação.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica. Método Silveira. Modelo IPH2. Pequenas bacias.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria

EVALUATION SILVEIRA METHOD USING TWO RAINFALL-RUNOFF MODELS FOR WATER AVAILABILITY ESTIMATIVE IN SMALL BASINS WITH REDUCED FLOW SAMPLING

AUTHOR: MARILIA FERREIRA TAMIOSSO

ADVISOR: JUSSARA CABRAL CRUZ

Place and Date of Defence: Santa Maria, August 24th, 2012.

The lack of hydrological data in small basins creates uncertainties that compromise the water resources management. Nowadays, the hydrometeorological network in Brazil mainly covers the large basins, difficulting the calibration of hydrological models in the conventional manner which usually requires a long period of monitoring. Aggravating the problem, there is the fact that the most of studies of hydrological regionalization do not have applicability to small basins. In this context, Silveira (1997) developed an alternative methodology for this demand, which is based on a combination of a simplified rainfall-runoff model with a reduced sampling of flow - at least three in periods without rainfall. So, its use is appropriate to determine a confident flow duration curve in the lower branch, providing subsidies for water resources management. Since the use of the methodology is growing, the objective of this study is to verify the applicability of this methodology to estimate median and minimum streamflow using two rainfall-runoff models in no data basins. To reach the purpose, four basins with small drainage areas and different land use were studied, two located near the campus of UFSM (Santa Maria / RS) and two in the city of Rosario do Sul / RS. In these basins, the methodology developed by Silveira was applied using two different rainfall-runoff models: i) MPB2, the simplified model developed in the Silveira methodology; and ii) IPH2. For this, from a series of observed flow were selected periods of drought – six days without rainfall (three days with flow measurements, intercalated). To these samples were adjusted the rainfall-runoff models, for subsequent generation of flow duration curve from each adjustment. Thus, the resulting flow duration curve of each event was compared to the flow duration curve of whole series of observed discharge, through statistical analysis and determination of confidence intervals. As a result, all basins showed a small estimation error with 90% confidence in the determination of flows with 90% and 95% of duration ($Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$), which are normally used in procedures for granting rights of usage. Therefore, the tested methodology produced satisfactory results to aid the management of water resources. As the two rainfall-runoff models showed acceptable results for determination of minimum flows, it is suggested to adopt the MPB2 model, which consists of a simplified model and easy to apply, while IPH2 model requires greater caution of use as considerations described in this dissertation.

Key-words: Water availability. Silveira model. IPH2 Model. Small Basins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reservatório de perdas por interceptação R_{max}	28
Figura 2.2 – Situação I contemplada no algoritmo de infiltração	31
Figura 2.3 – Situação IIa contemplada no algoritmo de infiltração	32
Figura 2.4 – Situação IIb contemplada no algoritmo de infiltração	32
Figura 2.5 – Histograma tempo-área	33
Figura 2.6 – Hidrograma e períodos de recessão.....	37
Figura 2.7 – Estrutura metodológica do método Silveira (1997)	39
Figura 2.8 – Esquema do modelo chuva-vazão simplificado.....	41
Figura 3.1 – Estratégia metodológica	43
Figura 3.2 – Localização das bacias hidrográficas do Campus da UFSM	45
Figura 3.3 – Localização das bacias do campus da UFSM em relação às Regiões Hidrográficas do RS	46
Figura 3.4 – Localização das bacias de Rosário do Sul em relação às Regiões Hidrográficas do RS	47
Figura 3.5 – Localização das bacias hidrográficas no município de Rosário do Sul	48
Figura 3.6 – Localização da estação meteorológica utilizada no estudo.....	51
Figura 3.7 – Localização das estações pluviométricas utilizadas no estudo	52
Figura 3.8 – Esquema de estiagem simulada.....	54
Figura 3.9 – Modelo chuva-vazão MPB2 em Excel® – planilha entrada de dados diários.....	56
Figura 3.10 – Modelo chuva-vazão MPB2 em Excel® – planilha parâmetros e gráfico.....	57
Figura 3.11 – Modelo chuva-vazão IPH2 em Excel® – planilha entrada de dados.....	61
Figura 3.12 – Modelo chuva-vazão IPH2 em Excel® – planilha parâmetros e gráfico.....	62
Figura 4.1 – Curva de permanência das vazões observadas.....	65
Figura 4.2 – Exemplo de ajuste de um evento no modelo IPH2	70
Figura 4.3 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo MPB2.....	76
Figura 4.4 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	76
Figura 4.5 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	77
Figura 4.6 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo MPB2.....	77
Figura 4.7 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	78
Figura 4.8 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	78
Figura 4.9 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo MPB2.....	79
Figura 4.10 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo MPB2	79
Figura 4.11 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	80
Figura 4.12 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	80
Figura 4.13 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	81

Figura 4.14 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	81
Figura 4.15 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo MPB2.....	82
Figura 4.16 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo MPB2.....	82
Figura 4.17 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	83
Figura 4.18 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}	83
Figura 4.19 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	84
Figura 4.20 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H	84
Figura 4.21 – Intervalos de confiança resultante de cada modelo.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Vazões ecológicas e outorgáveis para alguns estados brasileiros	15
Tabela 3.1 – Sugestões de Rmax para intervalos diários	59
Tabela 4.1 – Estudo das séries históricas de precipitação	67
Tabela 4.2 – Dados de entrada dos modelos chuva-vazão	69
Tabela 4.3 – Parâmetros calibráveis do modelo IPH2 que foram fixados	69
Tabela 4.4 – Média e desvio padrão dos parâmetros calibrados para os eventos de estiagem das quatro bacias estudadas	71
Tabela 4.5 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Urbana UFSM	71
Tabela 4.6 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Rural UFSM	71
Tabela 4.7 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Campo Rosário	72
Tabela 4.8 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Florestada Rosário	73
Tabela 4.9 – Erro das estimativas para as vazões de maior permanência	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.2	Objetivos específicos.....	11
1.3	Organização da dissertação	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Disponibilidade Hídrica	13
2.2	Regionalização hidrológica	17
2.3	Modelos chuva-vazão	21
2.3.1	Modelo IPH2	26
2.4	Método Silveira (1997)	36
2.4.1	Modelo chuva-vazão para pequenas bacias com dois parâmetros - MPB2	40
2.4.2	Aplicações do Método Silveira	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Área de Estudo.....	44
3.1.1	Bacias Hidrográficas do Campus da Universidade Federal de Santa Maria	44
3.1.2	Bacias Hidrográficas do Município de Rosário do Sul	47
3.2	Obtenção dos dados para ajuste dos modelos	49
3.2.1	Bacias Hidrográficas do Campus da Universidade Federal de Santa Maria	49
3.2.2	Bacias Hidrográficas do Município de Rosário do Sul	51
3.3	Seleção dos eventos de estiagem	52
3.4	Aplicação dos modelos	53
3.4.1	Modelo chuva-vazão MPB2	54
3.4.2	Modelo chuva-vazão IPH2	58
3.5	Análise das estimativas por mínima amostragem	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Dados para ajuste dos modelos	65
4.2	Seleção dos eventos de estiagem	68
4.3	Aplicação dos modelos chuva-vazão	68
4.4	Análise das estimativas por mínima amostragem	75
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	90
6	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

A falta de dados hidrológicos em pequenas bacias gera incertezas que comprometem o gerenciamento dos recursos hídricos. Essa situação limita o processo de gestão e planejamento de uso das águas, como exemplo estudos de aproveitamentos de pequenos mananciais, com pequenas hidrelétricas, sistemas de irrigação e abastecimento urbano. Além disso, esta falta de dados também prejudica os estudos de avaliação da qualidade das águas e de apoio direto a instrução de processos de outorga.

Para realização dos estudos citados, é necessário conhecer as vazões de estiagem do rio. Da mesma forma, para a instrução de processos de outorga de direito de uso dos recursos hídricos, as agências governamentais necessitam conhecer as respectivas disponibilidades hídricas de modo a não gerarem conflitos nem conceder outorga superior a real. Esse é um processo de desenvolvimento corrente no Brasil e no Rio Grande do Sul, função das atribuições definidas pelas últimas constituições Federal e Estadual (BRASIL, 1997; RIO GRANDE DO SUL, 1994).

A atual rede hidrometeorológica do Brasil contempla praticamente as grandes bacias hidrográficas, geralmente com áreas maiores que 500 km², conforme se observa no inventário de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Se considerarmos as bacias com áreas de drenagem inferiores a 100 km², pode-se constatar a carência quase total de dados através do inventário da rede nacional.

Esta situação dificulta a calibragem de modelos hidrológicos da forma convencional, sujeitando a grandes incertezas quanto aos resultados da quantificação de vazões. A simulação hidrológica convencional normalmente necessita de um período de monitoramento mínimo de dois anos para calibrar e validar modelos. Agravando o problema, tem-se o fato da maioria dos estudos de regionalização hidrológica ser baseados em grandes bacias, e, conseqüentemente, não possuem aplicabilidade para pequenas bacias. Isso acontece devido aos processos hidrológicos apresentarem comportamentos distintos de acordo com a escala do sistema, resultando em maiores incertezas para as estimativas (SILVEIRA e TUCCI, 1998).

Portanto, há uma grande demanda por estudos hidrológicos confiáveis para pequenas bacias que levem em conta a carência de dados fluviométricos da rede existente de monitoramento.

Foi neste contexto que Silveira (1997) em sua tese de doutorado desenvolveu uma metodologia que oferece uma alternativa a essa demanda. A metodologia proposta baseia-se em um modelo chuva-vazão simplificado para pequenas bacias com dois parâmetros (MPB2) combinado com uma amostragem reduzida de vazões – no mínimo três, em período de estiagem. Uma vez que o modelo representa o comportamento da bacia na estiagem, seu uso é adequado para a determinação de uma curva de permanência confiável em seu ramo inferior, ou seja, para determinação de disponibilidade hídrica dando subsídios para a gestão de recursos hídricos. Dessa forma, a estratégia metodológica de mínima amostragem constitui uma solução alternativa à necessidade da obtenção de séries contínuas de vazões, que é feita por um monitoramento convencional.

Como a utilização dessa metodologia vem crescendo, tornam-se necessários mais estudos que comprovem que esta metodologia é satisfatória, para a gestão, para estimativa de disponibilidade hídrica. Esta questão conduz o foco central desta dissertação.

1.1 Objetivo

Avaliar a aplicabilidade do Método Silveira (1997) para estimativa de vazões medianas e mínimas em bacias com dados escassos utilizando dois modelos chuva-vazão: MPB2 e IPH2.

1.2 Objetivos específicos

O objetivo geral é realizado por meio dos objetivos específicos:

a) Modelagem de quatro bacias de pequena área com diferentes usos do solo, utilizando a metodologia desenvolvida por Silveira (1997) em dois modelos chuva-vazão: i) o modelo simplificado de dois parâmetros para pequenas bacias desenvolvido na própria metodologia Silveira (1997) - MPB2; e ii) o modelo IPH2, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (TUCCI ET AL, 1983; TUCCI, 2005).

b) Análise estatística dos resultados das modelagens

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada da seguinte forma:

Capítulo 2 – refere-se à revisão bibliográfica, onde são abordados os métodos usualmente adotados em bacias sem dados: regionalização hidrológica e simulação chuvas-vazão.

Capítulo 3 – apresenta a metodologia adotada para se atingir o objetivo do trabalho. Neste capítulo é apresentada a caracterização das bacias estudadas, a forma e critérios de obtenção dos dados de entrada dos modelos utilizados, descrição e suposições adotadas em cada modelo e as análises estatísticas realizadas para validação do estudo.

Capítulo 4 – apresenta os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta.

Capítulo 5 – contém as conclusões e recomendações finais do presente trabalho. São sintetizadas conclusões sobre os capítulos anteriores e apresentadas algumas recomendações para futuros estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para sua gestão. No entanto, a carência de dados fluviométricos em pequenas bacias resulta em grandes incertezas na estimativa da disponibilidade hídrica. Esta situação dificulta a calibragem de modelos hidrológicos da forma convencional, pois em locais sem dados de vazão, com necessidade de estudo imediato de vazões mínimas, não existe possibilidade de instalar uma estação fluviométrica e esperar a formação de uma série longa.

Neste caso, as alternativas comumente utilizadas são: a) estudos de regionalização de variáveis ou funções hidrológicas referentes às vazões mínimas; b) geração de séries cronológicas de vazões por modelos chuva-vazão, com parâmetros extrapolados regionalmente; e c) pequenas amostragens de vazão no local de interesse em período de estiagem combinado com modelo chuva-vazão (Método Silveira).

Neste capítulo, os três métodos acima citados estão descritos na sequência, precedidos de algumas considerações e conceitos sobre disponibilidade hídrica.

2.1 Disponibilidade Hídrica

Segundo Branco (2006), disponibilidade hídrica é a quantidade de água que pode ser retirada de um manancial sem que se comprometa a flora e a fauna da bacia.

Para o caso de estudos de disponibilidade hídrica e preservação ambiental, é fundamental o conhecimento das vazões mínimas da bacia hidrográfica de interesse, pois estão vinculadas a períodos críticos de oferta de água e que condicionam a demanda. Assim, as vazões mínimas são fundamentais para avaliações de aproveitamentos de pequenos mananciais, como pequenas centrais hidrelétricas, sistemas de irrigação e abastecimento urbano e avaliação quantitativa e qualitativa das águas para apoio direto a instrução de processos de outorga.

Segundo Silveira e Silveira (2001), as vazões mínimas ocorrem em períodos de estiagem pelo esgotamento de reservas de água do subsolo que afloram nas fontes de talvegues dos cursos hídricos. A tendência das vazões de estiagem é diminuir continuamente

caso não ocorra chuva para recarregar as reservas (aquíferos), acelerando-se pelas perdas por evaporação e infiltração no leito do rio. Apesar de conhecermos a natureza das vazões mínimas, seu estudo é dificultado pela complexidade dos processos hidrológicos da bacia hidrográfica e caracterização geralmente precária da conexão entre aquíferos e rios. Por este motivo, as vazões mínimas são normalmente estudadas com base exclusivamente em medidas fluviométricas, podendo ser analisada por três enfoques (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001):

Vazão mínima estatística – é determinada pelo seu valor, duração e período de retorno. O valor corresponde à média da vazão de estiagem na duração considerada e o período de retorno é fornecido pela distribuição estatística que melhor se ajusta a esta variável. O período de retorno de uma determinada vazão de estiagem estatística corresponde então ao tempo médio em que ela pode ser inferiorizada ou igualada. A vazão mínima estatística geralmente utilizada em estudos de disponibilidade é a $Q_{7,10}$, que representa a vazão mínima média de sete dias com dez anos de período de retorno.

Vazão mínima da curva de permanência – a curva de permanência representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais (ou de qualquer outra duração) de uma determinada bacia hidrográfica, fornecendo a porcentagem de tempo que uma dada vazão é igualada ou superada num período histórico definido. Geralmente utiliza-se a vazão de 90% ou 95% de permanência ($Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$) como representativa de vazão mínima.

Vazão mínima ecológica – ou vazão de preservação ambiental, são as vazões mínimas necessárias que garantem a sobrevivência dos ecossistemas. Sua definição depende da realidade local, de estudos multidisciplinares de dados fluviométricos em conjunto com o ecossistema dependente do curso hídrico. Na falta de tais estudos, estimativas estatísticas têm substituído a abordagem ecológica e frequentemente a vazão mínima ecológica é definida em função da $Q_{7,10}$ ou vazões de maior permanência no tempo ($Q_{90\%}$ ou $Q_{95\%}$), sem qualquer ligação com os ecossistemas.

Em processos de outorga de direito uso dos recursos hídricos, a vazão máxima outorgável é definida em função da vazão mínima ecológica, ou seja, a vazão que deve ser mantida no curso hídrico. Observa-se ainda que no decorrer do texto da presente dissertação, quando se fala em “disponibilidade hídrica” refere-se à “vazão outorgável”, que pode ser utilizada sem comprometer a vazão ecológica. O tema disponibilidade hídrica e outorga está discutido e bem documentado em Cruz (2001).

A Tabela 2.1 apresenta as vazões ecológicas e outorgáveis definidas pela legislação de alguns estados brasileiros.

Tabela 2.1 – Vazões ecológicas e outorgáveis para alguns estados brasileiros

Estado	Vazão de referência	Vazão máxima outorgável	Vazão ecológica
PR	Q _{95%}	50% da Q _{95%}	50% da Q _{95%}
MG	Q _{7,10}	30% da Q _{7,10}	70% da Q _{7,10}
TO	Q _{90%}	75% da Q _{90%}	25% da Q _{90%}
PE	Q _{90%}	80% da Q _{90%}	20% da Q _{90%}
BA	Q _{90%}	80% da Q _{90%}	20% da Q _{90%}
PB	Q _{90%}	90% da Q _{90%}	10% da Q _{90%}
RN	Q _{90%}	90% da Q _{90%}	10% da Q _{90%}
CE	Q _{90%}	90% da Q _{90%}	10% da Q _{90%}

Fonte: Adaptado de Benetti et al (2003)

No estado do Rio Grande do Sul, a vazão ecológica é definida pelo Decreto Estadual nº 37.033 de 1996, Artigo 5º: “*Ressalvada a competência da União, a FEPAM definirá as quantidades mínimas de água necessárias para manutenção da vida nos ecossistemas aquáticos, para cada Bacia Hidrográfica*”.

Dessa forma, observa-se que as vazões de maior importância para estudos de disponibilidade são as vazões de referência Q_{90%}, Q_{95%} e Q_{7,10}. Por este motivo, nesta dissertação será dado maior enfoque à determinação da Q_{90%} e Q_{95%}. Sendo que todas as vazões de referência são determinadas por análises estatísticas e dependem somente da série de vazões, ao conseguirmos uma série de vazão que bem represente as vazões de maior permanência no tempo, conseqüentemente a vazão Q_{7,10} também será bem representada.

A estimativa da disponibilidade hídrica onde existem dados disponíveis é relativamente fácil de ser alcançada, mesmo que sujeita a algumas incertezas. No entanto, as bacias sem dados (ou escassos), que são a maioria em muitas partes do mundo, têm gerado grandes dificuldades para uma estimativa adequada. A falta de redes de monitoramento aumentam as incertezas da previsão e gestão de recursos hídricos, tanto em quantidade como em qualidade da água. O problema é agravado pelos impactos antropópicos (como mudanças no uso do solo) e a variabilidade e mudanças climáticas. Segundo Sivapalan et al (2003), as predições¹ em bacias sem dados sob estas condições são altamente incertas.

Para contornar esta situação, a Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS – *International Association of Hydrological Sciences*) lançou a Década IAHS em

¹ **Predição ou Previsão?** Segundo Tucci (2010), a **previsão** de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa num determinado período de tempo desta variável. Já a **predição** é a estimativa da vazão sem relação com um período de tempo definido, como a vazão com um determinado nível de probabilidade de ocorrência num determinado local.

Predição em Bacias sem Dados (PUB – Prediction on Ungaged Basins), de 2003 a 2012.

O objetivo principal do programa científico PUB concentra-se na estimativa e redução das incertezas preditivas. A iniciativa é destinada à “formulação e implementação de programas científicos adequados para envolver e dinamizar a comunidade científica, de forma coordenada, para alcançar grandes avanços na capacidade de fazer previsões em bacias sem dados” (SIVAPALAN et al, 2003).

Segundo IAHS (2012), a ideia surgiu de discussões entre os membros IAHS na *World Wide Web* (<http://www.w3.org/>) e durante uma série de reuniões da IAHS em Maastricht/Holanda (18-27 julho, 2001), em Kofu/Japão (28-29 de Março, 2002) e em Brasília/Brasil (20-22 de Novembro, 2002) sobre a necessidade de reduzir a incerteza preditiva da ciência hidrológica e prática.

Nesse contexto, PUB tem os seguintes objetivos:

- ◆ Avançar a capacidade de predição de vazão em bacias sem dados, juntamente com as estimativas da incerteza preditiva;
- ◆ Avançar o conhecimento e entendimento das mudanças climáticas e os controles da paisagem sobre os processos hidrológicos que ocorrem em todas as escalas, a fim de limitar a incerteza preditiva;
- ◆ Demonstrar o valor dos dados para as previsões hidrológicas, e fornecer uma base racional para futuras aquisições de dados, inclusive de fontes alternativas de dados, através da quantificação das relações entre os dados e a incerteza de predição;
- ◆ Avançar as bases científicas da hidrologia, e fornecer uma base científica para o manejo sustentável das bacias hidrográficas;
- ◆ Promover atividades de capacitação para o desenvolvimento do conhecimento científico e de tecnologias adequadas para áreas e comunidades onde ela é necessária.

A pesquisa científica sobre PUB é construída em torno de oito temas e é executado por meio de vários grupos de trabalho. Cada tema é liderado por um coordenador e diversos membros adicionais, nomeados a cada biênio (IAHS, 2012). A década PUB foi composta por cinco biênios, sendo cada um com foco diferente:

- ◆ 1º Biênio (2003/2005) – Iniciação;
- ◆ 2º Biênio (2005/2007) – Crescimento;
- ◆ 3º Biênio (2007/2009) – Balanço;
- ◆ 4º Biênio (2009/2011) – Consolidação; e
- ◆ 5º Biênio (2011/2012) – Divulgação.

O último biênio incidirá sobre a finalização e lançamento de produtos principais do movimento. Esta fase final não se destina a apoiar as novas atividades, mas para garantir que seus produtos recebam divulgação e oportunidades para aplicação prática.

Como o foco desta dissertação é a modelagem hidrológica visando uma boa estimativa de disponibilidade em bacias sem dados com pequena área de drenagem, foram pesquisadas experiências de outros países com relação a esta problemática. Estas experiências estão citadas no decorrer desta revisão bibliográfica.

2.2 Regionalização hidrológica

De acordo com ANEEL (2002), a regionalização hidrológica pode ser definida como o processo de transferência de informações de um local para outro, dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante.

Estas informações podem ser características fisiográficas e hidrometeorológicas da bacia e parâmetros estatísticos calculados a partir das séries de vazões de postos da região. São exemplos típicos de métodos de regionalização aqueles que fazem ajuste de uma distribuição estatística a uma variável (ou a um parâmetro ou a uma função hidrológica), combinando-a com a regressão desta mesma variável com características físicas das bacias (a área de drenagem quase sempre é uma delas) e características hidrometeorológicas (precipitação média anual, frequentemente) (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

Segundo ANA (2009), em geral, equações dependentes somente da área e da precipitação são mais adequadas.

Uma metodologia de regionalização tradicional é a proposta pela Eletrobrás (1983), que utiliza equações de regressão regionais, aplicadas a regiões hidrológicamente homogêneas. Por exemplo, para a estimativa da média das vazões mínimas com diferentes durações de estiagem, a equação de regressão pode ter a seguinte forma:

$$qm_d = aA^bL^cS^dDD^eP^fd^g \quad (1)$$

Onde A é a área da bacia, L e S são o comprimento e a declividade do rio principal, DD é a densidade de drenagem, P é a precipitação anual e d é a duração da estiagem. Os parâmetros a, b, c, d, e, f e g são obtidos por regressão linear múltipla.

Existem também modelos de regionalização simplificados e de fácil aplicação para locais sem dados, os quais muitas vezes também não possuem características fisiográficas e hidrometeorológicas disponíveis para a região em análise.

Na falta de dados hidrológicos, bem como na necessidade de respostas rápidas, é comum a utilização de procedimentos simplificados. Por exemplo: uma interpolação linear de valores em pontos próximos do local desejado para se determinar o valor necessário; a utilização de médias aritméticas; e médias ponderadas. No caso da precipitação, por exemplo, é comum a utilização de médias ponderadas pelo inverso da distância ao quadrado, polígonos de Thiesen ou mapas de isoietas. Já para o caso de vazões, a simples interpolação não fornece bons resultados. Esta variável está sujeita a diversas variáveis explicativas como a área, a escala, a precipitação, entre outras. (AGRA et al., 2003).

Para a determinação rápida e simplificada da vazão em um local sem dados, supõe-se a proporcionalidade linear entre as áreas: toma-se a vazão específica de um local mais próximo com dados e multiplica-se esta vazão específica pela área do local sem dados, desde que observadas as mesmas características fisiográficas, climatológicas e de escala entre as bacias.

Entre várias regionalizações usuais (vazões máximas, vazões médias, vazões mínimas, curvas de permanência, etc.), a regionalização da curva de permanência é um estudo frequentemente utilizado.

Na regionalização da curva de permanência podem ser adotados dois procedimentos baseados (CEEE, 1991): a) na parametrização da curva, relacionando os parâmetros com características fisiográficas e climatológicas da bacia, e; b) na interpolação, gráfica ou analítica, de uma curva passando por vazões com permanências pré-definidas e estimadas a partir das referidas características da bacia. No entanto, para a regionalização da curva de permanência há uma variedade de abordagens, tanto para modelos paramétricos como para interpolativos, sem que nenhuma possa ditar sua superioridade sobre a outra.

Os modelos de regionalização que definem a curva de permanência na forma parametrizada podem provocar erros nas estimativas do ramo inferior da curva, onde os escoamentos são menores, embora possa apresentar um bom ajuste global. Já os usos de modelos do tipo interpolativos minimizam este erro pela estimativa ponto a ponto da curva no trecho de interesse (SILVEIRA e SILVEIRA, 2001).

CEEE (1991) apresentou um estudo da curva de permanência para o Rio Grande do Sul, dividido em seis regiões, pelo método interpolativo. Foram utilizados dados de vazões diárias de 105 postos com áreas de contribuição entre 41 e 189.300 km² (mediana de 2058

km²). A regionalização se deu pela regressão de $Q_{50\%}$ e $Q_{95\%}$ com a área da bacia através de uma equação de potência do tipo:

$$Q_{50\%} \text{ ou } Q_{95\%} = cA^d \quad (2)$$

Onde A é a área da bacia em km², c e d são os parâmetros obtidos da regressão.

Outra regionalização para o Estado do Rio Grande do Sul, incluindo parte do Estado de Santa Catarina, foi realizada por ANEEL (2001a) e ANEEL (2001b). O objetivo foi regionalizar funções hidrológicas que permitam avaliar a disponibilidade hídrica superficial para inventário em estudos e projetos que envolvam o uso da água e em especial aqueles relativos aos aproveitamentos hidro-energéticos. Para isso, foram regionalizadas as seguintes funções hidrológicas: vazões máximas, vazões médias, vazões mínimas, curva de regularização de vazões e curva de permanência anual e sazonal. ANEEL (2001b) desenvolveu o estudo para a Região Hidrográfica do Guaíba e Região Hidrográfica da Lagoa dos Patos, enquanto ANEEL (2001a) desenvolveu o estudo para a Região Hidrográfica do rio Uruguai. Ainda, das bacias utilizadas no estudo, 13% possuem área menor que 500 km² e apenas 1% com área menor que 100 km².

Ribeiro et al. (2005) avaliou três metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$) aplicadas na bacia hidrográfica do Rio Doce (área de drenagem de 83.400km²): i) Eletrobrás (equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas); ii) técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas; e iii) interpolação linear, baseada no princípio da vazão específica. As vazões mínimas de referência estimadas pelas três metodologias foram comparadas com valores observados. O método que apresentou maior precisão foi o proposto pela Eletrobrás, com um menor erro relativo médio de 16,56 %.

Young (2006) estudou o problema da regionalização de um modelo chuva-vazão para 260 bacias hidrográficas no Reino Unido (95% das bacias tem área entre 3,19 a 1509,67 km² - mediana de 110,25 km²). Os parâmetros calibrados do modelo foram relacionados com as características climáticas e fisiográficas das bacias, e a regionalização desse conjunto de parâmetros foi realizada através de duas abordagens: análise de regressão multivariada e a abordagem do vizinho mais próximo. A qualidade da simulação baseada na regressão produziu melhores resultados preditivos, os quais segundo o autor são encorajadores para a gestão de recursos hídricos, salvo suas limitações.

Yadav et al. (2007) apresentou um estudo piloto utilizando 30 bacias hidrográficas do

Reino Unido (áreas de 47,9 a 1090,4 km²) onde os parâmetros de um modelo hidrológico são regionalizados em um quadro de incertezas. Os resultados são intervalos esperados de vazões que podem ser usados para restringir um conjunto de predições de qualquer modelo em locais sem dados. O autor comenta que esta nova abordagem forneceu previsões confiáveis de séries contínuas de vazão nos locais sem dados testados.

Laaha e Blöschl (2006) utilizaram 325 bacias com área de drenagem de 7 a 963 km² para desenvolvimento de um modelo regionalização de vazões mínimas (Q_{95%}) através de regressão regional na Áustria. Como resultado, o mapa da Q_{95%} para todo o país combina dados locais de vazão com as estimativas de regionalização.

Ainda, estudos recentes realçam que as técnicas de interpolação espacial de dados pontuais podem ser eficazmente aplicados para a regionalização de vazão. Castiglioni et. al. (2011) comparou duas técnicas de interpolação para a previsão vazões mínimas em bacias sem dados (25% das bacias com área menor que 97 km²): a PSBI (*Physiographical Space Based Interpolation*) e a krigagem topológica, obtendo resultados promissores para ambas as metodologias.

A simples observação dos intervalos de áreas abrangidas nos estudos acima citados, todos com bons resultados, permite avaliar sua aplicabilidade para pequenas bacias. Fica evidente que bacias pequenas foram consideradas nos estudos de Young (2006), Yadav et. al. (2007), Laaha e Blöschl (2006), Castiglioni et. al. (2011). O fato de que elas possuem um regime hidrológico diferenciado em relação às grandes bacias não impede, aparentemente, que a regionalização produza bons resultados.

No entanto, para a realidade brasileira, os estudos de regionalização hidrológica, por serem definidos a partir de uma base de dados proveniente de bacias maiores não devem, por consequência, serem aplicados fora dos limites estabelecidos pelas equações regionais e principalmente para as bacias consideradas pequenas. Segundo Silveira e Silveira (2001), estas limitações se devem principalmente devido aos seguintes fatores: a) pelas diferenças nas escalas espaciais e temporais dos mecanismos de transformação chuva-vazão nas pequenas e grandes bacias; b) pelas dificuldades de caracterização de regiões hidrologicamente homogêneas devido às especialidades locais do meio físico. Quando a área da bacia diminui, baixa a escala de detalhamento, e fica difícil a caracterização de regiões homogêneas, ou seja, a heterogeneidade das pequenas bacias é muito grande; c) dificuldade de obtenção de dados confiáveis convencionais para as vazões mínimas. Muitas vezes, ao priorizar as vazões máximas e médias, os segmentos inferiores das curvas-chave dos postos fluviométricos deixam a desejar.

Porém, apesar das limitações, estudos de regionalização têm sido utilizados para referência de outorga. Um exemplo é no Estado de Minas Gerais. Para obtenção dos valores de $Q_{7,10}$ utilizada como vazão de referência para outorga no estado, o órgão responsável (Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM) recomenda a metodologia de regionalização de vazões mínimas utilizada no trabalho realizado por Souza (1993, apud IGAM, 2010) para todo o Estado. Nesse estudo de regionalização, tem-se mapas contendo isolinhas de rendimento específico, em $L/s.km^2$, para vazões mínimas e máximas - com 10 anos de período de retorno, e média de longo termo para todo o Estado.

Ainda, um estudo realizado por Azevedo et al. (2003), avaliou a utilização de sistemas de suporte à decisão para outorga de direitos de uso da água na gestão de recursos hídricos em alguns estados do Brasil: São Paulo, Bahia, Paraná, Ceará, Minas Gerais e Pernambuco. Dentre estes estados, além de Minas Gerais (já citado), os estados de São Paulo, Paraná e Bahia, na época do estudo, também utilizavam a regionalização de vazões como base técnica para estudos de outorga.

Dessa forma, podemos afirmar que a regionalização de vazões é um método bastante promissor e que pode gerar bons resultados para avaliação da disponibilidade hídrica em bacias carentes de dados, desde que exista na região disponibilidade de dados de vazão que permitam a aplicação do método. Muito provável este seja o caminho a seguir e ser desenvolvido, pois sabemos não ser possível ter dados em todos os locais desejados. No entanto, como atualmente nossos dados para pequenas bacias são escassos, a solução é lançar mão de métodos alternativos, buscando minimizar o erro das estimativas de vazões.

2.3 Modelos chuva-vazão

Os modelos chuva-vazão surgiram com a necessidade de se obterem séries de vazões mais longas e representativas para os projetos de engenharia de recursos hídricos (TUCCI, 2005). Estes modelos calculam as vazões de uma bacia hidrográfica a partir de uma série de dados de precipitação ocorrida sobre ela, juntamente com dados de evaporação e parâmetros fisiográficos. Normalmente as séries de precipitação são mais longas que as de vazão.

Os modelos chuva-vazão podem ser aplicados da seguinte forma (SILVEIRA et al., 1998): a) a extensão de séries de vazões em seções fluviais monitoradas, com parâmetros estimados a partir dos dados existentes; b) geração de séries de vazões em seções não

monitoradas, com estimativa de parâmetros a partir de valores de outras bacias.

Estas aplicações são realizadas para atender a diversos objetivos, como: a análise de consistência e preenchimento de falhas; entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia; previsão de vazão; para construção de hidrogramas de dimensionamento em previsões de cheias em tempo real; para análise de disponibilidade da água; determinar efeitos resultantes da modificação do uso do solo; dimensionamento e previsão de cenários de planejamento; entre outros.

Os modelos de transformação de chuva em vazão possuem parâmetros que buscam representar o ambiente real. Devido ao grau de abstração dos modelos, alguns parâmetros não são medidos e outros podem ter seus valores estimados com base em medições em campo. Porém, conforme salientam TASSI et al. (2006), considerando os custos da amostragem ou monitoramento, ou mesmo à disponibilidade de tempo, em alguns casos a determinação desses parâmetros em campo torna-se inviável. Nessas circunstâncias, o ajuste dos valores dos parâmetros é realizado através do processo de calibração com base em informações hidrológicas existentes na bacia.

Os modelos chuva-vazão são compostos por um conjunto de algoritmos, onde cada um representa um processo hidrológico.

O processo de interceptação pode ser representado por equações em função do uso da bacia, espécies vegetais, intensidade da precipitação, vento, etc. No entanto, estes fatores são de difícil quantificação, podendo levar a informações equivocadas. Dessa forma, a interceptação (assim como as demais perdas) geralmente é contabilizada nos modelos através de parâmetros estimados que representam a capacidade máxima de interceptação/perdas.

Para a separação dos escoamentos, um algoritmo bastante utilizado é a equação de Horton (1939, citado em SILVEIRA et al., 2009), que determina o volume infiltrado em um determinado período de tempo. No entanto, essa equação é bem ajustada para dados pontuais, e seu uso deve ser cauteloso quando aplicado para bacias hidrográficas. Para caracterizar melhor este processo, pode-se utilizar o algoritmo de Berthelot (1970, citado em SILVEIRA et al., 2009), o qual é muito conveniente para simulação do escoamento em bacias hidrográficas, pois além de avaliar quanto infiltra ou escoar superficialmente, também determina a percolação que compõe o escoamento de base. Isso porque o referido algoritmo combina a equação de Horton com a equação da continuidade e percolação. Ainda, outro algoritmo de separação dos escoamentos que vem sendo utilizado é a equação de Green-Ampt (citado em SILVEIRA et al., 2009). Este algoritmo é derivado da equação de Darcy (descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso) por meio de algumas simplificações: o

avanço da profundidade de molhamento é homogêneo e paralelo à superfície, e a sucção capilar é constante. Outra forma de separação dos escoamentos é através de relações funcionais, que é o caso do método SCS (1957, citado em TUCCI, 2009). O método considera que a relação entre o volume infiltrado e a capacidade de armazenamento do solo é a mesma que a relação entre a chuva efetiva e a chuva total. O valor da capacidade de armazenamento é determinado em função do parâmetro CN, tabelado em função da umidade, cobertura e tipo do solo. Além dos algoritmos citados acima, existem ainda modelos mais simplificados, como os métodos de Índices, que adotam um fator constante de infiltração.

Quanto ao escoamento, sua representação é retratada por duas equações: conservação de massa (continuidade) e quantidade de movimento, as quais também são chamadas de equações de Saint Vénant. Conforme as simplificações consideradas nessas equações, os modelos de escoamento podem ser classificados da seguinte forma (TUCCI, 2005):

- ◆ Armazenamento – consideram apenas a equação da continuidade concentrada e uma relação entre o armazenamento e a vazão de saída e entrada. Despreza-se a variação longitudinal da vazão e da área. A vantagem deste tipo de modelo é sua simplicidade e pequeno volume de dados. Não consideram a influência da vazão de jusante, como maré na foz de rios;

- ◆ Onda cinemática – consideram a equação da continuidade distribuída e a equação simplificada da quantidade de movimento (consideram apenas a gravidade e atrito). Também não consideram o efeito de jusante;

- ◆ Difusão – utiliza a equação da continuidade distribuída e a equação da quantidade de movimento sem os termos da inércia (consideram a gravidade, atrito e pressão). Como considera a pressão, os efeitos de jusante são levados em conta;

- ◆ Hidrodinâmicos – utilizam as duas equações de Saint Vénant completas, sem desprezar nenhum termo (gravidade, atrito, pressão e inércia). Embora este tipo de modelo seja o mais completo e preciso, requer uma quantidade de dados muito grande, geralmente de difícil obtenção.

Para a representação do processo de propagação do escoamento superficial (deslocamento da água na superfície da bacia até encontrar a calha do corpo hídrico), os algoritmos de utilização corrente são do tipo armazenamento e onda cinemática (TUCCI, 2005). Um dos primeiros modelos apresentados foi o Hidrograma Unitário (HU). O HU é um processo de transformação da chuva efetiva em escoamento superficial através de um modelo

linear, podendo ser conceitual ou empírico² (dependendo da metodologia de estimativa das ordenadas do HU). Representa a resposta da bacia a uma precipitação de volume unitário e duração Δt , determinado a partir de dados observados ou com base em dados de outras bacias (hidrograma unitário sintético). Este último baseia-se na determinação de algumas abcissas (tempo de pico e tempo de base) e ordenadas (vazão de pico). Os HUTs mais utilizados são os de Snyder (1938) e SCS (1975) citados em Tucci (2009). Um modelo conceitual bastante utilizado para propagação do escoamento é o Reservatório Linear Simples – RLS (ZOCH, 1934 citado em TUCCI, 2005). Este é um modelo linear do tipo armazenamento, e considera que o escoamento superficial sofre amortecimento equivalente a de um reservatório. Segundo Tucci (2005) o algoritmo tem apenas um parâmetro (k) e, portanto, tem dificuldade em representar bacias com retardo maior, pois a tendência é que o pico do hidrograma ocorra no mesmo intervalo da precipitação máxima ou na vizinhança. Para permitir maior flexibilidade com relação ao retardo, Nash (1957, citado em TUCCI, 2005) representou o escoamento superficial por “ n ” reservatórios em cascata. Dessa forma, o algoritmo de Nash possui dois parâmetros, o “ k ” do RLS e “ n ” referente ao número de reservatórios. Como a precipitação ocorre distribuída em toda bacia e sua contribuição não é imediata no exutório, Clark (1954, citado em TUCCI, 2005) considerou este efeito de translação através de um histograma tempo área (HTA) e combinou a um RLS. Assim, no método Clark, a precipitação é transladada pelo HTA e logo após amortecida por um reservatório linear.

Quanto à propagação do escoamento subterrâneo, os mesmos algoritmos são válidos. No entanto, alguns deles não há aplicabilidade devido à dificuldade de obtenção de dados. Por este motivo, geralmente utiliza-se um RLS para a propagação do escoamento de base, visto a simplicidade do método.

Os algoritmos representativos de cada processo hidrológico citados são apenas alguns frequentemente utilizados, dentre tantos existentes. A combinação desses algoritmos compõem os modelos chuva-vazão. Como exemplo de modelos chuva-vazão concentrados³ utilizados em nosso país pode-se citar o HEC-HMS (HEC, 2010), SCS (SCS, 1975 citado em TUCCI, 2009), IPH2 (TUCCI et al., 1983), IPHS1 (TUCCI et al., 1989 citado em IPH, 2004),

² Um modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Já os modelos empíricos (também chamados “caixa-preta”) são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm relação com os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2005).

³ Um modelo chuva-vazão concentrado considera os dados de entrada e os parâmetros representativos da bacia como valores médios, válidos para toda bacia. Usado para bacias pequenas onde a distribuição espacial não compromete os resultados.

SMAP (LOPES et al., 1982 citado em TUCCI, 2005), MODHAC (LANNA, 1997), MOPH (SILVEIRA, 1974), entre outros. Como exemplo de modelos distribuídos⁴, cita-se o Topmodel (BEVEN et al., 1994 citado em TUCCI, 2005), ANSWERS (BEASLEY e HUGGINS, 1981 citado em TUCCI, 2005), MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001), entre outros.

Ressalta-se que o tipo de modelo empregado é condicionado pelo objetivo do estudo, disponibilidade de dados e as dimensões da bacia. Igualmente, a variabilidade temporal e espacial da precipitação pode embutir erros superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos hidrológicos na bacia. Independente do modelo chuva-vazão, seu uso eficiente para calcular vazões em bacias sem dados está condicionado à sua validação.

Além disso, ao escolher e/ou desenvolver um modelo, deve-se observar o princípio da parcimônia, que segundo Tucci (2005), é a busca da representação adequada do comportamento de um processo ou um sistema por um modelo com o menor número possível de parâmetros. Os modelos hidrológicos devem ser confiáveis e robustos, pois essas qualidades influenciam na vazão calculada pelo modelo. Alguns estudos sobre modelos conceituais de chuva-vazão têm mostrado que uma das causas da incerteza dos valores calculados é o excesso de parâmetros do modelo, que muitas vezes podem ser mal definidos.

A crescente capacidade do homem modificar o ambiente tem exigido o desenvolvimento de modelos que representem mais realisticamente os processos hidrológicos, para que seja possível avaliar os impactos tanto qualitativos como quantitativos destas alterações. No entanto, para isso são necessários modelos mais complexos, conseqüentemente, com maior número de parâmetros.

Neste contexto, Perrin et al (2001) estudou a relação entre o número de parâmetros otimizados e o desempenho de 19 modelos concentrados de simulação diária, em 429 bacias da França, EUA, Austrália, Costa do Marfim e Brasil. Os resultados mostraram que os modelos mais complexos (maior número de parâmetros) superaram os mais simples para a calibração, mas não para a validação. Os autores comentam que apesar de um maior número de parâmetros serem necessários para resolver alguns problemas de predição, estes podem ser de difícil estimação, resultando em incertezas e dificuldade de validação. O estudo mostrou que alguns modelos parcimoniosos podem produzir resultados promissores, embora não sejam capazes de enfrentar todos os tipos de problemas.

⁴ Em um modelo chuva-vazão distribuído os dados de entrada e as características da bacia variam no espaço. Estas informações podem ser distribuídas em sub-bacias ou em células/pixels.

Ainda, Kim e Kaluarachchi (2009) avaliaram como o tamanho de uma série de dados influencia a calibração de um modelo hidrológico. Os autores calibraram as bacias da parte alta do rio Nilo Azul usando uma série de dados contínuos e descontínuos de diferentes comprimentos. Os resultados mostraram que os dados descontínuos exigiram um menor comprimento de série calibrada que os contínuos para alcançar um bom desempenho do modelo, cerca de 36 e 120 meses, respectivamente. Este fato mostra que hidrogramas descontínuos podem ser úteis na calibração de modelos. No entanto, os autores comentam que o número de meses úmidos incluídos na calibração afeta fortemente a eficiência do modelo, sendo sugerido que dados descontínuos para calibração incluam ao menos 30% de meses úmidos.

Os estudos citados são exemplos de que é possível obter resultados aceitáveis de simulações com modelos chuva-vazão simplificados (poucos parâmetros) e com amostras reduzidas.

Na sequência, está descrito o modelo chuva-vazão IPH2 que será utilizado neste trabalho; adotado com o objetivo de verificar o comportamento da metodologia Silveira com outro modelo chuva-vazão, diferente do desenvolvido pelo autor. O modelo IPH2 foi escolhido para a análise por este ser um modelo que utiliza algoritmos tradicionais, além de ser de frequente utilização no país. O outro modelo chuva-vazão que será utilizado, MPB2, encontra-se descrito juntamente com a metodologia desenvolvida para sua utilização, no item 2.4.1.

2.3.1 Modelo IPH2

O modelo IPH2 foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É um modelo hidrológico chuva-vazão que utiliza poucos parâmetros e é baseado em algoritmos conhecidos. Ainda, é do tipo concentrado, ou seja, considera que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda a área estudada.

O modelo é composto pelos seguintes algoritmos (TUCCI, 2005):

- ◆ perdas por evaporação e interceptação;
- ◆ separação dos escoamentos;
- ◆ propagação do escoamento superficial; e

- ◆ propagação do escoamento subterrâneo.

Os dados de entrada necessários para aplicação do modelo são:

- ◆ área da bacia;
- ◆ tempo de concentração;
- ◆ taxa impermeável da bacia;
- ◆ coeficiente de forma do HTA (descrito na sequência, no algoritmo de propagação do escoamento superficial);
- ◆ séries de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada (para caso de calibração);
- ◆ séries de precipitação e evapotranspiração potencial (para caso de simulação).

Os parâmetros calibráveis do modelo são:

- ◆ I_o – capacidade de infiltração do solo correspondente à capacidade de campo;
- ◆ I_b – capacidade de infiltração quando o solo está saturado;
- ◆ H – parâmetro de decaimento da curva de infiltração;
- ◆ K_{sup} – parâmetro de propagação do escoamento superficial;
- ◆ K_{sub} – parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo; e
- ◆ R_{max} – capacidade máxima do reservatório de interceptação.

Na sequência, estão apresentados os algoritmos do modelo. Maiores detalhes sobre os algoritmos podem ser obtidos na literatura. O modelo está bem documentado em IPH (2006), Tucci et al (1983), Germano et al (1998), Tucci (2005), Maziero (2010), entre outros. A descrição que segue foi baseada nas literaturas citadas.

2.3.1.1 Algoritmo de perdas por evaporação e interceptação

Este algoritmo calcula a parcela da chuva que evapora e a parcela que fica retida por interceptação da cobertura vegetal e nas depressões. Inicialmente, o modelo compara a precipitação (P) com a evapotranspiração potencial (EP).

Quando $P > EP$, a evapotranspiração potencial é subtraída da precipitação ($P_t = P - EP$) e o excedente da chuva (P_t) passa a atender a interceptação dada por R_{max} (capacidade máxima

de armazenamento em um reservatório de perdas pela vegetação e nas depressões). Se P_t for suficiente para satisfazer o valor de R_{max} , então P_t é retida por interceptação até atingir sua capacidade máxima (R_{max}). O restante da chuva é entrada do algoritmo de separação do escoamento (em valor infiltrado e valor escoado superficialmente). Quando a chuva excedente P_t não é suficiente para satisfazer R_{max} , atinge apenas uma parte deste reservatório (nível R da Figura 2.1) restando o valor R_D para completar o R_{max} , então não haverá água excedente para o algoritmo de separação.

Quando $P < EP$, a evapotranspiração potencial passa a ser atendida pelo reservatório de interceptação R_{max} . No caso em que este reservatório seja totalmente esgotado, o restante da evapotranspiração passa a ser retirado da água contida no solo, através da relação linear entre a porcentagem da evapotranspiração potencial e a umidade do solo (equação 3):

$$E(t) = EP(t) \cdot S(t) / S_{max} \quad (3)$$

Onde: $E(t)$ é a evapotranspiração da superfície no tempo t ; $EP(t)$ é a evapotranspiração potencial; $S(t)$ é o estado de umidade da camada superior do solo; S_{max} é a capacidade máxima de umidade da camada superior do solo; e t é o tempo.

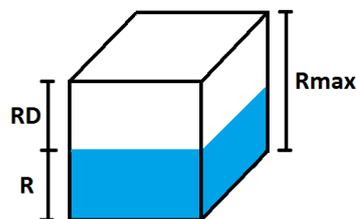


Figura 2.1 – Reservatório de perdas por interceptação R_{max}
Fonte: Adaptado de Maziero, 2010.

2.3.1.2 Algoritmo de separação dos escoamentos

Determina o volume de água resultante do algoritmo de perdas que irá escoar pela superfície e que volume irá infiltrar no solo.

A taxa impermeável da bacia (dado de entrada em porcentagem) é representada pelo parâmetro IMP. A água que cai nessa área esco superficialmente sem passar pelo algoritmo de infiltração, conforme a equação 4.

$$V_{ES} = Pt \cdot IMP \quad (4)$$

Onde V_{ES} é o volume escoado superficialmente, IMP é a taxa de área impermeável da bacia em porcentagem e Pt é a precipitação resultante do algoritmo de perdas.

Portanto, a parcela da chuva que será usada no algoritmo de separação do escoamento terá subtraído o volume dado pelas áreas impermeáveis.

$$Pt = Pt - VES \quad (5)$$

A separação do escoamento é baseada no algoritmo de Berthelot (1970 citado em TUCCI, 2005), onde é utilizada a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton, e uma função empírica para a percolação.

Considerando a camada superior do solo, que pode estar saturada ou não, o estado de umidade dessa camada é $S(t)$, a infiltração $I(t)$ e a percolação $T(t)$ no tempo t . A equação da continuidade é a seguinte:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - T(t) \quad (6)$$

A infiltração pode ser obtida pela equação de Horton (equação 7) e a percolação pela equação 8.

$$I(t) = Ib + (Io - Ib) \cdot h^t \quad (7)$$

$$T(t) = Ib(1 - h^t) \quad (8)$$

Onde: Ib é a capacidade de infiltração quando o solo está saturado; Io é a capacidade inicial de infiltração do solo; $h = e^{-k}$, e k é um parâmetro que caracteriza o decaimento da curva exponencial de infiltração e depende das características do solo.

Substituindo as equações 7 e 8 na equação 6 e integrando no intervalo de $t=0$ até t , temos:

$$S = S_0 + \frac{I_0}{\ln h} (h^t - 1) \quad (9)$$

Onde S_0 é o estado de umidade do solo quando inicia a percolação.

Isolando o termo h^t nas equações 7 e 8 e substituindo na equação 9, resultam duas equações que relacionam o armazenamento com a infiltração e percolação:

$$S(t) = a_i + b_i \cdot I(t) \quad (10)$$

$$S(t) = b_t \cdot T(t) \quad (11)$$

Sendo:

$$a_i = \frac{-I_0^2}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (12)$$

$$b_i = \frac{I_0}{\ln h(I_0 - I_b)} \quad (13)$$

$$b_t = \frac{-I_0}{\ln h I_b} \quad (14)$$

Com essas equações pode-se fazer a separação do escoamento. Da comparação entre a precipitação P_t e a capacidade de infiltração $I(t)$ no instante t , duas situações (I e II) podem ser observadas.

Situação I: $P(t) > I(t)$ (Figura 2.2). Como a precipitação é maior que a capacidade de infiltração, a equação de Horton (equação 7) pode ser utilizada. O volume infiltrado (V_i) é a integral, no intervalo de tempo $[0, \Delta t]$ da equação de Horton, que resulta na equação 15. O volume de escoamento superficial (V_e) é definido pela equação 16, e o volume percolado (V_p) é obtido pela equação 17. Os volumes calculados serão propagados no algoritmo de propagação dos escoamentos.

$$V_i = I_b \cdot \Delta t + \frac{I(t) - I_b}{\ln h} (h^{\Delta t} - 1) \quad (15)$$

$$V_e = P(t) \cdot \Delta t - V_i \quad (16)$$

$$V_p = S_{(t)} - S_{(t+1)} + V_i \quad (17)$$

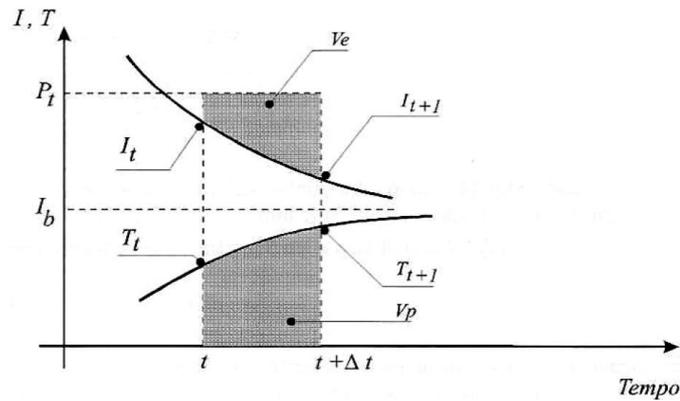


Figura 2.2 – Situação I contemplada no algoritmo de infiltração
 Fonte: Tucci (2005)

Situação II: $P(t) < I(t)$. Nesse caso, assume-se que toda precipitação se infiltra. Portanto, a infiltração é substituída pela precipitação na equação da continuidade. Substituindo a percolação T em função de S pela equação 11 e resolvendo a equação diferencial da continuidade para o intervalo de tempo $t, t+1$, resulta na seguinte equação 18 com $P(t)$ em $\text{mm}/\Delta t$.

$$S_{t+1} = S_t \cdot e^{-\Delta t/bt} + P_t \cdot bt \cdot (1 - e^{-\Delta t/bt}) \quad (18)$$

No fim do intervalo, I_{t+1} é obtida pela equação 10 e duas alternativas podem apresentar-se: $I_{t+1} > P_t$ e $I_{t+1} < P_t$.

a) $P(t) < I(t+1)$ (Figura 2.3). Nessa situação, não haverá escoamento superficial ($V_e=0$), o volume infiltrado (V_i) é toda a precipitação e o volume percolado é obtido pela equação 17.

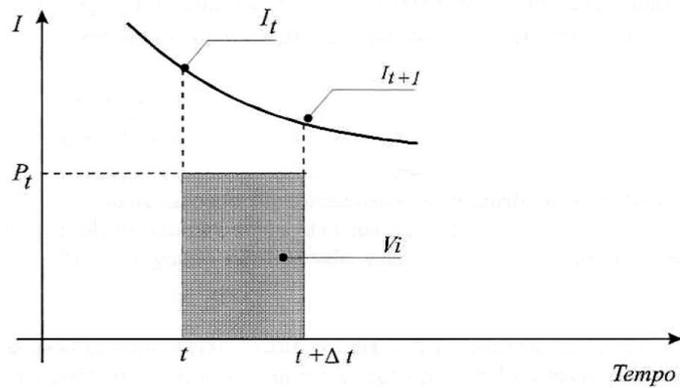


Figura 2.3 – Situação IIa contemplada no algoritmo de infiltração
Fonte: Tucci (2005)

b) $P(t) > I(t+1)$ (Figura 2.4). Nessa situação, a curva de infiltração cruza a precipitação criando duas condições diferentes. Para encontrar o ponto x da Figura 2.4, divide-se o intervalo em dois. No ponto x , $S(x)$ é determinado com base em que $I=P$, pela equação 10. O intervalo de tempo Δt_x é obtido da equação 18, resultado na equação 19 a seguir. Conhecidos os intervalos, o primeiro é tratado como situação IIa e o segundo como situação I.

$$\Delta t_x = -bt \cdot \ln\left(\frac{bt \cdot S(x) - P}{bt \cdot S(t) - P}\right) \quad (19)$$

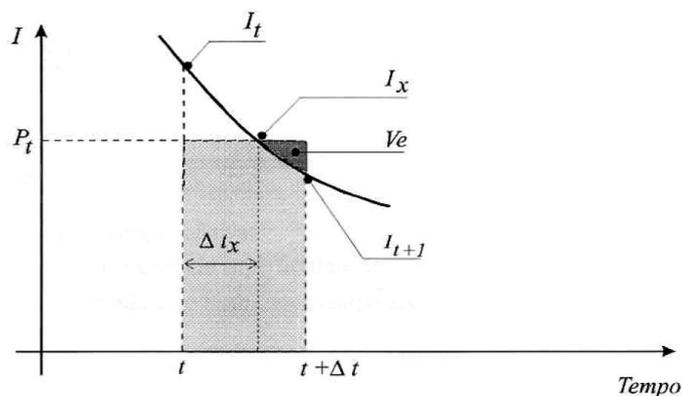


Figura 2.4 – Situação IIb contemplada no algoritmo de infiltração
Fonte: Tucci (2005)

2.3.1.3 Algoritmo de propagação do escoamento superficial

A propagação do escoamento superficial é calculada com base no método de Clark. Este método é uma combinação do histograma tempo-área (HTA) sintético com um reservatório linear simples (RLS). O HTA representa a translação da chuva pelo deslocamento sobre a superfície da bacia. O reservatório linear representa os efeitos de armazenamento das partículas de água no percurso até o ponto da saída da bacia.

a) HTA sintético:

O histograma tempo-área identifica o tempo de contribuição das partes da bacia à seção principal. O método se baseia nas isócronas, que são linhas que unem pontos da bacia de mesmo tempo de concentração com relação à saída da bacia. As isócronas são determinadas em intervalos de tempo com igual espaçamento, e o histograma é obtido a partir da determinação da área entre isócronas, conforme ilustrado na Figura 2.5.

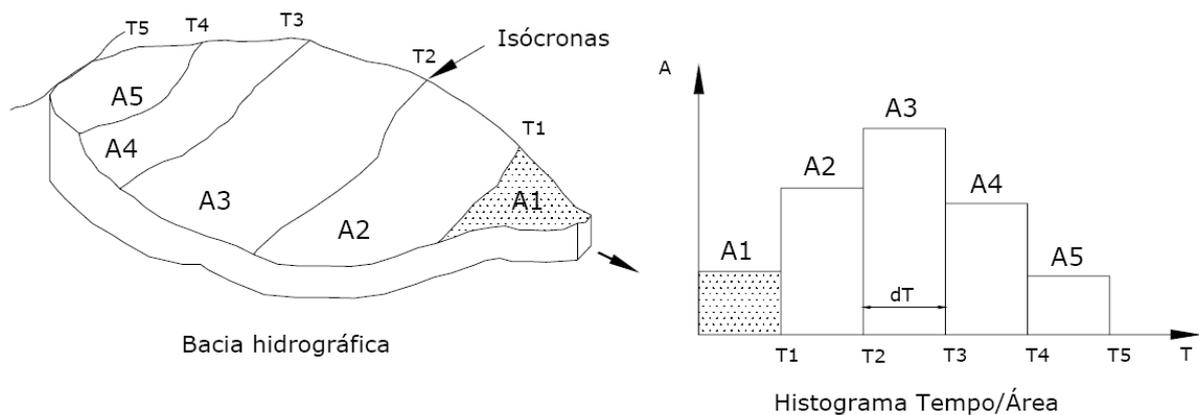


Figura 2.5 – Histograma tempo-área

Fonte: adaptado de Silveira, 2009

A determinação das ordenadas do HTA é um processo tedioso que pode ser substituído, com limitações, pelo uso de um histograma sintético. Este é obtido admitindo-se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto de estudo à seção principal.

A área acumulada de contribuição é relacionada ao tempo de percurso pelas seguintes equações empíricas:

$$Ac = at^n \quad \text{para} \quad 0 \leq t \leq 0,5tc \quad (20)$$

$$Ac = 1 - a(1 - t)^n \quad \text{para} \quad 0,5tc \leq t \leq 1 \quad (21)$$

Onde Ac é a área contribuinte acumulada dividida pela área total; t é o tempo em unidades de tempo de concentração tc ; e n o coeficiente que varia com a forma da bacia. Para uma bacia com formato retangular $n = 1$, com formato de losango $n = 2$ e com formato intermediário $n = 1,5$. Como esta distribuição é simétrica, quando $t=1/2$, $Ac=0,5$ e $A=0,5^{1-n}$. O histograma tempo-área é subdividido em intervalos onde as ordenadas são calculadas por:

$$f_i = Ac_{(i)} - Ac_{(i-1)} \quad (22)$$

O algoritmo de separação de escoamento é utilizado para a parcela permeável da bacia. A altura de água resultante desse algoritmo é $Ve(t)$. A altura de água superficial das superfícies impermeáveis é $P(t)$, calculada após o algoritmo de interceptação. A altura total de água superficial resultante das superfícies permeáveis e impermeáveis é calculada por:

$$Vs(t) = \sum_{i=r}^t Ve_{(t-i+1)} \cdot fp(i) + \sum_{i=r}^t P_{(t-i+1)} \cdot fm(i) \quad (23)$$

Onde: $r = 1$ para $t < n$; $r = t-n+1$ para $t > n$; n é o número de ordenadas do HTA; $fp(i)$ é um fator de ponderação do volume de escoamento superficial da parcela permeável; $fm(i)$ é um fator de ponderação do volume de escoamento superficial da parcela impermeável; α é a taxa impermeável da bacia.

$$fp(i) = f(i) \cdot (1 - \alpha) \quad (24)$$

$$fm(i) = \alpha \cdot f(i) \quad (25)$$

b) Reservatório Linear Simples (RLS):

Considera que o escoamento superficial sofre amortecimento equivalente a de um reservatório. Este modelo combina a equação de armazenamento (equação 26) com a equação da continuidade concentrada sem contribuição lateral (equação 27), resultando na vazão superficial propagada (equação 28).

$$S = K_{sup} \cdot Q_s \quad (26)$$

$$dS/dt = V_s - Q_s \quad (27)$$

$$Q_{S(t+1)} = Q_{S(t)} \cdot e^{-\Delta t/K_{sup}} + V_{S(t+1)} \cdot (1 - e^{-\Delta t/K_{sup}}) \quad (28)$$

Onde: K_{sup} é o tempo médio de esvaziamento do reservatório ou tempo de retardo do escoamento superficial; V_s é vazão superficial de entrada do reservatório; Q_s é a vazão superficial de saída do reservatório (vazão propagada); e S é o armazenamento do reservatório fictício.

2.3.1.4 Algoritmo de propagação do escoamento subterrâneo

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através de um RLS. Dessa forma, a vazão resultante do escoamento subterrâneo é dada por uma equação semelhante à equação 28, onde o K_{sup} é substituído por K_{sub} e V_s é substituído por V_p :

$$Q_{b(t+1)} = Q_{b(t)} \cdot e^{-\Delta t/K_{sub}} + V_{p(t+1)} \cdot (1 - e^{-\Delta t/K_{sub}}) \quad (29)$$

Essa formulação representa a recessão do hidrograma, e K_{sub} representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo.

A vazão total calculada é obtida pela soma da vazão subterrânea e superficial em cada intervalo de tempo.

2.3.1.5 Aplicações do modelo IPH2

Algumas aplicações já utilizadas deste modelo estão citadas na sequência.

Cruz (1987) testou três modelos de previsão de cheias em tempo real para a bacia do rio Itajaí, SC, onde o IPH2 foi um dos modelos testados. A autora ajustou um modelo empírico do tipo ARIMAX para correção dos erros da previsão de vazões feitas com o modelo IPH2. Com isso, a qualidade da previsão em tempo real a médio prazo foi melhorada, porém a longo prazo o modelo IPH2 sem a alteração foi considerado melhor previsor.

O modelo IPH também foi usado para previsão de cheias em tempo real por Bertoni et al (1992), juntamente com um modelo estocástico simplificado, para uma pequena bacia no Reino Unido.

Germano et. al. (1998) utilizou o modelo IPH2 para ajustar os parâmetros hidrológicos à eventos de cheia e características físicas de 28 bacias urbanas em 6 cidades brasileiras, uma vez que estas geralmente não dispõem de informações e há grande variabilidade de condições físicas. Através da análise da variabilidade dos parâmetros, foi possível orientar o uso do modelo para outras bacias brasileiras.

No estudo realizado por Brun e Tucci (2001) o modelo IPH2 foi adaptado para previsão em tempo real e utilizado para previsão das vazões afluentes do reservatório de Ernestina com base na precipitação.

O trabalho desenvolvido por Maziero (2010) utilizou o modelo IPH II aplicando o HTA-geoprocessado como variável de entrada no método de Clark. Ao comparar o modelo original e o modelo com o HTA-geoprocessado, observou-se que as alterações feitas no HTA não produziram resultados significativos no hidrograma final. A autora ainda comenta que este resultado comprova a eficácia do modelo IPH II na representação de todos os processos, mesmo com poucos parâmetros.

Ainda, com relação à calibração dos parâmetros do modelo IPH2, foram desenvolvidas técnicas de calibração automática, com o objetivo de tornar mais rápido e eficiente o processo de calibração. Para a estimativa dos parâmetros o modelo utiliza funções objetivas, algoritmos de otimização e critérios de parada. Estes, estão descritos em diversos trabalhos, como em IPH (2006), Collischonn e Tucci (2003), Bravo et al. (2009), entre outros.

2.4 Método Silveira (1997)

A metodologia proposta por Silveira (1997) baseia-se na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado com uma amostragem reduzida de vazões, constituindo uma solução alternativa à necessidade da obtenção de séries contínuas de vazões, que é feita por um monitoramento convencional. O método proposto considera que uma rápida interação com o meio, através de algumas medições locais em período de estiagem, conduz a uma boa avaliação da disponibilidade hídrica, através de um modelo chuva-vazão com dois parâmetros.

Este método teve origem a partir da observação de hidrogramas. Em bacias onde o tempo de concentração é inferior a um dia, a resposta rápida da bacia, na maioria das vezes, não coincide com a hora observada da vazão. No entanto, constatou-se que o monitoramento em intervalos diários é suficiente para a estimativa da disponibilidade hídrica, onde interessam as vazões médias e mínimas.

O deplecionamento fluvial de uma bacia é um retrato do seu comportamento, após a ocorrência das precipitações. Em pequenas bacias esse processo é mais marcante devido à resposta rápida da bacia a precipitações, função do pequeno tempo de concentração. Assim o escoamento superficial produzido ocorre normalmente nos próprios dias chuvosos e os períodos de recessão representam o período mais longo de tempo no fluviograma (Figura 2.6).

Dessa forma, a partir de algumas medições de vazão na seção de interesse em período de estiagem, busca-se representar uma série histórica de vazões através de simulação, transformando a precipitação em vazão. O significado da curva de depleção medida é dado por uma simulação de balanço hídrico diário que tenta reproduzi-la, a partir da cronologia de precipitações e estiagens, dados de fácil obtenção em qualquer região.

Sabendo isso, o método Silveira é aplicável a “pequenas bacias”, e considera estas como as áreas de drenagem onde o tempo de concentração seja inferior a um dia, de forma que a teoria do método seja válida. Como o método reproduz prioritariamente os períodos de estiagem, este é indicado para estudo de vazões de maior frequência.

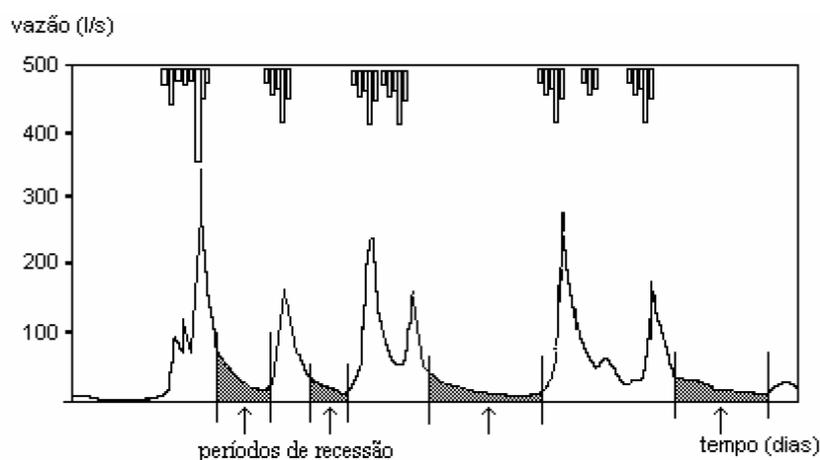


Figura 2.6 – Hidrograma e períodos de recessão

Fonte: Silveira (1997)

O método consiste em duas etapas (Figura 2.7):

Etapa I: Amostragem de vazões – realiza-se o levantamento de uma amostra reduzida de vazões em período de descarga do aquífero num curto espaço de tempo (uma a duas semanas), sem necessidade de instalações tradicionais de funcionamento contínuo (linígrafos). Esta amostra é a condição inicial para a aplicação do método.

A amostragem reduzida de vazões tem por objetivo dar uma vinculação local às estimativas, funcionando como uma ancoragem hidrológica aos procedimentos de simulação. Além disso, tem a vantagem de ser um procedimento bastante viável de ser realizado, mesmo em condições de falta de equipamentos sofisticados. A medição de vazões pode ser realizada por métodos simplificados, como o uso de flutuadores ou micromolinetes, a escolher em função das características do leito do rio amostrado.

A caracterização do deplecionamento fluvial em termos de magnitude e taxa de decaimento das vazões exige um mínimo de três medições de descargas na seção de interesse espaçadas de alguns dias, em período de estiagem, de modo a se avaliar a estabilidade do decaimento de vazões (ROCHE, 1963 citado em SILVEIRA, 1997).

Segundo Silveira (1997), a condição mínima para aplicação da metodologia foi definida como sendo o conhecimento de três medições locais, avaliadas a cada dois dias. Intervalos maiores entre as medições locais (5 dias, por exemplo) seriam melhores para a caracterização do deplecionamento fluvial na estiagem, em função da melhor estabilização do processo. No entanto, ao aumentar o intervalo também aumenta a possibilidade de ocorrência de uma precipitação que descaracterize a estiagem, provocando as perdas das medições anteriores e da mobilização de ida ao local.

Em caso de real aplicação da metodologia, estas dificuldades podem ser minimizadas, já que o engenheiro responsável pela avaliação inspecionará in loco a caracterização da estiagem através de consultas a moradores locais sobre a ocorrência de chuvas localizadas na área, nos dias anteriores aos trabalhos de campo, assim como pela avaliação direta da magnitude da vazão encontrada no corpo hídrico.

Etapa II: Simulação de série de vazões - envolve as seguintes etapas: (i) o ajuste de um modelo simplificado de balanço hídrico com a amostra reduzida, ou seja, com poucos valores de vazão conhecidos; (ii) a síntese de vazões diárias através da simulação chuva-vazão, a partir do histórico de precipitações e evapotranspirações regionais; e, (iii) determinação da curva de permanência.

O modelo chuva-vazão de dois parâmetros desenvolvido para a aplicação desta metodologia encontra-se descrito na sequência (item 2.4.1).

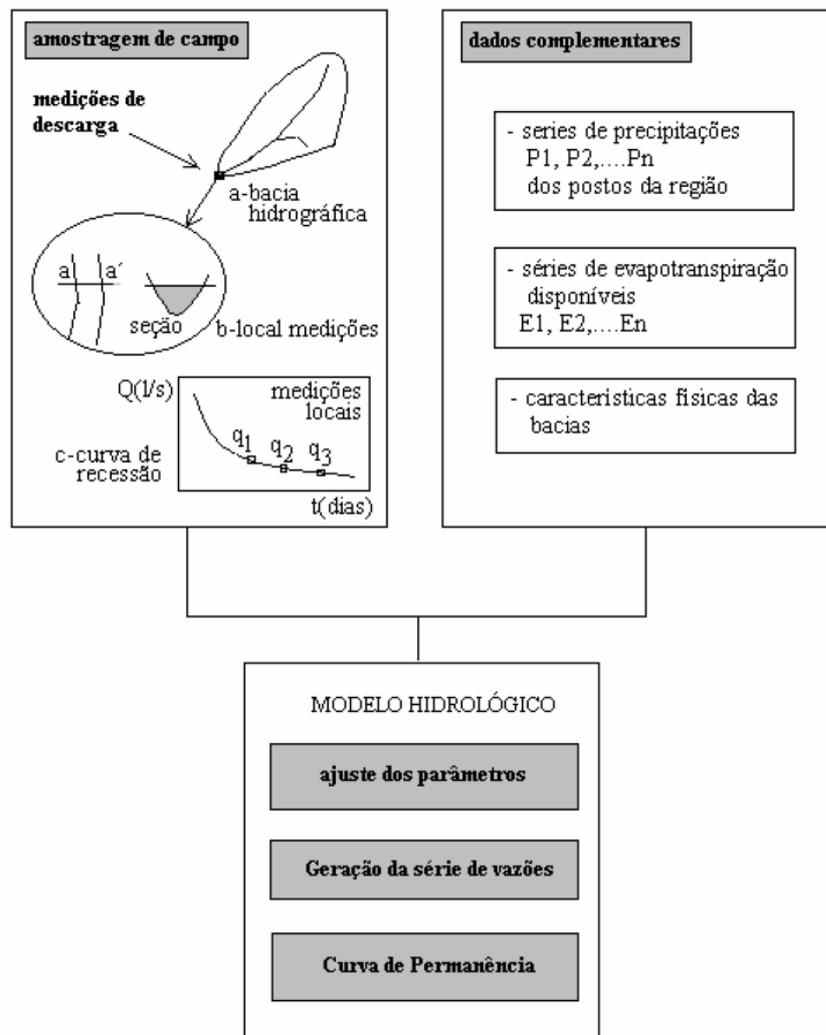


Figura 2.7 – Estrutura metodológica do método Silveira (1997)

Fonte: Silveira (1997)

Uma vez que o objetivo do método é avaliar com maior ênfase as vazões formadas no meio subterrâneo, sem deixar de calcular as vazões superficiais que podem surgir nos dias de cheia, o uso desta metodologia é adequado para as seguintes situações:

- para geração de uma curva de permanência confiável, sobretudo no seu ramo inferior;
- para o estabelecimento de uma série cronológica de vazões, ressaltando-se as incertezas dos picos gerados;
- para fornecer elementos quantitativos de vazões em estudos ambientais e de gestão de recursos hídricos.

2.4.1 Modelo chuva-vazão para pequenas bacias com dois parâmetros - MPB2

O modelo chuva-vazão MPB2 foi desenvolvido juntamente com a metodologia de mínima amostragem de vazões, com o objetivo de representar o comportamento da bacia na estiagem.

Segundo Silveira (1997), a simulação chuva-vazão através de um modelo simplificado de balanço hídrico tem por objetivo sintetizar vazões diárias para o local de interesse. O modelo utiliza o mínimo de parâmetros (princípio da parcimônia) com o objetivo de representar a faixa de vazões desejada, visando superar as limitações das técnicas atuais utilizando um mínimo de dados.

Para que o modelo tivesse o menor número de parâmetros possíveis e fosse de fácil uso para ajuste, foram estabelecidas as seguintes simplificações:

- ◆ Despreza-se o melhor ajuste da vazão quando existe escoamento superficial;
- ◆ O armazenamento na camada superior do solo é desprezível no intervalo de tempo de análise; e
- ◆ A evapotranspiração potencial é retirada da precipitação, quando houver, em cada intervalo de tempo.

Portanto, o modelo chuva-vazão MPB2 realiza a simulação em intervalos diários e funciona da seguinte maneira:

Quando a precipitação (P) é menor que a evapotranspiração potencial (E), não ocorrerá escoamento superficial. Caso contrário, uma parcela da precipitação irá infiltrar e a outra irá escoar superficialmente.

$$Pr = P - E \quad (30)$$

Onde Pr é a precipitação que gera escoamento na bacia. A precipitação efetiva e o volume infiltrado são determinados então pelas equações 31 e 32 respectivamente.

$$P_{ef} = (1 - C_{inf}) \cdot Pr \quad (31)$$

$$V_i = C_{inf} \cdot Pr \quad (32)$$

Onde C_{inf} é o coeficiente de infiltração ou fator de perda, representando a proporção da precipitação que infiltra.

O volume de infiltração é considerado alimentando diretamente o aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e geralmente de pequena profundidade na cabeceira das bacias.

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através de um reservatório linear simples (RLS), e a determinação da vazão de base se dá pela seguinte equação:

$$Qb_{(t)} = Qb_{(t-1)} \cdot e^{-\Delta t/Ksub} + Vi_{(t)} \cdot (1 - e^{-\Delta t/Ksub}) \quad (33)$$

Dessa forma, a vazão final na bacia é a soma do volume escoado superficialmente (precipitação efetiva) com a vazão de base no intervalo de tempo.

Na Figura 2.8 estão apresentados os principais elementos considerados na formulação do modelo chuva-vazão utilizados neste método.

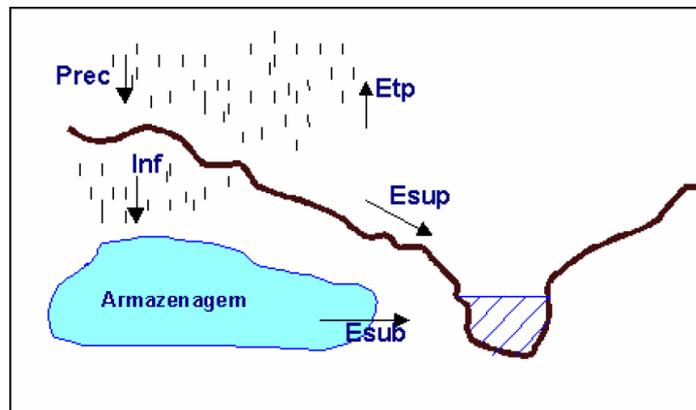


Figura 2.8 – Esquema do modelo chuva-vazão simplificado

Fonte: Silveira (1997)

A estrutura do modelo define então apenas dois parâmetros de ajuste para desenvolvimento do balanço hídrico:

- ◆ Cinf: Coeficiente de infiltração da precipitação descontada da evapotranspiração potencial. Relacionado ao armazenamento no interior da bacia, ou seja, à massa d'água que chega ao reservatório hipotético de escoamento subterrâneo.

- ◆ Ksub: Parâmetro do modelo RLS. Relacionado ao decaimento das vazões ao longo do tempo, liberadas pelo reservatório de escoamento subterrâneo.

Ressalta-se que o coeficiente de infiltração C_{inf} não possui a definição de nenhum dos três coeficientes: escoamento total, escoamento subterrâneo ou escoamento superficial. Isto porque no caso da simulação de pequenas bacias, este parâmetro traz embutido correções de volumes escoados, devido a incorreções de avaliação das áreas das bacias, representatividade dos dados de precipitação e evapotranspiração, e possibilidades de ganhos ou perdas de água subterraneamente.

O ajuste (calibração) dos dois parâmetros se dá manualmente, por meio de um processo de tentativa e erro. Considerando a existência de apenas três valores de vazões observadas, o ajuste manual tende a ser rápido.

2.4.2 Aplicações do Método Silveira

A Agência Nacional de Água (ANA), através da Nota Técnica nº 113/GEREG/SOF/ANA, de 16 de março de 2007, propôs o método de Silveira (1997) como metodologia para estimativa de disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas para fins de outorga de direito de uso de recursos hídricos, baseada em medições de vazão durante o período de estiagem. Nesta mesma nota técnica, a ANA apresenta os resultados deste método aplicado em algumas bacias do Distrito Federal.

Para atender à crescente demanda pela sistematização da metodologia, tanto de parte da ANA como eventualmente dos Estados, a ANA desenvolveu um sistema para facilitar a aplicação do método. O sistema conta com uma interface gráfica que torna seu uso amigável, mesmo para técnicos que não tenham familiaridade com modelos chuva-vazão.

Além disso, o método de Silveira (1997) foi adotado pelo órgão gestor de recursos hídricos do Estado do Mato do Grosso, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA-MT). Esta editou a Instrução Normativa nº 001/2009, em 08 de abril de 2009, a qual dispõe sobre os procedimentos a serem adotados para os processos de outorga de uso de recursos hídricos de águas de domínio do Estado do Mato Grosso, em pequenas bacias hidrográficas. Neste documento, o estado torna obrigatória a medição de vazões pelo empreendedor em pequenas bacias, de no mínimo três medições no período de estiagem, para aplicação do método.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia metodológica adotada para desenvolvimento da presente dissertação pode ser visualizada na Figura 3.1.

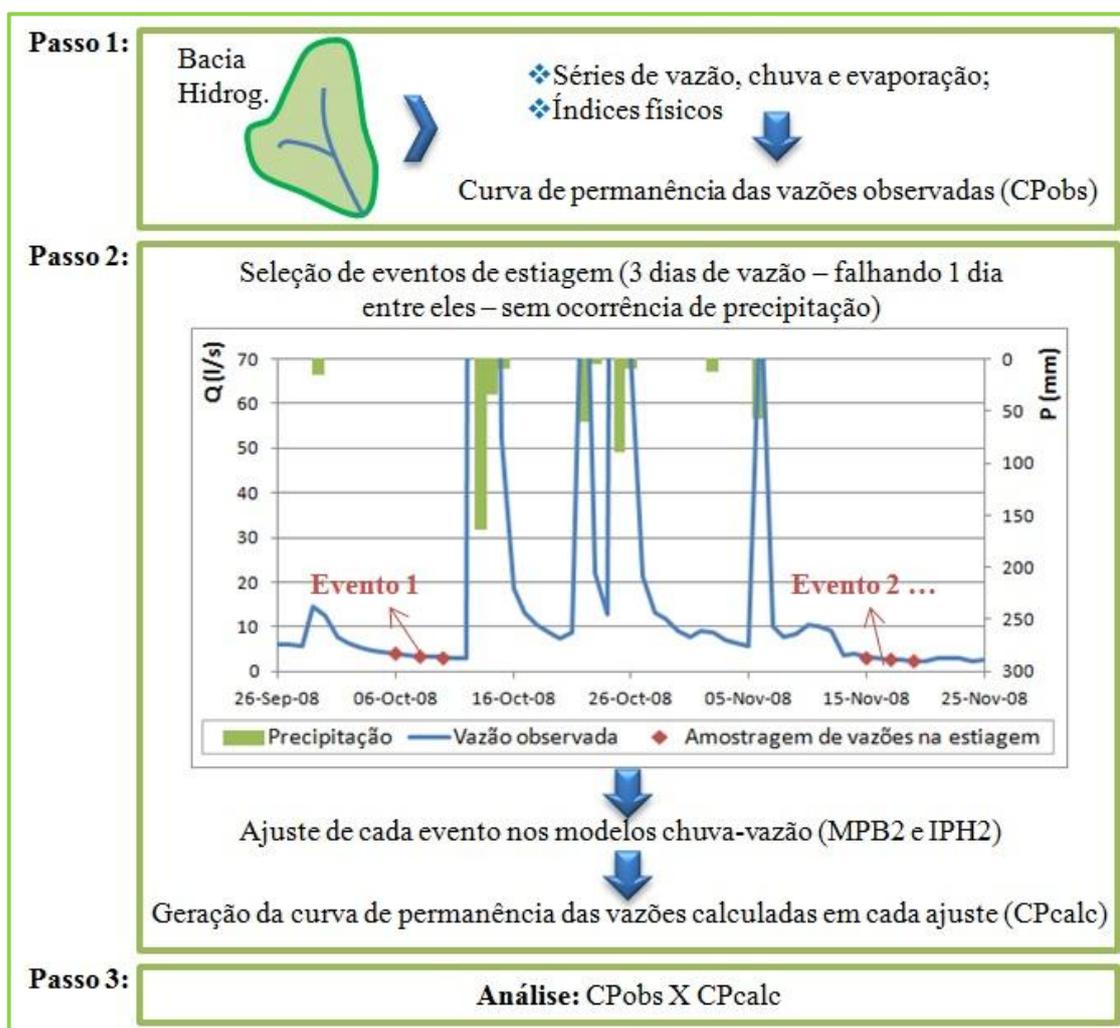


Figura 3.1 – Estratégia metodológica

Para atingir o objetivo do trabalho foram estudadas quatro bacias com pequenas áreas de drenagem, sendo que duas delas localizam-se próximas ao campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e as demais no município de Rosário do Sul. Estas são bacias experimentais do Grupo de Pesquisa em Gestão de Recursos Hídricos – GERHI, e foram

adotadas neste estudo por suas diferentes características físicas e de uso do solo, possibilitando testar os modelos em diferentes situações.

A estas bacias foi aplicada a metodologia desenvolvida por Silveira (1997), utilizando dois modelos chuva-vazão diferentes: i) o modelo simplificado MPB2, desenvolvido na própria metodologia Silveira (1997); e ii) o modelo IPH2.

Para isso, a partir de uma série observada de vazões, foram selecionados períodos de estiagens – seis dias sem chuva (três dias intercalados com medição de vazão). Com essas amostras ajustaram-se os modelos chuva-vazão para posterior geração da curva de permanência resultante de cada ajuste. Assim, a curva de permanência resultante de cada evento foi comparada com a curva de permanência da série inteira observada, através de análises estatísticas.

Na sequência deste capítulo está apresentada a área de estudo, os critérios e métodos utilizados para obtenção dos dados de entrada dos modelos (hidrometeorológicos e físicos) correspondentes às bacias analisadas e os métodos de ajuste dos modelos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação.

3.1 Área de Estudo

3.1.1 Bacias Hidrográficas do Campus da Universidade Federal de Santa Maria

No campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) são analisadas duas bacias, ambas de mesma área de drenagem de 2,29 km² e com características geológicas, hidrológicas e topográficas semelhantes, tendo como principal diferença o uso do solo. Uma das bacias, localizada à montante do campus da UFSM, possui aproximadamente metade de sua área urbanizada. Já a outra bacia, localizada dentro da área do Campus, abrange uma área de ocupação agrícola e pastoril, onde são realizados experimentos agropecuários. No decorrer do texto, as bacias serão chamadas de “Urbana UFSM” e “Rural UFSM”, respectivamente. A Figura 3.2 ilustra a localização das bacias em questão.

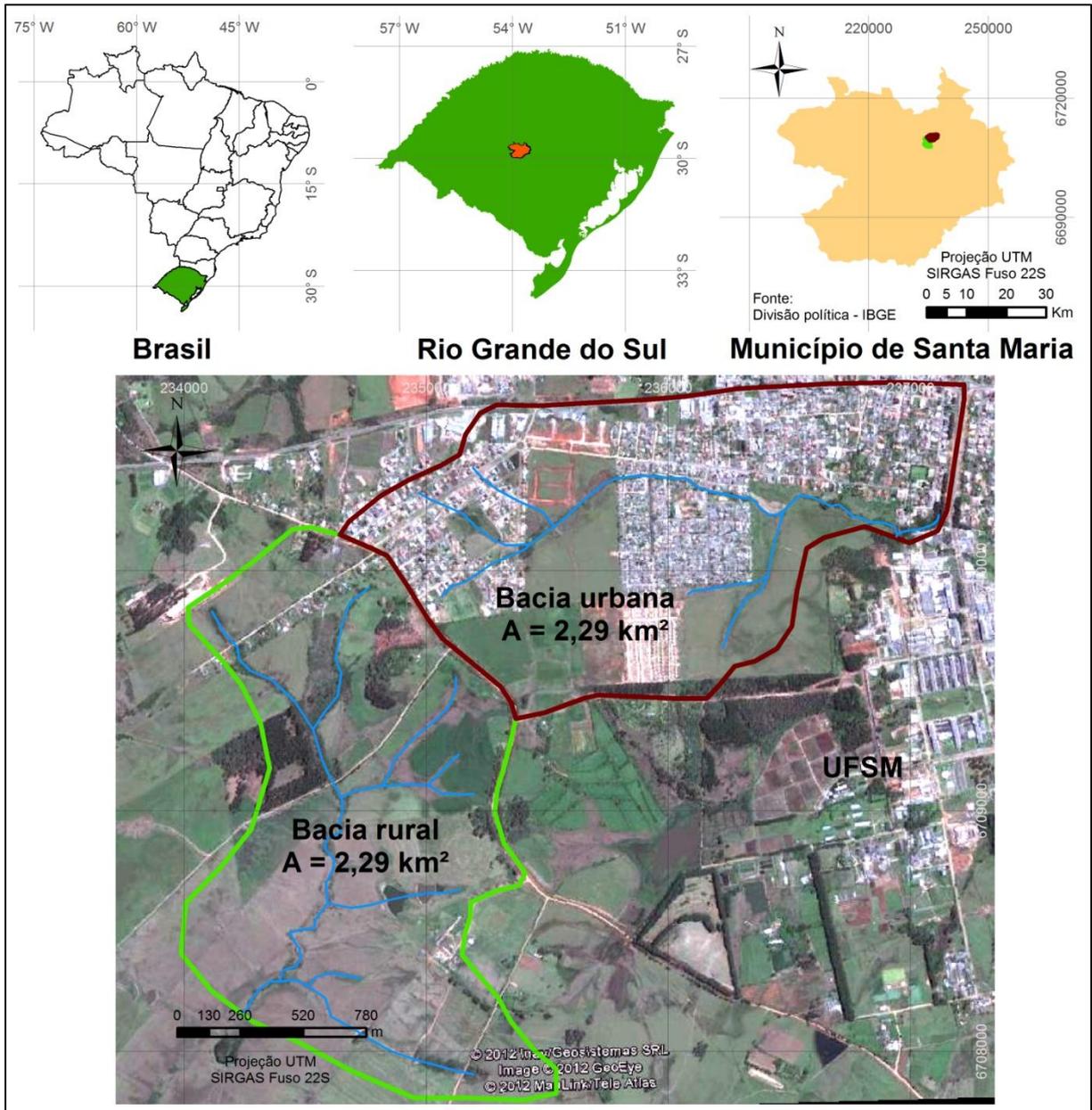


Figura 3.2 – Localização das bacias hidrográficas do Campus da UFSM

De acordo com a divisão do Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS), as bacias em estudo pertencem à Região Hidrográfica do Guaíba e ocupam parte da Unidade Hidrográfica Vacacaí – Vacacaí Mirim (G60). A bacia urbana pertence à bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, enquanto a bacia rural pertence à bacia do rio Vacacaí, conforme Figura 3.3.

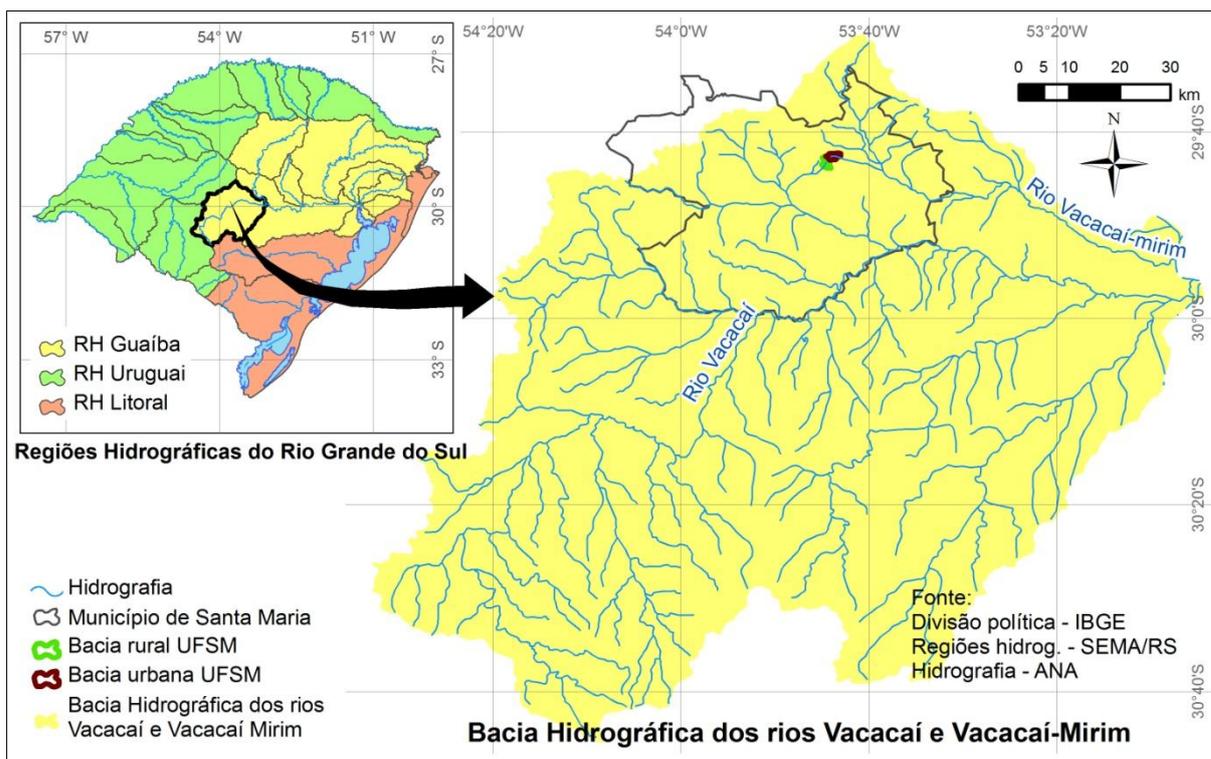


Figura 3.3 – Localização das bacias do campus da UFSM em relação às Regiões Hidrográficas do RS

Quanto às características fisiográficas, o solo da região tem predominância das Unidades de Mapeamento (UM) Santa Maria (argissolo bruno-acizentado) e São Pedro (argissolo vermelho). Os solos da UM Santa Maria caracterizam-se por sua textura e profundidade média, baixa fertilidade natural, susceptibilidade à erosão e má drenagem, sendo solos mais apropriados para pastagens. Já a UM São Pedro é característica de solos profundos, baixa fertilidade, avermelhados, textura superficial arenosa, friáveis e bem drenados (STRECK et al., 2008).

O relevo da região é composto de coxilhas suaves, levemente onduladas. Na vegetação, há predominância de campos (gramíneas), com presença de plantações de eucaliptos isoladas e algum cultivo (experimentos do Centro de Ciências Rurais/UFSM) na bacia rural.

Em relação ao clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo cfa – clima temperado úmido com verão quente. Caracteriza-se por chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura média mais baixa no mês de julho entre 9° C e 10° C e temperatura média no mês mais quente acima de 22° C. Possui verões quentes e tendência de concentração

das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (KUINCHTNER e BURIOL, 2001).

3.1.2 Bacias Hidrográficas do Município de Rosário do Sul

No município de Rosário do Sul, localizado na porção sudoeste do RS, são analisadas duas bacias com características semelhantes de solo, regime de precipitação e relevo, porém com usos distintos. A localização das bacias pode ser observada na Figura 3.5.

De acordo com a divisão do Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS), as bacias em estudo pertencem à Região Hidrográfica do Uruguai e ocupam parte da Unidade Hidrográfica Santa Maria (U70), estando localizadas entre os rios Santa Maria e Ibicuí da Armada (Figura 3.4).

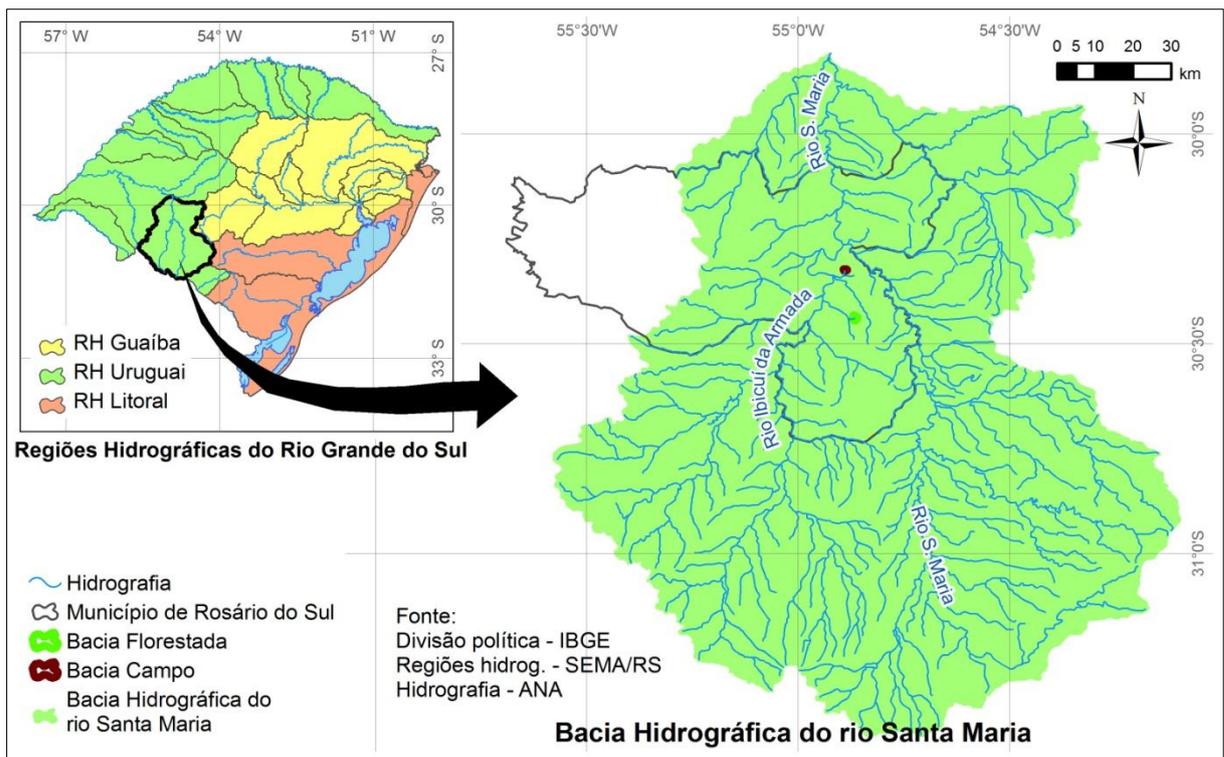


Figura 3.4 – Localização das bacias de Rosário do Sul em relação às Regiões Hidrográficas do RS

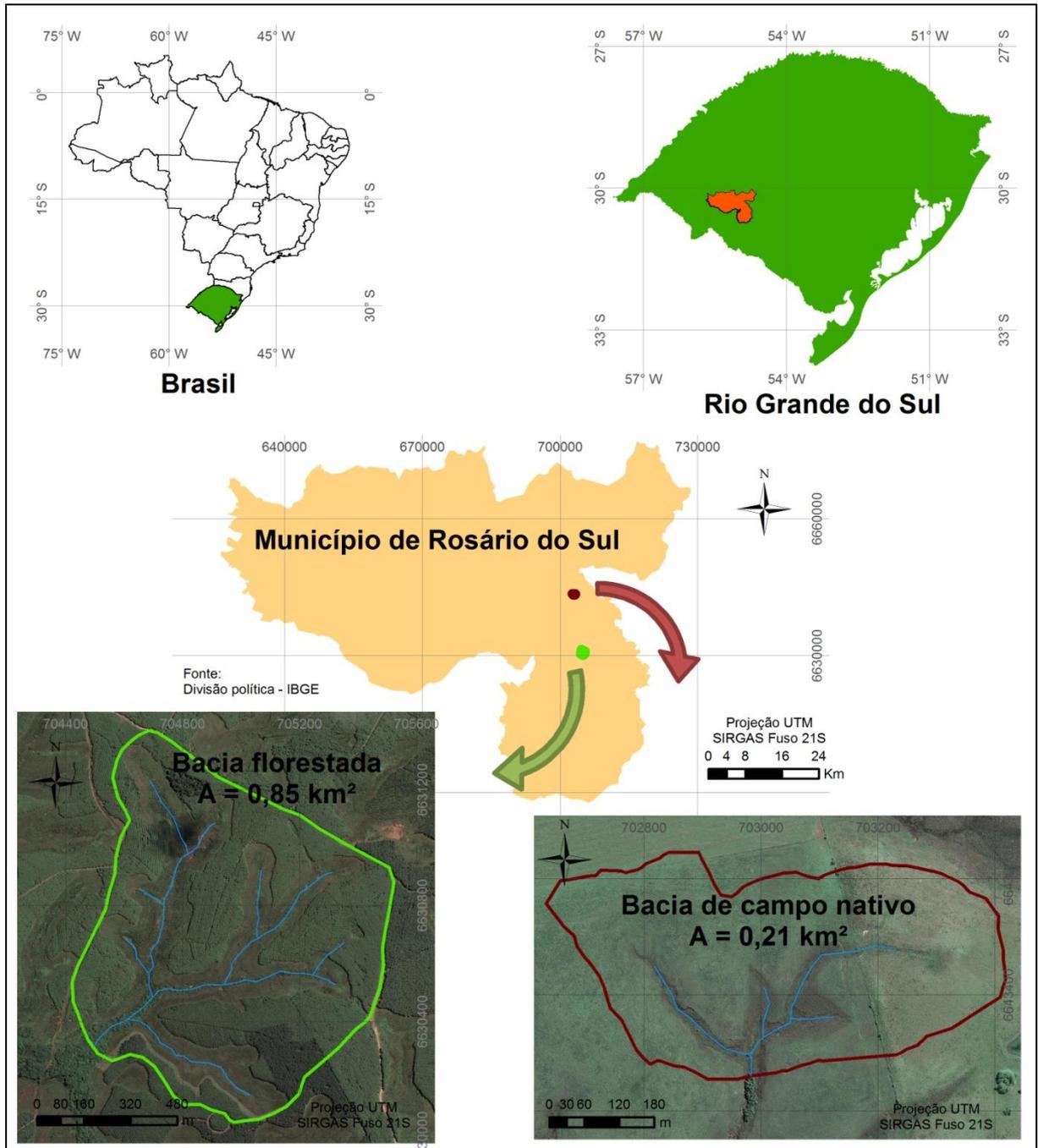


Figura 3.5 – Localização das bacias hidrográficas no município de Rosário do Sul

Uma das bacias é caracterizada pela pecuária extensiva coberta por pastagem nativa do bioma pampa, chamada de bacia “Campo Rosário”. A área de contribuição da bacia tem 21 hectares ($0,21 \text{ km}^2$) e pertence ao agropecuarista Sr. Ildo Spanevello.

Já a outra bacia é caracterizada pela silvicultura de eucalipto para celulose, pertencente à multinacional Stora Enso, chamada de bacia “Florestada Rosário”. Sua área de contribuição

é de 85 hectares (0,85 km²), sendo aproximadamente metade da área coberta por eucaliptos e a outra metade ocupada por Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal (campo nativo abandonado).

As duas microbacias, segundo Streck et al (2008), situam-se sobre um Argissolo Bruno Acinzentado Alítico em transição para os Planossolos da Depressão Central característico da bacia do Rio Santa Maria. São solos, em geral, arenosos, de baixa fertilidade natural e bastante suscetíveis à erosão.

O relevo da região é composto de coxilhas suaves, levemente onduladas, com vegetação característica do bioma pampa. Em relação ao clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo cfa – clima temperado úmido com verão quente.

3.2 Obtenção dos dados para ajuste dos modelos

São dados necessários para ajuste dos modelos chuva-vazão: séries de precipitação, vazão, evaporação, e área de drenagem. As áreas de drenagem, para todas as quatro bacias estudadas, foram delimitadas a partir de imagens de satélite e inspeções de campo.

A obtenção dos dados foi realizada conforme descrito na sequência.

3.2.1 Bacias Hidrográficas do Campus da Universidade Federal de Santa Maria

Os dados de vazão foram obtidos através de postos de medição instalados no exutório de cada bacia. Na bacia urbana encontra-se instalada uma calha parshall de fundo plano e na bacia rural um vertedor triangular de 120°. Ambas possuem um registrador automático de cota, que armazenam valores horários.

Durante o monitoramento, ocorreram períodos onde a vazão extravazou a estrutura hidráulica na bacia Urbana UFSM. Quando ocorrem esses extravasamentos, não é possível quantificar a vazão com a curva-chave da estrutura hidráulica. No entanto, como os sensores instalados registram a cota do nível da água, foi possível fazer o preenchimento destes dados. Para isso utilizou-se a equação de Manning (equação 34), onde determina-se a vazão em função do formato da seção estudada, da rugosidade do canal e da declividade da linha

d'água. A equação foi utilizada considerando a seção composta – margem esquerda, seção central (calha ou vertedor) e margem direita.

$$Q = (A \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}) / n \quad (34)$$

Onde:

Q = vazão em m³/s;

A = área da seção molhada em m²;

Rh = raio hidráulico da seção molhada, sendo Rh = área molhada/perímetro molhado;

I = declividade da linha d'água em m/m; e

n = coeficiente de rugosidade de manning.

Dessa forma, foi realizado um levantamento topográfico para determinação da seção de escoamento da bacia. A partir da seção é possível determinar o perímetro e área molhada para cada cota. O coeficiente de rugosidade de manning foi adotado a partir de bibliografias em função da cobertura do canal. Para a determinação da declividade nas margens foi considerada a declividade do fundo (determinada no levantamento topográfico). Para a declividade na seção central, a equação de Manning foi ajustada à curva-chave para dados conhecidos (dados que não extravazam), empregando a função solver da planilha Excel®, de forma que o erro quadrado das duas equações fosse o menor possível, variando a declividade da linha d'água.

Quanto à série de chuvas, foram obtidos dados da estação meteorológica Santa Maria/RS. Esta estação localiza-se no campus da Universidade Federal de Santa Maria e pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, onde são registrados os valores de precipitação horários por um pluviógrafo automático. Estes dados são disponibilizados no site www.inmet.gov.br. O pluviógrafo encontra-se instalado a 1,5 km da bacia urbanizada e a 2,5 km da bacia rural, fazendo com que os valores registrados ali sejam representativos das duas áreas.

Ainda da mesma estação, foram obtidos os dados diários de evaporação do tanque classe A. A localização da estação utilizada no estudo está apresentada na Figura 3.6.

Como a metodologia Silveira admite o intervalo de tempo de simulação diário, sendo este suficiente para a determinação da disponibilidade hídrica, as séries horárias de vazão e precipitação foram transformadas em diárias.



Figura 3.6 – Localização da estação meteorológica utilizada no estudo

3.2.2 Bacias Hidrográficas do Município de Rosário do Sul

Os dados de vazão foram obtidos em postos de medição instalados no exutório de cada bacia. Em ambas, foi instalado um vertedor triangular de 90°, com registrador automático de cota, que armazenam valores horários. Estes dados foram transformados em uma série diária através da média dos valores horários.

Durante o monitoramento, também ocorreram períodos onde a vazão extravazou a estrutura hidráulica, fato registrado nas duas bacias de Rosário do Sul. Para o preenchimento dessas falhas utilizou-se a equação de manning, conforme o item 3.2.1.

Quanto à série de chuvas, os moradores de ambas as fazendas registraram os valores diários de precipitação. Para preenchimento dos dias com falhas, utilizou-se os dados de precipitação da estação de código 3054016 – Granja Umbu para a bacia florestada, e dados da estação de código 3054007 – Rosário do Sul para a bacia Campo. Os dados de ambas as estações foram obtidos do banco de dados hidrológicos da ANA – Hidroweb. Estas estações também foram utilizadas para consistência dos dados, juntamente com outra estação instalada pela UFSM e pertencente ao projeto do grupo de pesquisa GERHI, sendo localizada entre as duas bacias, na Fazenda Santa Ambrosina. A localização das estações pluviométricas está apresentada na Figura 3.7.

Ainda, os dados de evaporação para estas bacias são os mesmos obtidos para as bacias do campus da UFSM, dados de tanque classe A da estação do INMET de Santa Maria.

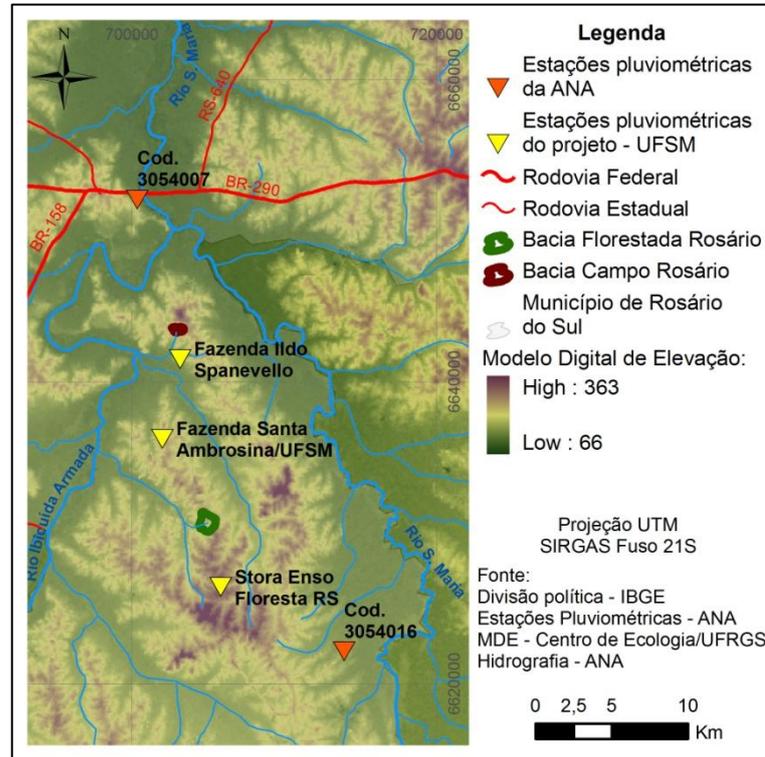


Figura 3.7 – Localização das estações pluviométricas utilizadas no estudo

3.3 Seleção dos eventos de estiagem

A etapa inicial de avaliação da metodologia de Silveira parte da seleção de eventos de estiagem, observando o fluviograma e a série de precipitação monitorados para cada bacia.

Silveira (1997) definiu que a condição mínima para a aplicação da metodologia são três medições locais de vazão, medidas a cada dois dias (por exemplo: segunda, quarta e sexta-feira). Segundo o autor, um intervalo maior entre as medições resultaria em uma melhor caracterização do deplecionamento fluvial, no entanto aumenta a possibilidade de ocorrência de uma precipitação que descaracterize a estiagem, provocando as perdas das medições anteriores.

Ainda, no desenvolvimento da metodologia, Silveira (1997) selecionou os eventos de estiagem observando que o período total sem ocorrência de precipitação seria constituído por 7 dias antecedentes à medição de descargas mais os 5 dias nos quais as três medições seriam efetuadas, totalizando em 12 dias consecutivos. Neste período, seriam permitidos no máximo a ocorrência 15 mm de chuva, devido à possível ocorrência de chuva isolada em alguma região da bacia.

Entretanto, ao aplicar este critério nos dados desta dissertação, acabou-se por isolar poucos eventos, insuficientes para uma avaliação de resultados. Além disso, a aplicação prática do método não pode se restringir a raras ocasiões.

Para solucionar esta situação, mudou-se o critério de seleção, adotando como evento de estiagem o período constituído por 1 dia antecedente à medição de descargas mais os 5 dias nos quais as três medições seriam realizadas, totalizando em 6 dias consecutivos sem ocorrência de precipitação. Este critério também permitirá verificar se o modelo é aplicável para estas situações menos restritivas.

Conforme o critério adotado, uma vez selecionado o período de estiagem, considerou-se como evento o conjunto de três vazões avaliadas com intervalo de tempo de dois dias. Estas três vazões avaliadas equivaleriam às medições locais a serem realizadas quando da aplicação real da metodologia Silveira.

3.4 Aplicação dos modelos

As informações necessárias para a aplicação dos modelos são as características físicas da bacia, dados hidrometeorológicos (precipitação e evaporação) e no mínimo três medições de descargas na seção de interesse. Estes são os dados de entrada dos modelos, que desenvolvem o balanço hídrico mediante o ajuste dos parâmetros. Nesta pesquisa esse processo foi realizado por meio de tentativa e erro.

O ajuste do modelo é realizado de forma que a curva de recessão do hidrograma calculado coincida com os pontos de vazão observados (Figura 3.8). Uma vez realizado o ajuste do modelo à estiagem com vazões observadas, pode-se gerar uma série cronológica de vazões e sua curva de permanência. Esse procedimento foi realizado para cada um dos eventos selecionados conforme critérios descritos no item 3.3, para as quatro bacias experimentais da área de estudo.

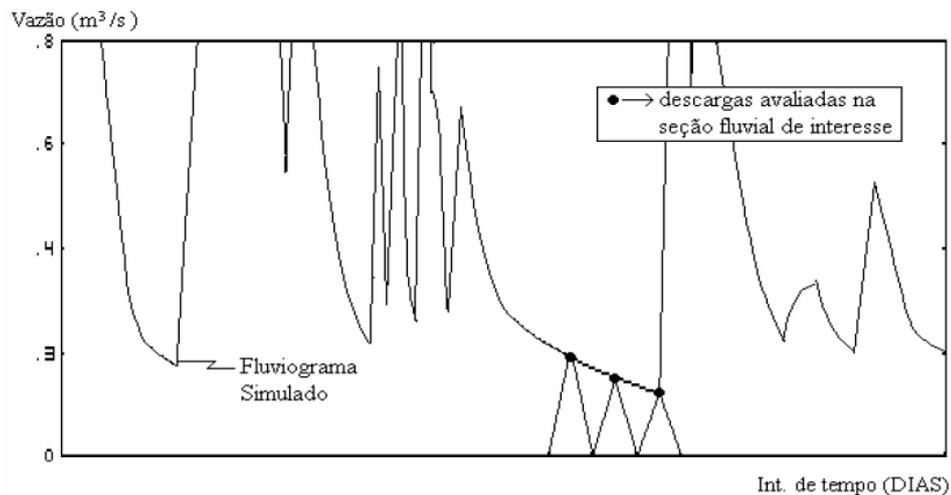


Figura 3.8 – Esquema de estiagem simulada
 Fonte: Silveira, 1997

3.4.1 Modelo chuva-vazão MPB2

A descrição do modelo chuva-vazão MPB2 proposto por Silveira (1997) encontra-se detalhada no item 2.4.1.

Para a calibração dos eventos de estiagem selecionados, são dados de entrada do modelo chuva-vazão: os três valores de vazão observados em campo, série de precipitação, série de evaporação do tanque classe A, K_{tanque} e área da bacia.

O parâmetro K_{tanque} foi estimado a partir de um balanço hídrico simplificado, onde calculou-se a evapotranspiração real diminuindo a vazão da precipitação (equação 35), em totais anuais ou por período de observação (para séries menores que um ano).

A relação entre a evapotranspiração real calculada e a evaporação do tanque classe A é o valor que se adotou para este parâmetro (equação 36). Observa-se que este valor não representa somente o K_{tanque} , mas também considera a vegetação característica da bacia. Este parâmetro, que para evitar confusão, aqui será chamado de K_{VT} (equação 37), foi utilizado como dado de entrada, pois melhor representa o objetivo deste no modelo chuva-vazão simplificado.

Para as séries com mais de um ano de observações, o K_{VT} corresponde à média dos K_{VT} anuais.

$$ETR = P - Q \quad (35)$$

$$K_{tanque} \cdot K_{vegetação} = ETR/E_{tanque} \quad (36)$$

$$K_{VT} = K_{tanque} \cdot K_{vegetação} \quad (37)$$

Assim, com todos os dados em mãos, para cada evento de estiagem selecionado com amostra reduzida de vazões, ajustou-se o modelo através de dois parâmetros C_{inf} e K_{sub} . Com isso, uma série de vazões é sintetizada a partir da série de chuva e evaporação, para então determinação da curva de permanência.

O modelo MPB2 foi desenvolvido originalmente em arquivo Excel® e para esta dissertação o modelo foi reestruturado, sendo composto por três planilhas:

“Entrada de dados diários” – nesta planilha são colocadas as séries de precipitação, evaporação tanque e vazão observada (Figura 3.9).

“Parâmetros e gráfico” – nesta planilha são colocadas as características fisiográficas da bacia que são dados de entrada do modelo. Também nesta planilha é que são calibrados os parâmetros, manualmente por método de tentativa e erro. As vazões observadas e o hidrograma calculado são apresentados nesta planilha para facilitar a calibração. Ainda, é calculada a vazão média e curva de permanência da série calculada. (Figura 3.10).

“Memória de cálculo” – planilha onde todos os algoritmos são calculados, resultando na série de vazões calculadas a partir dos dados de entrada e parâmetros calibrados. Nesta mesma planilha também é calculada a curva de permanência das vazões calculadas.

Portanto, o usuário utilizará apenas as duas primeiras planilhas para inserir os dados de entrada e realizar a calibração e simulação chuva-vazão. Estas estão ilustradas na Figura 3.9 e Figura 3.10 como exemplo de calibração de um evento de estiagem da bacia Campo Rosário.

Exemplo do modelo MPB2 - Microsoft Excel

Início Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibição

Colar Arial 10 Quebrar Texto Automaticamente Geral

Fonte Alinhamento Número

Formato Condicion Estilos de Célula

Inserir Excluir Formatar Células

Classificar Localizar e Filtrar Selecionar Edição

F8

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	MODELO Silveira	Dia	Precipitação (mm)	Evaporação tanque (mm)	Vazão observada (m3/s)						
2		26-Sep-08	0,0	5,9							
3		27-Sep-08	0,0	4,6							
4	DADOS DIÁRIOS	28-Sep-08	0,0	3,4							
5		29-Sep-08	0,0	8,7							
6	Cole nas colunas respectivas a data,	30-Sep-08	15,4	0,1							
7	a precipitação, a evaporação e a vazão observada.	01-Oct-08	0,0	0,1							
8		02-Oct-08	0,0	2,7							
9		03-Oct-08	0,0	7,1							
10	Anos sem dados preencha com brancos.	04-Oct-08	0,0	5,2							
11	Idem para vazões observadas faltantes.	05-Oct-08	0,0	3,7							
12		06-Oct-08	0,0	6,2							
13		07-Oct-08	0,0	3,4							
14		08-Oct-08	0,0	4,9							
15		09-Oct-08	0,0	6,9							
16		10-Oct-08	0,0	7,5							
17		11-Oct-08	0,0	0,8							
18		12-Oct-08	0,0	4,5							
19		13-Oct-08	70,3	5,6							
20		14-Oct-08	36,3	4,3							
21		15-Oct-08	16,7	2,9							
22		16-Oct-08	0,0	1,5							
23		17-Oct-08	0,0	1,8							
24		18-Oct-08	0,0	1,6							
25	19-Oct-08	0,0	2,9								
26	20-Oct-08	0,0	4,8								
27	21-Oct-08	0,0	8,6								
28	22-Oct-08	40,2	5,9								
29	23-Oct-08	0,0	3,1								
30	24-Oct-08	0,0	1,0								

entrada de dados diários parâmetros e gráfico memória de cálculo

Pronto 100%

Figura 3.9 – Modelo chuva-vazão MPB2 em Excel® – planilha entrada de dados diários

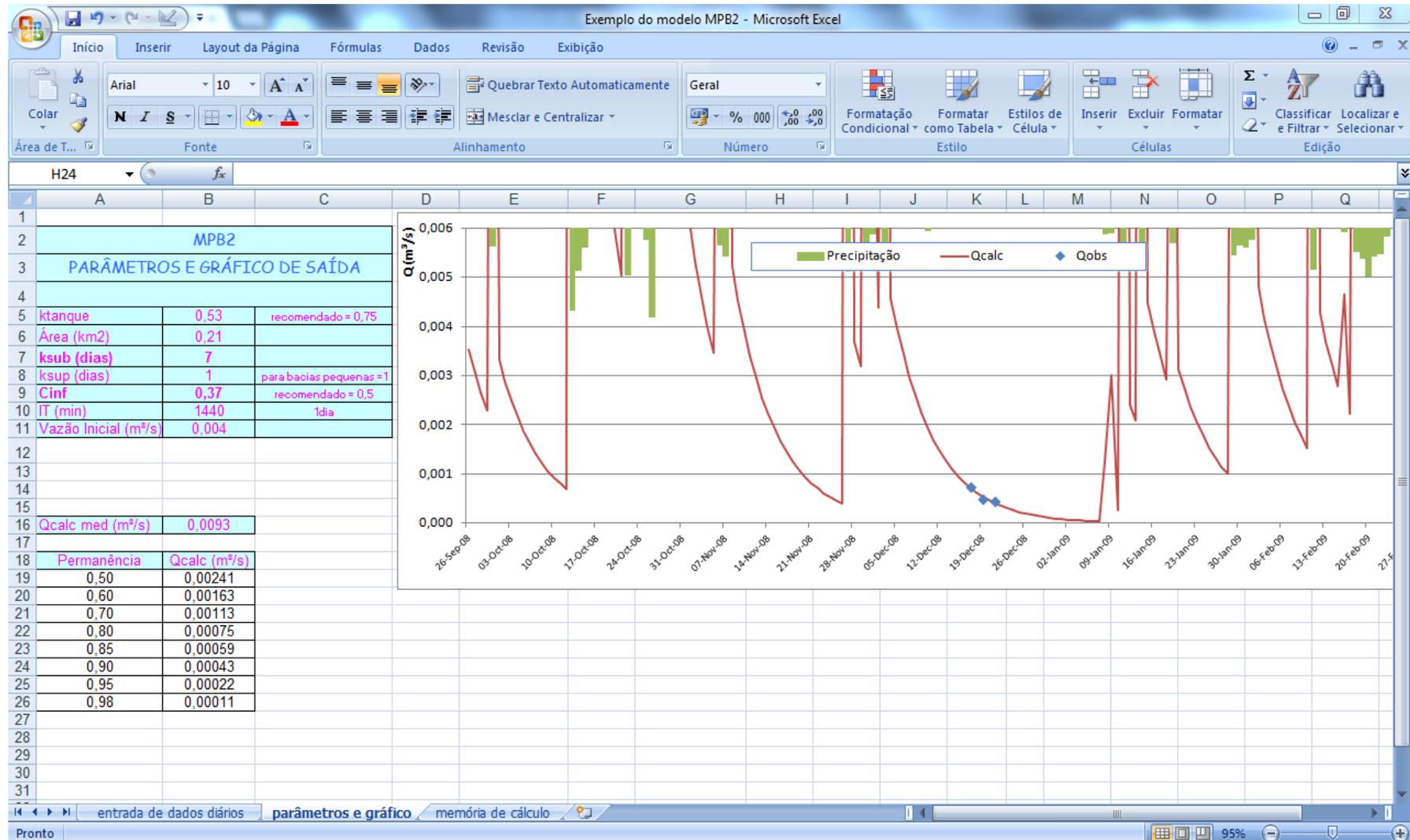


Figura 3.10 – Modelo chuva-vazão MPB2 em Excel® – planilha parâmetros e gráfico

3.4.2 Modelo chuva-vazão IPH2

A descrição do modelo chuva-vazão IPH2 encontra-se detalhada no item 2.3.1.

De forma a verificar como a metodologia Silveira funciona com outro modelo chuva-vazão que não o modelo simplificado desenvolvido originalmente, cada evento de estiagem selecionado também foi calibrado no modelo IPH2.

Para a calibração dos eventos neste modelo, são dados de entrada: os três valores de vazão observados em campo, série de precipitação, série de evapotranspiração potencial, área da bacia, tempo de concentração (em unidades de intervalo de tempo de simulação), taxa impermeável da bacia e coeficiente de forma do histograma tempo-área (HTA).

Para a obtenção da série de evapotranspiração potencial, multiplicou-se a série de evaporação do tanque classe A pelo parâmetro K_{VT} , calculado conforme descrito no item 3.4.1, resultando assim, em uma série de evapotranspiração real.

O tempo de concentração para todas as bacias foram estabelecidos como 1, uma vez que o intervalo de tempo de simulação é diário e todas as bacias estudadas possuem áreas muito pequenas, e, conseqüentemente, tempos de concentração inferiores a 1 dia. Em decorrência disso, o coeficiente de forma do HTA perde seu significado, onde qualquer valor adotado para este parâmetro não fará diferença uma vez que o tempo de concentração da bacia é 1 intervalo de tempo.

A determinação da taxa impermeável para a bacia Urbana do campus da UFSM foi calculada através da equação 38, determinada por Silveira (2000) para a cidade de Porto Alegre. Para as demais bacias esta taxa corresponde a zero por se tratarem de áreas com uso rural.

$$C_r = 0,0387AURB^{1,61} \quad (38)$$

Onde:

C_r é a parcela da chuva que vira escoamento superficial em um evento isolado, ou seja, é igual à taxa impermeável da bacia; e $AURB$ é a taxa de urbanização da bacia, ambos em %.

Após determinação dos dados de entrada, partiu-se para a calibração dos parâmetros. Como este modelo possui 6 parâmetros a calibrar - I_o , I_b , H , K_{sub} , K_{sup} e R_{max} – a partir de somente três medições de vazão, torna-se difícil definir apenas uma solução de conjunto de parâmetros, pois haveriam várias soluções.

Para contornar essa situação, foram fixados alguns parâmetros:

K_{sup} - parâmetro do algoritmo de propagação do escoamento superficial (Clark = HTA + RLS), representa o tempo médio do esvaziamento do RLS, ou seja, o tempo médio que levaria para escoar toda vazão superficial. Como sua unidade é em intervalo de tempo de simulação, este parâmetro foi fixado como 1 para todos os eventos. Isso porque o intervalo de simulação é diário e as bacias possuem áreas muito pequenas, e, conseqüentemente, tempos de concentração inferiores a 1 dia, conforme é baseada a ideia principal do modelo Silveira.

R_{max} – parâmetro que representa a capacidade máxima de perdas por interceptação. Este parâmetro varia com as características da bacia, onde bacias com vegetação, com grande capacidade de retenção da precipitação, grandes depressões do solo ou mesmo açudes, devem ter valores altos de R_{max} . Crawford e Linsley (1966) citado em Tucci (2005) apresentaram alguns valores para retenção devido à interceptação vegetal (Tabela 3.1). Como este parâmetro engloba outras perdas além da vegetal, pode assumir valores maiores. IPH (2006) sugere como limites deste parâmetro de 0 a 9 mm. Dessa forma, este parâmetro também foi fixado em cada bacia, de acordo com suas características.

Tabela 3.1 – Sugestões de R_{max} para intervalos diários

Cobertura	R_{max} (mm)
Campo, prado	2,50
Floresta ou mato	3,75
Floresta ou mato denso	5,00

Fonte: Tucci (2005)

K_{sub} – parâmetro que caracteriza o esvaziamento do RLS do algoritmo de propagação de escoamento subterrâneo. Este parâmetro, por representar a recessão do hidrograma e os escoamentos de base – objetivo principal para a determinação da disponibilidade hídrica – não é fixado, e sim calibrado de acordo com as vazões observadas.

I_o , I_b e H – parâmetros da equação de Horton, constante do algoritmo de separação de volumes, onde:

- ◆ I_o representa a capacidade de infiltração do solo correspondente à umidade limite do ponto de murchamento da vegetação (capacidade de campo);
- ◆ I_b representa a capacidade de infiltração quando o solo está saturado;
- ◆ $H=e^{-k}$, sendo k um parâmetro que caracteriza o decaimento da curva exponencial de infiltração e depende das características do solo.

Assim, os parâmetros I_0 e H definem a capacidade máxima de umidade do solo, enquanto que I_b define a capacidade máxima de percolação e, em consequência da vazão de base, permitindo ajustar a vazão inicial do período de recessão do hidrograma. Por este motivo, deixou-se o parâmetro I_b a ser calibrado enquanto I_0 e H foram fixados a partir de valores sugeridos em bibliografia. Estes parâmetros foram fixados com base em Germano et.al.(1998), onde os autores ajustaram o modelo IPH2 para 28 bacias em 6 cidades brasileiras diferentes. Dessa forma, os valores fixados para I_0 e H da bacia Urbana UFSM foram obtidos através da média dos valores encontrados para estes parâmetros nas bacias semiurbanizadas ajustadas por Germano et.al. (1998). Para as demais bacias, I_0 e H foram obtidos através da média dos valores encontrados para estes parâmetros nas bacias rurais do mesmo artigo citado.

Por fim, com todos os dados em mãos, para cada amostra reduzida de vazões ajustou-se manualmente o modelo através de dois parâmetros I_b e K_{sub} , pelo processo de tentativa e erro. Com isso, uma série de vazões é sintetizada a partir da série de chuva e evaporação, para então determinação da curva de permanência.

O modelo em arquivo Excel® é composto de quatro planilhas:

“Entrada de dados” – nesta planilha são colocadas as séries de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada. Nesta mesma planilha também é computada a curva de permanência de vazões calculadas (Figura 3.11).

“Parâmetros e gráfico” – nesta planilha são colocadas as características fisiográficas da bacia que são dados de entrada do modelo. Também nesta planilha é que são calibrados os parâmetros, manualmente por método de tentativa e erro ou ainda utilizando a função solver. O hidrograma de vazões calculadas e observadas é apresentado nesta planilha para facilitar a calibração (Figura 3.12).

“Saída de dados” – planilha auxiliar onde são calculados os erros da estimativa a cada intervalo, parâmetros de transformação de unidades, parâmetros iniciais dos algoritmos e onde é calculado o HTA sintético.

“Calculando” – planilha onde todos os algoritmos são calculados, resultando na série de vazões calculadas a partir dos dados de entrada e parâmetros calibrados.

Portanto, o usuário utilizará apenas as duas primeiras planilhas para inserir os dados de entrada e realizar a calibração e simulação chuva-vazão. Estas estão ilustradas na Figura 3.11 e Figura 3.12, como exemplo de calibração de um evento de estiagem da bacia Campo Rosário.

Exemplo do modelo IPH2 no excel - Microsoft Excel

Área de T... Fonte Alinhamento Número Estilo Células Edição

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	MODELO IPH2	dia	precipitação (mm)	vazão observada (m3/s)	evapotransp. pot (mm)		número de dados	% perman.	ordem	Qcalc	col aux	Qcalc ordenada	
2		26-set-08	0,0		3,15		1	0,001	316	0,00	0,20	0,20	
3		27-set-08	0,0		2,47		2	0,002	330	0,00	0,16	0,16	
4		28-set-08	0,0		1,82		3	0,003	347	0,00	0,12	0,12	
5		29-set-08	0,0		4,61		4	0,004	371	0,00	0,12	0,12	
6		30-set-08	15,4		0,04		5	0,005	156	0,01	0,11	0,11	
7		01-out-08	0,0		0,06		6	0,006	228	0,01	0,11	0,11	
8		02-out-08	0,0		1,46		7	0,007	287	0,00	0,11	0,11	
9		03-out-08	0,0		3,78		8	0,008	340	0,00	0,10	0,10	
10		04-out-08	0,0		2,75		9	0,009	382	0,00	0,10	0,10	
11		05-out-08	0,0		1,95		10	0,010	410	0,00	0,10	0,10	
12		06-out-08	0,0		3,31		11	0,011	435	0,00	0,09	0,09	
13		07-out-08	0,0		1,81		12	0,012	470	0,00	0,09	0,09	
14		08-out-08	0,0		2,59		13	0,013	500	0,00	0,08	0,08	
15		09-out-08	0,0		3,65		14	0,014	539	0,00	0,07	0,07	
16		10-out-08	0,0		4,00		15	0,015	591	0,00	0,07	0,07	
17		11-out-08	0,0		0,42		16	0,016	625	0,00	0,07	0,07	
18		12-out-08	0,0		2,42		17	0,017	664	0,00	0,07	0,07	
19		13-out-08	70,3		3,00		18	0,018	11	0,09	0,07	0,07	
20		14-out-08	36,3		2,26		19	0,019	15	0,07	0,07	0,07	
21		15-out-08	16,7		1,53		20	0,020	45	0,04	0,07	0,07	
22		16-out-08	0,0		0,79		21	0,021	115	0,02	0,07	0,07	
23		17-out-08	0,0		0,96		22	0,022	193	0,01	0,06	0,06	
24		18-out-08	0,0		0,86		23	0,023	254	0,00	0,06	0,06	
25		19-out-08	0,0		1,54		24	0,024	311	0,00	0,06	0,06	
26		20-out-08	0,0		2,55		25	0,025	357	0,00	0,06	0,06	
27		21-out-08	0,0		4,58		26	0,026	397	0,00	0,06	0,06	
28		22-out-08	40,2		3,12		27	0,027	42	0,04	0,06	0,06	
29		23-out-08	0,0		1,66		28	0,028	112	0,02	0,06	0,06	
30		24-out-08	0,0		0,55		29	0,029	194	0,01	0,06	0,06	

Pronto 100%

Figura 3.11 – Modelo chuva-vazão IPH2 em Excel® – planilha entrada de dados

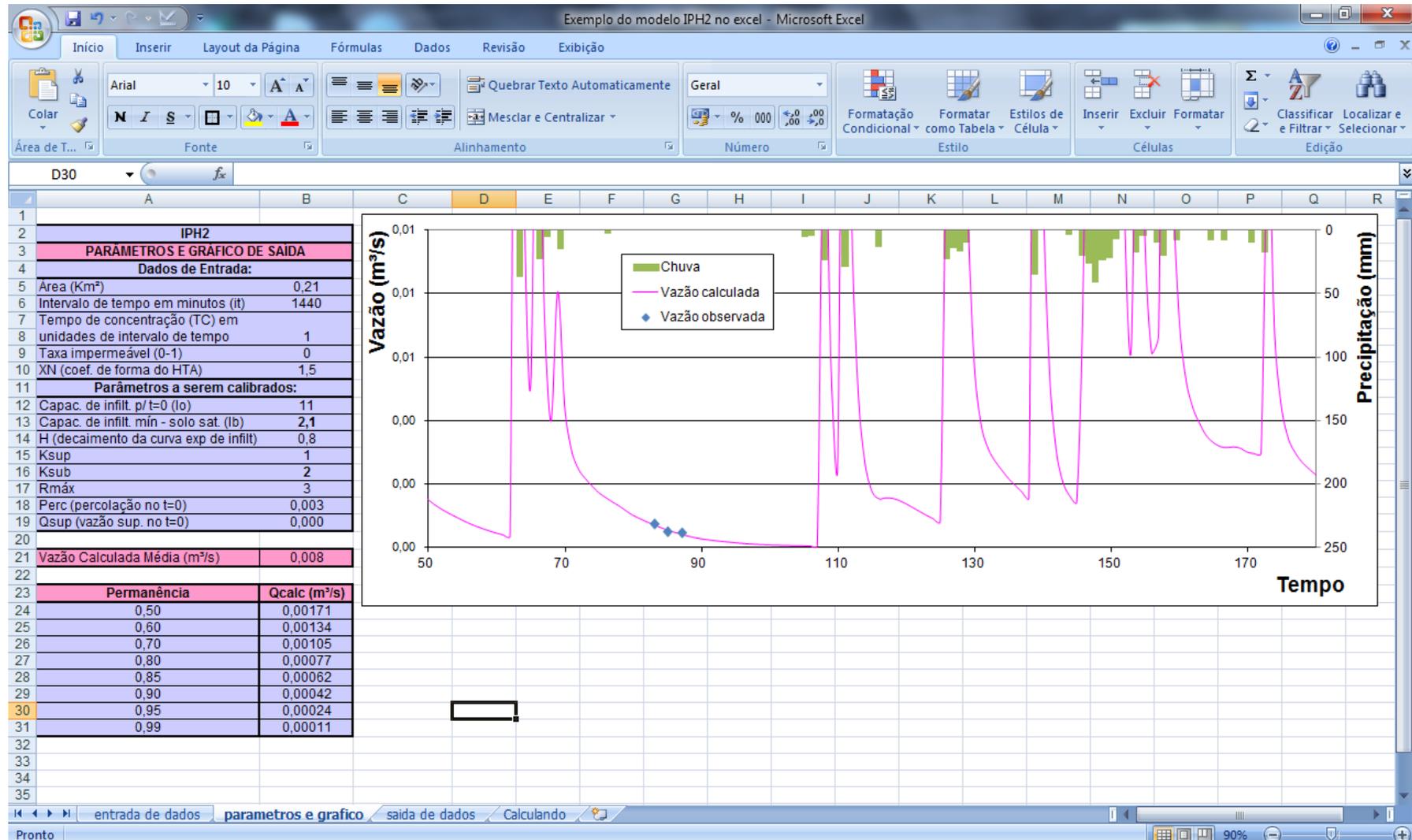


Figura 3.12 – Modelo chuva-vazão IPH2 em Excel® – planilha parâmetros e gráfico

Como a calibração se deu através de apenas dois parâmetros, o ajuste dos eventos foi realizado manualmente, por tentativa e erro.

A simulação chuva-vazão neste arquivo Excel® apresenta uma limitação, onde o tempo de concentração máximo como dado de entrada é de 20 intervalos de tempo de simulação. Esta limitação existe porque ao transformar a programação em planilhas do Excel® sem utilização de macros, há a necessidade de limitar o tamanho da matriz de propagação, e portanto, também do HTA. Caso fosse necessário um TC maior, o cálculo do HTA e a propagação do escoamento superficial teriam que ser adaptados.

3.5 Análise das estimativas por mínima amostragem

Para analisar as estimativas de disponibilidade, as curvas de permanência geradas a partir das amostras reduzidas de vazões foram comparadas com a curva de permanência calculada baseada na série observada de vazões, através da determinação de intervalos de confiança.

Sabemos que o valor estimado por um evento de estiagem não será exatamente igual ao valor verdadeiro. As curvas de permanência calculadas em cada evento são estimativas prováveis. Quão prováveis são estas estimativas é determinado pelo coeficiente de confiança, que fornece um intervalo de valores plausíveis baseado nos dados amostrais. Quanto maior a probabilidade do intervalo conter o parâmetro, maior será o intervalo.

Os intervalos de confiança geralmente são utilizados para indicar a confiabilidade de uma estimativa, e quanto menor for o intervalo de confiança, mais confiável será a pesquisa.

Como exemplo, um intervalo de confiança de 90% para as curvas de permanência calculadas nos eventos, fornece o intervalo no qual estaríamos 90% confiantes de cobertura do verdadeiro valor da curva de permanência.

Em trabalhos técnicos e pesquisas, geralmente utiliza-se o intervalo de confiança de 95%. No entanto, neste trabalho foi utilizado o intervalo de confiança de 90% por este ser mais restritivo (menor amplitude) e ainda ter um erro aceitável.

Segundo Silveira (1997), os dois parâmetros C_{inf} e K_{sub} do modelo MPB2 são independentes entre si e seguem uma distribuição normal de probabilidades (fato que será discutido nos resultados referentes à aplicação dos modelos – item 4.3 e 4.4). Considerando essa hipótese verdadeira, utiliza-se a distribuição normal para estabelecer intervalos de

confiança do feixe de curvas em torno de cada percentil (vazão com 95% de permanência, por exemplo). O intervalo de confiança de 90% é construído centralizado nos percentis da curva de permanência observada a partir das seguintes equações (DEVORE, 2006; NAGHETTINI e PINTO, 2007):

$$\text{Intervalo de conf. (90\%)} = Q_p^{obs} \pm 1,645 \cdot s_p^c \quad (39)$$

$$s_p^c = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_p^{mc} - Q_p^{obs})^2}{n-1}} \quad (40)$$

Onde:

s_p^c é o erro padrão centralizado para a permanência p;

n é o número de eventos;

Q_p^{mc} é a vazão calculada pelos ajustes de cada evento;

Q_p^{obs} é a vazão da curva de permanência observada;

O coeficiente 1,645 vem da Normal reduzida e define o intervalo de confiança de 90%.

A análise destes intervalos de confiança, enfocando a curva de permanência observada como a tendência central das curvas de permanência, permite então um julgamento se é satisfatória, para a gestão, uma estimativa de vazões em pequenas bacias a partir de pequenas amostragens de vazão e simulação hidrológica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência estão apresentados os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta.

4.1 Dados para ajuste dos modelos

Para as bacias do campus da UFSM, obteve-se uma série de vazões observadas no período de 31/12/2010 a 10/10/2011, totalizando em 284 dias com dados, tanto para a bacia urbana quanto para a bacia rural. Na bacia Campo Rosário, obteve-se uma série de vazões observadas para o período de 26/09/2008 a 28/06/2011, totalizando em 2 anos e 276 dias, enquanto na bacia Florestada Rosário a série foi de 26/09/2008 a 12/01/2011 (2 anos e 109 dias). Para estes períodos, foram então obtidas as séries de precipitação e evaporação tanque.

A curva de permanência das vazões específicas observadas (vazões por unidade de área) para as quatro bacias estudadas estão apresentadas na Figura 4.1. Observa-se diferenças acentuadas nos regimes hidrológicos das mesmas, que podem estar associadas, entre outros, às diferenças de uso e ocupação do solo.

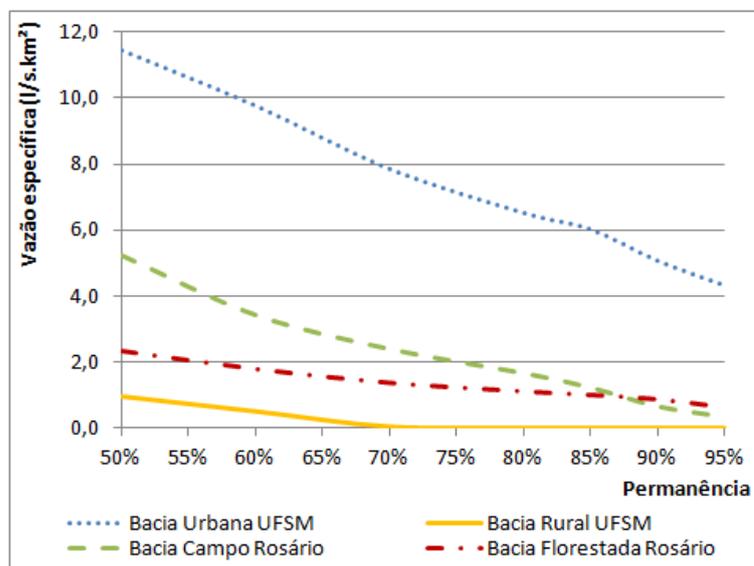


Figura 4.1 – Curva de permanência das vazões observadas

A bacia Urbana UFSM apresentou a maior disponibilidade hídrica para as permanências acima de 50%, demonstrando o efeito da urbanização. Observa-se esta tendência inclusive para as vazões de maior permanência, contrariando as expectativas quando comparadas com a bacia vizinha, de igual área e com uso de solo rural. Horn (2012) comparou o comportamento hidrológico das duas bacias do Campus da UFSM (Urbana e Rural) e observou que a bacia Urbana apresentou maior disponibilidade hídrica durante os períodos de estiagem, mesmo descontando a vazão exógena (proveniente do lançamento de esgoto doméstico). Para entender o resultado, o autor analisou o comportamento dos escoamentos subterrâneos por meio de dados provenientes de poços de observação existentes no Campus. Com isso, supôs que possivelmente a bacia Rural apresenta maiores perdas por infiltração profunda e levantou a hipótese da bacia Rural apresentar características influentes (rio abastece o aquífero), sem receber contribuição do lençol freático em seu abastecimento principalmente em períodos de estiagem. Dessa forma, na bacia Rural apenas o escoamento superficial e da camada vadosa do solo contribuem para a manutenção da vazão no arroio. Já para a bacia Urbana, em virtude da direção preferencial do escoamento subterrâneo observado, pode-se inferir que o rio recebe contribuição subterrânea, justificando-se assim as diferenças do regime hidrológico dessas duas bacias.

Horn (2012) salienta que este comportamento apresenta particularidades diferentes das consideradas em projetos de engenharia, quando se trata de bacias com características rurais. A priori, espera-se que essas apresentem maior disponibilidade hídrica para as maiores permanências, devido à maior infiltração e ao maior armazenamento de água no solo, quando comparado com bacias urbanas, devido ao processo de impermeabilização a que estão submetidas. Essa aparente contradição é explicada pela heterogeneidade das pequenas bacias, atribuída aos complexos hidrogeológicos locais, que são responsáveis pela manutenção da vazão nos períodos de deplecionamento fluvial, conforme explica Silveira (1997). Estes aspectos normalmente não são considerados em estudos hidrológicos que utilizam métodos de estimativa de vazões por proporção de áreas e por regionalização hidrológica para a estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas. Portanto, observa-se a importância de adotar métodos que utilizem dados observados do local, mesmo em pequenas quantidades de amostras, como a proposta da metodologia Silveira.

Da mesma forma, observam-se diferenças significativas nos regimes hidrológicos das duas bacias de Rosário do Sul. A bacia de Campo nativo apresentou maior oferta hídrica que a bacia Florestada, no entanto, em períodos de maior estiagem, a bacia Florestada apresentou maior disponibilidade (para vazões de maior permanência). Esse comportamento pode ser

explicado com base em Baumhardt (2010), que comparou o comportamento hidrológico das duas bacias para analisar a influência do uso do solo com floresta de Eucalipto. Segundo o autor, a bacia Campo por sua natureza produtiva com criação de gado e sobrepastoreio, apresenta maior escoamento superficial e subsuperficial, resultando em um menor armazenamento e menor produção de água em períodos de estiagem, podendo este fato estar relacionado a uma baixa recarga subterrânea.

Já a bacia Florestada, segundo mesmo autor, embora apresente menor oferta de água, apresentou deflúvio mais regularizado ao longo do ano e com maior disponibilidade hídrica especificamente nos períodos considerados de estiagem. Ainda, Avila (2011) comenta que há indicativos que na bacia Florestada o solo apresenta-se melhor estruturado (presença de matéria orgânica) e influência de raízes como caminhos preferenciais da água, aumentando a capacidade de infiltração, o que explica a maior oferta nos períodos de estiagem.

Para verificar a representatividade do período de observação com relação a um eventual período crítico, procurou-se estudar séries históricas de precipitação com períodos longos, das estações pluviométricas mais próximas às bacias estudadas. Este estudo encontra-se apresentado na Tabela 4.1.

Para as bacias do campus da UFSM considerou-se como referência a própria estação Santa Maria, também cadastrada na ANA sob código 2953017. Para as bacias campo e florestada de Rosário de Sul, as estações de código 3054007 e 3054016, respectivamente. Todas as estações com dados diários de precipitação disponíveis no endereço eletrônico hidroweb.ana.gov.br.

Tabela 4.1 – Estudo das séries históricas de precipitação

Bacia hidrog.	Período utilizado		Período de série longa		
	P (mm)	Período	Cod. estação ANA	Período analisado*	P (mm) média anual**
Campus UFSM (Urbana e Rural)	1.136	jan a set/2011	2953017	1970 a 1988	1.390
Campo Rosário	370	out a dez/2008	3054007	1970 a 2008	383
	1.993	2009			1.547
	1.335	2010			1.547
	414	jan a mai/2011			675
Florestada Rosário	493	out a dez/2008	3054016	1977 a 2006	353
	1.760	2009			1.430
	1.270	2010			1.430

* Os anos que tinham falhas na série não foram considerados na média

** Em períodos menores que 1 ano, foi feito a média dos totais mensais

Analisando a Tabela 4.1, percebemos que os períodos utilizados nas análises englobam um ano seco, caso de 2010, e um ano úmido, caso de 2009. Os demais períodos, em 2008 e 2011, mostraram-se períodos típicos, sendo este último levemente seco.

Salienta-se que esta análise não está vinculada a representatividade do período em termos de produção hídrica. Esta pode ser avaliada pela curva de permanência. No entanto, uma superioridade das precipitações pode proporcionar um aumento da disponibilidade em relação a um longo período, assim como um período seco pode diminuir esta disponibilidade.

4.2 Seleção dos eventos de estiagem

Observando os critérios citados na metodologia, foram selecionados um total de 83 eventos de estiagem para ajuste dos modelos, assim distribuídos:

- bacia Urbana UFSM – 3 eventos;
- bacia Rural UFSM – 6 eventos;
- bacia Campo Rosário – 42 eventos; e
- bacia Florestada Rosário – 32 eventos.

Os eventos foram numerados por algarismos arábicos em ordem crescente de acordo com a data. Foram adicionadas letras para diferenciar os eventos de mesmo período, porém iniciando as medições de vazão em dias diferentes. Ao lado do “nome” do evento ainda consta o mês em que ocorreu. Os eventos do período inicial das séries foram descartados por estarem em local de “aquecimento” do modelo, onde ainda dependem da vazão inicial da simulação.

4.3 Aplicação dos modelos chuva-vazão

Para a calibração dos eventos de estiagem no modelo MPB2 e IPH2, os dados de entrada utilizados estão apresentados na Tabela 4.2.

Observa-se nesta tabela que o valor de K_{vt} (parâmetro que representa perdas por evaporação ou por outro fator relacionado às características da bacia, pois corresponde ao K_{tanque} multiplicado pelo $K_{vegetação}$) para a bacia urbana é menor que o K_{vt} das demais bacias.

Isso ocorre justamente porque na bacia urbana a área impermeável é maior, e consequentemente, grande parte do que chove escoar, ao contrário das bacias de uso rural, onde as perdas por interceptação são maiores. Além disso, como estas bacias são de áreas muito pequenas, o volume de água infiltrado que é perdido para contribuir em outras bacias também pode ser considerável. Este tipo de perda também está ponderada no parâmetro K_{vt} , uma vez que este foi calculado por um balanço hídrico simplificado. Esta explicação é o motivo do valor deste parâmetro ser bastante alto para a bacia Rural UFSM, pois, conforme comentado anteriormente, esta bacia apresenta grandes perdas por infiltração profunda.

Para a calibração no IPH2, os parâmetros que foram fixados estão apresentados na Tabela 4.3. O parâmetro R_{max} foi fixado de acordo com os valores da Tabela 3.1, enquanto os parâmetros I_o e H foram fixados com base em Germano et.al.(1998).

Tabela 4.2 – Dados de entrada dos modelos chuva-vazão

Bacia Hidrog.	Área (km ²)	K_{vt}	% Área urbanizada	% Área impermeável
Urbana UFSM	2,29	0,43	54	23,8
Rural UFSM	2,29	0,98	0	0
Campo Rosário	0,21	0,53	0	0
Florestada Rosário	0,85	0,59	0	0

Tabela 4.3 – Parâmetros calibráveis do modelo IPH2 que foram fixados

Bacia Hidrog.	I_o (mm/ Δt)	H	K_{sup} (Δt)	R_{max} (mm)
Urbana UFSM	10,4	0,73	1	2
Rural UFSM	11,0	0,80	1	3
Campo Rosário	11,0	0,80	1	3
Florestada Rosário	11,0	0,80	1	4,5

Ao calibrar o modelo IPH2 com apenas 2 parâmetros – I_b e K_{sub} –, para muitos eventos não se conseguiu ajustar o modelo, pois sentiu-se a necessidade de ajuste de outro parâmetro. A solução encontrada foi ajustar o evento de acordo com a última observação. A Figura 4.2 mostra um exemplo, onde não foi possível realizar um bom ajuste para o “Evento 28A”, que foi ajustado baseado na última observação dos três pontos. Para se certificar que o ajuste é válido, plotou-se também o “Evento 28B”, que é observado no mesmo período, no

entanto com as medições começando dois dias após o “Evento 28A”. Observa-se que a vazão calculada foi gerada pelo ajuste do primeiro evento, no entanto, também ajustou-se bem ao segundo evento. Assim, os eventos ajustados deste tipo não foram descartados, uma vez que seu ajuste é válido para a geração de uma serie de vazões.

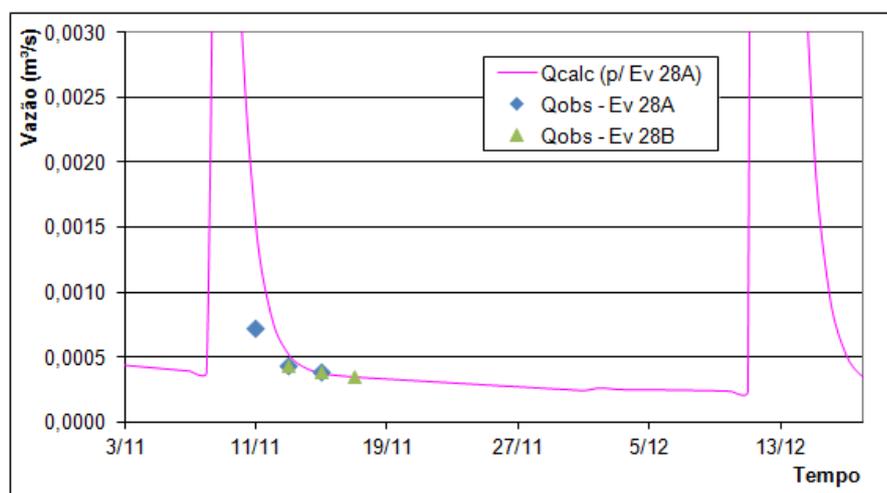


Figura 4.2 – Exemplo de ajuste de um evento no modelo IPH2

Como esta situação ocorreu para muitos eventos, decidiu-se calibrar o modelo IPH2 também com 3 parâmetros: I_b , K_{sub} e H , deixando fixos os demais parâmetros – I_o , K_{sup} e R_{max} . O parâmetro H representa o decaimento da curva exponencial de infiltração (Horton), ou seja, ajustando este parâmetro também, tentou-se conseguir um melhor ajuste para os eventos.

Mesmo calibrando os três parâmetros, ainda ocorreram eventos onde não foi possível conseguir um bom ajuste, de forma que estes eventos foram ajustados de mesma maneira conforme acima descrito. Percebeu-se novamente que seria necessário calibrar mais um parâmetro, sendo que a maioria dos eventos exigiam um K_{sup} menor que um para que se conseguisse um bom ajuste. No entanto, como ao aumentar o número de parâmetros também aumentaríamos os erros e incertezas, esta análise não foi realizada.

Na Tabela 4.4, Tabela 4.5, Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8, estão apresentados os parâmetros calibrados para os eventos de estiagem em cada bacia estudada. Juntamente, foram calculados os valores médios de cada parâmetro, seu desvio padrão e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.4 – Média e desvio padrão dos parâmetros calibrados para os eventos de estiagem das quatro bacias estudadas

Bacia		MPB2		IPH2 - 2 parâmetros		IPH2 - 3 parâmetros		
		Cinf	Ksub	Ib	Ksub	Ib	Ksub	H
Urbana UFSM	Média	0,27	15,00	1,55	9,50	1,33	5,17	0,81
	Desv.pad.	0,08	3,61	0,51	9,96	0,83	2,47	0,14
	CV	0,30	0,24	0,33	1,05	0,62	0,48	0,17
Rural UFSM	Média	0,09	6,00	0,16	4,67	0,91	5,83	0,59
	Desv.pad.	0,06	3,58	0,09	4,13	0,99	2,64	0,41
	CV	0,67	0,60	0,56	0,88	1,09	0,45	0,69
Campo Rosário	Média	0,16	13,36	1,28	9,59	1,27	8,06	0,66
	Desv.pad.	0,11	7,64	1,69	12,46	1,51	6,64	0,28
	CV	0,69	0,57	1,32	1,30	1,19	0,82	0,42
Florestada Rosário	Média	0,08	12,13	0,37	5,69	0,40	9,78	0,52
	Desv.pad.	0,04	5,04	0,20	5,67	0,21	5,25	0,32
	CV	0,50	0,41	0,54	1,00	0,52	0,54	0,61

Tabela 4.5 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Urbana UFSM

Bacia Urbana UFSM							
Evento	MPB2		IPH2 - 2 parâmetros		IPH2 - 3 parâmetros		
	Cinf	Ksub	Ib	Ksub	Ib	Ksub	H
Ev 1 mar	0,19	18	1,10	21,0	0,45	8,0	0,98
Ev 2 jun	0,35	11	2,10	3,50	2,10	3,5	0,73
Ev 3 set	0,26	16	1,45	4,0	1,45	4,0	0,73
Máximo	0,35	18	2,10	21,0	2,1	8,0	0,98
Mínimo	0,19	11	1,10	3,5	0,45	3,5	0,73
Média	0,27	15,00	1,55	9,50	1,33	5,17	0,81
Desv.pad.	0,08	3,61	0,51	9,96	0,83	2,47	0,14
Coef. variação	0,30	0,24	0,33	1,05	0,62	0,48	0,17

Tabela 4.6 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Rural UFSM

Bacia Rural UFSM							
Evento	MPB2		IPH2 - 2 parâmetros		IPH2 - 3 parâmetros		
	Cinf	Ksub	Ib	Ksub	Ib	Ksub	H
Ev. 1 mar	0,00095	11	0,0115	5	0,012	5	0,8
Ev. 2 jun	0,075	5	0,29	8	1,90	6	0,995
Ev. 3 set	0,14	4	0,14	2	0,55	5	0,1
Ev. 4 jul	0,057	10	0,15	1	0,31	10	0,1
Ev. 5 ago	0,165	3	0,21	11	2,40	7	0,998
Ev. 6 set	0,11	3	0,17	1	0,28	2	0,53
Máximo	0,165	11	0,29	11	2,40	10	0,998
Mínimo	0,00095	3	0,0115	1	0,012	2	0,1
Média	0,09	6,00	0,16	4,67	0,91	5,83	0,59
Desv.pad.	0,06	3,58	0,09	4,13	0,99	2,64	0,41
Coef. variação	0,67	0,60	0,56	0,88	1,09	0,45	0,69

Tabela 4.7 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Campo Rosário

Bacia Campo Rosário							
Evento	MPB2		IPH2 - 2 parâmetros		IPH2 - 3 parâmetros		
	Cinf	Ksub	Ib	Ksub	Ib	Ksub	H
Ev. 3A dez	0,18	11	1,15	4	1,15	4	0,8
Ev. 3B dez	0,37	7	2,10	2	2,10	2	0,8
Ev. 3C dez	0,14	15	0,80	12	0,80	12	0,8
Ev. 3D dez	0,44	11	2,50	9	2,50	9	0,8
Ev. 4 jan	0,045	6	0,27	1	0,17	3	0,6
Ev. 5 fev	0,021	31	0,20	25	0,20	25	0,8
Ev. 6 mar	0,12	8	0,27	1	0,38	3	0,6
Ev. 7 abr	0,115	14	0,45	9	0,45	9	0,8
Ev. 8 mai	0,445	22	2,20	23	2,20	23	0,8
Ev. 9A jul	0,137	15	0,33	4	0,33	4	0,8
Ev. 9B jul	0,115	21	0,26	2	0,26	2	0,8
Ev. 9C jul	0,15	9	0,25	1	0,27	4	0,15
Ev. 9D jul	0,23	5	0,12	1	0,40	4	0,05
Ev. 10 jul	0,124	16	0,22	6	0,22	5	0,97
Ev. 11 ago	0,045	5	0,20	1	0,15	6	0,98
Ev. 12A ago	0,148	14	0,65	0,1	0,95	11	0,1
Ev. 12B ago	0,14	30	0,57	2	0,57	2	0,8
Ev. 12C ago	0,18	10	0,56	1	0,95	9	0,3
Ev. 13 out	0,2	18	1,40	16	1,65	4	0,95
Ev. 14 out	0,115	7	0,57	28	0,67	6	0,88
Ev. 15 dez	0,18	10	2,60	13	3,15	14	0,5
Ev. 16 dez	0,21	11	2,70	2,5	2,70	2,5	0,8
Ev. 17A jan	0,195	12	3,00	40	3,00	4	0,95
Ev. 17B jan	0,173	31	3,20	60	3,10	18	0,97
Ev. 18 fev	0,13	9	1,80	5	1,80	5	0,8
Ev. 19 mar	0,12	27	1,80	17	1,80	17	0,8
Ev. 20A mar/abr	0,09	9	1,30	10	1,30	10	0,8
Ev. 20B mar/abr	0,12	28	2,10	21	2,10	21	0,8
Ev. 21 mai	0,11	24	1,35	3	1,65	25	0,1
Ev. 22 jun	0,18	7	0,80	1	0,60	3	0,6
Ev. 23 jul	0,1	15	0,53	1	0,53	1	0,8
Ev. 24 ago	0,275	13	3,60	7	3,60	7	0,8
Ev. 25 set	0,21	7	1,30	2	1,40	6	0,4
Ev. 27 out	0,47	16	10,00	15	8,40	17	0,01
Ev. 28A nov	0,14	7	0,60	23	0,46	8	0,93
Ev. 28B nov	0,14	17	0,60	23	0,46	8	0,93
Ev. 29 dez	0,05	4	0,27	0,1	0,16	4	0,6
Ev. 30 fev	0,015	5	0,075	8	0,06	6	0,7
Ev. 31 mar	0,04	8	0,22	1	0,215	3	0,7
Ev. 32 abr	0,03	6	0,155	1	0,13	5	0,6
Ev. 33 mai	0,11	11	0,33	0,1	0,33	0,1	0,48
Ev. 34 mai	0,07	9	0,22	1	0,22	7	0,1
Máximo	0,47	31	10	60	8,4	25	0,98
Mínimo	0,015	4	0,075	0,1	0,06	0,1	0,01
Média	0,16	13,36	1,28	9,59	1,27	8,06	0,66
Desv.pad.	0,11	7,64	1,69	12,46	1,51	6,64	0,28
Coef. variação	0,69	0,57	1,32	1,30	1,19	0,82	0,42

Tabela 4.8 – Parâmetros calibrados para os eventos de estiagem da bacia Florestada Rosário

Bacia Florestada Rosário							
Evento	MPB2		IPH2 - 2 parâmetros		IPH2 - 3 parâmetros		
	Cinf	Ksub	Ib	Ksub	Ib	Ksub	H
Ev. 3 dez	0,100	12	0,80	1	0,56	15	0,25
Ev. 4 jan	0,036	13	0,30	7	0,30	7	0,8
Ev. 5 fev	0,04	13	0,34	6	0,34	6	0,8
Ev. 6 mar	0,04	18	0,18	7	0,18	7	0,8
Ev. 7 abr	0,07	19	0,29	13	0,29	13	0,8
Ev. 8 abr	0,08	23	0,45	15	0,45	15	0,8
Ev. 9 mai	0,15	24	0,90	20	0,42	14	0,9
Ev. 10A jun	0,047	12	0,20	6	0,20	6	0,8
Ev. 10B jun	0,065	17	0,30	1	0,25	7	0,6
Ev. 11 jul	0,09	12	0,185	4	0,20	1	0,86
Ev. 12 jul	0,15	11	*	*	0,43	8	0,01
Ev. 13 ago	0,1	13	0,42	1	0,90	21	0,0001
Ev. 14 out	0,055	13	0,27	10	0,27	10	0,8
Ev. 15 dez	0,11	4	0,30	2	0,30	2	0,8
Ev. 16A jan	0,05	5	0,24	5	0,28	14	0,4
Ev. 16B jan	0,04	7	0,31	1	0,34	8	0,5
Ev. 17 fev	0,025	6	0,20	1	0,22	15	0,4
Ev. 18 mar	0,03	16	0,24	12,0	0,24	12,0	0,8
Ev. 19 mar	0,023	17	0,20	15	0,20	15	0,8
Ev. 20 abr	0,18	8	0,90	1	0,85	10	0,55
Ev. 21 abr	0,023	10	0,23	1	0,13	4	0,3
Ev. 22 mai	0,03	19	0,23	1	0,24	20	0,002
Ev. 23 jun	0,105	11	0,30	1	0,30	6	0,2
Ev. 24 jul	0,135	13	0,36	5,0	0,35	7,0	0,7
Ev. 25 ago	0,095	10	*	*	0,55	2	0,38
Ev. 26 ago	0,11	10	0,32	1	1,00	11	0,05
Ev. 27 set	0,1	4	0,45	8	0,45	8	0,8
Ev. 28 set	0,075	9	0,63	16	0,63	16	0,8
Ev. 29 out	0,075	10,5	0,36	2	0,57	16	0,03
Ev. 30 out	0,14	7	*	*	0,48	7	0,2
Ev. 31 out	0,113	8,5	0,34	1	0,39	8	0,01
Ev. 32 nov	0,07	13	0,34	1	0,34	2	0,7
Máximo	0,18	24	0,90	20	1,00	21	0,90
Mínimo	0,023	4	0,18	1	0,13	1	0,0001
Média	0,08	12,13	0,37	5,69	0,40	9,78	0,52
Desv.pad.	0,04	5,04	0,20	5,67	0,21	5,25	0,32
Coef. variação	0,50	0,41	0,54	1,00	0,52	0,54	0,61

* Eventos que não foram possíveis de ser calibrados apenas com os dois parâmetros selecionados

Nota-se que o parâmetro K_{sub} (em intervalos de simulação), presente em todos os modelos, obteve valores médios semelhantes, principalmente para a bacia Rural UFSM. No entanto, o modelo MPB2 resultou em valores de K_{sub} maiores para todas as bacias. Esse fato pode ter duas interpretações: a) o modelo MPB2 superestima este parâmetro por sua metodologia simplificada; ou b) o modelo IPH2 pode estar subestimando o K_{sub} , mascarado pelos demais parâmetros que foram fixos. No entanto, não há como afirmar com certeza o real motivo.

Quanto aos valores do parâmetro H , observa-se que, para as bacias de uso rural analisadas, seu valor médio é próximo de 0,6, menor que o valor fixado para a simulação com dois parâmetros em 0,8.

Analisando os valores médios dos parâmetros C_{inf} e I_b em cada bacia, percebemos que estes foram maiores para a bacia Urbana UFSM. Embora possuam definições diferentes, ambos os parâmetros (C_{inf} e I_b) são decisivos na determinação das vazões de base. Estes valores estão coerentes, pois as curvas de permanência dos dados observados já haviam demonstrado que esta bacia apresenta a maior disponibilidade hídrica, função de suas características físicas, geomorfológicas e climatológicas. Na bacia urbana grande parte da precipitação vai contribuir para a própria bacia, além de haver parcela de vazão proveniente dos esgotos com contribuição constante na vazão. Fato que não acontece nas bacias de uso rural, que grande parcela da água precipitada é perdida para contribuir em outra bacia maior pela escoamento subsuperficial ou subterrâneo. Isso ocorre principalmente em bacias de área pequena (caso em estudo), onde o divisor de águas superficiais dificilmente coincide com o divisor de águas subterrâneo.

Em relação ao coeficiente de variação (CV), estes apresentaram valores altos, principalmente para os parâmetros do modelo IPH2 (calibrado com 2 parâmetros). Os valores chegaram a 1,32, indicando que o desvio padrão do intervalo é cerca de 132% do valor médio. Já os parâmetros do modelo MPB2 apresentaram os menores CV.

Um CV alto indica dados pouco homogêneos, ou seja, grande variabilidade de valores dos parâmetros. Essa variabilidade pode ocorrer devido à distribuição da precipitação, limitação dos algoritmos que representam os fenômenos hidrológicos, condições iniciais das bacias em cada evento, técnicas inadequadas para estimativas dos parâmetros, entre outros fatores (SANTOS et al., 2001). A subjetividade dos parâmetros do modelo, principalmente nas simulações com o IPH2, provavelmente foram responsáveis por um aumento do CV, pois alguns parâmetros foram fixados, embutindo mais um erro na representatividade dos parâmetros calibrados.

Ainda, observando os valores máximos, mínimos e médios dos parâmetros, verifica-se que a média fica aproximadamente equidistante dos extremos inferior e superior, dando indicações de uma distribuição simétrica dos parâmetros, que conforme suposto por Silveira (1997) seguiam uma distribuição normal de probabilidades. Esta constatação é válida para os parâmetros do modelo MPB2. Para o modelo IPH2 não se pode afirmar o mesmo, pois alguns parâmetros foram fixados e os calibráveis deixaram de representar seu real significado, apresentando em alguns eventos parâmetros com valores improváveis.

Quanto à independência dos parâmetros, esta análise está apresentada no item 4.4 na sequência.

As curvas de permanência geradas a partir dos eventos calibrados em cada modelo chuva-vazão (MPB2, IPH2 com 2 parâmetros e IPH2 com 3 parâmetros) estão apresentadas a seguir, no item 4.4, juntamente com as curvas de permanência observadas.

4.4 Análise das estimativas por mínima amostragem

Na Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.11, Figura 4.13, Figura 4.15, Figura 4.17 e Figura 4.19, estão apresentadas as curvas de permanência geradas a partir do ajuste com as amostras reduzidas de vazões e a curva de permanência calculada com base na série de vazões observadas. Nestas figuras, também está apresentado o intervalo de confiança de 90% calculado em função da curva de permanência observada. A análise das curvas de permanência se restringe ao ramo inferior da curva, ou seja, das vazões de maior permanência, as quais são objetivo principal da metodologia adotada.

Ainda, nas Figura 4.10, Figura 4.12, Figura 4.14, Figura 4.16, Figura 4.18 e Figura 4.20, para as bacias de Rosário do Sul, também está ilustrada a relação entre os parâmetros ajustados em cada modelo, mostrando que não há dependência entre eles. Esta análise não é válida para as bacias do campus da UFSM, pois haviam poucos eventos selecionados. Os pontos que estão em vermelho representam os eventos que ficaram fora do intervalo de confiança.

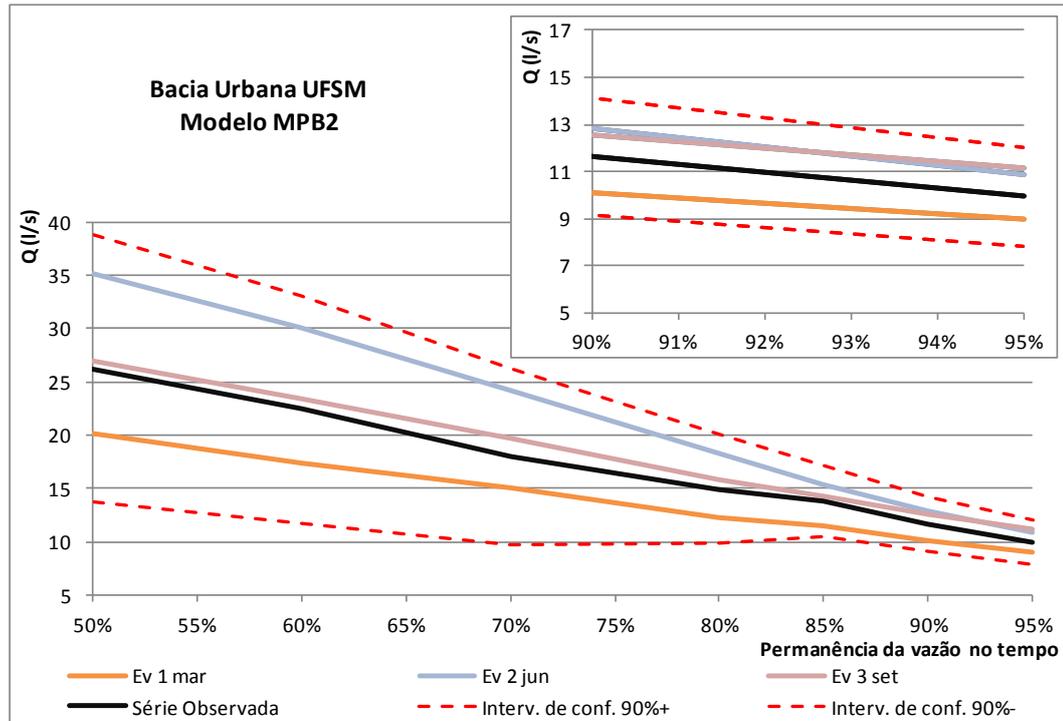


Figura 4.3 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo MPB2

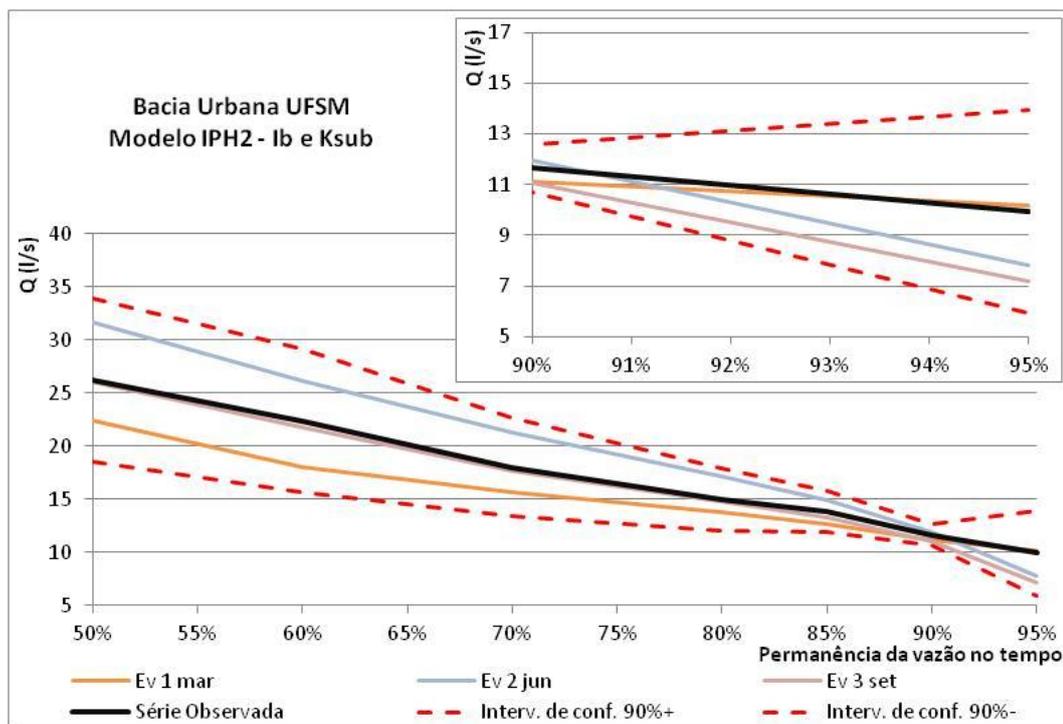


Figura 4.4 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib e Ksub

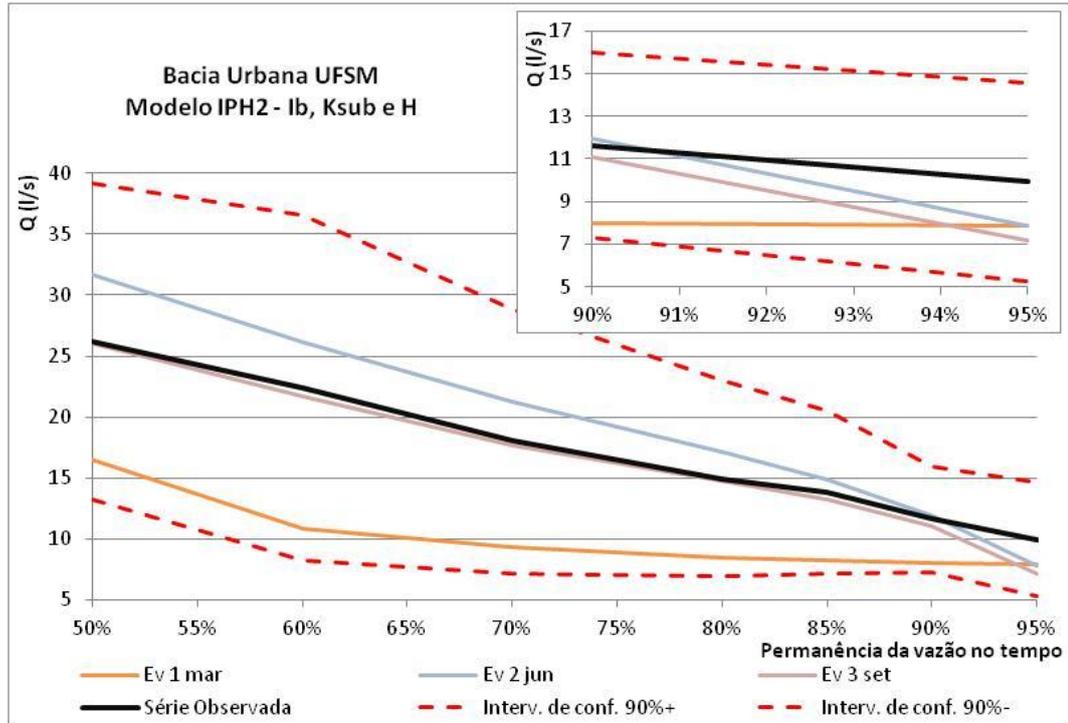


Figura 4.5 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Urbana UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b , K_{sub} e H

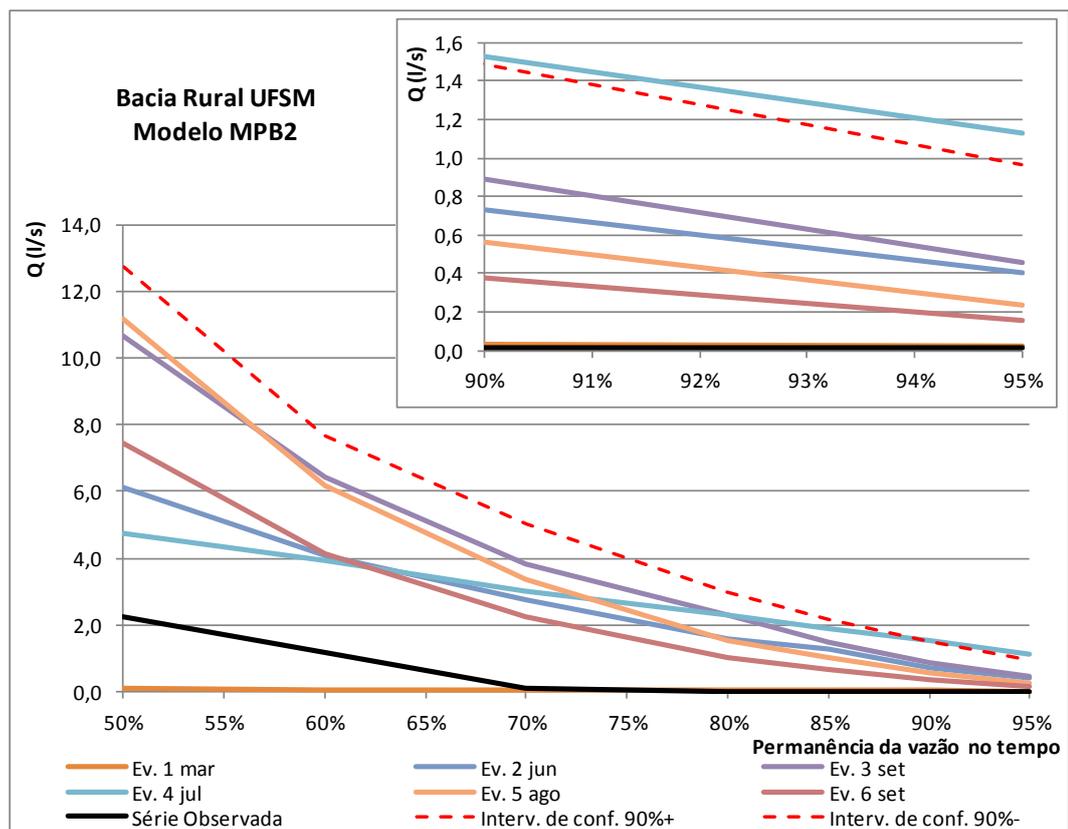


Figura 4.6 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo MPB2

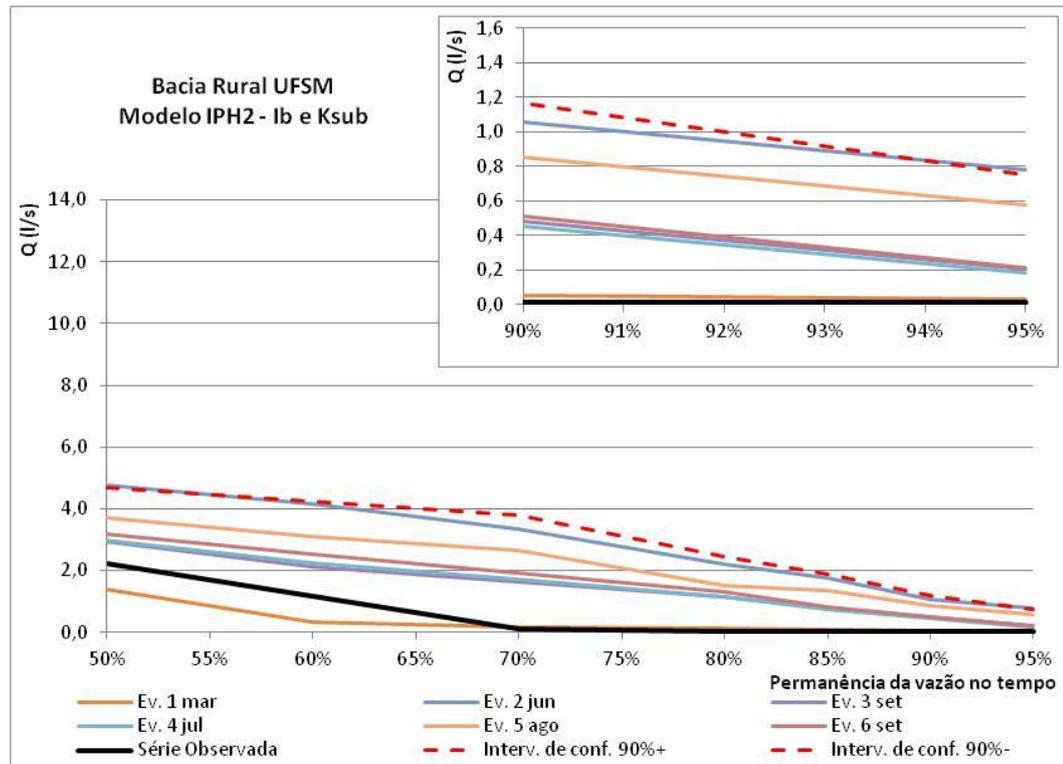


Figura 4.7 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib e Ksub

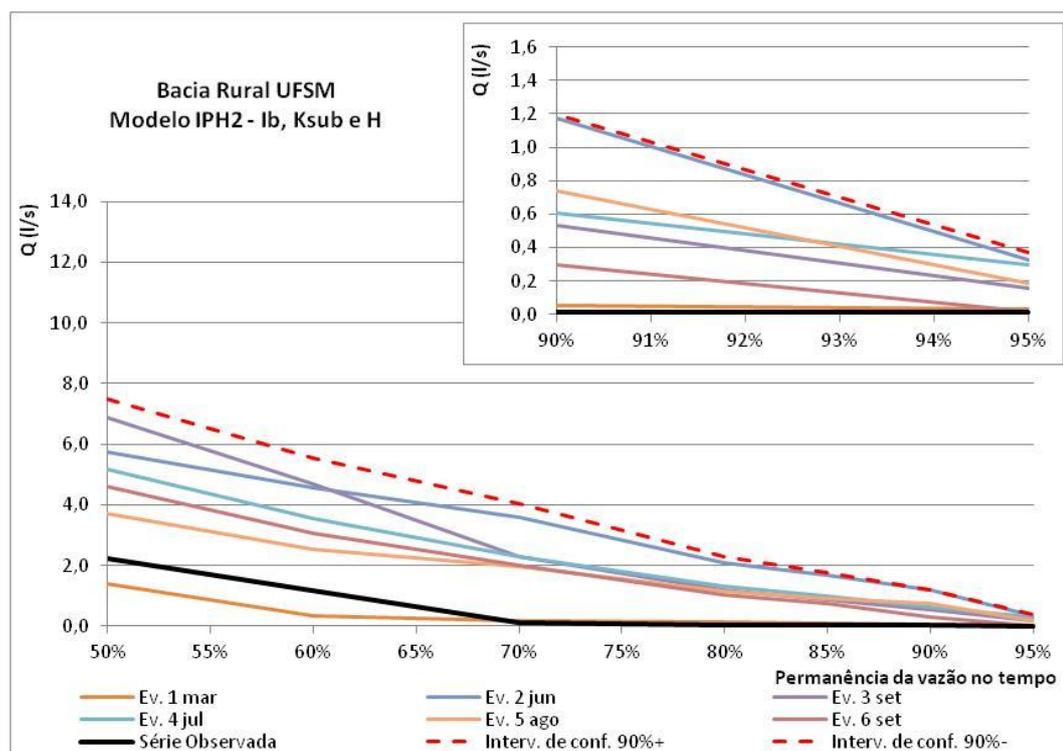


Figura 4.8 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Rural UFSM ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib, Ksub e H

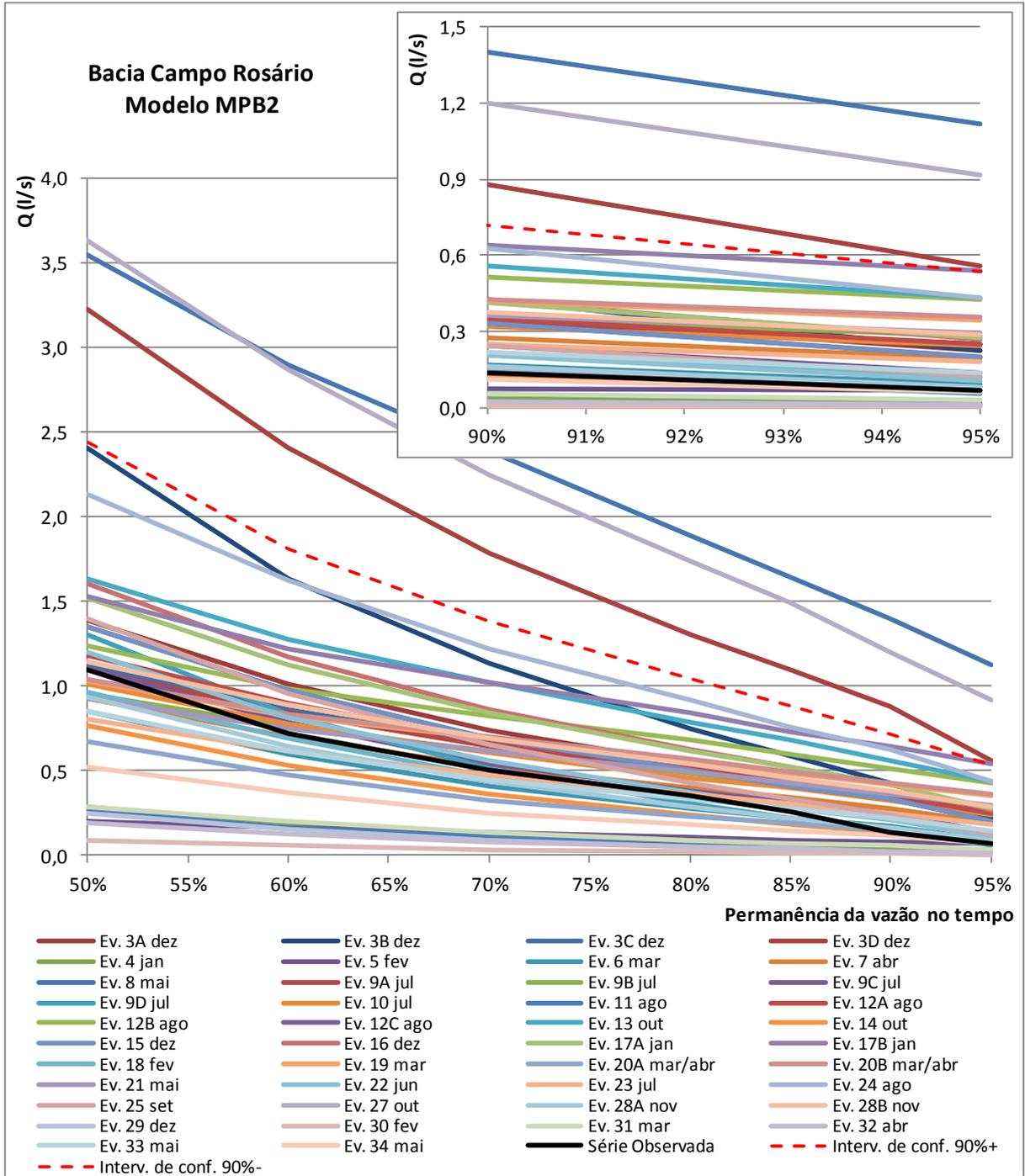


Figura 4.9 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo MPB2

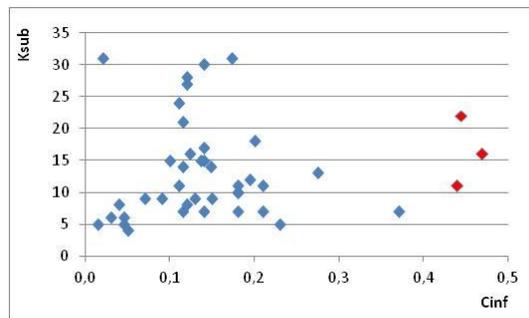


Figura 4.10 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo MPB2

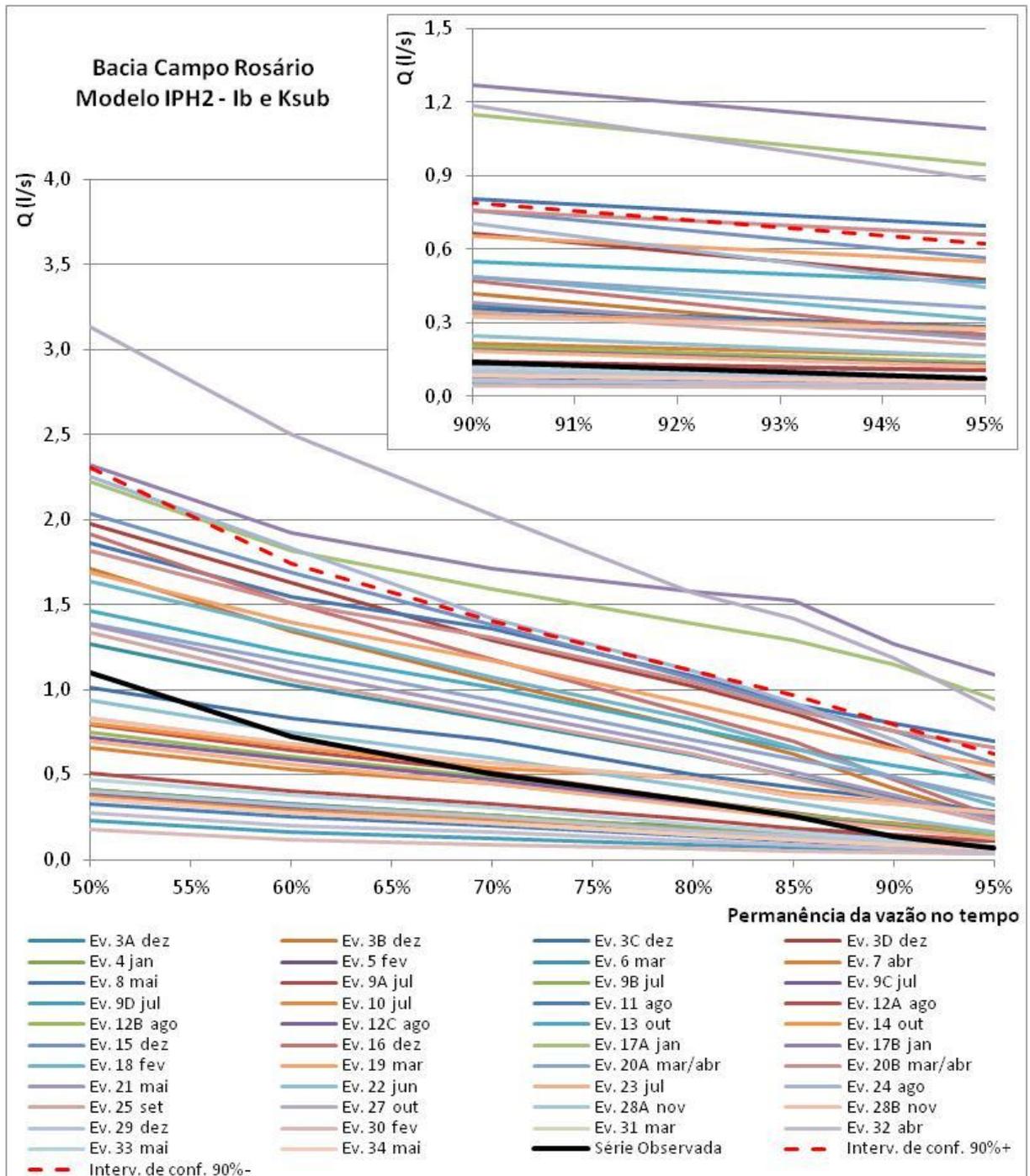


Figura 4.11 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}

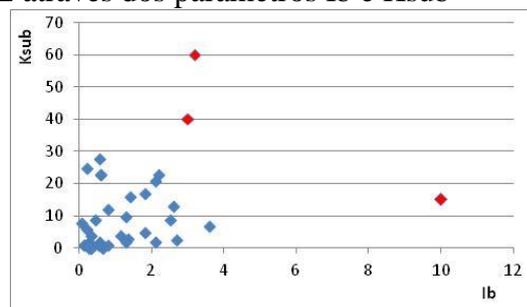


Figura 4.12 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}

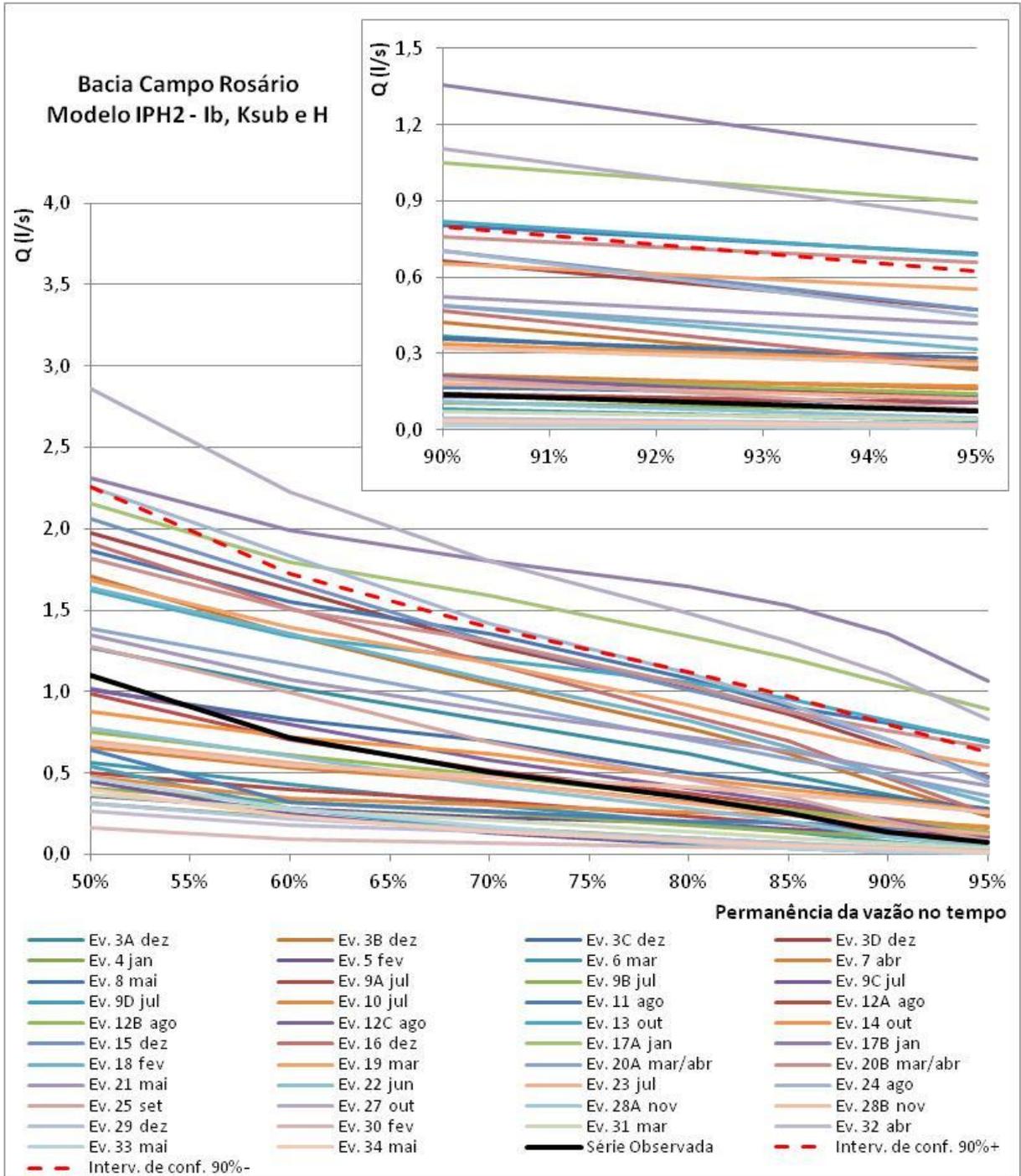


Figura 4.13 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib, Ksub e H

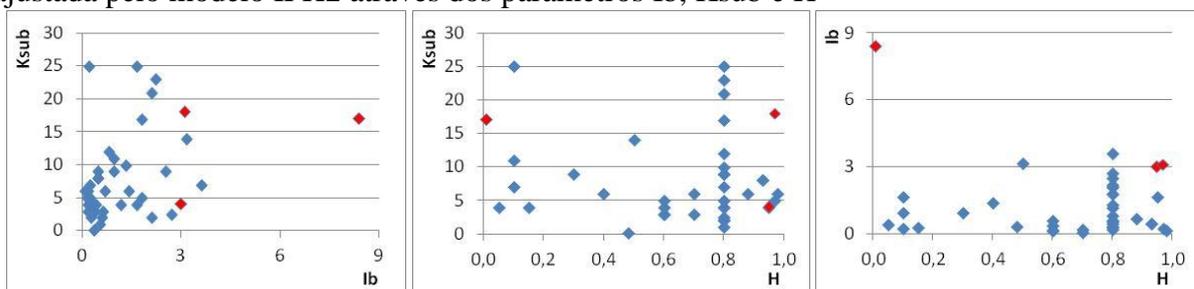


Figura 4.14 – Parâmetros de ajuste para a bacia Campo Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib, Ksub e H

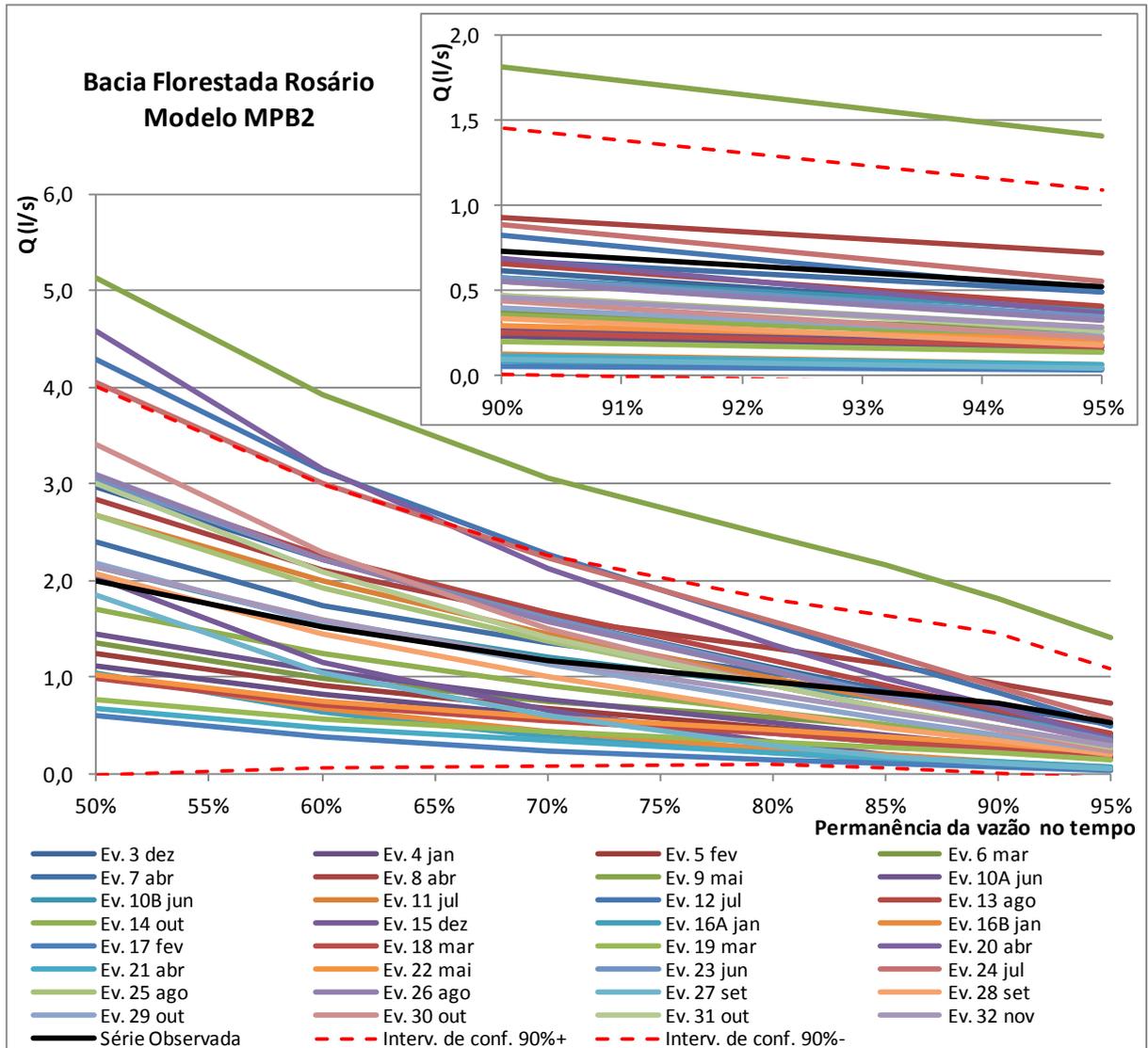


Figura 4.15 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo MPB2

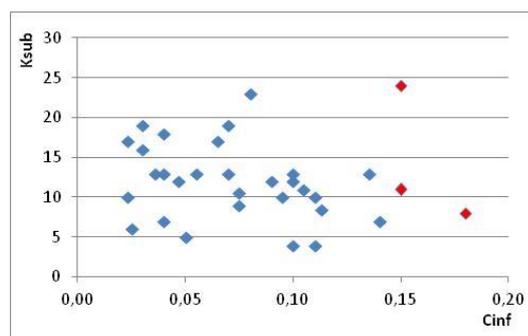


Figura 4.16 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo MPB2

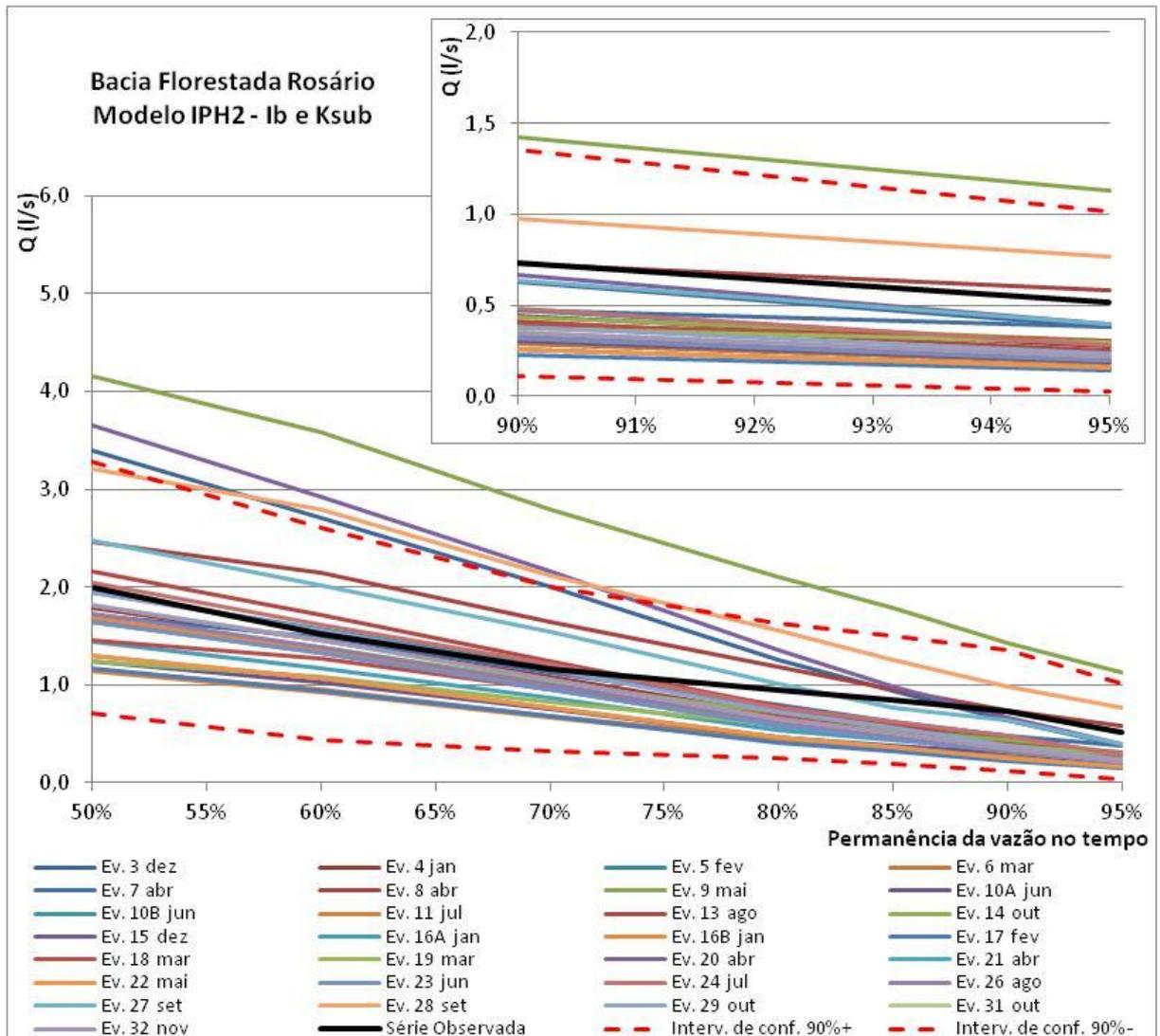


Figura 4.17 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}

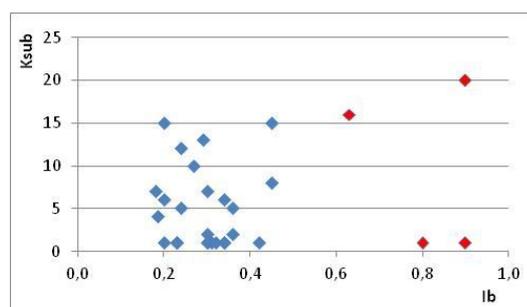


Figura 4.18 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros I_b e K_{sub}

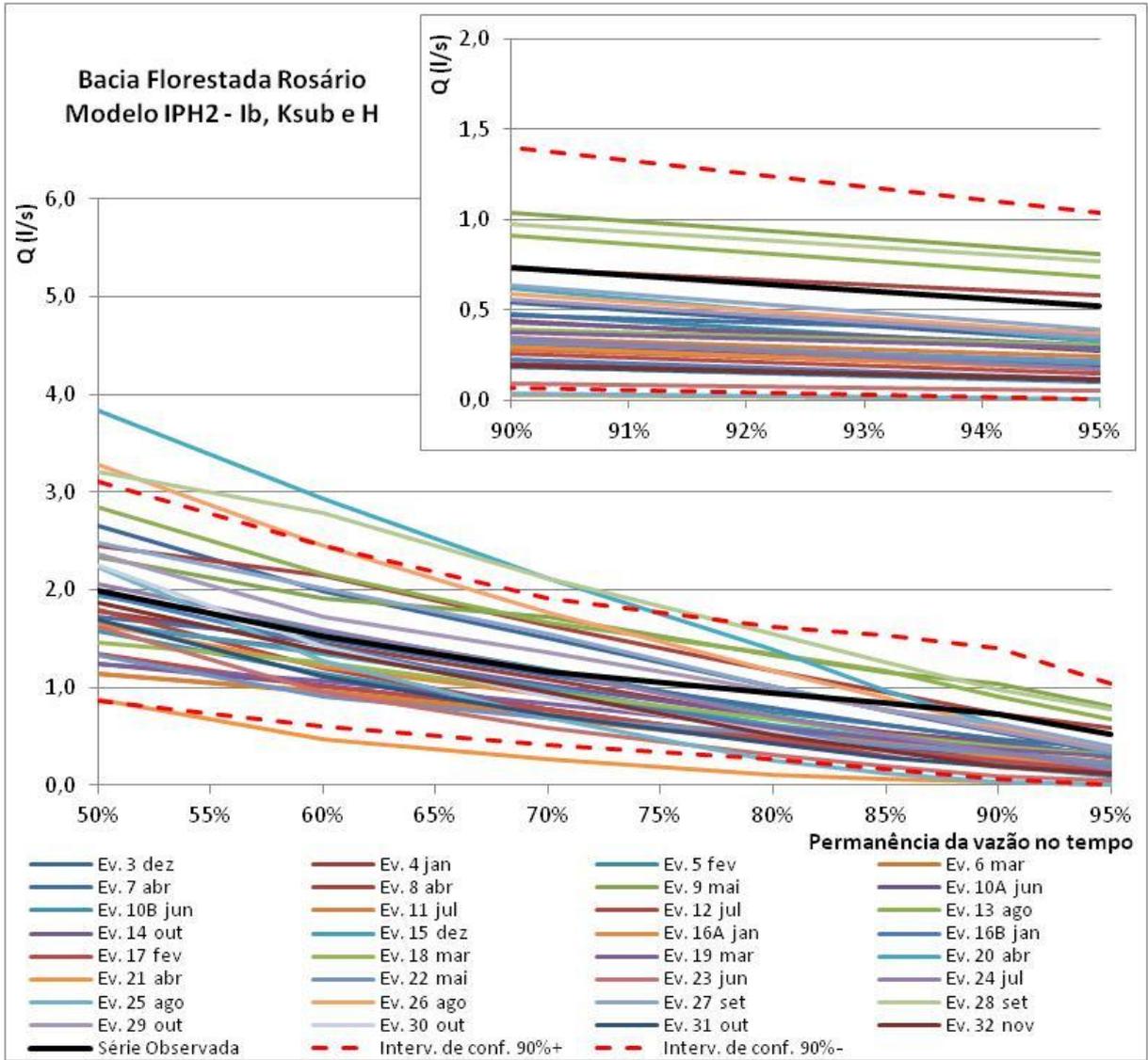


Figura 4.19 – Curvas de permanência e intervalo de confiança para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib, Ksub e H

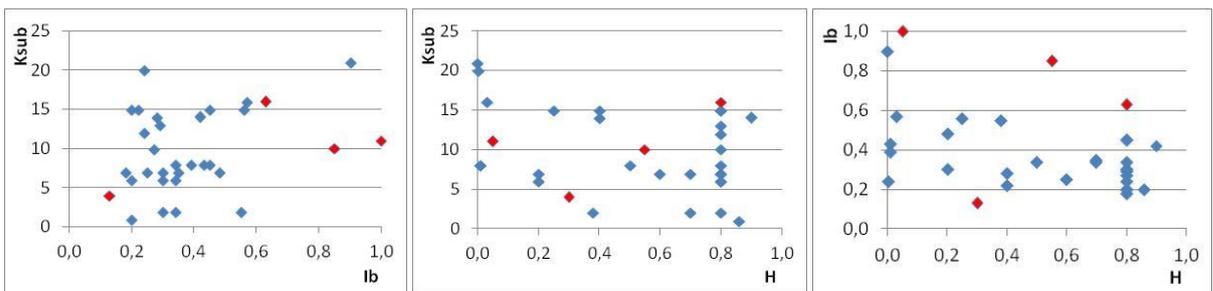


Figura 4.20 – Parâmetros de ajuste para a bacia Florestada Rosário ajustada pelo modelo IPH2 através dos parâmetros Ib, Ksub e H

Pode-se observar nas figuras que o intervalo de confiança de 90% é bastante amplo, ou seja, aproximadamente 90% dos eventos de estiagem estão dentro deste intervalo, porém a variabilidade das curvas de permanência é grande.

No entanto, se considerar apenas as vazões com 90% e 95% de permanência, que são comumente utilizadas em processos de outorga de direito de uso, a amplitude do intervalo de confiança de todas as bacias é pequeno, onde o erro da estimativa foi de no máximo próximo de 4,7 l/s para mais ou para menos, com 90% de confiança.

Analisando-se os gráficos que correlacionam os parâmetros que foram calibrados para cada modelo (Figura 4.10, Figura 4.12, Figura 4.14, Figura 4.16, Figura 4.18 e Figura 4.20) nas bacias de Rosário do Sul, percebe-se que eles são independentes entre si, pois não há nenhuma correlação, ou seja, um “Cinf” baixo não implica em um “Ksub” baixo ou alto, ou vice-versa. Para o modelo IPH2, o parâmetro “Ksub” também não se mostrou dependente de “Io” ou “h”. No entanto, segundo Tucci (1979), os parâmetros Io e Ib da equação de Horton variam de acordo com o valor de h e a influência de Io diminui à medida que diminui o valor de h, aumentando a influência de Ib.

Quanto aos parâmetros que geraram uma curva de permanência fora do intervalo de confiança (pontos em vermelho), correspondem aos eventos onde os parâmetros ajustados encontram-se fora dos valores comumente encontrados. Estes podem ter ocorrido devido a vários motivos, como erros de observação das vazões, pois os dados originais eram horários e podem sofrer influência da maré barométrica. A maré barométrica é uma variação diurna da pressão atmosférica que provoca pequenas alterações nos dados obtidos por meio de transdutores de pressão e que causam uma média de erro de 0,30 e 0,43 centímetros na cota observada (BAUMHARDT et al., 2011). Ou ainda, pode realmente ter ocorrido algum comportamento atípico no ciclo hidrológico da bacia.

Observando estes pares de parâmetros para os ajustes no modelo MPB2, percebe-se que a curva de permanência fica fora do intervalo de confiança para os maiores valores do coeficiente de infiltração (Cinf). Isso porque quanto maior o volume infiltrado, maior será a vazão de base, ou seja, maiores serão as vazões mínimas.

Ainda referente aos parâmetros calibrados, no modelo IPH2, como alguns parâmetros foram fixados, os parâmetros calibráveis foram ajustados de forma que acabaram ficando “mascarados”, ou seja, o valor calibrado não representa exatamente o seu objetivo, pois nele estão embutidos os demais parâmetros que foram fixados. Por este motivo, a análise destes parâmetros deve levar isso em conta. Quando calibrado o modelo apenas com dois parâmetros (Ib e Ksub), percebe-se que a curva de permanência fica fora do intervalo de confiança para

os maiores valores da capacidade de infiltração (I_b), pois, conforme já comentado, quanto maior o volume de água contribuindo às vazões de base, maior será a disponibilidade hídrica. Ainda, para a bacia Campo Rosário, em dois eventos foram encontrados K_{sub} com valores muito altos (40 e 60 dias), mostrando que nestes eventos os parâmetros calibráveis podem ter embutido neles a necessidade de calibração de outro parâmetro. No entanto, como já comentado, quando se aumenta o número de parâmetros calibráveis aumentará também a incerteza da resposta, pois haverá um maior número de grupo de parâmetros possíveis como solução.

Esta constatação pode ser confirmada observando a relação entre os parâmetros ajustados para os eventos de estiagem no modelo IPH2 com 3 parâmetros calibráveis: I_b , K_{sub} e H . A Figura 4.14 e Figura 4.20 mostram que os parâmetros que geraram curvas de permanência fora do intervalo de confiança (pontos em vermelho) não podem ser explicados pelos parâmetros, ou seja, não correspondem a I_b , K_{sub} ou H máximos ou mínimos. Isto comprova que existem “n” soluções e que os parâmetros calibráveis estão mascarando os outros que foram fixados. Salienta-se que os eventos que estavam bem ajustados com dois parâmetros (I_b e K_{sub}) não foram reajustados para os três parâmetros (I_b , K_{sub} e H), motivo pelo qual a relação entre o parâmetro H com os demais formam uma reta no valor que foi fixado na simulação com dois parâmetros.

Embora não se tenha eventos suficientes para se analisar nas bacias do campus da UFSM, com base nessa constatação para as bacias de Rosário, para fins de análise aceita-se que os parâmetros das bacias do campus de UFSM também tem o mesmo comportamento de independência. Dessa forma, pode-se aceitar os intervalos de confiança adotados.

Na Figura 4.21 está apresentada a comparação entre os intervalos de confiança resultante dos modelos utilizados para cada bacia. O intervalo de confiança foi mais restritivo para o modelo IPH2, ou seja, as curvas de permanência geradas pelo ajuste dos eventos no modelo IPH2 foram mais próximas da curva de permanência observada.

No entanto, para as maiores permanências, considerando a $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, não foram observadas grandes diferenças entre os intervalos de confiança gerados pelos diferentes modelos. Essa observação é comprovada ao analisar a Tabela 4.9, que apresenta o erro das estimativas pelos modelos utilizados para as vazões de maior permanência, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$. O erro apresentado na tabela é do intervalo de confiança de 90% em L/s, ou seja, mostra a variação das curvas de permanência calculadas, para mais ou para menos da curva de permanência observada.

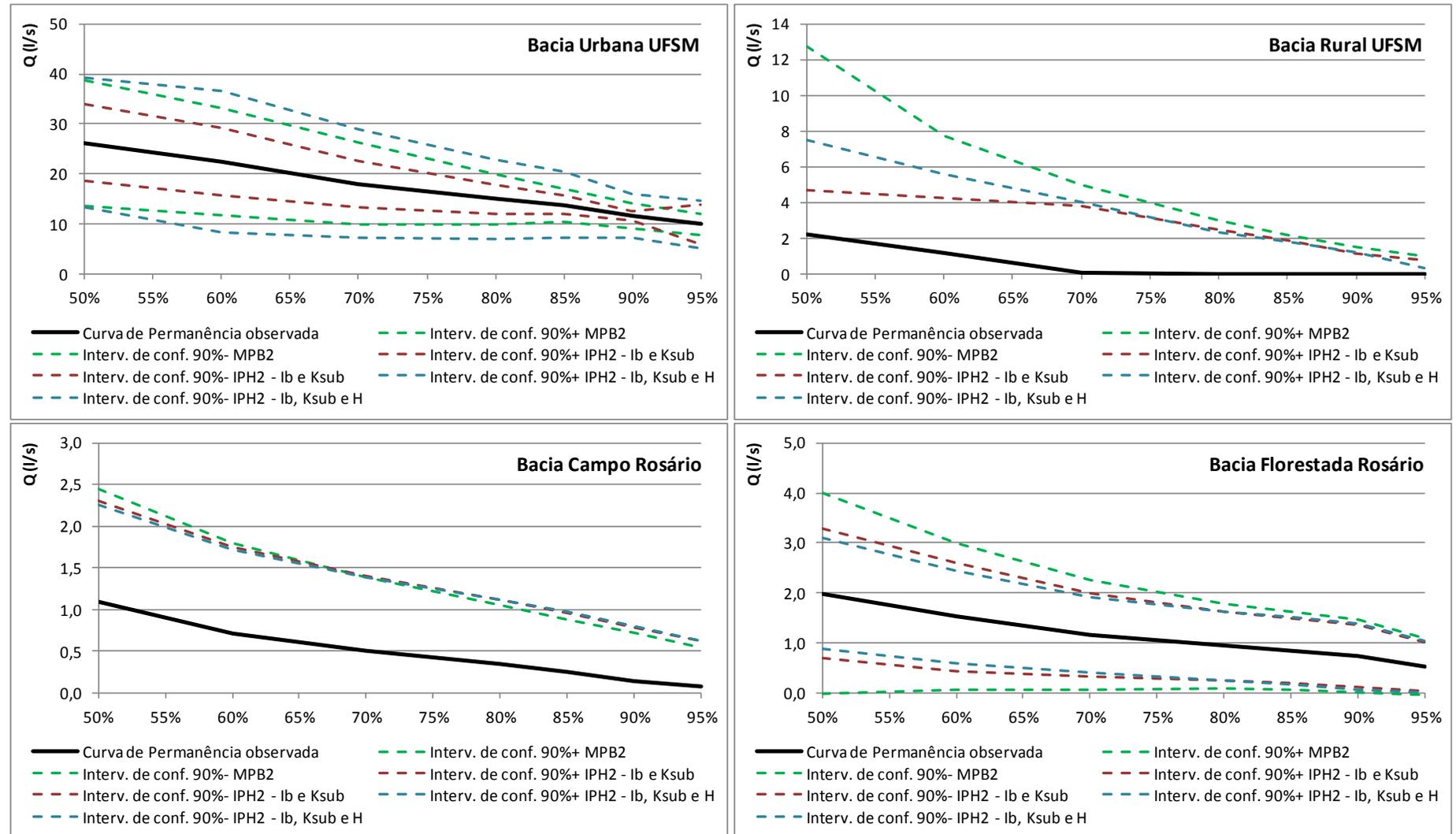


Figura 4.21 – Intervalos de confiança resultante de cada modelo

Tabela 4.9 – Erro das estimativas para as vazões de maior permanência

Bacia Urbana UFSM		
Permanência	90%	95%
Vazão observada (l/s)	11,6	9,9
	Erro em l/s	
Interv. de conf. 90% MPB2	± 2,5	± 2,1
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib e Ksub	± 1,0	± 4,0
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib, Ksub e H	± 4,3	± 4,7
Bacia Rural UFSM		
Permanência	90%	95%
Vazão observada (l/s)	0,0	0,0
	Erro em l/s	
Interv. de conf. 90% MPB2	± 1,5	± 1,0
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib e Ksub	± 1,1	± 0,7
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib, Ksub e H	± 1,2	± 0,4
Bacia Campo Rosário		
Permanência	90%	95%
Vazão observada (l/s)	0,1	0,1
	Erro em l/s	
Interv. de conf. 90% MPB2	± 0,6	± 0,5
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib e Ksub	± 0,7	± 0,6
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib, Ksub e H	± 0,7	± 0,6
Bacia Florestada Rosário		
Permanência	90%	95%
Vazão observada (l/s)	0,7	0,5
	Erro em l/s	
Interv. de conf. 90% MPB2	± 0,7	± 0,6
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib e Ksub	± 0,6	± 0,5
Interv. de conf. 90% IPH2 - Ib, Ksub e H	± 0,7	± 0,5

A tabela mostra que as análises para as três bacias de uso rural apresentaram bons resultados, sendo que a maior variação foi de $\pm 1,5$ L/s para a bacia Rural UFSM.

Já para a bacia Urbana UFSM, que possui maiores valores de disponibilidade, o modelo MPB2 apresentou o menor erro, aproximadamente 2,5 L/s para mais ou para menos; sendo um valor bastante aceitável. As estimativas pelo modelo IPH2 também obtiveram resultados aceitáveis, embora com um erro maior, chegando a 4,7 L/s para mais ou para menos da vazão de permanência observada.

Portanto, pode-se dizer que para estudos de disponibilidade, ambos os modelos podem gerar curvas de permanência “confiáveis” para a determinação da $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$.

Quanto ao modelo IPH2, ao calibrar três parâmetros não houve melhora considerável, sendo que em alguns casos diminuiu a qualidade do ajuste, fato mostrado por sua maior amplitude do intervalo de confiança, se comparado com o modelo IPH2 calibrando dois parâmetros. Além disso, mesmo calibrando três parâmetros, ainda não foi alcançado um bom ajuste em todos os eventos, conforme já comentado. Esse fato mostra que das três análises realizadas - modelo MPB2, modelo IPH2 com 2 parâmetros e modelo IPH2 com 3 parâmetros -, este último é o menos recomendável, pois o maior número de parâmetros traz maiores incertezas e nenhuma melhora significativa nos ajustes.

O modelo IPH2 mostrou-se um modelo “robusto”, pois atendeu ao objetivo proposto pela metodologia. No entanto, como alguns parâmetros foram fixados, os parâmetros calibráveis foram ajustados de forma que acabaram ficando “mascarados”, ou seja, o valor calibrado não representa exatamente o seu objetivo, pois nele estão embutidos os demais parâmetros que foram fixados.

Dessa forma, mesmo sendo menos restritivo o intervalo de confiança, o modelo MPB2 mostrou-se o mais recomendável, pois ao considerar as maiores permanências todos os modelos mostraram resultados aceitáveis para determinação da disponibilidade. Além disso, o modelo MPB2 consiste em um modelo simplificado e de fácil aplicação, enquanto o modelo IPH2 exige maior cautela de utilização para este tipo de aplicação (método Silveira), visto as considerações acima descritas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da presente dissertação buscou responder a questão: O método Silveira (1997) de estimativa de vazões em pequenas bacias a partir de pequenas amostragens de vazão e simulação hidrológica é válida para a determinação das vazões medianas e mínimas utilizando os modelos chuva-vazão MPB2 e IPH2?

Considerando que todas as bacias e modelos chuva-vazão analisados apresentaram um erro de estimativa pequeno na determinação das vazões mínimas, com 90% e 95% de permanência, com 90% de confiança, pode-se dizer que a metodologia gerou resultados satisfatórios para determinação das vazões mínimas, as quais dão subsídios à gestão de recursos hídricos.

Este resultado indica uma atração das estimativas aos valores reais observados de disponibilidade hídrica, provavelmente proporcionados pela interação com o meio nas medições de vazão na seção fluvial analisada.

Salienta-se que os resultados obtidos para os demais percentis de permanência (abaixo de 90% - vazões medianas) para a metodologia em questão exige maior cautela de utilização. Quanto menor a permanência maior a variação das estimativas, ou seja, maior a probabilidade de uma estimativa equivocada.

Quanto ao critério de escolha dos eventos de estiagem – um dia antecedente à medição de descargas mais os 5 dias nos quais as três medições seriam realizadas –, as análises mostraram que a metodologia pode ser utilizada para estas situações menos restritivas, uma vez que apresentou resultados aceitáveis para a determinação da $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$. Esta vantagem permite a utilização da metodologia em situações mais casuais, facilitando a aplicação e obtenção dos dados de vazão.

No entanto, buscando a uma estimativa mais confiável, sugere-se sempre que possível aguardar o maior período de estiagem antes das medições in loco. Ou ainda, segundo Silveira (1997), a observação de mais de um evento de estiagem subsequente permite uma melhor estimativa, para o caso de existir um problema de representatividade das precipitações que possa conduzir a resultados incompatíveis com a realidade física.

Ainda, visando a diminuição de possíveis erros, a qualidade de ajuste depende de uma correta avaliação da vazão in loco, da seleção de um evento de estiagem bem caracterizado,

da qualidade dos ajustes desenvolvidos e da qualidade e representatividade dos dados disponíveis.

Quanto aos modelos chuva-vazão, o modelo IPH2 mostrou-se um modelo “robusto”, pois atendeu ao objetivo proposto pela metodologia. No entanto, como alguns parâmetros foram fixados, os parâmetros calibráveis foram ajustados de forma que acabaram ficando “mascarados”, ou seja, o valor calibrado não representa exatamente o seu objetivo, pois nele estão embutidos os demais parâmetros que foram fixados.

Caso fosse utilizado o modelo IPH2 com todos seus parâmetros calibráveis, poderíamos chegar a um bom ajuste, no entanto, não chegaríamos a uma “boa solução” pois existiriam “n” conjunto de parâmetros de possíveis soluções para apenas três vazões observadas.

Dessa forma, mesmo sendo menos restritivo o intervalo de confiança, o modelo chuva-vazão MPB2, mostrou-se o mais recomendável, pois ao considerar as maiores permanências todos os modelos mostraram resultados aceitáveis para determinação da disponibilidade. Além disso, o modelo MPB2 consiste em um modelo simplificado e de fácil aplicação, enquanto o modelo IPH2 exige maior cautela de utilização para esta aplicação, com a estimativa e fixação de parâmetros de difícil determinação, acumulando erros nas estimativas das vazões.

Portanto, considerando ser necessário um estudo de disponibilidade em um local de interesse onde não há dados locais disponíveis, nem em região vizinha. Nesta situação, pode-se dizer que a proposta de Silveira (1997) representa uma solução alternativa para a avaliação de disponibilidade hídrica em pequenas bacias quando não houver condições para o monitoramento contínuo, embora não tenha se avaliado as incertezas associadas devido à pequena série de monitoramento para a verificação nas quatro pequenas bacias estudadas.

Recomenda-se ainda que ao realizar a simulação chuva-vazão utilizando o método Silveira, tenha-se o cuidado de utilizar uma série de precipitações e evaporações longa suficiente no período anterior às medições de vazão, de forma que a calibração dos parâmetros não fique dependente do valor inicial de vazão do período simulado.

Para a continuidade das pesquisas, sugere-se analisar a aplicabilidade do método para bacias maiores que as utilizadas no desenvolvimento da metodologia e nesta dissertação, pois Silveira (1997) analisou bacias de área de drenagem entre 0,7 e 10,8 km². Sugere-se também analisar a aplicabilidade de outros modelos chuva-vazão, em conjunto com a metodologia Silveira, buscando um aprimoramento do método. Ainda, seria interessante avaliar a aplicabilidade do método em bacias localizadas em regiões áridas e semi-áridas.

6 REFERÊNCIAS

AGRA, S.G.; SOUZA, V.C.B.; NEVES, M.G.F.P.; CRUZ, M.A.S. **Metodologias de regionalização de vazões: estudo comparativo na bacia do Rio Carreiro – RS.** Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Paraná. 2003.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Nota Técnica n.º 113/GEREG/SOF –ANA. Documento ANA nº 5847/2007. 16 de março de 2007.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Curso de hidrologia básica e aplicações à outorga. Superintendência de Outorga e Fiscalização. Brasília. 2009.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Regionalização das Vazões.** TUCCI, C.E.M. (coord.). IPH / UFRGS. Porto Alegre. 254p . 2002.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Técnico. Regionalização de vazões - Sub-bacias 70 a 79 - Integrantes da bacia 7 – Rio Uruguai.** Executado por Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001a.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Técnico. Regionalização de vazões - Sub-bacias 85 a 87 - Integrantes da bacia 8 – Atlântico Sudeste.** Executado por Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Hidráulica e Saneamento. 2001b.

AVILA, C.B. **Estudo da capacidade de infiltração em um solo da unidade de mapeamento Santa Maria, submetido a três diferentes usos e cobertura do solo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Florestal. UFSM. 2011.

AZEVEDO, L.G.T.; REGO, M.F.; BALTAR, A.M.; PORTO, R. **Sistemas de suporte à decisão para a outorga de direitos de uso da água no Brasil: uma análise da situação brasileira em alguns estados.** Bahia análise & dados. Salvador. v.13, n.ESPECIAL, p.481-496. 2003.

BAUMHARDT, E. **Balço hídrico de microbacia com eucalipto e pastagem nativa na região da campanha do RS.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil. UFSM. 130p. 2010.

BAUMHARDT, E.; MAZIERO, E.; CRUZ, J.C.; TAMIOSSO, M.F.; HORN, J.F.C. **Influência da maré barométrica nos dados de cota para monitoramento de pequenas bacias.** In: XIVth IWRA World Water Congress. 25 a 29 de setembro. Recife, PE.. Anais. IWRA, 2011. v.1. p.1 – 9. 2011.

BENETTI, A.D.; LANNA, A.E.L.; COBALCHINI, M.S. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, p.149-160. 2003.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Rainfall-based real-time flood forecasting. **Journal of Hydrology**, vol.131(1), p.313-339. 1992.

BRANCO, O.E.A. Estimativa da disponibilidade hídrica: Conceitos e aplicabilidade. 2006. Disponível em <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/04/Disponibilidade-H%C3%ADrica.pdf>> Acesso em 04/10/2012.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. 1997.

BRAVO, J.M., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.14, n.3, p37-50. 2009.

BRUN, G.W.; TUCCI, C.E.M. Previsão em tempo real do volume afluente ao reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol.6, n.2. p73-79. 2001.

CASTIGLIONI, S.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A.; SKØIEN, J.O.; LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. Smooth regional estimation of low-flow indices: physiographical space based interpolation and top-kriging. **Hydrology and Earth System Sciences**. v15, p715–727. 2011.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Regionalização de vazões do Rio Grande do Sul**. TUCCI, C.E.M. (coord.). IPH / UFRGS. 3 volumes. Porto Alegre. 1991.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de D.Sc., IPH/UFRGS. Porto Alegre. Brasil. 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.8, n.3, p27–39. 2003.

CRUZ, J.C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia de recursos hídricos e saneamento ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 189p. 2001.

CRUZ, J.C. **Estudo de previsão de cheias em tempo real com modelos empíricos e semi-conceitual**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de pós graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1987.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo. Ed. Pioneira Thomson Learning. 2006.

ELETOBRÁS. **Manual de Regionalização Hidrológica**. Ministério das Minas e Energia, 1983.

GERMANO, A.; TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.L.L. da. Estimativa dos parâmetros do Modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4 , p. 103-120, 1998.

GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SEMA. Instrução Normativa nº. 001, de 08 de abril de 2009.

HEC, Hydrologic Modeling System. **User's Manual**. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering. Disponível em <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation.html>>. Version 3.5. Aug 2010.

HORN, J.F.C. **Regime hidrológico de duas microbacias contíguas: um comparativo entre uso urbano e rural**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. UFSM. 118p. 2012.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS. GOVERNO DO ESTADO DO MINAS GERAIS. **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte. 2010.

IPH - INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. **Manual de usuário do modelo IPHS1 para Windows®**. Versão 2.11. Desenvolvido por IPH/UFRGS; ALM, FEA, IMF / UFPEL; DFIS/FURG. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

IPH - INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. **Manual de usuário do modelo IPH2 para Windows**. Versão 1.0. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.

IAHS – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES. **PUB – Prediction on Ungaged Basins**. Disponível em <pub.iahs.info>. Acesso em 22/07/2012.

KIM, U.; KALUARACHCHI, J.J. Hydrologic model calibration using discontinuous data: an example from the upper Blue Nile river basin of Ethiopia. **Hydrological Processes**. v23, p3705-3717. 2009.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G.A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v.2, n.1, p.171-182. 2001.

LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. **Low flow estimation in Austria**. Climate Variability and Change - Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006). IAHS Publ. 308. p117–121. 2006

LANNA, A.E. **MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável**. Versão DOS 1997. IPH–UFRGS. Porto Alegre. 55p. 1997.

MAZIERO, E. **Histograma tempo/área geoprocessado: Uso em modelo chuva-vazão concentrado**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. 2010.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM. 561p. 2007.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **Journal of Hydrology**. v.242, p275–301. 2001.

RIBEIRO, C.B.M.; MARQUES, F.A.; SILVA, D.D. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a Bacia do Rio Doce. **Engenharia na Agricultura**, v.13, n.2, p103-117, 2005.

RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 10.350 do Rio Grande do Sul, de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. Publicado no DOE em 01 de janeiro de 1995.

SANTOS, R.; TUCCI, C.E.M.; Silveira, A.L.L.; MENESES FILHO, A.S. Estimativa do hidrograma de projeto com base na incerteza dos parâmetros do modelo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.6, n.1, p.29-41, 2001.

SILVEIRA, A.L.L. **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica**. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 4ª Ed. Cap. 2, p35-51. 2009.

SILVEIRA, A.L.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. **Infiltração e Armazenamento no solo**. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 4ª Ed. Cap. 9, p335-372. 2009.

SILVEIRA, A.L.L. **Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre**. In: Tucci, C.E.M.; Marques, D.M. *Avaliação e Controle da Drenagem Urbana*. Editora da Universidade/UFRGS. Porto Alegre, 2000. pp 153-163.

SILVEIRA, A.L.L.; SILVEIRA, G.L. **Vazões mínimas**. In: PAIVA, J.B.D; PAIVA, E.M.C.D. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH. 2001. Cap. 5, p125-163.

SILVEIRA, G.L. **Quantificação de vazão em pequenas bacias carentes de dados**. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 1997. 180f. Tese de Doutorado.

SILVEIRA, G.L.; TUCCI, C.E.M. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 3, n.3, p97-110. 1998.

SILVEIRA, G.L.; TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.L.L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 3, n.3, p111-131. 1998.

SILVEIRA, R.L. da, **Proposição de um modelo determinista de simulação hidrológica para bacias hidrográficas com dados pluvio-hidrométricos escassos**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. IPH/UFRGS. 1974.

SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E.M.; O'CONNELL, P.E.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences*. J. 48(6), 857–880. 2003.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ª ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TASSI, R.; BRAVO, J.M.; MELLER, A.E.; COLLISCHONN, W. **Avaliação do impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II**. In: Congresso Latino-Americano de Hidráulica. Anais. Ciudad Guayana, Venezuela. p39. 2006.

TUCCI, C.E.M.; **Análise de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo de infiltração**. Anais. III Simpósio Brasileiro de Hidrologia. Brasília. 1979.

TUCCI, C.E.M. **Usos dos modelos hidrológicos**. In Hidrologia. Blog do Tucci – Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Disponível em <<http://rhama.net/wordpress/?p=130>>. Acesso em 22/07/2012. Postado em 18 de janeiro de 2010.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

TUCCI, C.E.M. **Escoamento Superficial**. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 4ª Ed. Cap. 11, p391-441. 2009.

TUCCI, C.E.M.; SANCHES, J.; LOPES, M.S. **Modelo matemático precipitação vazão IPH II**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983. 112p. (Publicação 3, Recursos hídricos).

YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. **Advances in Water Resources** 30 p1756-1774. 2007.

YOUNG, A.R. 2006 Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, 320. p155-172. 2006.