

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

**Marciano Friedrich**

**INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO USO DO MÉTODO SILVEIRA  
PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS ENTRE 800 A 1000 KM<sup>2</sup>**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Santa Maria, RS, Brasil  
2017

**Marciano Friedrich**

**INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO USO DO MÉTODO SILVEIRA PARA  
BACIAS HIDROGRÁFICAS ENTRE 800 A 1000 KM<sup>2</sup>**

Dissertação apresentado 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. Dr<sup>a</sup>. Jussara Cabral Cruz

Santa Maria, RS, Brasil  
2017

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

Friedrich, Marciano  
Influência da precipitação no uso do método Silveira  
para bacias hidrográficas entre 800 a 1000 km<sup>2</sup> /  
Marciano Friedrich.- 2017.  
99 p.; 30 cm

Orientadora: Jussara Cabral Cruz  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2017

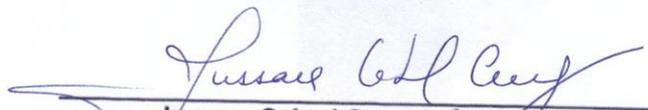
1. Monitoramento Hidrológico 2. Método Silveira 3.  
Simulação Hidrológica 4. Escalas I. Cruz, Jussara Cabral  
II. Título.

Marciano Friedrich

**INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO USO DO MÉTODO SILVEIRA PARA  
BACIAS HIDROGRÁFICAS ENTRE 800 A 1000 KM<sup>2</sup>**

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**.

Aprovado em 26 de janeiro de 2017:

  
\_\_\_\_\_  
Jussara Cabral Cruz, Dr.<sup>a</sup> (UFSM)  
(Presidente/Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Jorge Enoch Furquim Werneck Lima, Dr. (EMBRAPA) - Videoconferência

  
\_\_\_\_\_  
Francisco Rossarolla Forgiarini, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS, Brasil  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Jussara Cabral Cruz por sua orientação, amizade, ensinamentos e apoio para a realização desse trabalho.

Aos Professores Geraldo Lopes da Silveira e João Francisco Carlexo Horn, pela amizade, ensinamentos e apoio no decorrer desse trabalho.

Aos colegas e amigos do Grupo de Pesquisa em Gestão de Recursos Hídricos - GERHI pelos momentos de convívio, auxílio, amizade e troca de conhecimentos: Elisandra Maziero, Graciela Shmidt Disconzi, Calinca Barão de Ávila, Alexandre Barin, Damaris Padilha, Edner Baumhardt, Josita Soares Monteiro, durante o período dessa dissertação.

À minha namorada, Carine Baggiotto, pelo companheirismo, paciência, e apoio especialmente na fase final dessa pesquisa.

Ao João Carlos Dutra Junior, demais amigos, família, e a todos que de alguma forma e em algum momento me incentivaram na execução desse trabalho.

Por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO USO DO MÉTODO SILVEIRA PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS ENTRE 800 A 1000 KM<sup>2</sup>

AUTOR: Marciano Friedrich  
ORIENTADORA: Jussara Cabral Cruz

A crescente demanda pelos recursos hídricos, para as mais diversas finalidades, tem evidenciado um cenário ainda deficitário em relação ao monitoramento fluviométrico, sobretudo em bacias hidrográficas com áreas inferiores a 1000 km<sup>2</sup>, em grande parte das regiões do Brasil. As demandas estão vinculadas a disponibilidade hídrica e para a sua determinação em locais com carência de dados medidos torna-se necessário recorrer a técnicas como a regionalização de vazões, ou a simulação por meio de modelos chuva-vazão. Em 1997 foi proposto um método que se utiliza de poucas amostragens de medições de vazões locais para a determinação das vazões mínimas por meio de um modelo chuva-vazão, cujo processo matemático envolve dois parâmetros, o  $C_{inf}$  e o  $K_{sub}$ . O primeiro está relacionado ao balanço hídrico e o segundo ao deplecionamento fluvial. O objetivo desse trabalho foi verificar a influência da precipitação na aplicação dessa metodologia em bacias entre 800 a 1000 km<sup>2</sup> visando subsidiar informações acerca da elaboração de um protocolo de uso do método. Para o estudo de caso utilizaram-se quatro bacias com áreas entre 817 e 965 km<sup>2</sup> com disponibilidade de séries de dados fluviométricos e pluviométricos. A metodologia utilizada foi baseada no método Silveira. Inicialmente foram elaborados cenários de chuvas nas quatro bacias para posterior seleção dos eventos de estiagem, que juntamente com os cenários de chuvas, resultaram em um total de 1407 simulações por meio do uso do método Silveira. Para cada simulação foi gerada uma curva de permanência das vazões. A determinação dos erros foi realizada entre os pares de vazões simulados e os observados para os percentis considerados. Observou-se uma tendência de melhora nos resultados das simulações, traduzido pela menor dispersão dos erros, quando se utiliza informações de precipitação de mais de um posto pluviométrico. Com relação à posição espacial dos postos pluviométricos, verificou-se que não houve impactos significativos nos erros quando se utilizou dados dos postos localizados em diferentes pontos no interior da bacia e no seu entorno.

**Palavras-chave:** Monitoramento hidrológico; Método Silveira; Simulação hidrológica; Escalas de áreas.

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF PRECIPITATION IN THE USE OF THE SILVEIRA METHOD FOR RIVER BASIN BETWEEN 800 AND 1000 KM<sup>2</sup>

AUTHOR: Marciano Friedrich  
ADVISOR: Jussara Cabral Cruz

The increasing demand for water resources, for the most diverse purposes, has evidenced a still deficient scenario in relation to fluviometric monitoring, especially in river basins with areas smaller than 1000 km<sup>2</sup>, in large part of the regions of Brazil. Inevitably, these demands are linked to water availability and your determination in lack of measured data becomes necessary to resort to techniques such as regionalization of flows, or the simulation through rain-flow models. However, a period of hydrological monitoring data is still necessary to enable the application of these methodologies. In 1997 it was proposed a method that uses a few samplings of local flow measurements for the determination of the minimum flows through a rain-flow model, whose mathematical process involves two parameters, the  $C_{inf}$  and the  $K_{sub}$ . The first is related to water balance and the second to the river depletion. The objective of this work was to verify the influence of precipitation in the application of this methodology in basins between 800 and 1000 km<sup>2</sup> in order to subsidize information about the elaboration of a protocol of use of the method. For the case study, four basins with areas between 817 and 965 km<sup>2</sup> were used, with the availability of fluviometric and pluviometric data series. The methodology used was based on the Silveira method. Initially, rainfall scenarios were elaborated in the four basins for later selection of the drought events, which along with the rainfall scenarios, resulted in a total of 1407 simulations using the Silveira method. For each simulation, a flow continuity curve was generated. The determination of the errors was performed between the pairs of simulated flows and those observed for the considered percentiles. It was observed a tendency of improvement in the results of the simulations, translated by the smaller dispersion of errors, when the precipitation information from more than one pluviometric station is used. Regarding the spatial position of the pluviometric stations, it was verified that there were no significant impacts on the errors when data from the stations located at different points inside the basin and your surroundings.

**Keywords:** Hydrologic Monitoring; Silveira Method; Hydrologic simulation; Scales of areas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Hidrograma e os períodos de recessão (SILVEIRA, 1997) .....	29
Figura 2.2 Estrutura do método Silveira (SILVEIRA, 1997).....	31
Figura 2.3 Balanço hídrico proposto por Silveira (1997) .....	32
Figura 3.1 Localização geográfica das bacias hidrográficas. ....	38
Figura 3.2 Localização geográfica da bacia Comandaí (Área 817km <sup>2</sup> ). ....	42
Figura 3.3 Localização geográfica da bacia Jaguarizinho (Área 926 km <sup>2</sup> ). ....	42
Figura 3.4 Localização geográfica da bacia Piratini (Área 932 km <sup>2</sup> ). ....	43
Figura 3.5 Localização geográfica da bacia Vacacaí (Área 965 km <sup>2</sup> ). ....	43
Figura 4.2 Fluxograma geral da metodologia utilizada.....	45
Figura 4.3 Fluxograma relacionado a seleção dos eventos de estiagem.....	47
Figura 4.4 Evento do dia 25/03/2004 da bacia Comandaí com Ksub de 22,18 e Cinf de 0,27. ....	49
Figura 4.5 Ilustração esquemática do gráfico tipo Box-plot.....	56
Figura 4.6 Distância entre os postos de medição na bacia Comandaí.....	57
Figura 5.1 Correlação entre os erros e o Cinf para as vazões Q50 e a Q95.....	68
Figura 5.2 Correlação entre os erros dos agrupamentos com 1 (G1) e 3 (G3) pluviômetros e o Cinf.....	70
Figura 5.3 Correlação entre os erros e parâmetro Ksub para as vazões com 95% de permanência.....	70
Figura 5.4 Correlação entre as vazões do primeiro dia do evento de estiagem selecionado e o Ksub .....	72
Figura 5.5 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança para a C4, C2 e a Pm .....	73
Figura 5.6 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança da combinação C6. ....	74
Figura 5.7 Erro médio absoluto percentual para os erros nos agrupamentos de 1, 2, 3 e 4 pluviômetros. ....	76
Figura 5.8 Box-plot dos erros entre os agrupamentos para as vazões de permanência Q50% e Q95%.....	80
Figura 5.9 Outliers identificados no box-plot .....	81
Figura 5.10 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança. ....	85
Figura 5.11 Medidas escalares de precisão para a bacia Comandaí.....	86
Figura 5.12 Medidas escalares de precisão para a bacia Jaguarizinho. ....	87
Figura 5.13 Medidas escalares de precisão para a bacia Piratini. ....	88
Figura 5.14 Medidas escalares de precisão para a bacia Vacacaí. ....	89
Figura 5.15 Box-plot dos erros entre os pluviômetros e as combinações para as vazões Q50 e Q95. ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estudos para estimativa de vazões de base em bacias sem dados .....	19
Tabela 2.2 Densidade mínima de estações pluviométricas, segundo recomendações da <i>WMO</i> (2008). .....	22
Tabela 2.3 Densidade mínima de estações fluviométricas, segundo as recomendações da <i>WMO</i> (2008). .....	23
Tabela 2.4 Vazões de Referências de diferentes estados brasileiros. ....	24
Tabela 3.1 Características morfométricas das bacias do estudo .....	39
Tabela 3.2 Localização dos postos Fluviométricos utilizados. ....	41
Tabela 3.3 Localização dos postos Fluviométricos utilizados. ....	41
Tabela 4.1 Resumo da formulação matemática da estrutura do método Silveira (SILVEIRA, 1997). .....	48
Tabela 4.2 Equações de Regionalização para determinação das vazões Q50 e Q95 .....	57
Tabela 5.1 Número total de eventos e período de análise das séries de dados hidrológicos .....	58
Tabela 5.2 Cenários de chuva na bacia Comandáí.....	59
Tabela 5.4 Cenários de chuva na bacia Piratini .....	61
Tabela 5.5 Cenários de chuva na bacia Vacacaí .....	61
Tabela 5.6 Estatística dos parâmetros $K_{sub}$ e $C_{inf}$ obtidos na bacia Comandáí. ....	63
Tabela 5.7 Estatística dos parâmetros de ajuste da bacia Jaguarzinho .....	64
Tabela 5.8 Estatística dos parâmetros de ajuste da bacia Piratini. ....	65
Tabela 5.9 Estatística dos parâmetros de ajuste obtidos na bacia Vacacaí.....	66
Tabela 5.10 Sumário estatístico dos parâmetros $K_{sub}$ e $C_{inf}$ das bacias avaliadas. ....	67
Tabela 5.11 Sumário estatístico das medidas escalares dos erros para os agrupamentos dos postos pluviométricos. ....	75
Tabela 5.12 Tabela de ANOVA para as vazões Q50 e Q95. ....	79
Tabela 5.13 Resumo estatístico dos erros entre os agrupamentos para as vazões de permanência Q50% e Q95%. .....	82
Tabela 5.14 Erro percentual absoluto da regionalização de vazões. ....	84
Tabela 5.15 Sumário estatístico dos erros entre as vazões observadas e calculadas para os percentis de 50% e 95%. .....	90
Tabela 5.16 Sumário do teste de ANOVA .....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional de Águas  
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANOVA: Análise de variância  
CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
C: Combinações  
EMA: Erro médio absoluto  
REMQ: Raiz do erro quadrático médio  
EMPA: Erro médio absoluto percentual  
EPA: Erro absoluto percentual  
FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roesler  
IAHS - International Association of Hydrological Sciences  
MPB2: Modelo para Pequenas Bacias com dois parâmetros  
P: Pluviômetro  
Pm : Precipitação média  
PUB: Prediction Ungauged Basins  
Q<sub>7,10</sub>: Vazão com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno  
Q<sub>50</sub>: Vazão de permanência de 50%  
Q<sub>80</sub>: Vazão de permanência de 80%  
Q<sub>90</sub>: Vazão de permanência de 90%  
Q<sub>95</sub>: Vazão de permanência de 95%  
UFMS – Universidade Federal de Santa Maria  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	AVALIAÇÕES DE VAZÕES HIDROLÓGICAS EM BACIAS COM CARÊNCIA DE DADOS	17
2.2	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	21
<b>2.2.1</b>	<b>Monitoramento pluviométrico</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Monitoramento fluviométrico</b>	<b>22</b>
2.3	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VAZÕES EM BACIAS SEM DADOS	25
<b>2.3.1</b>	<b>Regionalização hidrológica</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Simulação Hidrológica por meio de Modelos chuva-vazão</b>	<b>26</b>
2.4	DESCRIÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA	29
<b>2.4.1</b>	<b>Estrutura do Método Silveira (SILVEIRA, 1997)</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ajuste do método Silveira (Silveira, 1997)</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Uso do método Silveira</b>	<b>34</b>
2.5	VARIAÇÃO ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>37</b>
3.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS	37
<b>3.1.1</b>	<b>Características gerais das bacias</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Dados hidrológicos</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>44</b>
4.1	PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA E SELEÇÃO DOS EVENTOS DE ESTIAGEM	44
4.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA (SILVEIRA, 1997)	47
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
<b>4.3.1</b>	<b>Influência quanto ao número de postos pluviométricos na bacia</b>	<b>50</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Influência quanto à disposição espacial dos postos pluviométricos na bacia</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>58</b>
5.1	PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA E SELEÇÃO DOS EVENTOS DE ESTIAGEM	58
5.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA E AJUSTE DOS PARÂMETROS PARA OS EVENTOS DE ESTIAGEM SELECIONADOS	62
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES DE VAZÕES CALCULADAS E AS OBSERVADAS CONSIDERANDO O AGRUPAMENTO DOS PLUVIÔMETROS E AS COMBINAÇÕES.	72
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES DE VAZÕES CALCULADAS E AS OBSERVADAS CONSIDERANDO A LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS EM RELAÇÃO À ÁREA DA BACIA.	84
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelos recursos hídricos no Brasil, para abastecimento público, irrigação ou a geração de energia, tem evidenciado um cenário de déficit com relação ao monitoramento hidrológico nas bacias hidrográficas. A falta de monitoramento, sobretudo em pequenas bacias hidrográficas, foi destacada por Silveira (1997) e apesar de terem ocorrido avanços nessa área, a maioria dos estudos tem se restringido a bacias hidrográficas de maior porte (SILVEIRA, 1997; CGEE, 2014).

Todavia, dadas às proporções continentais do território brasileiro, dispor de uma rede de monitoramento que seja capaz de atender a todas as escalas de áreas das bacias torna-se relativamente oneroso (GENOVEZ, 2001). Além disso, a instalação de postos de monitoramento está condicionada as variações sazonais das chuvas, e inclusive da densidade populacional, devido à dificuldade de disponibilidade de observadores na região (PAIVA, 2001).

Diante disso, a maior parte dos esforços destinados ao monitoramento hidrológico, sobretudo das vazões, esteve restrita a bacias com áreas superiores a 500 km<sup>2</sup>, em que tais bacias desempenhavam papel de destaque em alguns setores, como para a geração de energia (TUCCI, SILVEIRA, SILVEIRA, 1998; TUCCI, 2015). Segundo descreve Silveira (1997), o cenário de meados da década de 90 apontava para uma mudança desse paradigma devido à viabilidade de aproveitamento de pequenas centrais hidrelétricas e sistemas de abastecimento, dentre outros em bacias de menor porte. Contudo, a falta de monitoramento em bacias de pequeno e médio porte ainda persiste.

A inexistência ou carência de informações hidrológicas é um dos desafios enfrentados por pesquisadores e profissionais que atuam no âmbito da hidrologia (SILVEIRA, 1997; CRUZ, 2001; TAMIOSSO, 2012; HORN, 2016). Para Silveira, Tucci e Silveira (1998), essa carência de informações também implica em reflexos negativos para a gestão dos recursos hídricos.

Nesse contexto, embora se tenha uma rede de monitoramento de dados hidrológicos, ainda assim os mesmos são insuficientes para abranger de forma satisfatória as diversas regiões e bacias hidrográficas brasileiras devido a, principalmente, as grandes diferenças morfoclimáticas existentes (CGEE, 2014).

Mas como então contornar a falta de informações hidrológicas em estudos de disponibilidade hídrica?

Para realizar as estimativas de disponibilidade, geralmente são utilizadas duas alternativas: a regionalização de vazões e a simulação por meio de modelos chuva-vazão (SILVEIRA, 1997; TUCCI, 2009; HORN, 2016). Em síntese, a regionalização de vazões consiste na transferência de informações hidrológicas existentes em determinadas bacias da região, para locais onde o monitoramento é inexistente (SILVEIRA, 1997; ANEEL, 2002; TUCCI e CLARKE, 2001; TUCCI, 2009). Já a simulação chuva-vazão, de acordo com Silveira (1997), necessita de informações climatológicas (notadamente, dados de precipitação e de vazão) para realizar o ajuste dos parâmetros a partir de dados locais necessitando, portanto, de um período de monitoramento para a obtenção desses dados.

Entretanto, o uso dessas técnicas podem representar incertezas, conforme descreve Tucci (2015), principalmente devido à extrapolação das informações entre as escalas. Silveira e Tucci (1998) também apontam outras dificuldades tais como a de caracterização de regiões dadas às heterogeneidades hidrológicas devido às diferenças locais dos meios físicos e a falta de obtenção de dados convencionais confiáveis.

Com relação à problemática das escalas, os processos de escoamento em vertentes ocorrem em áreas entre  $10^{-4}$  e  $10$  km<sup>2</sup>, classificadas de acordo com Becker (1992) e descritas também por Tucci (2015) como microescala e de transição. Segundo o autor, no Brasil, no âmbito de bacias nessa escala de área, há reduzido número de dados e quando existem, podem não ser confiáveis ou não medem os eventos de forma correta.

Já na mesoescala, estão às bacias entre  $10$  e  $10^3$  Km<sup>2</sup>. Nessa escala estão representadas as bacias onde já são mais frequentes as demandas como abastecimento e irrigação (CGEE, 2014; TUCCI, 2015), cuja outorga dos usos dos recursos hídricos é altamente dependente da extrapolação e do comportamento dos dados hidrológicos medidos, devido à carência de monitoramento hidrológico em bacias dessa grandeza de área.

Tucci (2005) acrescenta ainda que por meio da utilização de modelos tem se obtido um melhor conhecimento dos processos que envolvem os recursos hídricos, assim como a relação desses processos no contexto da paisagem em uma bacia hidrográfica. Os modelos hidrológicos são dependentes das variáveis e do ajuste

dos parâmetros. Em sua maioria, necessitam de um período de dados amostrais tanto para calibração quanto para validação dos dados (TUCCI, 2005).

Para a determinação de disponibilidade hídrica em bacias sem dados, recorre-se a técnica de regionalização das vazões, ou metodologias alternativas como o método Silveira (SILVEIRA, 1997). Ainda assim, são necessários dados climatológicos, notadamente, de chuvas medidas, normalmente medidas em estações pluviométricas convencionais, pois como salientam Tucci e Clarke (2001) nenhum modelo é capaz de criar novas informações, as técnicas matemáticas e estatísticas são utilizadas para explorar melhor as informações existentes. Além disso, esses autores explicam que dificilmente uma rede de informações hidrológicas cobre todos os locais havendo, portanto, lacunas temporais e espaciais que necessitam de preenchimento baseado em metodologias robustas.

Segundo uma publicação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), no Brasil, a densidade média da rede nacional de estações pluviométricas em 2012 era de uma para cada 987 km<sup>2</sup>. No entanto, apresenta grande variabilidade espacial na distribuição das estações, Já em relação à densidade de estações fluviométricas, a média nacional, conforme essa mesma publicação, consistia em 1.316 km<sup>2</sup> por estação. Vale ressaltar que o monitoramento é efetuado, sobretudo em bacias com áreas superiores a 500 km<sup>2</sup>, conforme descrito anteriormente.

Nesse contexto, Silveira (1997) elaborou um modelo de balanço hídrico simplificado visando estimar as vazões de estiagem por meio de mínimos dados observados – Método Silveira. Silveira demonstrou que para bacias de até 300 km<sup>2</sup> o método proposto reduz significativamente as incertezas quando comparado com outros métodos, como a regionalização. Contudo, essa estimativa de vazões é altamente dependente da qualidade dos dados de chuvas, que por sua vez dependem da representatividade dos postos pluviométricos na área de interesse em relação à medição sistemática das precipitações.

A carência de monitoramento hidrológico, traduzida pela cobertura reduzida de estações fluviométricas e pluviométricas em determinadas bacias pode comprometer a gestão dos recursos hídricos (SILVEIRA, TUCCI e SILVEIRA, 1998). Isso, principalmente porque existe uma dificuldade inerente em uma melhor representação dos processos hidrológicos devido a grande variabilidade de cobertura vegetal, das ações antrópicas e dos solos. Há ainda que se considerar a variação sazonal cujas alterações implicam em diferença da evapotranspiração, as

diferenças de elevação, declividade e profundidade do solo (TUCCI, 2015). Assim, a localização espacial dos postos de medição das chuvas podem sofrer influências das condições inerentes às variações hidroclimáticas.

A medição das chuvas é comumente realizada ou por meio de pluviômetros convencionais ou de pluviógrafos automáticos. Os primeiros são os mais utilizados devido ao seu baixo custo de instalação e manutenção. A área de captação das chuvas nos aparelhos é relativamente pequena, cerca de 400 cm<sup>2</sup> em média, como por exemplo, no modelo mais comumente utilizado, o “*Ville de Paris*”, tornando-se assim uma medida pontual das chuvas em determinada área geográfica (MARTINS e PAIVA, 2001; FREIRE e OMENA, 2005). Dessa forma, se a coleta dos dados não for cuidadosa, esta medição pode não ser representativa tornando-se uma fonte de erros na estimativa das chuvas em uma bacia.

Sendo assim, apesar das limitações existentes em relação ao monitoramento hidrológico em bacias de mesoescala, uma maior densidade de estações pluviométricas poderia contribuir para a melhora nos resultados de estimativas de vazões em bacias de mesoescala com carência de dados?

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo verificar a influência do número de postos pluviométricos, assim como a disposição espacial destes em uma bacia, no uso do Método Silveira (SILVEIRA, 1997) para determinação de vazões mínimas em bacias de até 1000 km<sup>2</sup>.

A definição desse limite de área parte do princípio de que quanto maior a área de uma bacia, possivelmente maior será a possibilidade de variação das precipitações nessa bacia o que pode influenciar nos resultados da avaliação da disponibilidade hídrica. Embora originalmente o método tenha sido desenvolvido em bacias de até 300 km<sup>2</sup>, o trabalho desenvolvido por Horn (2016) constatou que o método Silveira (SILVEIRA, 1997) pode se utilizado em bacias com áreas de até 1000 km<sup>2</sup>.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar a influência da precipitação no uso do método Silveira (1997) em bacias com áreas de drenagem entre 800 e 1000 km<sup>2</sup>.

Os objetivos específicos são baseados nas seguintes condições:

- Verificação da influência do número de postos pluviométricos na aplicabilidade do método Silveira.
- Avaliação da influência da disposição espacial dos postos na aplicação do método para as bacias propostas.
- Estabelecer um protocolo do uso do método Silveira para bacias com áreas maiores do que 300 km<sup>2</sup> e inferiores a 1000 km<sup>2</sup>.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AVALIAÇÕES DE VAZÕES HIDROLÓGICAS EM BACIAS COM CARÊNCIA DE DADOS

Segundo CGEE (2014) e Tucci (2015), a gestão dos recursos hídricos transcorre em um universo de elementos que vai desde a demanda da água para a população, animais, agricultura, energia, a conservação da qualidade da água e os ambientes aquáticos até a vulnerabilidade de extremos. Além disso, Horn (2016) adverte que há a necessidade de maior celeridade no que tange aos processos de licenciamento e outorga do uso da água. A carência de informações hidrológicas, no entanto, tem dificultado esse equacionamento, pois por um lado há necessidade da tomada de decisão em um relativo curto espaço de tempo, por outro, não há dados disponíveis para a determinação de variáveis hidrológicas como as vazões de referência de forma eficiente (TUCCI, 2015).

Nesse contexto, a indisponibilidade de dados muitas vezes recai na busca por estudos convencionais de modelagem hidrológicas por meio de métodos que possam ser utilizados para sua geração em locais onde o monitoramento hidrológico é inexistente SILVEIRA (1997). A falta de dados hidrológicos não se restringe apenas a realidade brasileira.

Conforme Blosch et al. (2013) a carência de dados é um problema a nível mundial que tem mobilizado diversos pesquisadores a tentarem solucionar este paradigma da hidrologia, ou seja, a substituição de séries de vazões monitoradas por séries geradas por meio da utilização de modelos matemáticos.

A Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS – *International Association of Hydrological Sciences*) lançou em 2003 a chamada Década IAHS 2003 – 2012, dedicada a Predição em Bacias sem Dados (*Prediction Ungauged Basins – PUB*). O objetivo geral desse programa foi incentivar o meio científico no desenvolvimento de métodos para a determinação de informações hidrológicas em locais com inexistência de monitoramento com a redução das incertezas existentes (ARHEIMER; LINDSTRO, 2013).

Blosch et al (2013) em seu trabalho apontaram que diferentes problemas relacionados a predição de vazões foram pesquisadas, tais como a variabilidade do escoamento anual, sazonal, determinação da curva de permanência, vazões de base e vazões de pico, assuntos diretamente relacionados aos problemas observados nos diversos lugares do mundo.

O trabalho realizado por Blosch et al. (2013) reuniu um conjunto de 19 metodologias utilizadas por diferentes pesquisadores em diferentes países, propostas para determinação de vazões de estiagem. No total, 27 cenários foram analisados utilizando-se das metodologias escolhidas foram aplicadas em diferentes situações. Para cada estudo, as metodologias foram aplicadas em diversas bacias, variando entre 40 a 1003 bacias. O número médio de bacias utilizadas em cada estudo foi de 150 bacias, com áreas variando entre 3 a 2600 km<sup>2</sup>.

Na Tabela 2.1 são apresentados os autores dos estudos, os países em que foram realizados, o número de bacias, assim como a variação do tamanho das áreas das bacias conforme cada estudo.

Contudo, Hrachowitz et al. (2013) realizaram uma revisão sobre os trabalhos publicados no livro síntese sobre a chamada década do PUB (*Prediction in Ungauged Basins*) organizado por Blöschl et al. (2013). Os autores concluíram que a iniciativa PUB foi altamente produtiva na revisão da literatura sobre as metodologias utilizadas na predição de vazões em bacia sem dados. Ainda, permitiu o ajuste de modelos a condições ambientais específicas em diferentes bacias hidrográficas, entretanto a década PUB não conduziu a uma harmonização das estratégias de modelagem que era esperado.

Visando contornar a falta de informações hidrológicas no âmbito da gestão dos recursos hídricos no Brasil, pesquisadores têm reunido esforços na busca por alternativas para suprir essa carência. Silveira e Tucci (1998) sugeriram o uso de estruturas fixas, por exemplo, calhas do tipo Parshall, como uma alternativa para o monitoramento hidrológico em pequenas bacias com falta de dados. Os autores descrevem ainda, que para bacias maiores, entre 100 km<sup>2</sup> a 300 km<sup>2</sup>, a regionalização hidrológica consiste em uma das alternativas para suprir essa carência em bacias nessa escala de área. Contudo, essa metodologia não deve ser usada para extrapolação entre as escalas (SILVEIRA, 1997; TUCCI, 2015).

Tabela 2.1 Estudos para estimativa de vazões de base em bacias sem dados

Autores do Estudo	País	n° de bacias estudadas	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	Metodologia utilizada
Kroll (2012)	Estados Unidos	150	3 a 2600	GR
Eng et al. (2011)	Estados Unidos	516	3 a 2600	SR
Castgioni et al (2011)	Itália	51	-	G
PlasseandSauquet (2010)	França	1003	10 a 1940	GR
Veza et al (2010)	Itália	41	-	GR
EngelandandHisdal (2009)	Noruega	51	6 a 1900	RR
Zhang et al (2008c)	China	-	-	GR
LaahaandBloschl (2007)	Austria	325	7 a 960	RR
Laaha et al (2006)	Austria	298	2 a 1700	G
Chen et al (2006)	China	-	-	IM
Pacheco et al. (2006)	Costa Rica	-	-	IM
Rees et al (2004)	Nepal e Índia	-	-	SR
Tallaksen et al (2004)	Alemanha	-	-	IM
Young et al (2000 a,b)	Reino Unido	-	-	IM
AschwandenandKan (1999)	Suíça	143	-	GR
Smakhtin (1997)	África do Sul	-	-	PB
DemuthandHagemann (1994)	Alemanha	54	-	GR
Gustard et al (1992)	Reino Unido	-	-	GR
Nathan andMcMahon (1990, 1992)	Austrália	184	-	RR

Fonte: Adaptado de Blocsh et al. (2013)

Legenda: PB- process based, GR- global regression, RR- regional regression, G- geostatistics, SR- short records, IM- index methods

A inexistência de informações hidrológicas seja em bacias rurais, urbanas ou mistas, tem dificultado uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos devido ao desconhecimento do regime hidrológico e dos impactos, decorrentes dos usos em bacias na escala de vertentes (UFSM, 2012).

Mediondo e Tucci (1997) explicam que as vertentes são áreas representativas e deve-se utilizá-las como ponto de partida para o entendimento dos processos em nível de micro e macro escalas observacional, ou seja, os ecossistemas cujas formulações mais se aproximam das realizadas em escalas locais e globais, respectivamente. De acordo com Tucci (2015) essa análise pode ser extrapolada para bacias com áreas médias.

Horn (2012) realizou um estudo comparativo, em escala de vertentes, do comportamento hidrológico em duas bacias contíguas, uma com uso rural e outra

com uso urbano, na região do Campus da Universidade Federal de Santa Maria. Este verificou que a bacia urbana apresentou maior disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem mesmo descontando as vazões consideradas exógenas. Diante disso, o autor buscou investigar o porquê desse comportamento e ponderou que os resultados obtidos poderiam estar relacionados com uma maior perda de água por infiltração profunda na bacia rural e provavelmente aquela bacia apresentava um comportamento influente, que é quando o rio abastece o aquífero.

Já para a bacia urbana, esse mesmo autor supôs que em razão da direção preferencial verificada do escoamento subterrâneo, o rio estaria recebendo contribuição subterrânea, justificando esse comportamento. Ele alerta que o esperado é que bacias com uso rural apresentariam uma maior disponibilidade hídrica quando comparadas com as bacias inseridas em zonas urbanas, devido a uma maior infiltração e maior armazenamento de água no solo.

Entretanto, conforme comenta Silveira (1997), essa incoerência pode ser explicada em decorrência da heterogeneidade das pequenas bacias e combinada aos complexos hidrogeológicos locais, os quais respondem pela manutenção das vazões nos períodos de deplecionamento fluvial.

Em outro estudo realizado por Baumhardt (2010), foi comparado o comportamento hidrológico de duas bacias, também em escala de vertentes, visando analisar a influência do uso do solo no escoamento de base. Uma das bacias com cobertura de floresta de Eucalipto e a outra, de campo, com criação de gado e sobrepastoreio. Neste trabalho, esse autor observou que a bacia de campo apresentou menor disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem em relação à bacia com floresta. Embora a bacia florestada tenha apresentado menor oferta global de água, apresentou maior regularidade no deplecionamento fluvial ao longo do ano e conseqüentemente, maior disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem.

Estes aspectos também devem ser considerados em estudos hidrológicos que utilizam métodos de estimativa de vazões por regionalização hidrológica para a estimativa da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas com áreas medianas (mesoescala), o que normalmente não ocorre como observado por Silveira (1997).

Sendo assim, o monitoramento sistemático e consistente em bacias dessa escala seria a situação desejável para melhor avaliar a disponibilidade hídrica. Porém, na falta de monitoramento, observa-se a importância da adoção de

metodologias que utilizem dados observados localmente, mesmo que em menor número de amostragem, para uso nas estimativas de vazões, de modo a permitir identificar as potencialidades e diferenças entre as bacias, conforme já citado.

## 2.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

### 2.2.1 Monitoramento pluviométrico

O monitoramento hidrológico para a obtenção de séries de dados hidrológicos confiáveis é de fundamental importância para as mais diversas áreas relacionadas ao campo da hidrologia (MENDONÇA, 2001). Segundo esse autor, a maior parte das técnicas relacionadas à hidrologia é dependente de dados confiáveis da quantidade de água. Em relação ao monitoramento das precipitações, CGEE (2014) destaca que o Brasil possui uma densidade de postos pluviométricos relativamente satisfatórios. Todavia, estes não se encontram igualmente distribuídos em todas as regiões do país.

De acordo com ANA (2013), a distribuição espacial é desigual. Por exemplo, parte da região Sul, Sudeste e Nordeste, existe uma estação por uma área menor que 500 km<sup>2</sup>. Em compensação, na região Norte o número de estações fica restrita a uma estação por área maior que 4.000 km<sup>2</sup>.

Ishihara e Fernandes (2013) em seu trabalho sobre a densidade de estações pluviométricas na região da Norte identificaram que no estado do Amazonas a densidade de postos pluviométricos é um para cada 5.590 km<sup>2</sup>. Em Mato Grosso, uma estação para 3.000 km<sup>2</sup> e o estado da região com melhor cobertura, o Maranhão, com densidade de um posto de medição para cada 1.074 km<sup>2</sup>.

A Organização Meteorológica Mundial, *World Meteorological Organization* (WMO, 2008) recomenda que a densidade de estações pluviométricas leve em conta a classificação das unidades fisiográficas. Em áreas litorâneas, a recomendação é que se tenha uma estação para cada 900 km<sup>2</sup> de área, se a estação for sem registrador (Tabela 2.2). Paiva (2001) ressalta ainda que em determinadas áreas, principalmente em zonas com maior densidade populacional é

necessário um número maior de estações pluviométricas para identificar as variações espaciais e temporais das chuvas de forma a orientar os sistemas de drenagem e demais aplicações da engenharia. As diretrizes estabelecidas pela *WMO* são padrões médios e aplicam-se de forma geral a todas as regiões da terra. São baseadas em diferenças de clima, uso e ocupação do solo, vegetação, etc.

Tabela 2.2 Densidade mínima de estações pluviométricas, segundo recomendações da *WMO* (2008).

Característica Fisiográfica	Densidade mínima (km <sup>2</sup> / estação)	
	Sem registrador	Com registrador
Litoral	900	9000
Montanhosa	250	2500
Planície interior	575	5750
Ondulada	575	5750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas urbanas	-	10 - 20
Polar/árida	10000	100000

Fonte: Adaptado da *WMO* (2008)

### 2.2.2 Monitoramento fluviométrico

Segundo Paiva (2001), o principal objetivo das estações fluviométricas é a obtenção de informações de disponibilidade hídrica, assim como sua distribuição geográfica e a variabilidade temporal. Conforme *WMO* (2008), a densidade mínima recomendada de estações fluviométricas deve contemplar as heterogeneidades fisiográficas (Tabela 2.3).

A ANA, por meio do seu site, disponibiliza o inventário das estações fluviométricas. Em 2013 o número total de estações fluviométricas da rede nacional consistia em 6470. Em 2007, esse número era 5275 estações, de acordo com Pimentel (2015). Dessa forma, ter-se-ia uma densidade média de uma estação fluviométrica para uma área correspondente de 1316 km<sup>2</sup>. De forma semelhante ao que ocorre com a distribuição espacial das estações pluviométricas, sua espacialização no território não é homogênea. As regiões com melhor cobertura de estações são: Sul, Sudeste e parte do Nordeste, com densidades variando de uma estação por área menor do que 500 km<sup>2</sup> e entre 500 a 1.000 km<sup>2</sup> por estação. A

região Norte é a menos servida de estações fluviométricas tendo uma densidade média que contempla uma área de abrangência maior do que 4.000 km<sup>2</sup> para cada posto fluviométrico instalado (ANA, 2013), o que configura ao não atendimento nessa região em relação ao recomendado pela WMO (2008).

Tabela 2.3 Densidade mínima de estações fluviométricas, segundo as recomendações da WMO (2008).

Unidade Fisiográfica	Densidade mínima (km <sup>2</sup> / estação)
Litoral	2750
Montanhosa	1000
Planície interior	1875
Ondulada	1875
Pequenas ilhas	300
Polar/árida	20000

Fonte: Adaptado da WMO (2008)

A falta de informações é uma realidade observada quando se analisa o cenário atual brasileiro, podendo ser considerada preocupante quanto à quantidade insuficiente de estações fluviométricas em bacias de mesoescala, as quais frequentemente apresentam séries históricas com curta extensão. Sendo assim, fica ainda mais evidente a carência de dados, especialmente em bacias hidrográficas de menor dimensão (SILVEIRA, 1997; CRUZ, 2001; CGEE, 2014; TUCCI, 2015; HORN, 2016), podendo representar implicações negativas na determinação da disponibilidade hídrica.

O conhecimento da disponibilidade hídrica é de fundamental importância para a gestão dos recursos hídricos e para isso é necessário conhecer as vazões de estiagem, as quais ocorrem em maior percentual do tempo e podem ser aplicadas para inúmeras finalidades tais como planejamento para abastecimento de água, projeto de reservatórios, manutenção de quantidade e qualidade de água para irrigação, recreação e vazão ecológica para conservação de espécies animais (CRUZ, 2001). Além disso, essas vazões são frequentemente utilizadas em processos de licenciamento ambiental e de outorga de recursos hídricos.

As legislações estaduais no Brasil, segundo Benneti et al. (2003) e ANA (2007), têm adotado as vazões mínimas para servir de embasamento aos processos de licenciamento ambiental e outorga do direito de uso dos recursos hídricos, conforme exemplificado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Vazões de Referências de diferentes estados brasileiros.

Estado	Vazão de Referência	Critério e máxima vazão Outorgável	Vazão Remanescente*
PR	$Q_{7,10}$	50% $Q_{7,10}$	50% $Q_{7,10}$
MG	$Q_{7,10}$	30% $Q_{7,10}$ em cursos d'água usuais	70% $Q_{7,10}$
		80% $Q_{90}$ caso não tenha barramento ou se este ocorre em cursos perenes	20% $Q_{90}$
PE	$Q_{90}$	95% da Vazão de referência se houver barramento em curso a'água intermitente	5% $Q_{90}$
		80% $Q_{90}$ caso não tenha barramento ou se este ocorre em cursos perenes	20% $Q_{90}$
BA	$Q_{90}$	95% da Vazão de referência se houver barramento em curso a'água intermitente	5% $Q_{90}$
PB	$Q_{90}$	90% $Q_{90}$	10% $Q_{90}$
RN	$Q_{90}$	90% $Q_{90}$	10% $Q_{90}$
CE	$Q_{90}$	90% $Q_{90}$ em cursos d'água com barramento	10% $Q_{90}$
		33% $Q_{90}$ em cursos d'água com barramento	67% $Q_{90}$
GO	$Q_{90}$	70% $Q_{90}$	30% $Q_{90}$
PI	$Q_{95}$	80% $Q_{90}$	20% $Q_{90}$
RS	$Q_{90}$	75% $Q_{90}$	25% $Q_{90}$
SP	$Q_{7,10}$	50% $Q_{7,10}$ por bacia	50% $Q_{7,10}$
		22% $Q_{7,10}$ usuário individual	85% $Q_{7,10}$
SE	$Q_{90}$	30% $Q_{90}$ para cada usuário individual	70% $Q_{90}$
TO	$Q_{90}$	75% $Q_{90}$ por bacia	25% $Q_{90}$
		25% $Q_{90}$ usuário individual	75% $Q_{90}$

Fonte: Adaptado de Benneti et al. (2003) e ANA (2007).

(\*) Vazão ecológica estabelecida de forma indireta por meio dos critérios de outorga estabelecidos pelos Estados brasileiros (BENNETI et al., 2003)

## 2.3 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VAZÕES EM BACIAS SEM DADOS

### 2.3.1 Regionalização hidrológica

A técnica de regionalização hidrológica consiste em um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, com o objetivo de estimar as variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com informações insuficientes (ANEEL, 2002). Pode-se utilizar essa técnica para melhor explorar as amostras pontuais, verificar ainda a consistência das séries hidrológicas e identificar se há falta de postos de monitoramento.

Para a utilização desta técnica, a série de vazões observadas deve ser de no mínimo cinco anos. Em caso de haver falhas na série, não se recomenda preenchê-las por regressão devido à possibilidade de introduzir alguma tendenciosidade. Já se as falhas ocorrem sempre em períodos do ano de baixas vazões, o posto de observação deve ser descartado, portanto analogamente, não se utiliza postos de observação de vazões que não possuem períodos de pelo menos 5 anos de dados de vazão representativos (TUCCI, 2002).

Segundo Tucci (2002), a regionalização hidrológica pode compreender diversas variáveis ou funções, tais como, vazões máximas, medianas e mínimas, assim como funções relacionadas ao período de retorno, das curvas de permanência e da regularização de vazões. Ressalta ainda que conforme estudos realizados no Rio Grande do Sul, o uso dessa técnica para bacias menores que 300 km<sup>2</sup> pode levar a um valor de incerteza extremamente elevado, uma vez que devido a falta de dados suficientes fica difícil conhecer o comportamento da bacia.

Em 2001 foi publicado um estudo de regionalização de vazões em bacias hidrográficas de parte do estado do Rio Grande do Sul realizado pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Dentre as variáveis independentes trabalhadas pode-se citar a área da bacia A, em km<sup>2</sup>, o comprimento do rio principal, avaliado em km, a declividade S do rio, em m/km, assim como o número de confluências N, avaliado em cartografia em escala 1:250.000 e a precipitação anual P, medida em metros por ano.

As áreas das bacias abrangidas pelo estudo realizado pela UFSM (2001), sub-bacias 85, 86 e 87, integrantes da bacia 8 – Atlântico Sudeste, por exemplo, foram bastante variadas, algumas com área menor do que 100 km<sup>2</sup>, já outras, superiores a 21000 km<sup>2</sup>. Nas conclusões e recomendações desse estudo, é realizado um alerta em relação da aplicabilidade do método da regionalização em bacias de menor escala de área. Segundo o estudo, apesar da facilidade e rapidez da utilização da regionalização para uma avaliação rápida da vazão procurada, não deve ser abdicado de um estudo hidrológico específico na fase executiva de um projeto. Salaria ainda, que essa técnica pode ser utilizada em regiões onde há dados para a definição das equações regionais, o que normalmente não ocorre em bacias de menor escala devido à falta de estações fluviométricas.

Cabe ressaltar, que essa metodologia necessita da caracterização das bacias próximas para a espacialização das informações da região em determinada bacia específica.

### **2.3.2 Simulação Hidrológica por meio de Modelos chuva-vazão**

Para Rennó e Soares (2000) um modelo pode ser compreendido como a representação da realidade de forma simplificada. São cada vez mais utilizados em estudos ambientais, uma vez que auxiliam no entendimento do impacto das mudanças do uso e ocupação do solo, assim como na previsão de futuras alterações. Conforme Tucci (2005) os modelos hidrológicos, por exemplo, foram desenvolvidos pela ciência visando à obtenção de estimativas de vazões em locais sem dados de monitoramento de vazões.

Os modelos são basicamente compostos por equações e procedimentos constituídos por variáveis e parâmetros. Sendo assim, os parâmetros, em princípio, não se alteram ao longo dos intervalos de tempo, no entanto podem variar espacialmente. Já as variáveis podem se alterar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado. Essas últimas podem ser de três tipos: A primeira, denominada variável de estado, é o foco modelo. Exemplificando, na modelagem do balanço de água no solo, a variável de estado pode ser a quantidade de água no solo. A segunda variável é o processo, ou fluxo, e geralmente são calculados em

razão das variáveis de estado. Por exemplo, a taxa de infiltração de água no solo, a qual irá alterar a variável de estado, quantidade de água no solo. Por fim, a terceira variável, chamada de forçante, funciona como um propulsor do modelo. No exemplo de balanço de água no solo, esta poderia ser a chuva (RENNÓ e SOARES, 2000).

Conforme Tucci (2005), os modelos podem ser classificados sob a ótica de alguns aspectos tais como: o tipo de variáveis empregadas na modelagem, estocásticas ou determinísticas, o tipo de relações entre as variáveis, assim como a forma de sua representação, ou seja, discretas ou contínuas.

Podem ainda estar relacionadas com a dependência ou não de relações espaciais. Neste caso, pontuais ou distribuídos, assim como a dependência temporal dessas (estáticos ou dinâmicos) (RENNÓ e SOARES, 2000).

Na descrição de Rennó e Soares (2000) e Tucci (2005), se os modelos utilizam relações baseadas em observação, podem ser classificados como empíricos e geralmente são bastante simples e úteis. São geralmente menos robustos e não devem ser utilizados fora da região para a qual as relações foram determinadas. Ainda, não possibilitam realizar estimativas de mudanças em condições nas quais não estão previstas, por exemplo, chuvas extremamente elevadas e mudança no uso do solo. Por outro lado, os modelos baseados nos processos, os modelos conceituais, são geralmente mais complexos uma vez que procuram descrever todos os processos envolvidos. Os modelos na maioria das vezes são discretos, apesar de os fenômenos serem variados no tempo e no espaço. Nesse caso a escolha do intervalo de tempo a ser usado no modelo é dependente do fenômeno a ser estudado, da disponibilidade de dados e da precisão almejada nos resultados.

Os modelos de acordo com Tucci (2005) constituem-se de uma ferramenta que visa um melhor entendimento e representação do comportamento de uma bacia hidrográfica. Ressalta, no entanto, que devido à heterogeneidade das características físicas da bacia e dos processos envolvidos, a simulação hidrológica torna-se limitada uma vez que os processos matemáticos e estatísticos envolvidos apenas exploram as informações existentes, ou seja, não criam novas informações (TUCCI e CLARKE, 2001).

Os modelos chuva-vazão possuem parâmetros que procuram 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” (TAMIOSSO, 2012).

Os diversos modelos chuva-vazão desenvolvidos são compostos cada qual por conjuntos de algoritmos, onde cada um representa um processo hidrológico, como, como exemplo: interceptação, separação de escoamento, dentre outros. Os modelos chuva-vazão resultam da combinação destes algoritmos.

Em um estudo realizado por Perrin et al. (2001) foram utilizados 19 modelos concentrados de simulação diária em 429 bacias da França, Estados Unidos, Austrália, Costa do Marfim e Brasil. Os autores concluíram que os modelos mais complexos apresentaram superioridade para calibração quando comparados ao modelos simplificados, entretanto, para a validação o mesmo não ocorreu. Embora seja necessário um maior número de parâmetros para resolver problemas de predição, a estimativa destes pode ser dificultosa, o que pode acarretar incertezas e dificuldades de validação, por esta razão os modelos que são simplificados podem apresentar uma boa aplicabilidade. Portanto a conclusão que os autores chegaram com estes dois estudos foi que é possível obter resultados aceitáveis de simulações com modelos chuva-vazão simplificados e com amostras reduzidas. Em síntese, Tucci (2005) avalia que o melhor modelo é aquele com que o usuário tem maior sensibilidade quanto aos parâmetros e a representatividade dos processos em diferentes problemas.

O uso de modelos hidrológicos está associado ao princípio da parcimônia (Silveira, 1997), ou seja, busca-se a utilização de modelos que se utilizam do menor número de parâmetros possíveis. Tamiosso (2012) comparou o uso de dois modelos chuva-vazão, o método Silveira e o IPH-2 em bacias em escala de vertentes e conclui que os dois métodos apresentaram resultados similares e satisfatórios. Logo, utilizar-se ia o método Silveira pela maior facilidade de aplicação e por gerar resultados tão aceitáveis quanto o modelo IPH-2, o qual necessita de até três parâmetros para sua calibração. Além disso, modelos como este último necessitam de um período de informações hidrológicas para a calibração e validação.

Nesse contexto, torna-se necessário buscar metodologias alternativas que se utilizem do mínimo de dados observados para estimar as vazões em locais sem informações fluviométricas de longo período (séries de dados históricos) ou informações hidrológicas de bacias próximas.

Foi com o objetivo de contornar parte dessa deficiência que Silveira (1997) propôs um modelo chuva-vazão simplificado para estimativas de vazões de estiagem em bacias com carência de dados, o método Silveira.

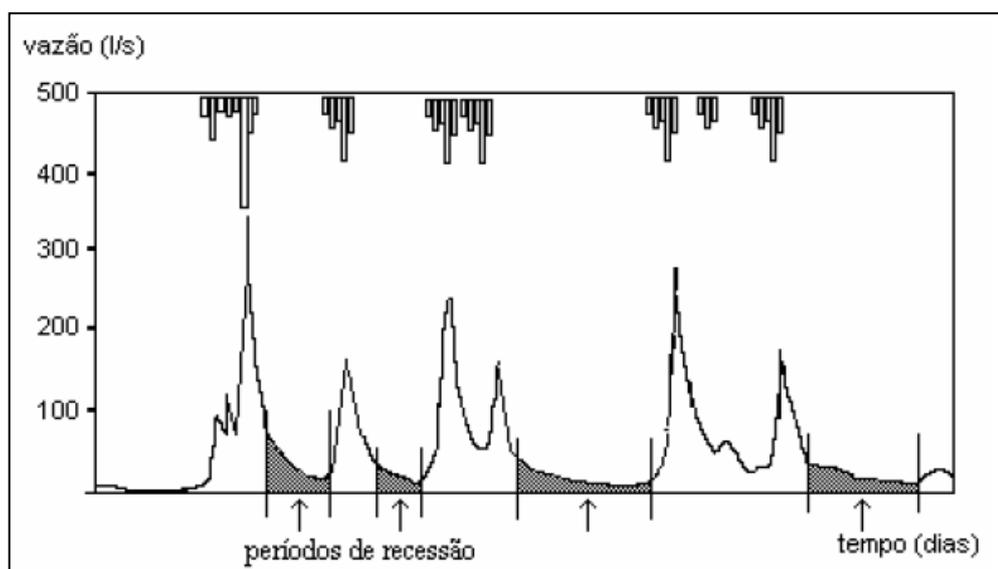
## 2.4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA

### 2.4.1 Estrutura do Método Silveira (SILVEIRA, 1997)

Silveira (1997) propôs um método para a avaliação da disponibilidade hídrica que tem como base principal a estimativa do comportamento da bacia hidrográfica em períodos de estiagem. Nesses períodos ocorre um deplecionamento fluvial de uma bacia sendo uma representação do seu comportamento após a ocorrer evento de precipitação.

Conforme o autor do método (SILVEIRA, 1997), esse processo é mais evidente em pequenas bacias uma vez que há uma resposta rápida da bacia aos estímulos de precipitações, devido ao seu pequeno tempo de concentração. Dessa forma, a ocorrência do escoamento superficial ocorre normalmente nos próprios dias em que houve as chuvas e os períodos de recessão representam um período maior de tempo no fluviograma. Na Figura 2.1, é apresentada a ilustração do hidrograma de como esse processo ocorre (SILVEIRA, 1997).

Figura 2.1 Hidrograma e os períodos de recessão (SILVEIRA, 1997)



Fonte: Silveira (1997)

Além disso, a metodologia visa representar a resposta de uma bacia por meio da técnica de simulação que transforma chuva em vazão a partir da obtenção de algumas medições que reproduzam o seu comportamento nas estiagens. O significado da curva de depleção medida é obtido por uma simulação de balanço hídrico diário que tenta reproduzi-la, a partir da cronologia de precipitações e estiagens, informações essas muitas vezes disponíveis em grande parte das regiões. O método reproduz prioritariamente os períodos de estiagem, sendo sua utilização indicada para estudos de vazões de maior frequência. Em resumo, a metodologia consiste de duas etapas básicas:

I – Amostragem de vazões onde se caracteriza 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 onerosas instalações fluviométricas. Esta amostra é a condição inicial para sua aplicação.

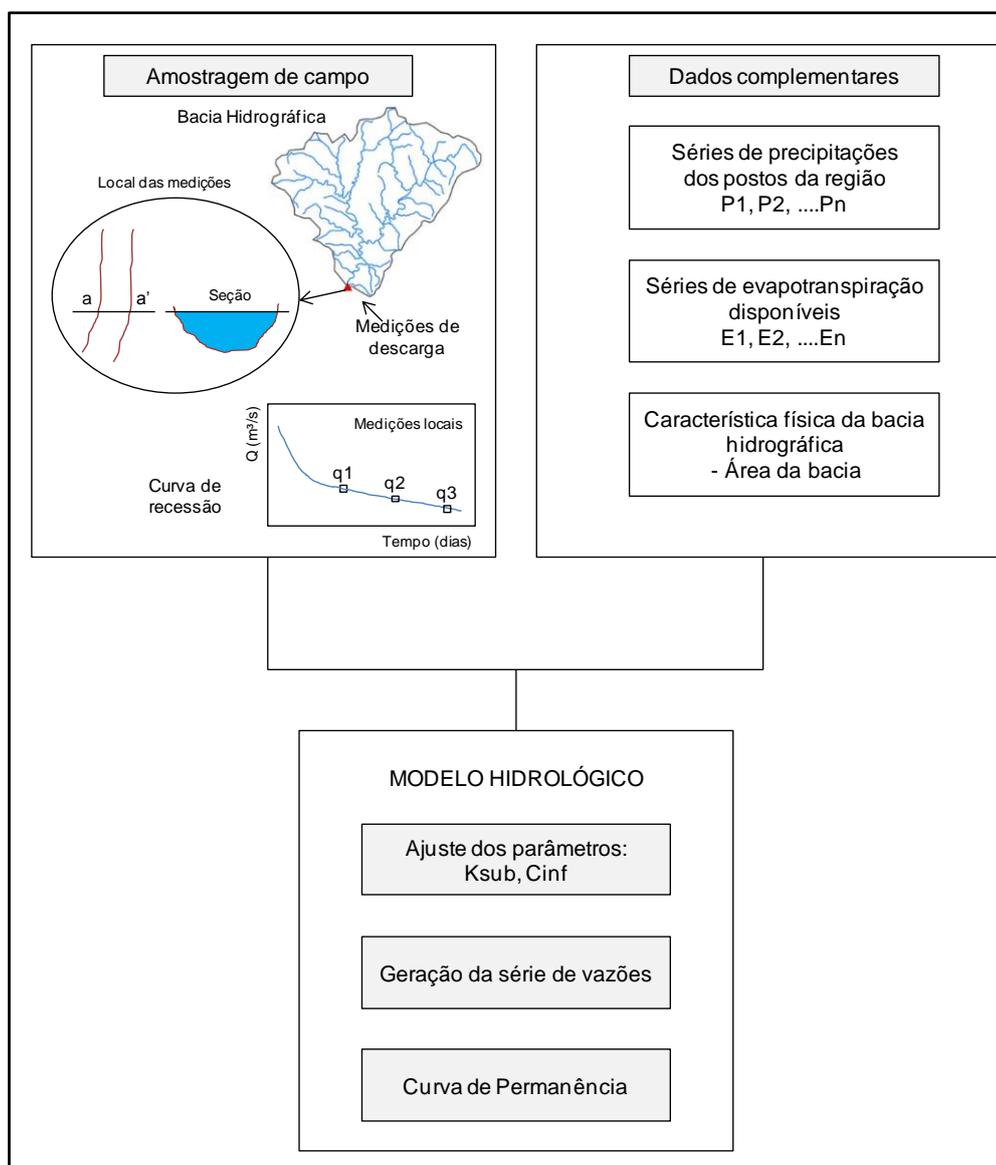
II – Simulação de série de vazões que envolvem as seguintes etapas: (i) o ajuste de um modelo simplificado de balanço hídrico com a amostra reduzida, ou seja, com poucos valores de vazão conhecidos; (ii) a síntese de vazões diárias por meio da simulação chuva-vazão, a partir do histórico de precipitações e evapotranspirações regionais, e, (iii) determinação da curva de permanência (SILVEIRA, 1997).

Segundo Silveira (1997), o número reduzido de amostragem de vazões visa representar uma vinculação local nas estimativas, sendo dessa forma a base hidrológica para os procedimentos de simulação. O autor descreve ainda que é necessário que sejam realizadas no mínimo três medições de vazões na seção considerada, espaçadas de alguns dias para que possa ser avaliada preliminarmente a caracterização do deplecionamento fluvial.

O método Silveira propõe que a simulação chuva-vazão seja realizada utilizando-se de um modelo simplificado de balanço hídrico objetivando sintetizar vazões diárias para o local do estudo. O modelo deve ter como objetivo sintetizar a série de saída com o mínimo de parâmetros, princípio da parcimônia, buscando representar a faixa de vazões almejada (Silveira 1997). O método, segundo seu

autor, considera apenas dois parâmetros, um relacionado com a parcela da precipitação que infiltra no solo e que mantém o reservatório subterrâneo, o  $C_{inf}$ , que por sua vez é responsável pelas vazões de base, e o outro referente à velocidade com que ocorre o esvaziamento desse reservatório, o  $K_{sub}$ . Para fins de simplificações, o reservatório é considerado um reservatório linear simples. Na Figura 2.2 é apresentada a estrutura metodológica do método.

Figura 2.2 Estrutura do método Silveira (SILVEIRA, 1997)



Fonte: Adaptado de Silveira (1997)

### 2.4.2 Ajuste do método Silveira (Silveira, 1997)

A metodologia proposta por Silveira (1997) apresenta os seguintes pontos como premissa:

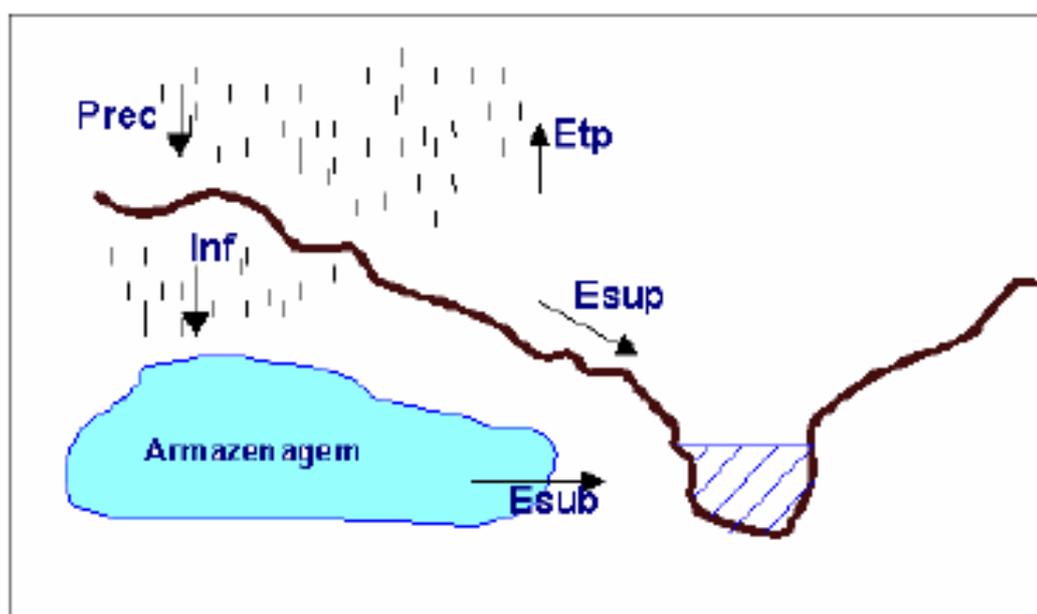
- “Possuir o menor número de parâmetros que permita estimar a série de vazões médias diárias em uma bacia hidrográfica”;
- “permitir fácil ajuste e na extensão de séries”.

Para isso, o autor estabeleceu as seguintes simplificações principais no seu equacionamento:

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

O esquema do balanço hídrico proposto por Silveira (1997) pode ser observado na Figura 2.3.

Figura 2.3 Balanço hídrico proposto por Silveira (1997)



Fonte: Silveira (1997)

O ponto fundamental e o mérito do método Silveira referem-se ao processo de “ajuste-calibração-verificação” comumente utilizado nos modelos chuva-vazão. O método não necessita de ajuste – verificação como na maioria dos modelos chuva-vazão, tais como o IPH 2, SMAP, etc. conforme descrito por Silveira (1997) e observado por Horn (2016). A estratégia desenvolvida por Silveira (1997) foge de uma abordagem convencional dos modelos hidrológicos, os quais necessitam de uma série de vazões observadas para realizar o ajuste-calibração-verificação (HORN, 2016). Além disso, nesse método é necessária a determinação de apenas dois parâmetros, o  $C_{inf}$  e o  $K_{sub}$ , cujos valores resultam do ajuste da depleção medida ou observada (SILVEIRA, 1997; HORN, 2016). Desses, apenas o primeiro é efetivamente passível de modificação, uma vez que o segundo resulta das três vazões medidas ou observadas. Em relação ao  $C_{inf}$ , sua determinação ocorre alternando seu valor inicial de forma manual, de modo que o hidrograma calculado, sobretudo a parte de recessão deste, coincida com os pontos das vazões medidas ou observadas. Dessa forma, para cada evento selecionado, faz-se necessário determiná-lo e a partir daí obtém-se a curva de permanência das vazões calculadas pelo método.

Nesse contexto, como então certificar-se de que o método pode ou não ser utilizado em determinadas situações e/ou locais com déficit de informações hidrológicas? Neste caso, uma vez que o método não carece do processo de “ajuste – verificação” é necessário buscar alternativas para realizar a validação da metodologia, já que caso isso não ocorra, o método pode ser utilizado por vezes de forma equivocada suscitando em algumas ocasiões dúvidas sobre a metodologia. Para tanto, tal qual ocorre em outras áreas do conhecimento, como na área médica, por exemplo, para a validação de uma ferramenta ou estratégia para o enfrentamento de um problema, faz-se necessário um protocolo que estipule a forma que otimize a sua utilização. O que norteia esse protocolo são os resultados oriundos de uma amostra de uma população a qual é submetido a testes e avalia-se o resultado da metodologia adotada e de sua eficiência no enfrentamento do problema. É a partir dessas verificações que são feitos apontamentos do desempenho da ferramenta ou estratégia utilizada onde se descrevem os pontos positivos e as falhas, assim como possíveis formas de contorná-las.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho não foi modificar a estrutura do método Silveira (SILVEIRA, 1997), mas sim aplicar o método para elaborar um

banco de dados de simulações. Essa estratégia foi utilizada por Horn (2016), em sua Tese de Doutorado o qual definiu o seu banco de dados de simulações como sendo um Lastro Técnico a partir do qual objetiva-se subsidiar a aplicação de um protocolo de orientação do uso do método Silveira.

### **2.4.3 Uso do método Silveira**

A metodologia proposta por Silveira (1997) tem sido utilizada para a determinação de vazões mínimas. O Método pode ser utilizado como uma ferramenta de apoio para a determinação de vazões de referência em bacias com carência de dados de vazões.

A Agência Nacional de Águas ANA (2013), propõe e utiliza o método Silveira (1997) como metodologia para estimar a disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas. A finalidade das estimativas insere-se no âmbito de outorga de direito de uso de recursos hídricos, baseada em poucas medições de vazão durante o período de estiagem e conforme essa publicação, o método Silveira tem sido frequentemente utilizado em pequenas bacias de cabeceira próximas ao Distrito Federal.

O Método de Silveira (1997) também foi adotado pelo órgão gestor de recursos hídricos do Estado do Mato do Grosso, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMAMT), por meio da Instrução Normativa n° 001/2009, de 08 de abril de 2009, cujo texto expõe sobre os procedimentos a serem adotados para os processos de outorga de uso de recursos hídricos em pequenas bacias hidrográficas de domínio daquele Estado. 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.

No estado do Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental– FEPAM/RS também tem recomendado essa metodologia como referência para estudo e apresentação de Laudos Hidrológicos (OI.N.º FEPAM/DICOPI/SELMI/9737/2016 Ref. Proc. n.º 007245-05.67/15-7, 2016).

## 2.5 VARIAÇÃO ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES

As precipitações não se distribuem de forma homogênea no tempo e no espaço (PAIVA, 2001; TUCCI, 2009). Há de se considerar as variações das precipitações devido aos processos naturais envolvidos. Villela e Mattos (1975) descrevem que as precipitações podem se originar de diferentes formas, precipitações ciclônicas, orográficas e convectivas. Segundo esses autores, as chuvas de origem ciclônicas são de longa duração, intensidades variando de baixas a moderadas e atingem grandes regiões. Já as chuvas orográficas são resultantes da ascensão de correntes de ar úmido que encontra barreiras naturais como montanhas, por exemplo. E as chuvas convectivas, são características por apresentarem curta duração, grandes intensidades e atingir áreas menores.

Nesse contexto, de acordo com Buriol et al. (2013), a precipitação pluvial é uma das variáveis hidroclimáticas que apresenta a maior variação no tempo e no espaço. Em determinadas áreas pode ser significativa, já que dependendo do tipo de formação das precipitações, eventos de chuva podem ocorrer de forma isolada em uma bacia e pode muitas vezes não ser registrada nos postos de medição. Holtz (1976) expõe ainda que o total precipitado varia de um lugar para outro e se considerar o mesmo local, anualmente também ocorrem variações.

Visando identificar regiões homogêneas de precipitação quanto à distribuição de probabilidades, Filho et al. (2005) utilizaram a análise de agrupamento hierárquica em séries de dados de 2.341 postos especializados em todas as regiões do Brasil. As séries históricas avaliadas consistiram em períodos entre 15 a 35 anos para cada estação pluviométrica. Os autores desse trabalho identificaram 25 zonas pluviométricas homogêneas, situadas em seis áreas climaticamente representativas no território nacional.

Silveira (2012) estudou a espacialidade dos totais mensais médios de precipitação na bacia do rio Vacacaí, no Rio Grande do Sul, a qual possui uma área de aproximadamente 10.000 km<sup>2</sup>. A autora avaliou a variação altimétrica da região de abrangência da bacia, e os mapas de precipitação resultantes do trabalho foram baseados nas informações de séries de dados de precipitação de 14 estações pluviométricas distribuídas na área e no entorno dessa bacia. Esse número de postos pluviométricos corresponde a uma densidade média de 714 km<sup>2</sup> por posto.

Essa autora observou valores mais elevados de precipitação na região do rebordo do Planalto rio-grandense, assim como precipitações totais maiores nos meses de setembro e outubro.

Portanto, em estudos que visem à determinação de disponibilidade hídrica deve considerar a variação espacial e temporal da precipitação para a obtenção de resultados satisfatórios e diminuição das incertezas associadas ao uso de cada metodologia. A distribuição espaço-temporal das precipitações pode apresentar erros intrínsecos superiores aos refinamentos de processos que simulem as representações físicas em uma bacia. Sendo assim, a extrapolação dos dados observados para a área como um todo deve ser realizada de forma bastante criteriosa (TUCCI, 2015).

A escolha do método mais adequado deve ser baseada nas especificidades locais, conforme observado por Silveira (1997).

### **3 MATERIAIS**

#### **3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDADAS**

Para o desenvolvimento desse estudo foram utilizadas quatro bacias hidrográficas, as quais se encontram cadastradas junto ao banco de dados da ANA. As bacias aqui utilizadas, doravante denominadas Comandaí, Jaguarizinho, Piratini e Vacacaí são drenadas pelos seus principais rios, Comandaí, Jaguarizinho, Piratini e Vacacaí. As bacias abrangem as unidades hidrográficas do Rio Grande do Sul: Turvo- Santa Rosa -Santo Cristo, Ibicuí, Butuí-Piratini-Icamaguã e Vacacaí-Vacacaí Mirim, respectivamente (LEI 10.350, 1994).

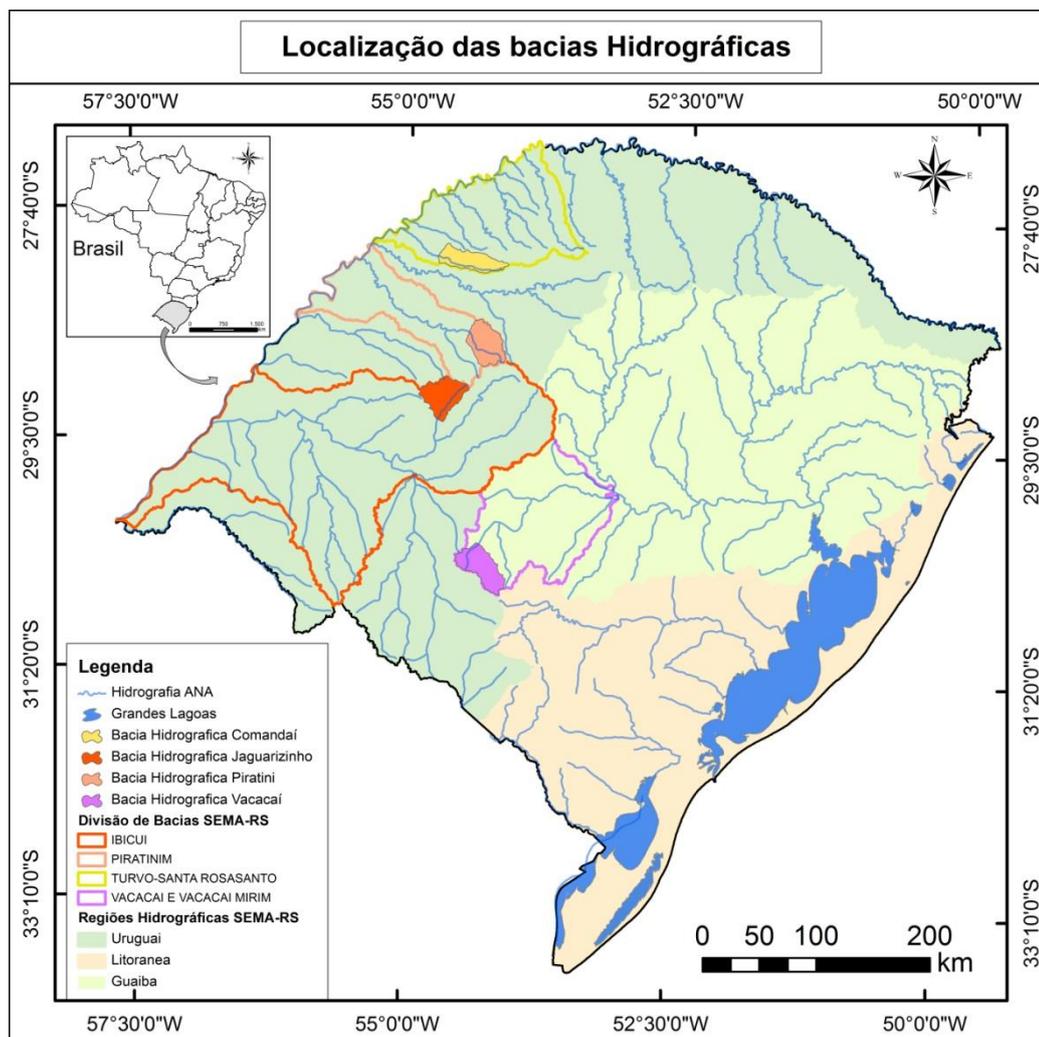
Com exceção da bacia Vacacaí, pertencente à região hidrográfica do Guaíba, as demais estão inseridas na região hidrográfica Uruguai. A região hidrográfica do Guaíba localiza-se na dominalidade da bacia do Atlântico Sudeste. Já a região do Uruguai, à bacia nacional do Uruguai. A localização das bacias é apresentada na Figura 3.1. A escolha dessas bacias foi relacionada com os objetivos desse trabalho, assim como a disponibilidade de dados para as bacias com as áreas de drenagem de interesse.

##### **3.1.1 Características gerais das bacias**

As bacias utilizadas nesse estudo possuem características as mais variadas em relação a alguns aspectos gerais, tais como uso e cobertura do solo, geomorfologia, geologia, vegetação, etc. não diferindo, porém, no que concerne ao clima em geral. O estado do Rio Grande do Sul está inserido na região de clima do tipo temperado úmido – Cf, conforme a classificação climática de Köppen com variantes Cfa e Cfb, segundo descreve Moreno (1961). Em ambas as regiões climáticas as chuvas ocorrem em todos os meses do ano diferindo apenas em relação às temperaturas. No primeiro, as temperaturas médias no mês mais quente são superiores a 22°C, e no segundo, inferiores. As áreas de estudo localizam-se

nas áreas abrangidas pelo tipo climático Cfa. Porém, se em relação ao clima as características regionais são similares, o mesmo não se pode concluir sobre a morfologia das áreas.

Figura 3.1 Localização geográfica das bacias hidrográficas.



As bacias em estudo estão inseridas nas regiões de abrangência das Províncias Geomorfológicas do Planalto e Depressão Central. As bacias Comandaí, Piratini e Jaguarizinho apresentam morfologias semelhantes caracterizadas pelas coxilhas de superfície do Planalto. Já a bacia Vacacaí compreende a região do Escudo Cristalino, em parte localizada no Escudo de depósitos colúviars. As bacias Comandaí, Jaguarizinho e Piratini encontram-se assentadas sobre rochas da Formação Serra Geral, com fácies Caxias, Gramado e Paranapanema. Ainda, apresentam dois tipos de solos, Neossolo litólico e Latossolo vermelho. Contudo, a

bacia Vacacaí abrange as Formações Grupo Guatá, Complexo Vacacaí, Grupo Passo Dois e Complexo Cambaí e alcança os principais fácies: Formação rio Bonito, Granito Jaguari, Cerro Mantiqueira e Formação Irati (GONÇALVES e SANTOS, 1985; IBGE, 2003; UFRGS – IB, 2009).

Em relação ao relevo, com exceção da bacia Vacacaí, em que predominantemente o relevo é ondulado, nas demais essa característica varia de ondulado a forte ondulado, conforme a classificação proposta por Miranda (2005). As bacias também se distinguem em relação à morfometria. Como pode ser observado na Tabela 3.1, o fator de forma, por exemplo, é semelhante nas bacias Jaguarzinho e a Piratini sendo os valores mais elevados quando comparados com as bacias Comandaí e Vacacaí em que o valor desse coeficiente resultou em 0,21 e 0,38 respectivamente.

Tabela 3.1 Características morfométricas das bacias do estudo

Características Morfométricas	Unidade	Bacia Hidrográfica			
		Comandaí	Jaguarzinho	Piratini	Vacacaí
Área	km <sup>2</sup>	817	926	932	965
Perímetro	km	158,60	143,90	136,75	155,20
Coefficiente de compacidade (Kc)	-	1,55	1,32	1,25	1,40
Fator forma (Kf)	-	0,21	0,56	0,57	0,38
Índice de circularidade	-	0,41	0,56	0,63	0,50
Relação de relevo	m/km	2,39	3,12	3,84	4,53
Tempo de concentração (tc)	hs	25,10	15,10	15,40	13,44
Densidade de Drenagem (D <sub>d</sub> )	km <sup>-1</sup>	0,56	0,44	0,61	0,54

De forma geral, segundo sugerem Cordeiro e Hazenack (2004), ocorrem formações de Floresta Decidual e Floresta Estacional na região do rio Uruguai e na encosta sul do planalto, onde se encontram as bacias Comandaí e Piratini. Também, ocorrem formações de espécies constituídas pelas famílias das gramíneas em regiões com até 300 m de altitudes. Na bacia Jaguarzinho ocorre essencialmente às formações de Estepe, caracterizada pela vegetação campestre. Essas são resultados da estacionalidade provocada pelo frio oriundo das frentes polares e de outra frente seca, mais curta, quando em geral ocorre déficit hídrico.

Os usos predominantes dos solos, conforme aponta o estudo de UFRGS (2009) na região de abrangência das bacias, é destinada a atividades

agropecuárias. Na bacia Vacacaí ocorrem também atividades agrícolas, sobretudo orizícolas, razão das características de localização geográfica da bacia que permitem que tais atividades sejam desenvolvidas.

### **3.1.2 Dados hidrológicos**

Para a realização desse estudo, foram selecionadas quatro bacias hidrográficas de até 1000 km<sup>2</sup> com séries de dados hidrológicos consistidos e disponibilizados na rede hidrometeorológica nacional da ANA. Para o teste de aplicação da metodologia desenvolvida por Silveira (1997), são necessários dados de séries de vazões, precipitação e evapotranspiração, além da área de drenagem da bacia.

A delimitação das áreas de drenagem foi realizada com auxílio de ferramenta computacional do pacote ArcGIS® 10. utilizando-se de imagens de satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e de dados vetoriais, disponibilizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa e o Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia / UFRGS, respectivamente.

#### *3.1.2.1 Dados de evapotranspiração*

A evapotranspiração potencial (EVTP) regional utilizada nesse trabalho foi obtida por meio dos dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, localizada no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, na região central do estado.

#### *3.1.2.2 Séries de dados de vazão*

Os dados das séries históricas de vazão foram obtidos por meio do banco de dados da ANA, para cada uma das bacias selecionadas. A descrição dos postos fluviométricos dos quais foram obtidos os dados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Localização dos postos Fluviométricos utilizados.

Bacia	Código ANA	Área (Km <sup>2</sup> )	Posto Fluviométrico	Localização		Município	Período de dados	
				Lat.	Long.			
Comandaí	74880000	817	Passo São João	- 28:03:47	- 54:45:21	Cerro Largo	01/01/1942	31/03/2015
Jaguarizinho	74460000	926	Ernesto Alves	- 29:21:45	- 54:44:07	Jaguari	01/10/1958	31/03/2015
Piratini	75400000	932	Passo dos Dias	-29:39:25	-54:27:32	São Gabriel	01/01/1942	31/03/2015
Vacacaí	85470000	965	Ponte São Gabriel	-30:21:35	-54:18:48	São Gabriel	01/01/1958	31/03/2015

### 3.1.2.3 Séries de dados Pluviométricos

A seleção das bacias foi condicionada pela disponibilidade de informações hidrológicas. Dessa forma, a partir de uma pesquisa no banco de dados da ANA foi possível identificar 14 postos pluviométricos com séries de dados de precipitação necessários para uso do Método Silveira. Para cada uma das bacias, foram escolhidos postos na região de alcance. A localização espacial dos postos em relação às áreas das bacias e as respectivas identificações de cada um podem ser verificadas na Tabela 3.3 e nas Figuras 3.2 a 3.5.

Tabela 3.3 Localização dos postos Fluviométricos utilizados.

Bacia	Posto Pluv.	Nome	Cód. ANA	Município	Localização		Período de dados	
					Lat.	Long.		
Comandaí	P1	Campina das Missões	2754013	Campina das Missões	- 27:54:15	- 54:50:01	21/12/2002	31/12/2015
	P2	Boa Vista	2854001	Catuípe	- 28:06:40	- 53:59:35	14/11/1969	31/12/2015
	P3	Girua	2854003	Girua	- 28:03:15	- 54:21:41	23/04/1943	31/12/2015
	P4	Ponte Mística	2854015	Rolador	- 28:10:53	- 54:44:18	01/10/2015	31/07/2009
Jaguarizinho	P5	Ernesto Alves	2954004	Santiago	- 29:21:58	- 54:44:08	01/08/1959	31/01/2016
	P6	Florida	2954030	Santiago	- 29:16:06	- 54:35:54	01/02/1983	31/01/2016
	P7	Santiago	2954020	Santiago	- 29:11:12	- 54:51:21	01/08/1976	31/01/2016
	P8	Esquina dos Lima	2954031	Capão do Cipó	- 29:02:53	- 54:34:15	01/02/1983	31/01/2016
Piratini	P9	Coimbra	2854012	São Miguel das Missões	- 28:47:16	- 54:27:09	01/09/1976	30/06/2016
	P10	São Bernardo	2854013	Tupanciretã	- 28:54:19	- 54:03:54	01/01/1983	30/06/2016
	P11	Jóia	2854018	Jóia	- 28:38:57	- 54:06:48	01/12/2002	30/06/2016
	P12	Passo Major Zeferino	2854005	São Miguel das Missões	- 28:44:01	- 54:38:32	01/10/1957	30/06/2016
Vacacaí	P13	Granja Umbu	3054016	Rosário do Sul	- 30:30:52	- 54:46:13	26/06/1976	31/12/2015
	P14	Ibaré	3054019	Lavras do Sul	- 30:46:28	- 54:13:29	25/11/1999	31/12/2015

Figura 3.2 Localização geográfica da bacia Comandai (Área 817km<sup>2</sup>).

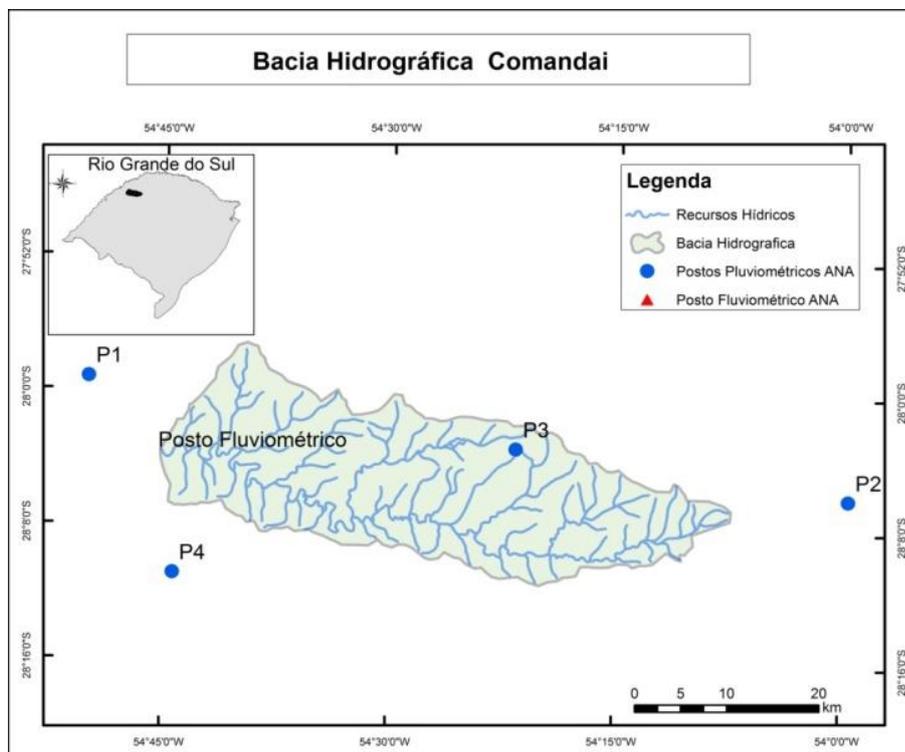


Figura 3.3 Localização geográfica da bacia Jaguarzinho (Área 926 km<sup>2</sup>).

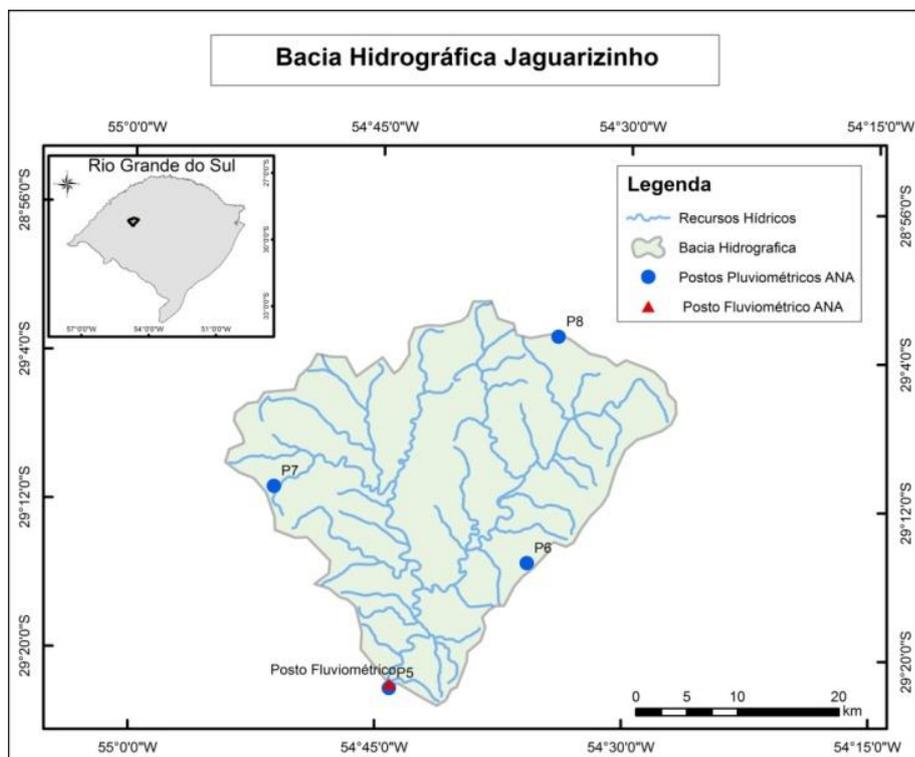
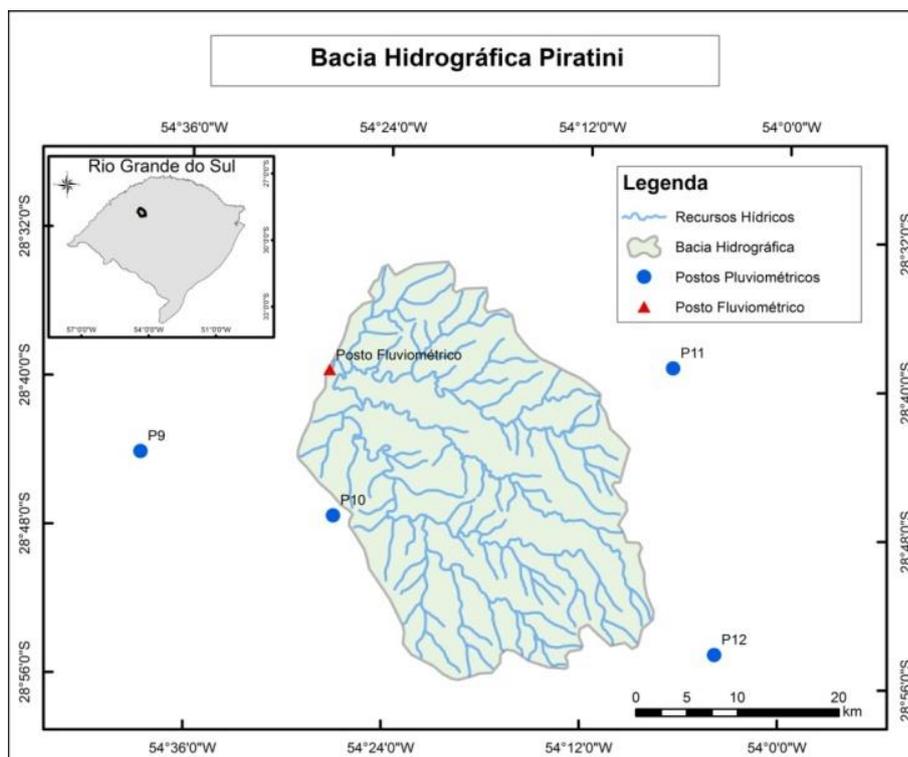
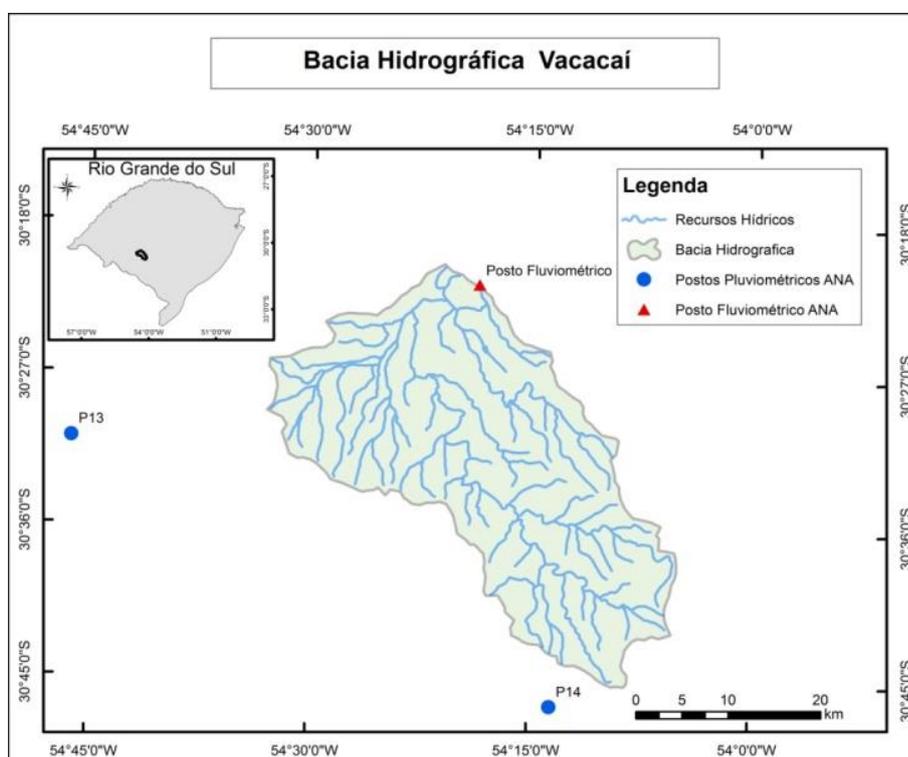


Figura 3.4 Localização geográfica da bacia Piratini (Área 932 km<sup>2</sup>).Figura 3.5 Localização geográfica da bacia Vacacaí (Área 965 km<sup>2</sup>).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA E SELEÇÃO DOS EVENTOS DE ESTIAGEM

A metodologia utilizada está baseada no método Silveira elaborado por Silveira (1997). Na Figura 4.1 apresenta-se o fluxograma geral das etapas realizadas na elaboração desse trabalho. Para a aplicação do método Silveira foi necessário realizar algumas etapas anteriores. A primeira consistiu na pesquisa e escolha das bacias a serem estudadas com base nas informações hidrológicas disponíveis. Na sequência, foram obtidos os dados de entrada necessários para aplicação do método: vazão, precipitação, evapotranspiração potencial e informações morfométricas das bacias, especificamente as áreas. Posteriormente, iniciou-se a seleção dos eventos de estiagem.

A seleção dos eventos de estiagem foi realizada conforme orientações propostas por Silveira (1997) e descrita também no trabalho de Horn (2016). Aquele recomendava que fossem observados os 7 dias antecedentes às medições das vazões, nos quais não poderia haver um volume total precipitado maior que 15 mm e ainda, não deveria ter ocorrido um volume precipitado maior que 5 mm em um mesmo dia. Já este, testou em seu trabalho a utilização de 14 dias antecedentes à primeira medição ou observação das vazões, sendo que nesse intervalo seria admitido a ocorrência de um volume total precipitado de até 30 mm desde que não mais do que 5 mm diários. Conforme o autor do método (SILVEIRA, 1997) parte-se do princípio da observação concomitante da série de vazões, caracterizada pelo fluviograma, e as séries de dados medidos de precipitação de cada posto utilizado na bacia.

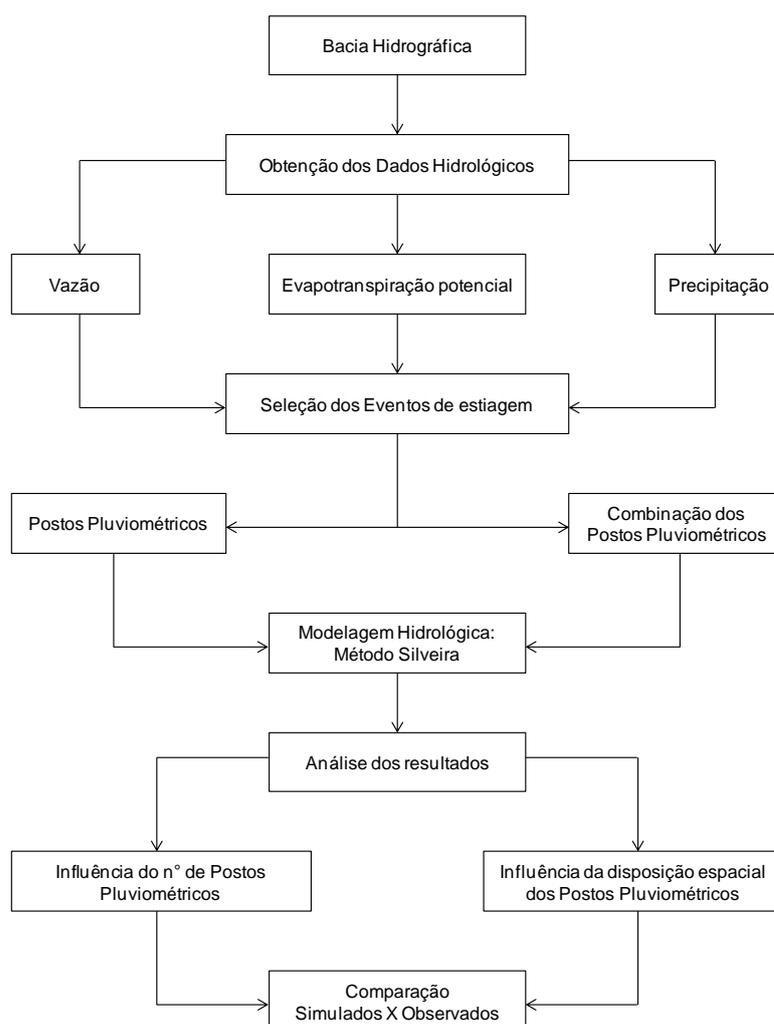
Na Figura 4.2, são apresentadas as etapas utilizadas para a seleção dos eventos de estiagem.

Nesta, pode-se verificar que a seleção dos eventos de estiagem foi realizada de forma concomitante entre os postos pluviométricos (P) e as combinações (C) entre os postos. A razão pela qual foram realizadas combinações entre os postos foi condicionada aos objetivos do trabalho: verificar a influência do número de postos

pluviométricos e a localização espacial destes na bacia, sobre os resultados das simulações efetuadas a partir dos eventos de estiagem.

Dessa forma, inicialmente atribui-se a denominação aos postos sendo P1, P2, P3 e P4 e assim sucessivamente até P14. Posteriormente foram efetuadas combinações entre os mesmos. Em três das quatro bacias utilizadas nesse estudo, resultaram em dez combinações diferentes (C1 a C10) assim divididas: 6 combinações entre dois postos, quatro combinações entre três postos, e a precipitação média na bacia onde se utilizou os dados de todos os postos, precipitação média (Pm). Por exemplo, a combinação entre dois postos: C1(P1 e P2); de três: C7 (P1, P2 e P3), e assim sucessivamente até exaurir as possibilidades de combinações dentre os postos na mesma bacia. Assim, P1, P2,..., P14 e Pm, além das combinações C1, C2, ..., até C10 constituíram o conjunto de cenários para cada uma das bacias estudadas.

Figura 4.1 Fluxograma geral da metodologia utilizada

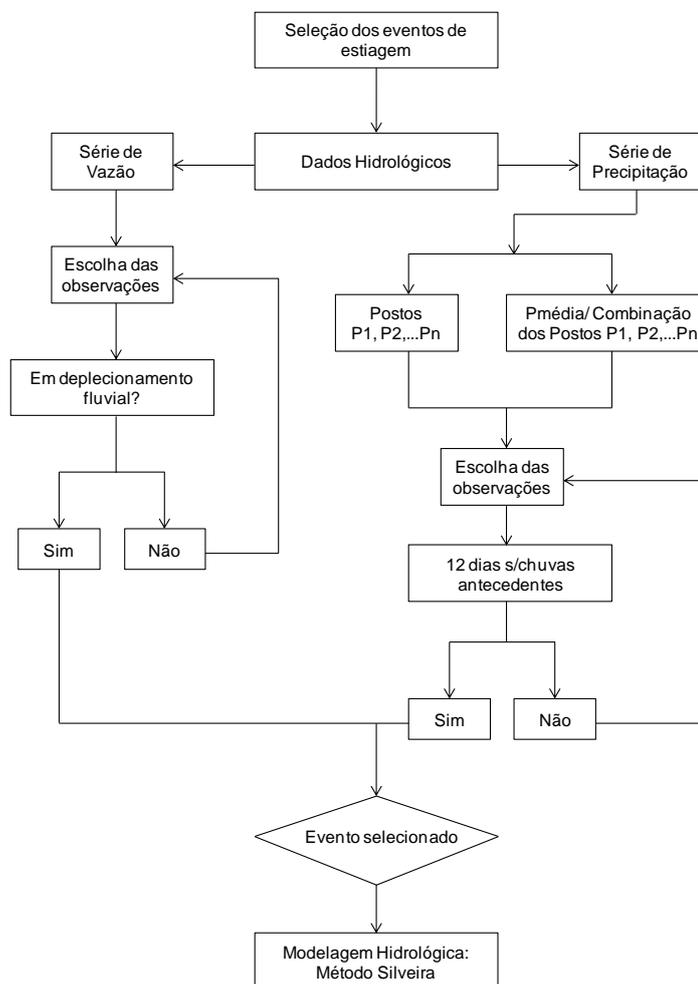


É necessário mencionar que as denominações C1 a C10 não obedeceram à ordem do número de postos pluviométrico, pois caso isso ocorresse, C6, por exemplo, seria a combinação entre seis postos pluviométricos, o que foge do escopo dessa pesquisa. Ainda, para a bacia Vacacaí não se obtiveram combinações além da precipitação média obtida per meio dos dados de chuvas dos dois postos, haja vista que foram utilizados apenas dois postos pluviométricos na bacia.

Ressalta-se que os eventos de estiagem ensejam hipoteticamente as medições realizadas a campo. Nessa dissertação, para cada evento selecionado, foi adotado o critério proposto por Silveira (1997), ou seja, foi necessário primeiramente verificar na série de precipitações para cada cenário considerado um período de controle de 7 dias antecedentes às observações das vazões nos quais seria admitido um volume total precipitado de até 15 mm contanto que não houvesse um volume maior do que 5 mm em um mesmo dia. Optou-se por selecionar eventos em que não houve precipitação durante o período de controle (7 dias antecedentes às observações das vazões). A metodologia desenvolvida por Silveira (1997) preconiza que sejam realizadas no mínimo três medições locais, intercaladas com um espaço de tempo de um dia entre cada uma. É necessário enfatizar que para a escolha dos eventos é necessário observar a série de precipitações e a série de vazões de forma concomitante.

A etapa intermediária em que foram realizadas as combinações dos postos foi precedida pelo cálculo das chuvas médias entre as combinações por meio do Método de Thiessen, conforme descrito por (McCUEM, 1998; TUCCI, 2009; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), com o auxílio de ferramenta computacional do pacote ArcGIS® 10. Utilizando-se desse método, foi possível calcular as áreas de influência de cada posto em relação à bacia em cada uma das combinações elaboradas. Após as verificações pertinentes para a escolha do evento, os eventos selecionados foram submetidos à modelagem hidrológica por meio do uso do método Silveira.

Figura 4.2 Fluxograma relacionado a seleção dos eventos de estiagem



#### 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA (SILVEIRA, 1997)

Como já citado no início desse capítulo, a aplicação da metodologia proposta foi baseada no método Silveira elaborado por Silveira (1997). A metodologia utiliza-se de informações pluviométricas na bacia para efetuar a determinação dos parâmetros do método, notadamente o Cinf. As vazões observadas na série das vazões de cada evento selecionado correspondem a uma hipotética medição a campo. As equações utilizadas no método Silveira podem ser verificadas na Tabela 4.1 onde é apresentado um resumo do delineamento matemático do método (SILVEIRA, 1997).

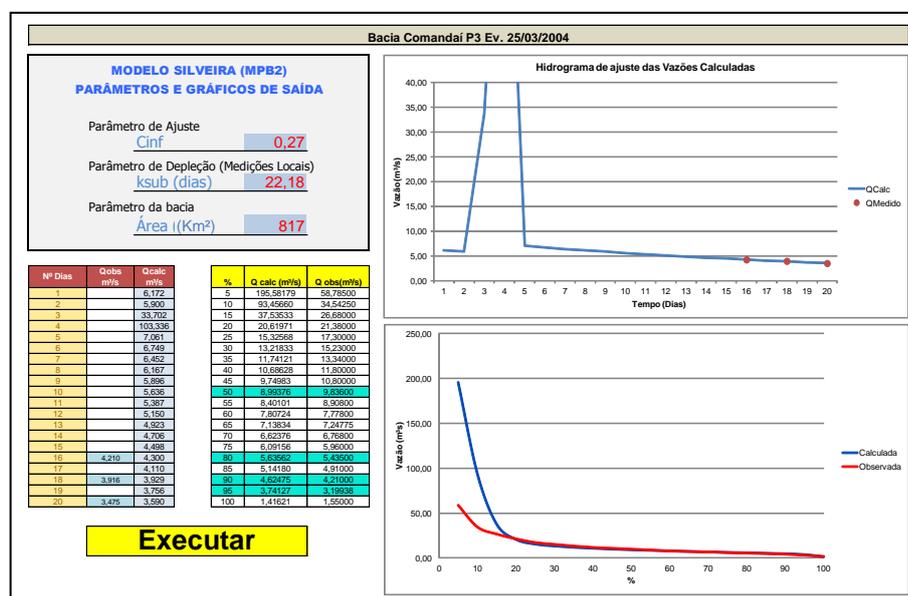
Tabela 4.1 Resumo da formulação matemática da estrutura do método Silveira (SILVEIRA, 1997).

Estrutura do Método Silveira			
Situação	Ordenamento da estrutura do modelo	Equacionamento	Processos /Descrição das variáveis
I	A precipitação $P_t$ (mm) em cada intervalo de tempo (diário) é subtraída da evapotranspiração potencial $E_t$ (mm).	$P_t - E_t \leq 0$	Neste caso não resulta precipitação para gerar escoamento.
	Na situação em que $P_t - E_t > 0$	$P_{rt} = P_t - E_t$	Uma parcela da precipitação irá gerar escoamento superficial e outra infiltrará.
II	A precipitação efetiva é avaliada por:	$P_{ef}(t) = (1 - C_{inf}) \cdot P_r(t)$	$C_{inf}$ representa a proporção da precipitação que infiltra; $P_{ef}$ , a precipitação efetiva.
	O volume de infiltração $V_i$ , fica expresso por:	$V_i = C_{inf} \cdot P_r(t)$	Onde a expressão $(1 - C_{inf})$ representa o coeficiente de escoamento e $C_{inf}$ , o coeficiente de infiltração ou o fator de perda.
	O reservatório subterrâneo pode ser expresso pela equação da continuidade	$\frac{dS}{dt} = V_i - Q_b$	Em que $S$ é o armazenamento em mm; e $Q_b$ a vazão de escoamento subterrâneo em mm/dia.
	Considerando que o armazenamento (mm) e a vazão de saída estão relacionados pela expressão:	$S = K_{sub} \cdot Q_b$	$K_{sub}$ representa o tempo de esvaziamento do reservatório em dias.
	Derivando a equação do armazenamento e substituindo na equação da continuidade resulta a equação diferencial do modelo do reservatório simples.	$K_{sub} \cdot dQ_b/dt + Q_b = V_i$	
	Após a resolução da equação do reservatório simples e isolando a vazão de base ( $Q_b$ ) tem-se:	$Q_b(t) = Q_b(t-1) \cdot e^{-\Delta t/K_b} + V(t) \cdot (1 - e^{-\Delta t/K_b})$	Onde $Q(t)$ é a vazão total em mm/dia
	No período chuvoso em que $P_r > 0$ a vazão incorpora também a parcela de origem superficial e é dada por:	$Q(t) = [P_{ef}(t) + Q_b(t)]$	
	Quando $P_r = 0$ , a equação se reduz a:	$Q(t) = Q_b(t)$	Para transformar as vazões de mm/dia para $m^3/s$ , multiplique-as pela área da bacia em $Km^2$ e divide-se pelo fator 86,4.
	O valor inicial do parâmetro $K_{sub}$ para simulação pode ser obtido a partir das medições locais do método proposto, considerando o mínimo estipulado de três valores. Considerando a equação na ausência de precipitações pelo modelo, o valor do parâmetro pode ser obtido da seguinte forma:	$Q_2 = Q_1 \cdot e^{-\Delta t/K_{sub}}$ $Q_3 = Q_2 \cdot e^{-\Delta t/K_{sub}}$	Onde $\Delta t$ é o intervalo de tempo entre as medições locais em dias; $K_{sub}$ , a estimativa inicial para o parâmetro $K_{sub}$ ; e $Q_1$ , $Q_2$ e $Q_3$ , as três vazões inicialmente levantadas a campo.
O valor resultante de $K$ , estimado pelas equações é:	$K_{1sub} = \Delta t \cdot \ln Q_1/Q_2$ ; $K_{2sub} = \Delta t \cdot \ln Q_2/Q_3$ $K_{sub} = (K_{1sub} + K_{2sub})/\Delta t$		

Fonte: Adaptado de Silveira (1997)

Inicialmente para a aplicação do método Silveira (SILVEIRA, 1997), são necessários os dados de entrada: séries de precipitações, de evapotranspiração potencial, da área da bacia e o valor de no mínimo três observações ou medições de vazões. No presente estudo, as séries de vazões observadas. Posteriormente, determina-se o valor do parâmetro  $K_{sub}$ , utilizando-se das duas equações para essa finalidade, conforme descrição na Tabela 4.1, com um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) em dias, de no mínimo dois dias entre a primeira e a segunda medições, e de dois dias entre a segunda e a terceira medições. Essa etapa é necessária e faz parte da estratégia do método Silveira para verificar se ocorre ou não o deplecionamento fluvial. Na sequência, é realizado o ajuste do  $C_{inf}$ , por meio de tentativa e erro, segundo descrevem Silveira e Tucci e Silveira (1998), até que ocorra a melhor convergência entre as curvas de permanência das vazões calculadas e a observada (Figura 4.3), configurando um ajuste empírico e matemático deste. Por fim, obtêm-se as séries de vazões calculadas e a respectiva curva de permanência dessas vazões.

Figura 4.3 Evento do dia 25/03/2004 da bacia Comandáí com  $K_{sub}$  de 22,18 e  $C_{inf}$  de 0,27.



### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados das simulações foi realizada visando atender aos objetivos propostos por meio da verificação dos erros entre as vazões calculadas e as observadas.

#### 4.3.1 Influência quanto ao número de postos pluviométricos na bacia

Em relação a este objetivo, inicialmente partiu-se do pressuposto de que um maior número de informações de precipitação registradas em postos pluviométricos na área e no entorno dessa bacia poderia trazer melhora nos resultados das simulações.

Para esta avaliação, o primeiro passo foi tabular e dividir os erros dos postos de todas as simulações realizadas em grupos da seguinte forma:

Grupo 1 (G1), conjunto de erros oriundos das simulações com séries pluviométricas de apenas um posto pluviométrico; Grupo 2 (G2), das combinações entre dois postos; Grupo 3 (G3) resultante do agrupamento dos erros das combinações entre três postos, e Grupo 4 (G4) da precipitação média na bacia, que com exceção da bacia Vacacaí, foram utilizados um total de quatro postos pluviométricos.

Posteriormente, foram plotadas curvas de permanência das séries de vazões observadas e das vazões calculadas por meio do método Silveira de todos os eventos simulados, assim como as curvas de permanência referente ao intervalo de confiança. O objetivo dessa etapa foi verificar o ajuste das curvas calculadas, evento por evento, mediante o intervalo de confiança construído para todos os postos e combinações realizadas.

Foi realizada uma comparação entre vazões das curvas de permanência das vazões observadas - vazões de referência Q50, Q80, Q90 e Q95, e seus respectivos percentis, 50%, 80%, 90% e 95% - e as das curvas de permanência das vazões calculadas, visando identificar se as simulações a partir de um maior número de

postos pluviométricos produziria uma melhora no ajuste do feixe de curvas de permanência calculadas.

A escolha desses percentis está relacionada com as vazões de referência preconizadas pela Legislação brasileira, seja para fins de outorga do uso da água ou de licenciamento ambiental.

O intervalo de confiança é utilizado para mensurar a confiabilidade dos dados estimados. A justificativa para se utilizar dessa técnica depara na questão de que dificilmente os dados simulados sejam exatamente iguais aos dados verdadeiros. Conforme Naghettini e Pinto (2007), a estimativa pontual é uma estatística e por derivar de variáveis aleatórias, a própria pode ser considerada aleatória e dessa forma, por si só possui uma densidade de probabilidades. Dessa forma, a construção de um intervalo de confiança visa contornar as incertezas inerentes aos processos de simulação para que diante de um valor estimado, possa-se calcular um intervalo onde exista uma percentagem de certeza de que o valor esteja contido nesse intervalo (TAMIOSSO, 2012).

Segundo Silveira (1997), os intervalos de confiança podem ser construídos centralizados nos percentis da curva de permanência observada, ou centralizados na curva de permanência média das simulações. O primeiro focaliza a curva de permanência observada como a tendência central, já a segunda, tem como referencial a curva observada como sendo esta o resultado do universo estatístico das simulações. Nessa dissertação, a partir das Equações 4.1 e 4.2 (NAGUETTINI e PINTO, 2007), foi construído um intervalo de confiança de 90% nos percentis, centralizada nas curvas de permanência das vazões observadas.

Equação 4.1

$$IC = Q_p^{obs} \pm 1,645.S_p^s$$

Equação 4.2

$$S_p^c = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_p^{cal} - Q_p^{obs})^2}{n - 1}}$$

A segunda etapa da análise dos resultados consistiu em utilizar medidas estatísticas descritivas e escalares de precisão para mensuração dos erros em relação às simulações efetuadas. Os erros foram calculados para cada par de dados observado e calculado todos os eventos do universo das simulações realizadas por meio do método Silveira. A unidade de medida dos erros foi obtida em m<sup>3</sup>/s,

contudo, para fins das análises, optou-se por transformá-los em vazões específicas (L/s.km<sup>2</sup>). Essa análise torna-se mais justa e permite que de forma geral os erros possam ser comparados de forma direta entre bacias com diferentes áreas (HORN, 2016). Para mensuração dos erros em relação às medidas estatísticas utilizaram-se as seguintes métricas:

- Erro médio;
- Erro médio absoluto;
- Raiz do erro quadrático médio;
- Erro médio absoluto percentual;
- Análise de variâncias – ANOVA;
- Correlação linear de Pearson;
- *Box-plot*

Esse procedimento foi efetuado para cada uma das bacias estudadas.

#### 4.3.1.1 Erro médio (EM)

O erro médio (EM) representa a diferença média entre as vazões calculadas pelo método Silveira e a série de vazões observadas do posto fluviométrico. É calculado por meio da Equação 4.3.

Equação 4.3

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Q_{cal} - Q_{obs})$$

Sendo,  $Q_{cal}$ , é a vazão calculada pelo método Silveira,  $Q_{obs}$ , a vazão observada, e  $n$  o número de simulações.

#### 4.3.1.2 Erro médio absoluto (EMA)

Segundo Wilks (2006), o EMA é a média aritmética dos valores absolutos das diferenças entre os membros de cada par considerado. Quanto mais próximo de zero for o EMA, há uma maior convergência das simulações em relação aos dados observados. Do contrário, há uma maior discrepância entre os resultados das simulações e as observações. Dessa forma, pode-se utilizá-lo para mensurar a magnitude típica para os erros em um conjunto de dados de simulações. É medido com as mesmas unidades das séries. Sua determinação é realizada por meio da Equação 4.4.

Equação 4.4

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 |Q_{cal} - Q_{obs}|$$

De forma análoga a Equação 3,  $Q_{cal}$ , é a vazão calculada pelo método Silveira,  $Q_{obs}$ , a vazão observada, e  $n$  o número de simulações.

#### 4.3.1.3 Raiz do erro quadrático médio (REMQ)

Na sequência utilizou-se a Equação 5 para determinar a raiz do erro médio quadrático (REMQ). O REMQ, utilizado nessa pesquisa, possui as mesmas dimensões físicas das simulações e observações. O REMQ é calculado pela raiz da diferença quadrática média entre os pares calculado e observado. É uma medida semelhante ao EMA, excetuando-se pelo uso da quadratura ao invés da função de valor absoluto. Para Wilks (2006), devido ao fato da função quadrática utilizada, a função é mais sensível aos maiores erros e aos chamados *outliers*, e sua relevância aumenta quando da avaliação de grandes erros. Valores próximos a zero indicam maior semelhança entre as séries calculadas e as observadas.

Equação 4.5

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (Q_{cal} - Q_{obs})^2}$$

#### 4.3.1.4 Erro médio percentual absoluto (EMPA)

É uma medida em percentual e segundo Armstrong e Collopy (1992), essa é livre de unidades e apresenta a vantagem de controlar a escala dos erros, ou seja, calcula-se o erro como uma percentagem do valor observado. Entretanto apresenta a desvantagem de colocar um maior peso sobre as simulações cujos valores são superiores ao observado do que sobre aquelas em que os valores calculados são inferiores ao observado. Para erros menores que o observado, o EMPA é limitado em cem por cento, contudo, para os erros maiores, não há limitação. O EMPA é calculado pela Equação 6.

Equação 4.6

$$EMPA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{cal} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} \cdot 100$$

#### 4.3.1.5 Análise de variâncias – ANOVA

Para avaliar os resultados em relação aos objetivos no intuito de orientar a aplicação do protocolo na utilização do método Silveira, realizaram-se testes de comparação entre as médias por meio da análise das variâncias, a ANOVA, de acordo com (BUSSAB e MORETTIN, 2002). A aplicação do teste foi realizada com o auxílio do software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS).

O objetivo de adotar esse procedimento foi avaliar as variâncias dos erros mediante os dois objetivos principais propostos: quanto ao número de postos pluviométricos e quanto à localização espacial destes em relação à bacia. Este teste serve para comparar os valores das médias de pelo menos um grupo em relação aos demais. Assim, a ANOVA foi aplicada aos resultados em duas situações:

A primeira, com os dados dos grupos definidos anteriormente visando identificar possíveis diferenças entre os grupos testando as seguintes hipóteses:

As hipóteses testadas, com teste bilateral foram:

$H_0$  = as médias dos erros dos grupos G1 a G4 são iguais;

$H_1$  = as médias dos erros dos grupos G1 a G4 são diferentes.

Dessa forma, considerando o nível de significância de 0,05 foi calculada a probabilidade de significância, o *p-valor*. A partir dos resultados do teste têm-se duas possibilidades: se *p-valor* < 0,05, rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos *H0* e confirma-se *H1*, e neste caso há diferença entre as médias dos grupos. Entretanto, se *p-valor* > 0,05, confirma-se a hipótese de igualdade entre as médias *H0*, e neste caso não há diferenças significativas entre os grupos com 1, 2, 3, e 4 pluviômetros.

#### 4.3.1.6 Análise de correlação linear de Pearson

No intuito de identificar possíveis correlações entre os erros e as variáveis associadas no processo das simulações hidrológicas por meio do método Silveira, foram realizadas análises de correlação conforme descritos por Fernandes (1999) e Naghettini e Pinto (2007). Essa análise se estendeu entre os erros e o Cinf; os erros e o Ksub; os erros e os dias antecedentes sem chuvas. Para essas análises, também foi utilizado o software SPSS.

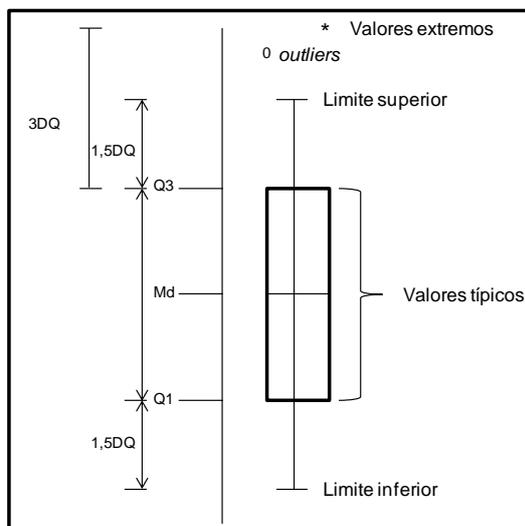
Equação 4.7

$$r = \frac{n \sum(x_i \cdot y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

#### 4.3.1.7 Box-plot

Visando analisar a dispersão dos erros foram elaborados gráficos de medidas descritivas representadas por meio de diagramas de caixas (*Box-plot*) como ilustra a Figura 4.4. Seu uso adquire importância na medida em que permite a comparação múltipla entre vários grupos lado a lado possibilitando a comparação entre agrupamentos de dados (WILKS, 2006). Nesse tipo de representação é possível identificar as discrepâncias entre os dados. O *Box-plot* fornece medidas relevantes, tais como a dispersão, assimetria, cauda e os *outliers* (medidas discrepantes).

Figura 4.4 Ilustração esquemática do gráfico tipo Box-plot



Fonte: Adaptado de Wilks (2006)

Na ilustração apresentada (Figura 4.4), pode-se verificar a divisão em quatro quartis, cada um correspondendo a 25%. O quartil inferior (Q1 0,25), a mediana Md (Q 0,5) - a linha de divisão da caixa - e o quartil superior (Q3 0,75). Os limites inferior, superior e os *outliers* são calculados pela diferença interquartílica (DQ). Quanto mais centralizada for a mediana em relação à caixa, menos assimétricos são os resultados. Ainda, quanto menor for o comprimento dos segmentos (“bigodes”), menor será a dispersão dos resultados.

Por fim, o box-plot foi utilizado para realizar uma comparação entre os resultados obtidos por meio das simulações utilizando o método Silveira e o método da Regionalização, utilizou-se das equações de regionalização descritas em UFSM (2001); UFRGS (2001), cujos estudos de regionalização foram realizados nas regiões de inserção das bacias utilizadas nesse estudo. Essa comparação foi possível haja vista que as escalas de áreas das bacias usadas naqueles estudos contemplaram as escalas que aqui foram utilizadas. Portanto, as equações de regionalização resultantes daquelas pesquisas (Tabela 4.2) puderam ser utilizadas nesse estudo para fins de determinação das vazões Q50 e Q95, regionalizadas.

Tabela 4.2 Equações de Regionalização para determinação das vazões Q50 e Q95

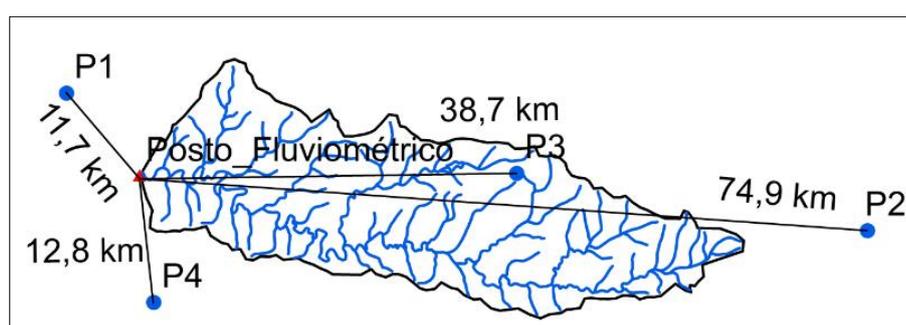
Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Eq. de Regionalização (UFSM e UFRGS, 2001)	
Comandaí	817	$Q_{50} = 0,0105 A^{1,036}$	$Q_{95} = 0,00245 A^{1,02}$
Piratini	932		
Jaguarizinho	926	$Q_{50} = 0,00334 A^{1,109}$	$Q_{95} = 0,00334 A^{1,109}$
Vacacaí	965		

Fonte: UFSM e UFRGS (2001)

#### 4.3.2 Influência quanto à disposição espacial dos postos pluviométricos na bacia

Esta avaliação seguiu sequência análoga ao primeiro objetivo. A diferença que, ao invés de avaliar os erros em relação aos grupos constituídos, aqui as análises foram realizadas considerando os erros de cada posto pluviométrico e as combinações, separadamente. O objetivo foi verificar qual dos postos ou a combinação destes poderia resultar em menores erros nas vazões calculadas pelo método Silveira, com base na localização dos postos em relação à área da bacia. Ou seja, quais os reflexos nas vazões calculadas utilizando-se das séries de precipitação de um posto localizado à montante ou a jusante à seção fluviométrica. Ainda, verificar se as séries de vazões calculadas por meio de dados pluviométricos de postos localizados externamente à bacia apresentariam maiores erros nos resultados das simulações quando comparadas com as séries obtidas com base nas informações de postos localizados no interior da bacia considerando a distância em linha reta entre os postos. Na Figura 4.5 apresenta-se um exemplo de avaliação da disposição espacial dos postos pluviométricos.

Figura 4.5 Distância entre os postos de medição na bacia Comandaí



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio da metodologia proposta estão apresentados nesse item seguindo a seguinte sequência: determinação da precipitação média na bacia e seleção dos eventos de estiagem; aplicação do método Silveira e obtenção dos parâmetros Cinf e Ksub para os eventos de estiagem selecionados e as simulações dos cenários; comparação entre as séries de vazões calculadas e as observadas considerando o agrupamento dos pluviômetros e suas combinações visando analisar a influência do número de postos nos resultados das simulações; avaliação da disposição espacial dos postos por meio da comparação entre as séries de vazões calculadas e as observadas considerando a localização espacial dos destes em relação à área da bacia.

### 5.1 PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA E SELEÇÃO DOS EVENTOS DE ESTIAGEM

Dentre as séries originais foram selecionados um total de 117 eventos de estiagem e juntamente com as combinações dessas, o total geral de simulações resultantes foi de 1407 distribuídas entre os cenários de chuvas pré-estabelecidos para cada bacia em estudo (Tabela 5.1).

Os resultados das combinações, assim como a distribuição do número de eventos selecionados para cada uma das bacias utilizadas é apresentado nas Tabelas 5.2 a 5.5. Observa-se que a denominação abreviada “P” do posto pluviométrico refere-se ao posto pluviométrico e “C”, as combinações efetuadas.

Tabela 5.1 Número total de eventos e período de análise das séries de dados hidrológicos

Bacia Hidrográfica	Período utilizado	Nº total de eventos	Nº total de cenários de chuva
Comandaí	mai/2003 - mar/2006	25	375
Jaguarzinho	fev/1983 - abr/1990	39	585
Piratini	fev/2010 - mar/2015	24	360
Vacacaí	ago/2000 - nov/2004	29	87

Pode-se verificar que a bacia com o maior número de eventos selecionados foi à Jaguarzinho. Das quatro bacias, esta foi a que teve o maior período de informações de precipitação das séries dos postos. Logo, foi possível selecionar um maior número de eventos.

Das bacias utilizadas para esse estudo, duas delas já haviam sido aproveitadas no estudo realizado por Horn (2016). A bacia Comandaí e a Vacacaí. Importante ressaltar que neste trabalho o período de seleção dos eventos foi entre mai/2003 a marc/2006 e de ago/2000 a nov/2004, conforme se observa na Tabela 5.1.

Como pode ser verificado, na bacia Comandaí foram selecionados vinte e cinco eventos (Tabela 5.2) por posto e também em cada uma das combinações feitas. Para as demais bacias, trinta e nove e vinte e quatro eventos nas bacias Jaguarzinho e Piratini, respectivamente (Tabelas 5.3 e 5.4).

A bacia Vacacaí foi a que teve o menor número de eventos escolhidos, entretanto, nessa bacia obteve-se informações de precipitação de apenas dois postos de medição, razão pela qual não foram realizadas um número maior de combinações refletindo no total de eventos obtidos (Tabela 5.5).

Tabela 5.2 Cenários de chuva na bacia Comandaí

Posto	Pluviométrico	Cód. ANA	Município	Nome*	Posto Pluv.	Área** (%)
Campina das Missões		2754013	Campina das Missões	P1	P1	100
Boa Vista		2854001	Catuípe	P2	P2	100
Girúá		2854003	Girúá	P3	P3	100
Ponte Mística		2854015	Rolador	P4	P4	100
Campina das Missões		2754013	Campina das Missões	C1	P1	59,5
Boa Vista		2854001	Catuípe		P2	40,5
Campina das Missões		2754013	Campina das Missões	C2	P1	25,7
Girúá		2854003	Girúá		P3	74,3
Campina das Missões		2754013	Campina das Missões	C3	P1	8,0
Ponte Mística		2854015	Rolador		P4	92,0
Girúá		2854003	Girúá	C4	P3	97,2
Boa Vista		2854001	Catuípe		P2	2,8
Ponte Mística		2854015	Rolador	C5	P4	33,3
Girúá		2854003	Girúá		P3	66,7
Ponte Mística		2854015	Rolador	C6	P4	69,6
Boa Vista		2854001	Catuípe		P2	30,4

Legenda:

(\*) Denominação convencionada para os postos pluviométricos e as combinações entre estes.

(\*\*) Área de influência de cada posto Pluviométrico nas bacias calculadas pelo Método de Thiessen.

Tabela 5.2 (Continuação)

Campina das Missões	2754013	Campina das Missões		P1	25,8
Girúá	2854003	Girúá	C7	P3	71,4
Boa Vista	2854001	Catuípe		P2	2,8
Campina das Missões	2754013	Campina das Missões		P1	8,0
Ponte Mística	2854015	Rolador	C8	P4	61,6
Boa Vista	2854001	Catuípe		P2	30,4
Campina das Missões	2754013	Campina das Missões		P1	8,0
Ponte Mística	2854015	Rolador	C9	P4	25,3
Girúá	2854003	Girúá		P3	66,7
Ponte Mística	2854015	Rolador		P4	33,2
Girúá	2854003	Girúá	C10	P3	63,9
Boa Vista	2854001	Catuípe		P2	2,8
Campina das Missões	2754013	Campina das Missões		P1	8,0
Boa Vista	2854001	Catuípe	Pm	P2	2,8
Girúá	2854003	Girúá		P3	63,9
Ponte Mística	2854015	Rolador		P4	25,3

Tabela 5.3 Cenários de chuva na bacia Jaguarizinho.

Posto	Pluviométrico	Cód. ANA	Município	Nome*	Posto Pluv.	Área** (%)
Ernesto Alves		2954004	Santiago	P5	P5	100
Florida		2954030	Santiago	P6	P6	100
Santiago		2954020	Santiago	P7	P7	100
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó	P8	P8	100
Ernesto Alves		2954004	Santiago	C1	P5	29,3
Florida		2954030	Santiago		P6	70,7
Ernesto Alves		2954004	Santiago	C2	P5	42,7
Santiago		2954020	Santiago		P7	57,2
Ernesto Alves		2954004	Santiago	C3	P5	45,8
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	57,2
Florida		2954030	Santiago	C4	P6	35,8
Santiago		2954020	Santiago		P7	64,2
Santiago		2954020	Santiago	C5	P7	64,1
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	35,9
Florida		2954030	Santiago	C6	P6	52,5
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	47,4
Ernesto Alves		2954004	Santiago		P5	12,9
Florida		2954030	Santiago	C7	P6	32,8
Santiago		2954020	Santiago		P7	54,2
Ernesto Alves		2954004	Santiago		P5	29,1
Santiago		2954020	Santiago	C8	P7	35,3
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	35,6
Ernesto Alves		2954004	Santiago		P5	23,9
Florida		2954030	Santiago	C9	P6	32,6
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	43,5
Florida		2954030	Santiago		P6	32,9
Santiago		2954020	Santiago	C10	P7	38,0
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	29,0
Ernesto Alves		2954004	Santiago		P5	13,0
Florida		2954030	Santiago	Pm	P6	30,0
Santiago		2954020	Santiago		P7	28,1
Esquina dos Lima		2954031	Capão do Cipó		P8	29,0

Tabela 5.4 Cenários de chuva na bacia Piratini

Posto	Pluviométrico	Cód. ANA	Município	Nome*	Posto Pluv.	Área** (%)
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões	P9	P9	100
São Bernardo		2854013	Tupanciretã	P10	P10	100
Jóia		2854018	Jóia	P11	P11	100
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões	P12	P12	100
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões	C1	P9	0
São Bernardo		2854013	Tupanciretã		P10	100
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões	C2	P9	25,9
Jóia		2854018	Jóia		P11	74,1
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões	C3	P9	41,1
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	58,9
Jóia		2854018	Jóia	C4	P11	67,0
São Bernardo		2854013	Tupanciretã		P10	33,0
São Bernardo		2854013	Tupanciretã	C5	P10	76,4
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	23,6
Jóia		2854018	Jóia	C6	P11	70,5
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	29,5
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões		P9	0
São Bernardo		2854013	Tupanciretã	C7	P10	67,0
Jóia		2854018	Jóia		P11	33,0
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões		P9	0
São Bernardo		2854013	Tupanciretã	C8	P10	76,4
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	23,6
Coimbra		2854012	São Miguel das Missões		P9	24,0
Jóia		2854018	Jóia	C9	P11	48,3
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	27,7
São Bernardo		2854013	Tupanciretã		P10	62,3
Jóia		2854018	Jóia	C10	P11	22,7
Passo Major Zeferino		2854005	São Miguel das Missões		P12	14,9

Tabela 5.5 Cenários de chuva na bacia Vacacaí

Posto	Pluviométrico	Cód. ANA	Município	Nome*	Posto Pluv.	Área** (%)	nº de eventos
Granja Umbu		3054016	Rosário do Sul	P13	P13	100	29
Ibare		3054019	Lavras do Sul	P14	P14	100	29
Granja Umbu		3054016	Rosário do Sul	Pm	P13	19,9	29
Ibare		3054019	Lavras do Sul		P14	80,1	

## 5.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO SILVEIRA E AJUSTE DOS PARÂMETROS PARA OS EVENTOS DE ESTIAGEM SELECIONADOS

A aplicação do método foi realizada para todos os eventos pré-selecionados considerando:

- a) Aplicação do método Silveira para os eventos com as séries de precipitação provenientes de cada um dos postos pluviométricos de cada uma das bacias;
- b) Aplicação do método Silveira para os eventos com as séries de precipitação média resultante das combinações das séries de dados entre os postos de medição.

Nas Tabelas 5.6 a 5.9 são apresentadas as estatísticas convencionais obtidas para os parâmetros  $K_{sub}$  e  $C_{inf}$  das bacias estudadas.

Analisando a verifica-se que na bacia Comandaí o valor máximo do  $C_{fin}$  resultante de todas as simulações foi de 1,00 e o menor valor 0,12. A média obtida para essa bacia variou entre 0,27 e 0,36. Para o  $K_{sub}$ , os valores apresentaram uma maior amplitude. Ressalta-se que conforme descrevem Silveira (1997) e Horn (2016) aquele parâmetro é o que tem maior sensibilidade em relação aos erros. Ou seja, valores relativamente elevados de  $C_{inf}$  (maiores que 0,6), geralmente estão associados a maiores erros nas vazões calculadas. O autor do método também indica que os parâmetros  $C_{inf}$  e  $K_{sub}$  se comportam de maneira independente. Como resultado, pode-se obter uma curva de permanência com ajuste satisfatório mesmo com um valor elevado do  $K_{sub}$  (Horn, 2016).

Para a bacia Jaguarizinho, a média observada do  $C_{inf}$  foi relativamente constante para todas as situações analisadas. Entretanto, o desvio padrão médio sugere maior dispersão entre os valores obtidos. Dentre os postos e as combinações destes, o pluviômetro 2 (P2) e a combinação 4 (C4) resultaram nas menores médias. Opostamente, o P4 apresentou tanto a média mais elevada, quanto a maior amplitude entre máximos e mínimos. Conforme se observa na Tabela 5.8, os valores de  $C_{inf}$  obtidos na bacia Piratini foram bastante semelhantes quando comparados entre os postos e suas combinações. Embora os resultados tenham sido similares, o P3 apresentou o menor valor médio (0,32), seguido do P2, Pm, C2 e C4.

Os resultados da bacia Vacacaí indicam que o P1 expôs as menores médias e amplitude dentre as séries utilizadas.

Tabela 5.6 Estatística dos parâmetros Ksub e Cinf obtidos na bacia Comandaí.

Data Ev.	Ksub	Cinf														
		P1	P2	P3	P4	Pmédia	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
29/06/2003	18,12	0,42	0,30	0,44	0,40	0,42	0,37	0,43	0,40	0,43	0,42	0,37	0,43	0,37	0,43	0,42
31/07/2003	52,99	0,45	0,26	0,35	0,38	0,36	0,34	0,37	0,38	0,35	0,36	0,34	0,37	0,34	0,36	0,35
19/08/2003	54,75	0,40	0,25	0,30	0,38	0,33	0,32	0,32	0,38	0,30	0,35	0,32	0,30	0,34	0,32	0,32
31/08/2003	25,11	0,40	0,34	0,36	0,40	0,39	0,38	0,37	0,40	0,36	0,38	0,38	0,37	0,38	0,37	0,38
15/09/2003	53,25	0,30	0,24	0,24	0,29	0,26	0,27	0,25	0,28	0,24	0,25	0,26	0,35	0,27	0,25	0,25
14/10/2003	11,41	0,25	0,23	0,19	0,19	0,20	0,25	0,21	0,19	0,20	0,20	0,20	0,22	0,21	0,20	0,20
26/02/2004	48,08	0,15	0,15	0,14	0,20	0,16	0,16	0,14	0,20	0,14	0,16	0,20	0,15	0,20	0,16	0,16
19/03/2004	21,02	0,34	0,26	0,26	0,47	0,33	0,30	0,28	0,46	0,26	0,32	0,40	0,28	0,40	0,32	0,33
25/03/2004	22,18	0,34	0,27	0,27	0,45	0,34	0,30	0,30	0,48	0,25	0,32	0,40	0,30	0,42	0,33	0,34
03/06/2004	16,24	0,41	0,25	0,33	0,27	0,33	0,34	0,36	0,30	0,34	0,33	0,28	0,35	0,29	0,33	0,32
17/06/2004	13,91	0,60	0,25	0,24	0,50	0,30	0,40	0,29	0,52	0,24	0,30	0,40	0,29	0,41	0,30	0,30
13/08/2004	30,05	0,38	0,23	0,28	0,30	0,30	0,32	0,31	0,30	0,28	0,28	0,28	0,30	0,30	0,30	0,30
02/09/2004	21,02	0,31	0,24	0,31	0,32	0,32	0,28	0,31	0,33	0,30	0,31	0,30	0,30	0,30	0,32	0,32
04/10/2004	11,59	0,24	0,17	0,20	0,24	0,22	0,21	0,21	0,25	0,20	0,22	0,23	0,21	0,22	0,22	0,22
22/11/2004	92,40	0,29	0,30	0,31	0,29	0,30	0,30	0,31	0,28	0,30	0,30	0,29	0,31	0,29	0,30	0,30
25/12/2004	47,33	0,18	0,25	0,24	0,20	0,23	0,21	0,22	0,19	0,23	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22
12/02/2005	20,62	0,23	0,17	0,19	0,29	0,23	0,23	0,20	0,30	0,18	0,22	0,28	0,20	0,28	0,23	0,23
19/02/2005	57,39	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,15	0,14	0,12	0,12	0,14	0,12	0,14	0,12	0,12
26/02/2005	14,24	0,58	0,38	0,50	0,80	0,58	0,52	0,50	0,13	0,45	0,55	0,70	0,50	0,70	0,58	0,58
04/03/2005	11,24	0,92	0,54	0,67	0,95	0,92	0,68	0,80	1,00	0,65	0,80	0,85	0,80	0,95	0,85	0,80
01/05/2005	11,19	0,15	0,17	0,20	0,16	0,19	0,16	0,20	0,16	0,20	0,19	0,17	0,19	0,17	0,19	0,19
10/07/2005	20,98	0,42	0,35	0,45	0,32	0,41	0,40	0,45	0,33	0,45	0,40	0,34	0,45	0,34	0,41	0,40
29/07/2005	16,75	0,52	0,43	0,47	0,43	0,47	0,49	0,48	0,43	0,47	0,45	0,43	0,49	0,44	0,46	0,46
12/08/2005	28,14	0,42	0,33	0,40	0,34	0,39	0,38	0,41	0,35	0,40	0,38	0,35	0,41	0,35	0,39	0,38
11/12/2005	23,62	0,28	0,30	0,32	0,28	0,32	0,32	0,31	0,28	0,33	0,31	0,28	0,31	0,31	0,30	0,31
Média	29,75	0,36	0,27	0,31	0,36	0,34	0,32	0,33	0,34	0,31	0,33	0,34	0,33	0,35	0,33	0,33
Desv. Padrão	20,22	0,17	0,09	0,13	0,18	0,16	0,12	0,14	0,17	0,12	0,14	0,15	0,14	0,17	0,15	0,14
CV	0,68	0,47	0,34	0,40	0,51	0,47	0,38	0,42	0,51	0,39	0,43	0,46	0,43	0,49	0,45	0,43
Máximo	92,40	0,92	0,54	0,67	0,95	0,92	0,68	0,80	1,00	0,65	0,80	0,85	0,80	0,95	0,85	0,80
Mínimo	11,19	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,13	0,12	0,12	0,14	0,12	0,14	0,12	0,12

Tabela 5.7 Estatística dos parâmetros de ajuste da bacia Jaguarzinho

Data Ev.	Ksub	Cinf														
		P5	P6	P7	P8	Pm	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
06/03/1983	8,44	0,29	0,23	0,27	0,25	0,26	0,28	0,25	0,26	0,26	0,27	0,24	0,26	0,28	0,26	0,25
25/03/1983	12,33	0,27	0,20	0,24	0,25	0,23	0,25	0,23	0,25	0,22	0,24	0,22	0,23	0,25	0,23	0,23
25/11/1983	8,54	0,60	0,60	0,87	1,12	0,96	0,78	0,70	0,87	0,90	1,10	0,80	0,85	0,90	0,90	0,98
13/03/1984	31,77	0,09	0,10	0,13	0,17	0,13	0,12	0,10	0,12	0,12	0,15	0,13	0,12	0,14	0,13	0,14
10/04/1984	20,87	0,13	0,15	0,14	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,14	0,15	0,16	0,16
30/04/1984	22,48	0,17	0,17	0,15	0,24	0,18	0,15	0,17	0,19	0,16	0,17	0,19	0,16	0,18	0,19	0,18
27/07/1984	8,52	0,59	0,64	0,63	0,66	0,64	0,64	0,62	0,60	0,65	0,64	0,65	0,64	0,64	0,65	0,65
16/08/1984	12,56	0,64	0,71	0,56	0,74	0,68	0,60	0,71	0,70	0,62	0,64	0,75	0,65	0,70	0,74	0,68
01/09/1984	10,30	0,89	0,96	0,62	1,30	0,92	0,69	1,00	1,10	0,72	0,80	1,15	0,75	0,90	1,12	0,90
16/11/1984	7,79	0,37	0,50	0,39	0,75	0,51	0,40	0,45	0,52	0,45	0,51	0,60	0,45	0,50	0,55	0,51
24/11/1984	11,41	0,27	0,34	0,38	0,50	0,36	0,27	0,30	0,35	0,30	0,35	0,40	0,30	0,35	0,37	0,36
24/12/1984	10,55	0,23	0,23	0,23	0,20	0,23	0,23	0,23	0,20	0,20	0,23	0,20	0,23	0,24	0,20	0,23
23/04/1985	14,01	0,23	0,26	0,22	0,21	0,22	0,22	0,25	0,20	0,23	0,22	0,23	0,24	0,22	0,23	0,23
24/06/1985	13,87	0,50	0,36	0,43	0,65	0,45	0,44	0,40	0,58	0,40	0,48	0,45	0,40	0,52	0,50	0,44
14/07/1985	7,39	0,43	0,34	0,35	0,42	0,37	0,37	0,38	0,42	0,35	0,37	0,38	0,36	0,40	0,40	0,37
06/11/1985	12,38	0,12	0,16	0,11	0,21	0,14	0,12	0,15	0,15	0,12	0,14	0,18	0,12	0,15	0,18	0,15
04/12/1985	11,30	0,12	0,17	0,65	0,65	0,32	0,55	0,17	0,60	0,30	0,50	0,30	0,30	0,60	0,35	0,35
04/05/1986	24,87	0,29	0,12	0,13	0,14	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
09/07/1986	14,28	0,42	0,35	0,40	0,39	0,38	0,41	0,38	0,40	0,38	0,40	0,37	0,38	0,41	0,39	0,38
10/09/1986	23,56	0,22	0,22	0,24	0,26	0,23	0,23	0,22	0,24	0,23	0,25	0,25	0,23	0,23	0,23	0,25
02/10/1986	10,36	0,30	0,33	0,28	0,33	0,31	0,29	0,31	0,30	0,30	0,31	0,33	0,30	0,30	0,32	0,32
23/01/1987	11,79	0,05	0,12	0,12	0,15	0,10	0,08	0,08	0,09	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,13
29/05/1987	18,64	0,26	0,26	0,30	0,32	0,29	0,29	0,26	0,28	0,28	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29
19/07/1987	11,65	0,26	0,21	0,26	0,26	0,24	0,26	0,23	0,25	0,24	0,26	0,23	0,24	0,26	0,24	0,24
23/09/1987	13,87	0,34	0,39	0,42	0,29	0,35	0,40	0,38	0,30	0,40	0,35	0,34	0,40	0,35	0,33	0,36
07/10/1987	8,83	0,36	0,26	0,34	0,33	0,31	0,35	0,30	0,34	0,30	0,34	0,28	0,31	0,35	0,30	0,31
07/02/1988	6,86	0,29	0,40	0,44	0,25	0,34	0,38	0,35	0,26	0,42	0,35	0,31	0,40	0,32	0,30	0,36
14/03/1988	12,75	0,26	0,12	0,16	0,16	0,16	0,18	0,16	0,20	0,12	0,16	0,15	0,15	0,20	0,16	0,15
20/05/1988	16,07	0,40	0,26	0,22	0,22	0,25	0,26	0,32	0,27	0,24	0,22	0,25	0,25	0,25	0,26	0,23
31/05/1988	13,16	0,55	0,38	0,30	0,30	0,34	0,34	0,45	0,35	0,32	0,30	0,32	0,35	0,35	0,35	0,32
14/07/1988	12,55	0,52	0,52	0,47	0,44	0,48	0,48	0,52	0,45	0,48	0,45	0,48	0,48	0,46	0,48	0,46
29/07/1988	17,96	0,53	0,52	0,48	0,51	0,50	0,51	0,52	0,50	0,51	0,48	0,50	0,49	0,53	0,52	0,50
27/08/1988	9,41	0,26	0,27	0,65	0,32	0,32	0,42	0,26	0,30	0,40	0,50	0,30	0,35	0,38	0,30	0,35
10/10/1988	7,86	0,22	0,28	0,29	0,31	0,28	0,26	0,25	0,25	0,28	0,30	0,30	0,28	0,28	0,27	0,30
08/12/1988	19,82	0,09	0,09	0,13	0,11	0,11	0,12	0,10	0,10	0,11	0,13	0,10	0,12	0,13	0,10	0,12
18/04/1989	11,23	0,15	0,16	0,14	0,18	0,16	0,14	0,15	0,16	0,14	0,15	0,17	0,14	0,15	0,17	0,15
13/05/1989	9,27	0,22	0,26	0,25	0,24	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,26	0,24	0,24	0,26
19/10/1989	11,41	0,48	0,28	0,50	0,23	0,32	0,50	0,35	0,30	0,23	0,33	0,25	0,40	0,35	0,28	0,30
08/01/1990	6,62	0,20	0,14	0,12	0,15	0,13	0,15	0,16	0,15	0,12	0,14	0,15	0,12	0,15	0,16	0,15
Média	13,26	0,32	0,31	0,33	0,37	0,33	0,32	0,32	0,34	0,31	0,34	0,33	0,32	0,34	0,33	0,33
Desv. Padrão	5,56	0,18	0,19	0,18	0,26	0,20	0,17	0,19	0,22	0,18	0,20	0,21	0,18	0,20	0,22	0,20
CV	0,42	0,56	0,60	0,55	0,71	0,61	0,53	0,61	0,64	0,58	0,60	0,65	0,56	0,58	0,65	0,60
Máximo	31,77	0,89	0,96	0,87	1,30	0,96	0,78	1,00	1,10	0,90	1,10	1,15	0,85	0,90	1,12	0,98
Mínimo	6,62	0,05	0,09	0,11	0,11	0,10	0,08	0,08	0,09	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12

Tabela 5.8 Estatística dos parâmetros de ajuste da bacia Piratini.

Data Ev.	Ksub	Cinf														
		P9	P10	P11	P12	Pm	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
09/03/2010	47,04	0,33	0,42	0,32	0,29	0,39	0,41	0,32	0,31	0,35	0,40	0,32	0,39	0,40	0,33	0,39
31/03/2010	35,17	0,29	0,37	0,30	0,27	0,34	0,37	0,32	0,28	0,34	0,35	0,31	0,35	0,35	0,30	0,35
08/04/2010	101,00	0,12	0,15	0,12	0,11	0,14	0,15	0,12	0,55	0,13	0,14	0,12	0,14	0,14	0,12	0,14
15/04/2010	61,99	0,22	0,28	0,22	0,20	0,26	0,28	0,22	0,21	0,25	0,26	0,23	0,27	0,26	0,23	0,26
11/06/2010	37,44	0,11	0,08	0,10	0,11	0,09	0,07	0,10	0,11	0,02	0,08	0,10	0,08	0,08	0,11	0,09
02/07/2010	24,95	0,54	0,52	0,57	0,59	0,56	0,52	0,59	0,57	0,58	0,55	0,60	0,56	0,54	0,60	0,56
08/08/2010	25,36	0,55	0,51	0,59	0,54	0,56	0,51	0,60	0,55	0,58	0,53	0,60	0,55	0,54	0,60	0,56
21/08/2010	79,88	0,45	0,41	0,47	0,45	0,45	0,41	0,48	0,46	0,45	0,43	0,48	0,44	0,43	0,48	0,45
16/11/2010	71,24	0,26	0,25	0,23	0,27	0,25	0,24	0,24	0,27	0,23	0,25	0,25	0,44	0,25	0,26	0,25
18/05/2011	21,96	0,40	0,55	0,37	0,41	0,48	0,55	0,38	0,41	0,42	0,52	0,39	0,48	0,52	0,39	0,49
13/09/2011	30,12	0,58	0,39	0,39	0,61	0,43	0,39	0,43	0,62	0,40	0,45	0,44	0,40	0,45	0,49	0,44
19/10/2011	14,77	0,36	0,36	0,34	0,31	0,37	0,35	0,36	0,33	0,36	0,36	0,35	0,37	0,35	0,35	0,37
16/11/2011	28,11	0,32	0,25	0,25	0,25	0,27	0,25	0,27	0,28	0,26	0,27	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28
13/12/2011	34,76	0,42	0,30	0,31	0,37	0,34	0,30	0,35	0,38	0,32	0,34	0,35	0,32	0,34	0,37	0,34
03/01/2012	38,46	0,28	0,24	0,23	0,24	0,26	0,22	0,25	0,26	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26
07/05/2012	31,22	0,15	0,13	0,13	0,13	0,15	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
27/06/2012	24,34	0,15	0,12	0,14	0,15	0,13	0,12	0,14	0,14	0,13	0,12	0,15	0,13	0,13	0,15	0,14
09/11/2012	22,26	0,36	0,43	0,34	0,33	0,41	0,42	0,35	0,35	0,38	0,42	0,34	0,41	0,42	0,35	0,41
20/01/2013	38,23	0,35	0,27	0,32	0,36	0,30	0,27	0,33	0,35	0,31	0,29	0,33	0,29	0,29	0,34	0,30
24/04/2013	47,67	0,32	0,31	0,28	0,30	0,32	0,32	0,29	0,31	0,30	0,32	0,29	0,31	0,32	0,30	0,32
06/10/2013	47,49	0,78	0,65	0,62	0,66	0,71	0,62	0,68	0,70	0,65	0,70	0,67	0,68	0,71	0,72	0,71
24/08/2014	23,66	0,48	0,41	0,40	0,44	0,43	0,42	0,42	0,45	0,42	0,42	0,41	0,43	0,42	0,44	0,43
15/11/2014	20,44	0,26	0,40	0,43	0,34	0,41	0,40	0,38	0,31	0,43	0,39	0,41	0,41	0,39	0,36	0,41
17/03/2015	30,14	0,21	0,23	0,21	0,28	0,27	0,23	0,23	0,26	0,24	0,26	0,25	0,25	0,26	0,25	0,27
Média	39,07	0,35	0,33	0,32	0,33	0,35	0,33	0,33	0,36	0,33	0,34	0,34	0,35	0,34	0,34	0,35
Desv. Padrão	20,85	0,16	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
CV	0,53	0,47	0,43	0,45	0,46	0,43	0,43	0,45	0,43	0,46	0,44	0,45	0,42	0,43	0,45	0,43
Máximo	101,00	0,78	0,65	0,62	0,66	0,71	0,62	0,68	0,70	0,65	0,70	0,67	0,68	0,71	0,72	0,71
Mínimo	14,77	0,11	0,08	0,10	0,11	0,09	0,07	0,10	0,11	0,02	0,08	0,10	0,08	0,08	0,11	0,09

Analisando o sumário estatístico do Cinf (Tabela 5.10) para as quatro bacias utilizadas pode-se verificar que não houve grande heterogeneidade entre as médias gerais em todas as situações nas quatro bacias estudadas. Contudo, em geral, valor de Cinf maior, implicou em maiores erros, o que já era esperado dado às observações realizadas em trabalhos anteriores.

O Cinf é um parâmetro relativamente sensível sendo que seu ajuste requer atenção, já que uma pequena variação no valor deste pode resultar em significativas variações nas vazões calculadas. O Cinf, pelas características globais que desempenha no modelo acaba incorporando parcela de variáveis como a infiltração, por exemplo. Como observado por Horn (2016), pode-se encontrar valores elevados de Cinf, próximos da unidade, ou até mesmo maiores, mesmo com um ajuste razoável da curva de permanência calculada. Logo, sendo o Cinf um parâmetro

relacionado à parcela de água da precipitação que infiltra no solo, valores elevados deste, maiores do que 0,6 implicam na perda do sentido e a uma irrealidade física, conforme salientam Silveira (1997) e Horn (2016). Alguns valores de Cinf, inclusive foram, superiores a 1,0, ou seja, neste caso a não ser que teria um aporte externo de água na bacia que não o da precipitação, significaria que toda a água que choveu infiltrou, o que é fisicamente impossível. Assim, poder-se-ia caracterizá-lo como sendo um indicador da parcela de água que infiltra na bacia e que sustenta o complexo hidrogeológico e conseqüentemente as vazões no período de estiagem.

Tabela 5.9 Estatística dos parâmetros de ajuste obtidos na bacia Vacacaí.

Data Ev.	Ksub	Cinf		
		P13	P14	Pm
29/09/2000	10,70	0,28	0,26	0,27
19/11/2000	8,18	0,22	0,20	0,20
06/12/2000	21,64	0,13	0,13	0,13
27/07/2001	11,76	0,52	0,52	0,52
13/08/2001	30,76	0,22	0,19	0,19
21/09/2001	11,67	0,20	0,16	0,17
23/10/2001	12,12	0,17	0,17	0,17
27/12/2001	12,49	0,28	0,24	0,26
06/04/2002	66,67	0,12	0,13	0,13
08/05/2002	9,25	0,27	0,18	0,19
25/06/2002	11,27	0,43	0,38	0,39
14/07/2002	56,88	0,63	0,60	0,61
13/12/2002	6,11	0,24	0,31	0,29
30/12/2002	3,25	1,20	1,90	1,80
11/04/2003	31,66	0,24	0,25	0,25
12/05/2003	47,42	0,21	0,21	0,21
29/06/2003	24,52	0,41	0,32	0,34
31/07/2003	11,62	0,56	0,77	0,72
16/08/2003	10,22	0,62	0,68	0,72
15/09/2003	37,20	0,20	0,20	0,21
14/10/2003	60,45	0,16	0,15	0,15
07/11/2003	46,57	0,12	0,12	0,12
03/01/2004	10,64	0,12	0,12	0,12
09/02/2004	18,09	0,18	0,11	0,18
20/03/2004	70,54	0,17	0,12	0,13
08/07/2004	11,07	0,48	0,30	0,27
26/08/2004	44,36	0,23	0,27	0,30
29/09/2004	15,67	0,20	0,21	0,21
20/11/2004	9,25	0,22	0,23	0,24
Média	24,90	0,31	0,33	0,33
Desv. Padrão	20,07	0,23	0,35	0,33
CV	0,81	0,74	1,07	1,01
Máximo	70,54	1,20	1,90	1,80
Mínimo	3,25	0,12	0,11	0,12

Outra medida que deve ser destacada na avaliação entre um universo de resultados é o coeficiente de variação (cv). O cv é um valor adimensional resultante da variabilidade relativa, ou seja, é uma medida de relação entre o desvio padrão e a média dos dados e remete a precisão experimental. Em percentual, significa quanto por cento o desvio padrão representa a média. Valores menores que dez por cento e maiores que trinta por cento são classificados como de ótima e péssima precisão,

respectivamente. Valores intermediários correspondem de boa a regular (GOMES, 2000).

Ao se avaliar a

Tabela 5.10, é possível observar que em nenhuma das bacias estudadas foram obtidos valores do cv abaixo de 0,3 (trinta por cento). Dessa forma, poder-se-ia deduzir que os valores apresentados são pouco precisos. Entretanto, Gomes (2000) destaca que essa classificação é sugerida baseada em experimentos agrícolas de campo e valores elevados refletem dados pouco homogêneos. Ainda assim, é possível extrapolar o seu uso para verificar a conformidade dos resultados.

Tamiosso (2012) encontrou valores entre 0,24 e 0,69 para os parâmetros Cinf e Ksub das bacias estudadas no seu trabalho. Destaca-se, porém, que o trabalho dessa autora foi baseado em bacias em escala de vertentes.

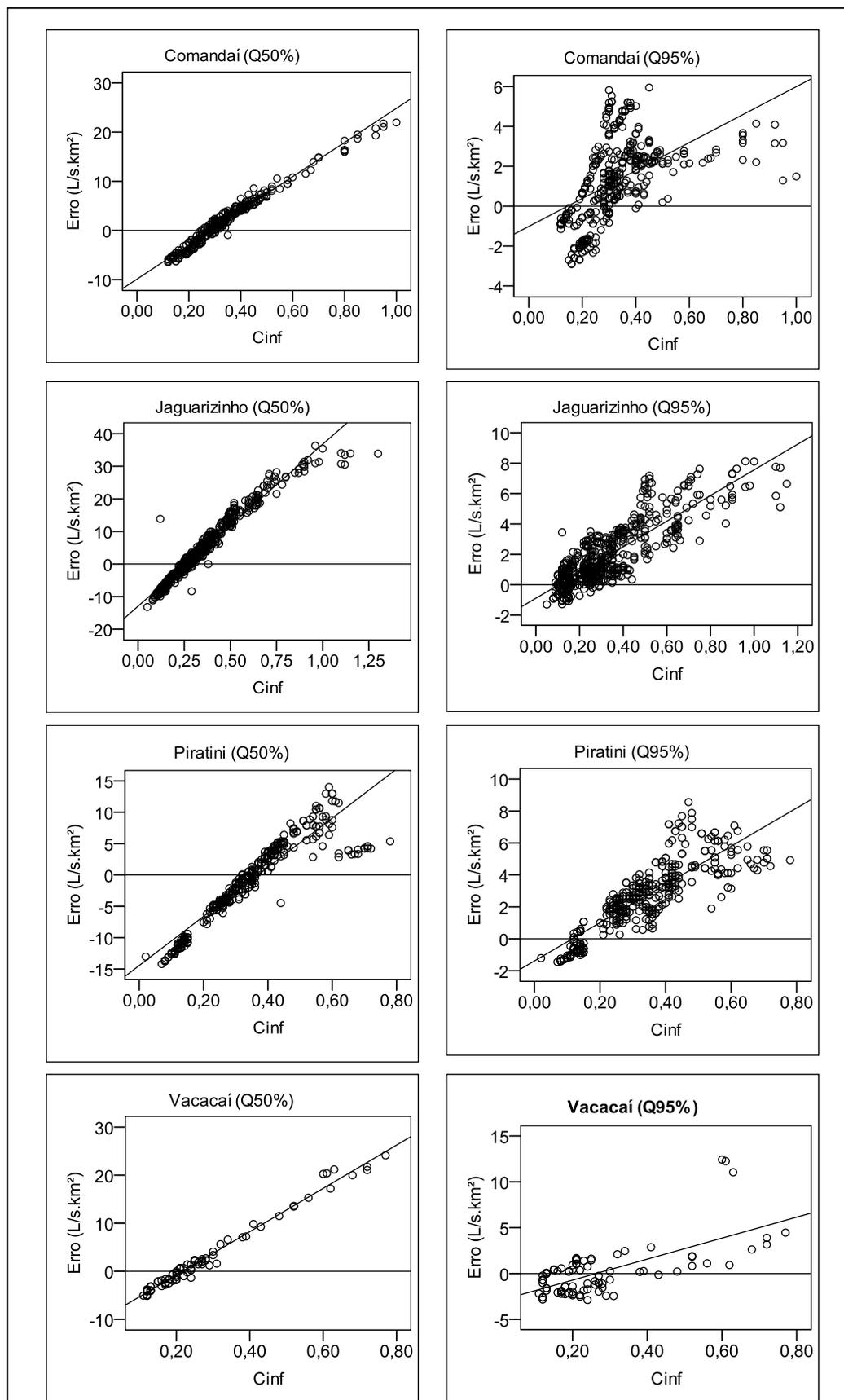
Nesse contexto, com base nos valores do cv obtidos pelos autores citados anteriormente, os valores do cv resultantes dessa pesquisa, na maioria entre 0,4 e 0,6, com exceção da bacia Vacacaí em que a variação do cv foi entre 0,74 e 1,07, podem ser considerados satisfatórios.

Tabela 5.10 Sumário estatístico dos parâmetros Ksub e Cinf das bacias avaliadas.

Bacia Hidrográfica	Estatística	Ksub	Cinf															
			P1	P2	P3	P4	Pmédia	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
Comandaí	Média	29,75	0,36	0,27	0,31	0,36	0,34	0,32	0,33	0,34	0,31	0,33	0,34	0,33	0,35	0,33	0,33	
	Desv. Padrão	20,22	0,17	0,09	0,13	0,18	0,16	0,12	0,14	0,17	0,12	0,14	0,15	0,14	0,17	0,15	0,14	
	CV	0,68	0,47	0,34	0,40	0,51	0,47	0,38	0,42	0,51	0,39	0,43	0,46	0,43	0,49	0,45	0,43	
	Máximo	92,40	0,92	0,54	0,67	0,95	0,92	0,68	0,80	1,00	0,65	0,80	0,85	0,80	0,95	0,85	0,80	
	Mínimo	11,19	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14	0,13	0,12	0,12	0,14	0,12	0,14	0,12	0,12	
Jaguarizinho	Média	13,26	0,32	0,31	0,33	0,37	0,33	0,32	0,32	0,34	0,31	0,34	0,33	0,32	0,34	0,33	0,33	
	Desv. Padrão	5,56	0,18	0,19	0,18	0,26	0,20	0,17	0,19	0,22	0,18	0,20	0,21	0,18	0,20	0,22	0,20	
	CV	0,42	0,56	0,60	0,55	0,71	0,61	0,53	0,61	0,64	0,58	0,60	0,65	0,56	0,58	0,65	0,60	
	Máximo	31,77	0,89	0,96	0,87	1,30	0,96	0,78	1,00	1,10	0,90	1,10	1,15	0,85	0,90	1,12	0,98	
	Mínimo	6,62	0,05	0,09	0,11	0,11	0,10	0,08	0,08	0,09	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	
Piratini	Média	39,20	0,35	0,34	0,32	0,34	0,35	0,33	0,34	0,36	0,33	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	
	Desv. Padrão	20,43	0,16	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	
	CV	0,52	0,46	0,42	0,44	0,45	0,42	0,42	0,44	0,42	0,45	0,43	0,44	0,41	0,42	0,44	0,42	
	Máximo	101,00	0,78	0,65	0,62	0,66	0,71	0,62	0,68	0,70	0,65	0,70	0,67	0,68	0,71	0,72	0,71	
	Mínimo	14,77	0,11	0,08	0,10	0,11	0,09	0,07	0,10	0,11	0,02	0,08	0,10	0,08	0,08	0,11	0,09	
Vacacaí	Média	24,90	0,31	0,33			0,33											
	Desv. Padrão	20,07	0,23	0,35			0,33											
	CV	0,81	0,74	1,07			1,01											
	Máximo	70,54	1,20	1,90			1,80											
	Mínimo	3,25	0,12	0,11			0,12											

Na Figura 5.1 são apresentadas as correlações entre os erros de todas as simulações e os respectivos Cinf para as vazões de permanência Q50% e Q95% das bacias estudadas.

Figura 5.1 Correlação entre os erros e o Cinf para as vazões Q50 e a Q95.



Avaliando os resultados das correlações, é possível concluir que em todas as bacias estudadas a tendência de forte correlação entre os erros e o Cinf se repetiu. Também foi testada a correlação somente entre os erros dos agrupamentos considerando o número de pluviômetros e os Cinf's relacionados. Para exemplificar, verifica-se na Figura 5.2 que a tendência foi semelhante ao que ocorreu quando se determinou a correlação dos erros com a série completa dos erros. Além disso, para as vazões de maior permanência ocorreu uma maior dispersão no conjunto de valores de Cinf resultando, conseqüentemente, em uma correlação menos acentuada. Ainda assim, pode-se assegurar que os erros de maior magnitude correspondem a um Cinf de maior valor.

Portanto, assim como já identificado por Silveira (1997) e Horn (2016), observou-se uma correlação entre os erros das simulações e o indicador Cinf, ou seja, quanto maior for o Cinf, há tendência de superestimativa das vazões calculadas, por outro lado, valores abaixo de 0,1, por exemplo, resulta em vazões subestimadas. Silveira (1997) indicou um intervalo de valores de Cinf entre 0,2 e 0,5. Todavia, Horn (2016) verificou ser possível a ampliação desse intervalo para 0,1 a 0,6. Valores fora dessa faixa, mesmo com o evento resultando em um ajuste relativamente razoável das curvas de permanência, podem significar valores discrepantes de erros.

Com relação ao Ksub, esse depende apenas dos dados observados das vazões. É obtido por meio da média entre os ksub 1 e 2. Logo, como a série de vazões utilizadas foi à mesma para todas as simulações realizadas na mesma bacia, o Ksub resultante foi apenas um para cada evento selecionado.

Verificou-se, em geral, acentuada amplitude entre os máximos e mínimos. Destaca-se, porém, que o Ksub é um parâmetro obtido a partir dos dados observados e, portanto, não passível de mudança durante o processo de simulação. Como mencionado anteriormente, o Ksub se comporta como um parâmetro independente no processo envolvido no método Silveira. Buscou-se, entretanto, avaliar uma possível relação entre os erros das simulações e o Ksub, cujos resultados podem ser observados na Figura 5.3.

Figura 5.2 Correlação entre os erros dos agrupamentos com 1 (G1) e 3 (G3) pluviômetros e o Cinf

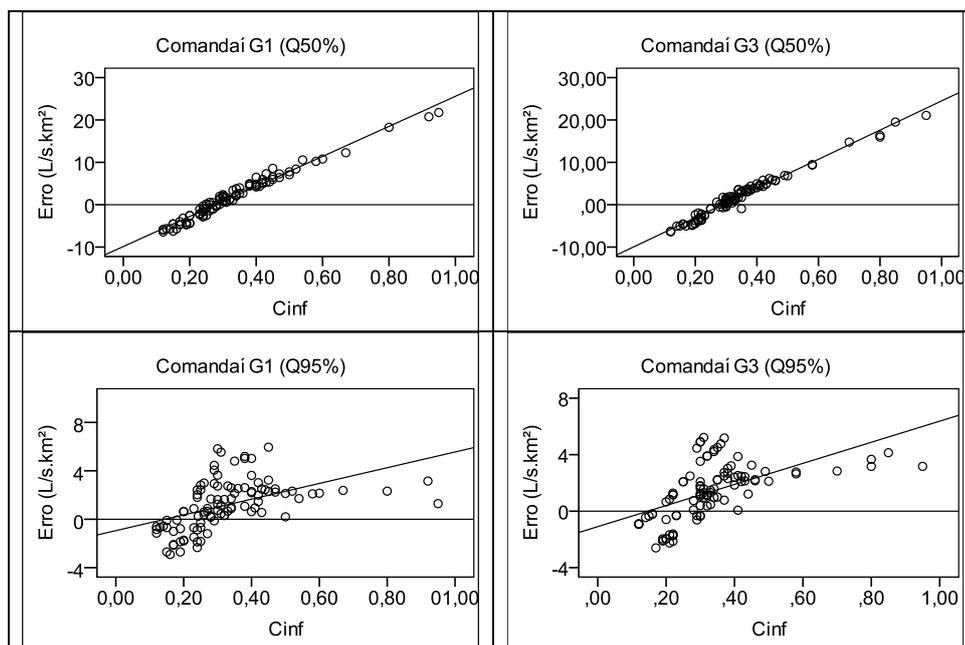
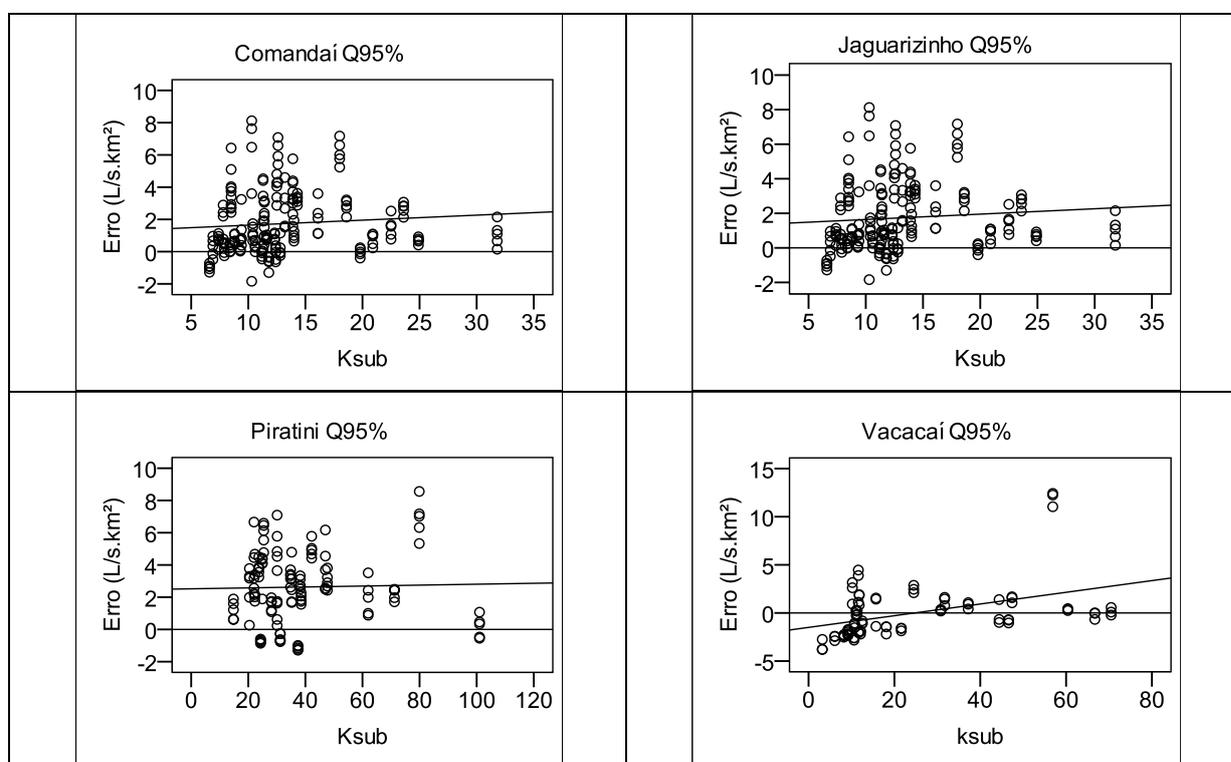


Figura 5.3 Correlação entre os erros e parâmetro Ksub para as vazões com 95% de permanência



Comandáí Q95%				Jaguarizinho Q95%			
		Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Ksub			Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Ksub
Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Correlação de Pearson	1	,511**	Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Correlação de Pearson	1	,088
	Sig. (bilateral)		,000		Sig. (bilateral)		,221
	N	125	125		N	195	195
Ksub	Correlação de Pearson	,511**	1	Ksub	Correlação de Pearson	,088	1
	Sig. (bilateral)		,000		Sig. (bilateral)		,221
	N	125	125		N	195	195
Piratini Q95%				Vacacaí Q95%			
		Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Ksub			Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	ksub
Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Correlação de Pearson	1	,027	Erro (L/s.km <sup>2</sup> )	Correlação de Pearson	1	,421**
	Sig. (bilateral)		,769		Sig. (bilateral)		,000
	N	120	120		N	87	87
Ksub	Correlação de Pearson	,027	1	ksub	Correlação de Pearson	,421**	1
	Sig. (bilateral)		,769		Sig. (bilateral)		,000
	N	120	120		N	87	87

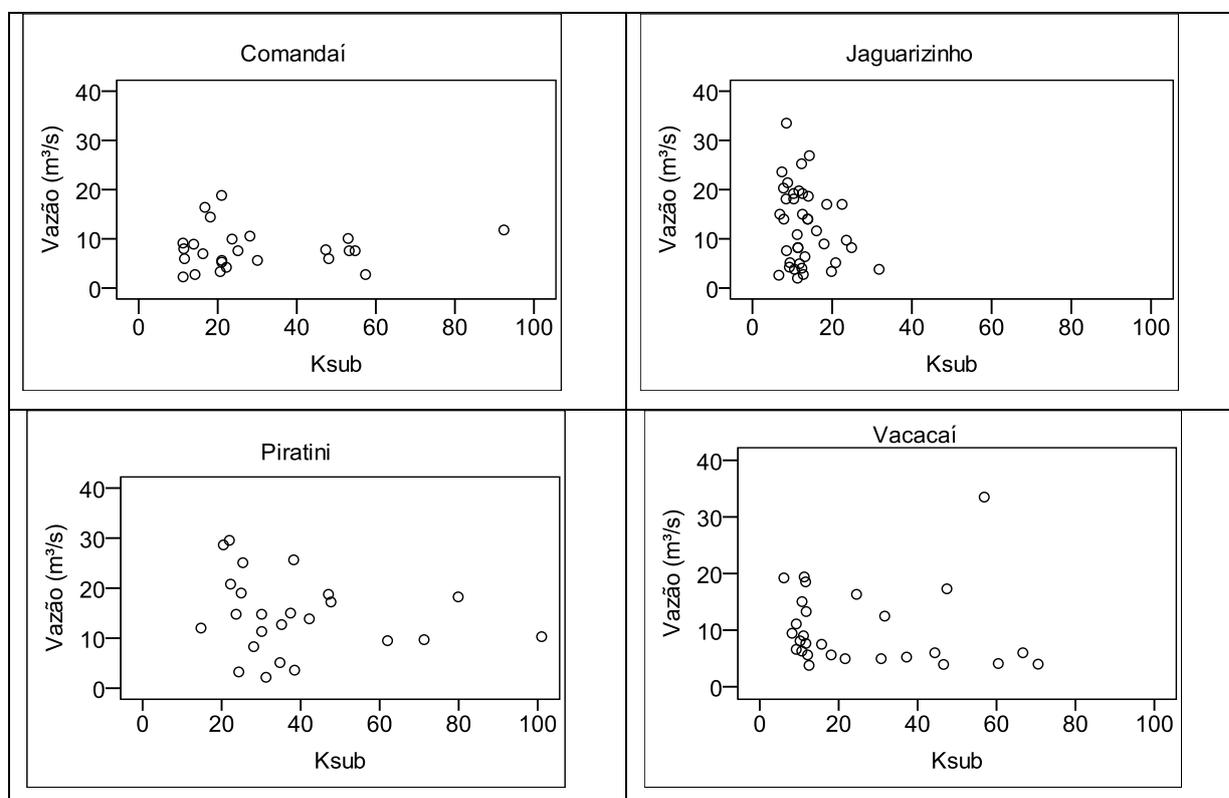
Figura 5.3 (Continuação)

Observou-se que não houve uma correlação linear entre os erros e este parâmetro. Também, analisou-se a existência ou não de uma correspondência entre as vazões do primeiro dia do evento selecionado e o Ksub e não foram encontradas evidências de correlação linear entre eles (Figura 5.4). Isso implica que pode haver resultados de simulações com valores elevados do Ksub, mas com erros diminutos, ou o contrário. Situação semelhante foi observada por Horn (2016). Este autor propôs ainda um limite do Ksub por meio de uma relação entre os Ksubs 1 e 2, os quais são resultantes das vazões medidas/observadas. Em sua proposição, caso os valores entre os ksub 1 e 2 fossem discrepantes, com uma diferença superior a 100 % entre eles, o evento deveria ser descartado e novas medições/observações a campo seriam necessárias. Essa análise, no entanto, não pode ser confirmada nesse trabalho.

Fisicamente, as razões das diferenças dos Ksubs possivelmente guardam uma relação com a representatividade das chuvas em bacias nessa escala de área no período do evento e também com as maiores ou menores perdas de água por evapotranspiração, dependendo do mês mais quente ou frio. Na tentativa de obter uma resposta relacionada à elevada variação do Ksub avaliou-se uma possível relação entre as vazões correspondentes ao primeiro dia do evento selecionado e o

Ksub resultante ao evento em questão e observou-se que não houve correlação linear entre as variáveis analisadas.

Figura 5.4 Correlação entre as vazões do primeiro dia do evento de estiagem selecionado e o Ksub



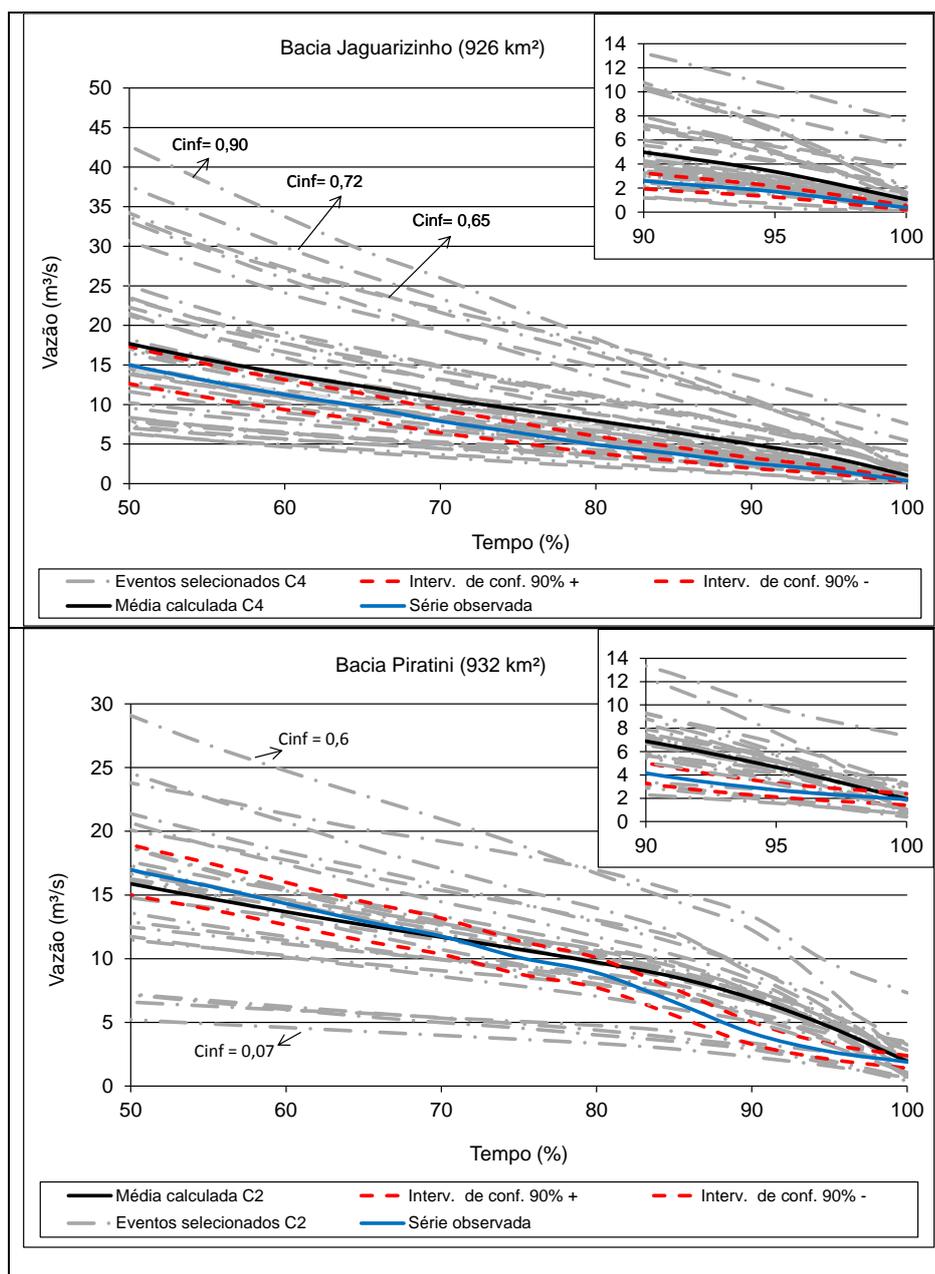
### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES DE VAZÕES CALCULADAS E AS OBSERVADAS CONSIDERANDO O AGRUPAMENTO DOS PLUVIÔMETROS E AS COMBINAÇÕES.

O objetivo foi comparar os valores das vazões de permanência calculadas em cada bacia com as observadas em relação ao ajuste do feixe de curvas, considerando os resultados individualmente, e as combinações com dois, três, e quatro pluviômetros. Os percentis das vazões utilizadas para a análise dos erros em relação aos dados observados e simulados foram os de 50%, 80%, 90% e 95%, respectivamente.

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas de permanência (CP), observadas, dos eventos de uma das combinações, da média do total dos eventos, bem como do intervalo de confiança com dez por cento de significância ( $\alpha = 0,1$ ),

centrada na curva das vazões observadas. A representação das CPs ilustra a disposição do feixe de curvas evento por evento, em cada uma das situações estudadas para as bacias Jaguarizinho e Piratini.

Figura 5.5 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança para a C4, C2 e a Pm



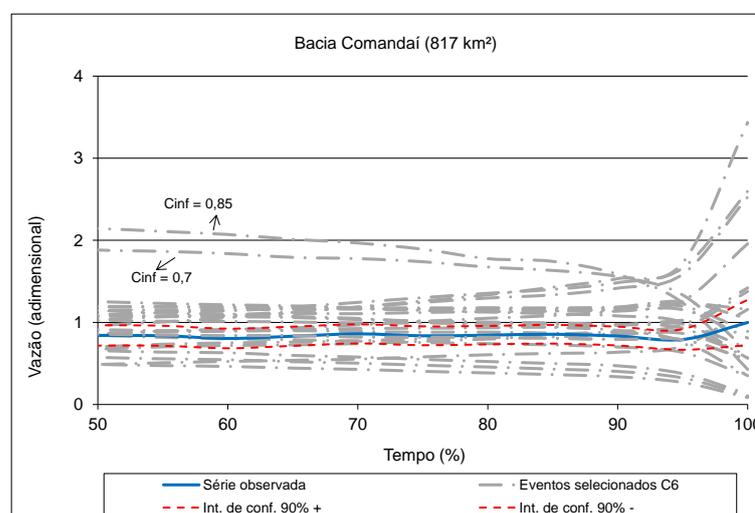
Podem ser observados eventos fora do intervalo de confiança. Nesse caso, cabe ressaltar que não necessariamente os resultados desses eventos traduzem medidas inconsistentes. Assim como observado por Tamiosso (2012), os eventos

dispersos em relação ao intervalo de confiança pode ser resultado de várias interferências tais como: os parâmetros envolvidos estão fora do intervalo recomendado, maior Cinf, maior os erros; erros de observação das vazões. Entretanto, neste trabalho, não necessariamente as curvas fora do intervalo de confiança correspondem a valores elevados do Cinf, por exemplo. Contudo, na medida em que as curvas de permanência se afastam da observada, e conseqüentemente tendem a ficar fora do intervalo de confiança, maior é o Cinf, e os erros das vazões calculadas pelo método Silveira se intensificam, conforme se pode observar os valores do Cinf indicados nas curvas de permanência.

As curvas de permanência se aproximam das curvas observadas conforme aumenta a permanência das vazões. O distanciamento das curvas em relação à observada implica em reflexos nos erros quando se realiza a comparação dos valores escalares entre as vazões calculadas pelo método e a observada para cada um dos percentis considerados.

Quanto mais aglutinadas às curvas dos eventos em relação às observadas, melhores são os resultados traduzidos por menores erros globais quando se analisa os pares calculados e observados. Ressalta-se que embora haja uma maior convergência das vazões Q90 e Q95, por exemplo, em relação às vazões observadas, o percentual de erros, em geral, aumenta para esses percentis. Isso porque, em valores absolutos, os erros, de vazões menores tem maior representatividade e traduzem maior peso em relação aos erros (Figura 5.6).

Figura 5.6 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança da combinação C6.



### 5.3.1.1 Medidas escalares de precisão

A análise foi realizada para todos os postos pluviométricos e suas combinações, de acordo com os agrupamentos propostos visando identificar possíveis diferenças entre os resultados quando se utiliza informações pluviométricas de mais de um posto em bacias nessa escala de área (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 Sumário estatístico das medidas escalares dos erros para os agrupamentos dos postos pluviométricos.

Percentis	Estatísticas	Bacias Hidrográficas													
		Comandaí (817 Km²)				Jaguarizinho (926 Km²)				Piratini (932 Km²)				Vacacaí (965 Km²)	
		Grupos				Grupos				Grupos				Grupos	
		1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv
50%	EM *	1,70	1,40	1,52	1,45	3,15	3,31	3,76	3,87	-1,63	-1,09	-0,85	-0,61	3,12	3,17
	EAM *	4,12	3,77	3,78	3,79	7,84	7,57	7,52	7,54	5,30	5,12	5,01	4,96	5,49	5,41
	REMQ *	5,66	5,14	5,35	5,38	10,79	10,54	10,65	10,76	6,49	6,35	6,19	6,11	8,43	8,51
	EMPA	34%	31%	31%	31%	48%	47%	46%	47%	29%	28%	28%	27%	50%	50%
80%	EM	1,34	1,26	1,41	1,54	3,20	3,35	3,56	3,55	0,57	0,98	1,20	1,39	2,20	2,25
	EAM	2,57	2,42	2,51	2,66	3,89	3,95	4,06	4,08	3,10	3,14	3,15	3,22	2,88	2,87
	REMQ	3,11	2,95	3,10	3,23	5,57	5,66	5,79	5,87	3,85	3,90	3,91	3,96	4,59	4,70
	EMPA	39%	36%	38%	40%	73%	74%	76%	77%	32%	33%	33%	34%	61%	60%
90%	EM	1,13	1,16	1,26	1,37	2,52	2,72	2,83	2,87	2,77	4,47	3,28	3,40	0,84	1,01
	EAM	2,13	2,08	2,14	2,27	2,72	2,88	2,97	3,00	3,27	3,57	3,71	3,81	2,15	2,21
	REMQ	2,53	2,47	2,55	2,65	3,78	3,96	4,04	4,11	3,98	4,22	4,27	4,33	3,31	3,49
	EMPA	41%	40%	42%	44%	97%	102%	106%	107%	73%	80%	83%	85%	53%	55%
95%	EM	1,18	1,26	1,39	1,47	1,66	1,87	2,04	2,08	2,58	2,67	2,76	2,85	-0,06	0,16
	EAM	1,90	1,91	2,00	2,09	1,82	1,98	2,13	2,16	2,80	2,89	2,96	3,04	1,86	1,92
	REMQ	2,33	2,32	2,38	2,46	2,52	2,70	2,86	2,91	3,38	3,40	3,43	3,48	2,81	2,92
	EMPA	48%	49%	51%	53%	99%	108%	116%	117%	96%	99%	102%	105%	49%	51%

Legenda: (\*) refere-se à unidade em L/s.km² das medidas estatísticas.

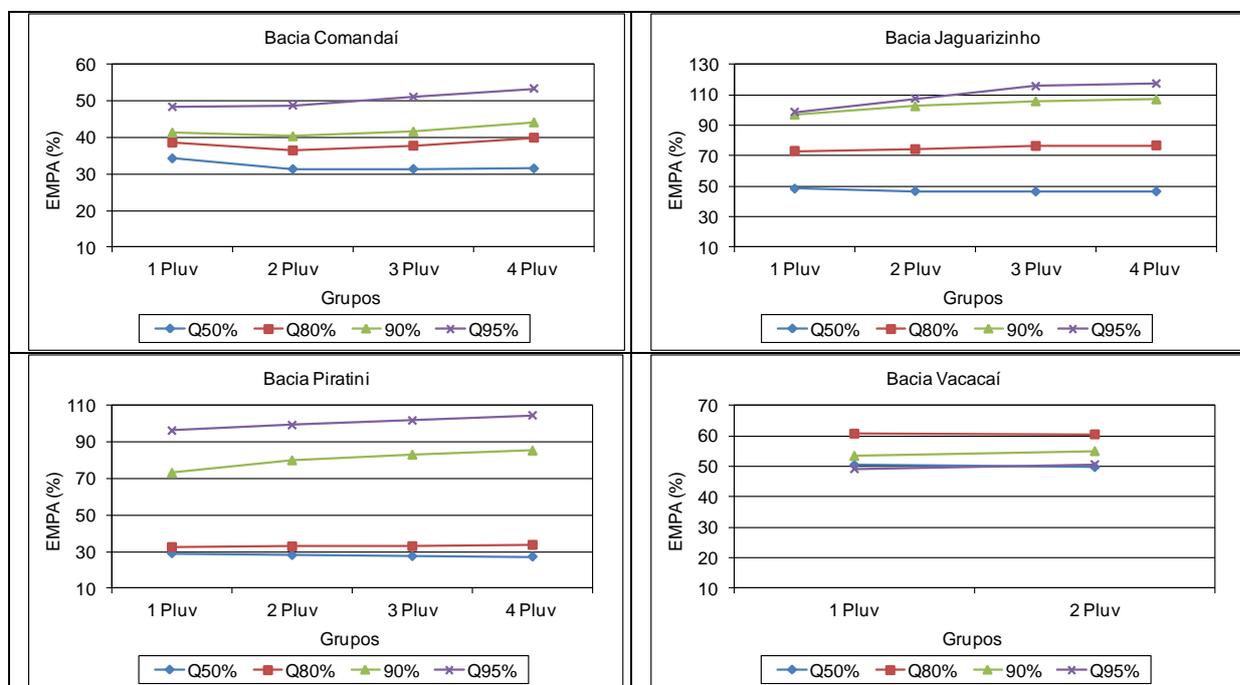
Os resultados das métricas utilizadas são apresentados na Figura 5.7. Destaca-se que nas figuras são apresentados apenas os erros médios percentuais absolutos, já que as demais medidas utilizadas seguiram o mesmo padrão.

Vale ressaltar que um viés para uma maior acurácia nas previsões está relacionado a um maior rigor na escolha dos eventos de medição, assim como no uso de séries de dados pluviométricos com boa consistência de dados e representatividade de áreas.

Pode-se verificar que em três das quatro bacias os erros com os dados de apenas um pluviômetro resultaram em menores valores. Apenas na bacia Comandaí a tendência geral converge para a melhoria quando da utilização de séries

pluviométricas de dois pluviômetros. Verifica-se também, que para os percentis de menor permanência, 50%, existem uma convergência de melhora nos resultados com a utilização de séries de precipitações de mais de um pluviômetro. Já para as vazões Q90 e Q95, os menores erros convergiram para séries onde se utilizou dados de apenas um posto de medição. Isso pode ser explicado devido “diluição” dos valores extremos na média dos valores escalares. Essa análise pode ser observada nas demais medidas escalares utilizadas.

Figura 5.7 Erro médio absoluto percentual para os erros nos agrupamentos de 1, 2, 3 e 4 pluviômetros.



Em uma análise geral pode ser verificado que a ordem de grandeza do EM observado está coerente com os resultados obtidos por Horn (2016) no Lastro Técnico do seu trabalho para bacias nessa escala de área. Tamiosso (2012) obteve erro médio para Q95% em bacias em escala de vertentes, de uso rural com áreas de 2,29 e 0,21 km<sup>2</sup>, que variaram entre 0,44 e 2,38 L/s.km<sup>2</sup> para mais ou para menos com intervalo e confiança de 90% , respectivamente. Naquele trabalho a autora apresentou os erros entre das vazões em unidade de L/s. No entanto, utilizando-se das respectivas áreas das bacias que a autora utilizou, os erros das vazões em L/s.km<sup>2</sup> correspondem ao citado (0,44 e 2,38 L/s.km<sup>2</sup>).

Essa análise pode ser extrapolada para as demais métricas em que o padrão de maiores valores escalares se repetem para as vazões de permanência Q50 quando comparada com a Q95.

Nesse estudo foram obtidos EMA que variaram entre 3,12 e 7,84 L/s.km<sup>2</sup> para a vazão Q50% e de 1,86 a 2,96 L/s.km<sup>2</sup> em vazões com 95% de permanência. Para uma melhor compreensão da dimensão dos erros em termos absolutos, pode ser realizado um comparativo de quanto esses valores correspondem a uma determinada demanda hídrica. Por exemplo, segundo um estudo publicado por UFSM (2004), a demanda hídrica média para a lavoura de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul em solos mistos era de 9.500 m<sup>3</sup>/ano.ha. Teríamos dessa forma, uma vazão de 30,12 L/s.km<sup>2</sup> de demanda. O impacto do erro da estimativa nessa situação seria de cerca de 10% tomando como base o maior erro médio absoluto obtido para a vazão Q95% (Tabela 5.11). Portanto, o uso dessa metodologia deve ser realizado de forma criteriosa visando sempre à diminuição das incertezas associadas.

Em relação à REMQ, de acordo com Lima e Silva (2009), é relativamente sensível a maiores erros, tornando-se assim mais relevantes quando se quer avaliar erros de maior magnitude.

Os valores escalares dos REMQ foram maiores se comparados com as demais medidas utilizadas. Isso já era esperado uma vez que no equacionamento do REMQ se utiliza a quadratura ao invés da função dos valores absolutos como ocorre no EMA. O EMPA observado variou entre 27% a 50% para as vazões Q50% e entre 48% a 117% para as vazões com 95% de permanência (Tabela 5.11).

No que se refere à influência do número de pluviômetros, observou-se nesse estudo que não houve grandes diferenças entre o uso de séries de um, dois, três até de quatro pluviômetros nas bacias estudadas. É possível verificar na Figura 5.7, inclusive, que o EMPA para as vazões de menor permanência tendem a se reduzir quando se utilizam informações de precipitação de mais de um posto de medição. Diante disso, pode-se verificar que o método desenvolvido por Silveira (1997) é robusto para a obtenção de vazões de referência em bacias nessa escala de área, mesmo frente a uma maior heterogeneidade na espacialização das chuvas em maiores áreas.

Destaca-se ainda que os resultados evidenciaram uma diferença na dimensão dos erros quando a comparação ocorre entre as bacias. Foi observada uma

tendência a erros de menor magnitude para as bacias Comandaí e Vacacaí. Coincidentemente as duas bacias têm um formato mais alongado se comparado com as bacias Jaguarzinho e Piratini, nas quais se observaram erros médios mais discrepantes, em especial, para percentis maiores tais como 90% e 95%.

Sendo assim, é possível que haja maiores incertezas quando da aplicação dessa metodologia em bacias médias com formato mais circulares. Essa tendência pode estar relacionada com o fato de que, em bacias com formatos mais circulares, o tempo de concentração tende a ser menor. Entretanto, não se pode afirmar tal suposição e essa hipótese deve ser investigada em estudos futuros.

### 5.3.1.2 Avaliação estatística dos erros entre os agrupamentos

Em uma análise geral verificou-se que vazões de maior permanência como a Q95%, o EMPA foi menor nos grupos com erros oriundos de simulações com dados de apenas um posto pluviométrico (Tabela 5.11). No entanto, quando se trabalha com valores escalares como é o caso em que foram utilizadas equações para dimensionar os erros entre os agrupamentos, os resultados são pontuais. Ou seja, pouco diz sobre a dispersão e a variância dos erros, assim como não é possível identificar valores atípicos.

Os erros dos agrupamentos foram analisados por meio do teste de ANOVA e elaborados gráficos do tipo *Box-plot*. O teste de ANOVA serviu para confrontar os erros dos agrupamentos e a partir das hipóteses iniciais descritas na metodologia (item 4.3.1.5), verificar se havia ou não diferença significativa entre os grupos testados. Assim, conforme pode ser observado na Tabela 5.12, onde são apontados as significâncias do teste de ANOVA entre os grupos, verifica-se que em todas as bacias, a significância foi superior ao *p-valor* ( $<0,05$ ).

Sendo assim, as significâncias apresentadas na Tabela 5.12 indicam que a hipótese inicial de igualdade ( $H_0$ ) entre as médias dos erros dos agrupamentos pode ser aceita, rejeitando-se, portanto, a hipótese alternativa de desigualdade ( $H_1$ ) entre os agrupamentos elaborados.

Em síntese, significa que não foram apontadas diferenças entre os grupos com um ou mais pluviômetros, reforçando a ideia da robustez do método Silveira para uso em bacias sem dados nessa escala de área. Ainda assim, pouco se pode inferir sobre a dispersão dos erros.

Tabela 5.12 Tabela de ANOVA para as vazões Q50 e Q95.

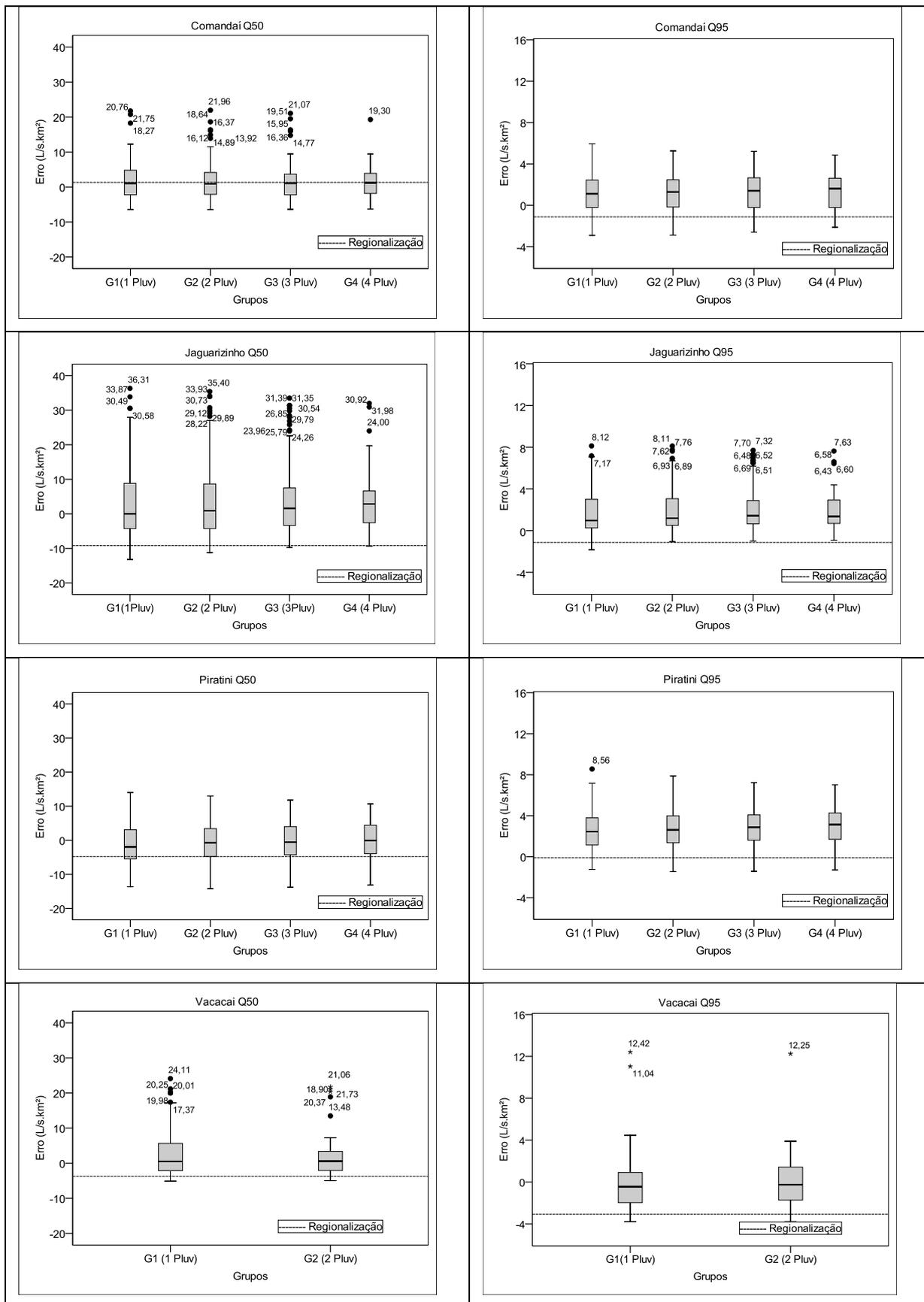
Bacia	Erro (L/s.km <sup>2</sup> ) Inter-grupos (Combinadas)	Soma dos Quadrados	gl	Média Quadrática	F	Sig.
Comandai	Q50%	5,493	3	1,831	0,69	0,977
	Q95%	3,238	3	1,079	0,277	0,842
Jaguarizinho	Q50%	39,725	3	13,242	0,129	0,943
	Q95%	13,291	3	4,43	1,153	0,327
Piratini	Q50%	38,406	3	12,802	0,327	0,806
	Q95%	2,279	3	0,76	0,169	0,917
Vacacaí	Q50%	0,327	1	0,327	0,001	0,98
	Q95%	1,195	1	1,195	0,147	0,702

Visando identificar tal questão foram elaborados gráficos do tipo box-plot. Esse tipo de gráfico é uma ferramenta bastante versátil para a avaliação de resultados, especificamente os erros de previsão, já que fornece informações relevantes que não são possíveis de ser identificadas por meio de outras ferramentas estatísticas comumente usadas.

Os resultados dos gráficos para as vazões de menor e maior permanência (Q50% e Q95%) são apresentados na Figura 5.8. Avaliando os gráficos, observam-se algumas tendências que devem ser consideradas na aplicação do protocolo de uso do método Silveira em bacias nessa escala.

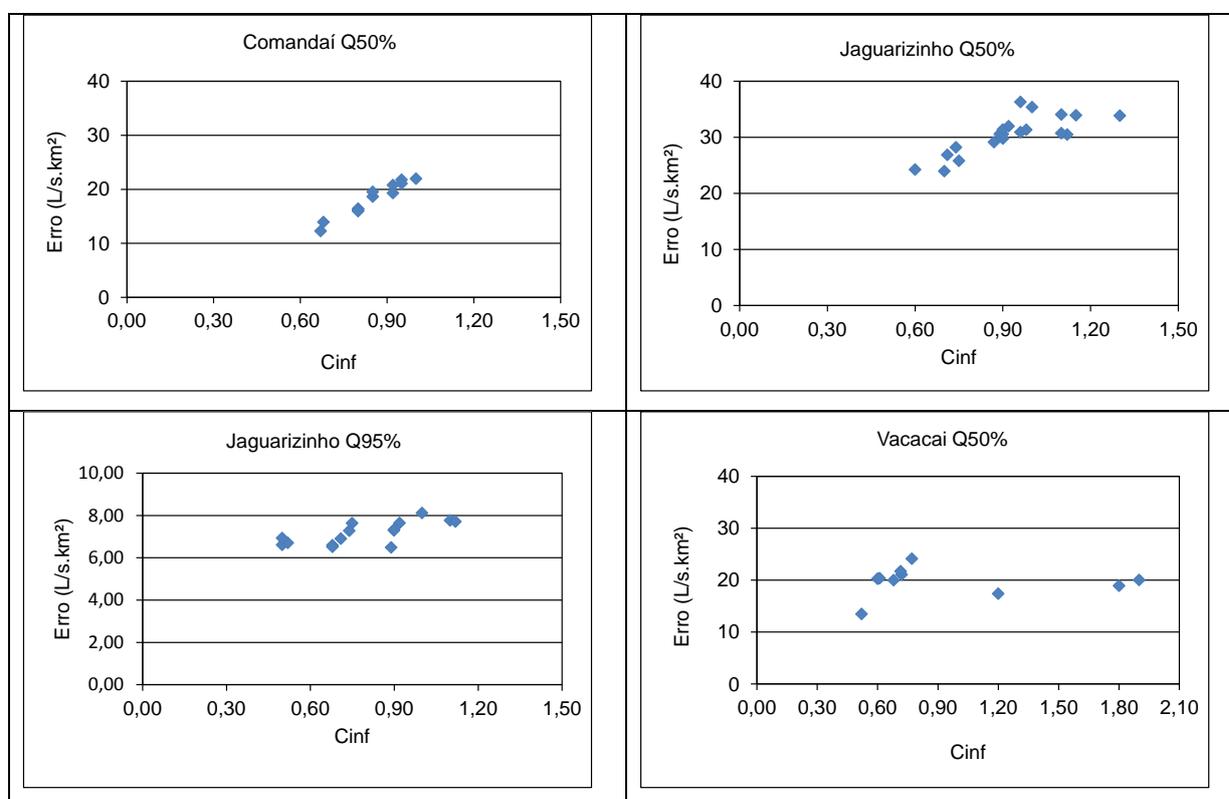
Na bacia Comandaí para a Q50%, verifica-se que os erros possuem uma grande dispersão e os *outliers* são mais frequentes. O mesmo já não ocorre em relação a Q95% da mesma bacia. Ou seja, nesta as vazões de maior permanência tendem a ter maior aderência às vazões observadas diminuindo a dispersão dos erros entre os pares calculados e observados. Fato semelhante pode ser observado nas bacias Jaguarizinho e Vacacaí. A exceção ocorre apenas na bacia Piratini em que não foram apontados outliers nas vazões com 50% de permanência. A ocorrência de maior número de outliers para a Q50% quando comparada com a Q95% se deve provavelmente devido ao fato de que a Q50% ainda ter uma parte das vazões provenientes do escoamento superficial, ao contrário da Q95% em que o escoamento é quase que unicamente subterrâneo. Constatou-se também que o valor do erro determinado por meio da regionalização de vazões, na maior parte dos casos, é maior do que a mediana dos erros determinados usando o método Silveira (Figura 5.8).

Figura 5.8 Box-plot dos erros entre os agrupamentos para as vazões de permanência Q50% e Q95%.



Importante destacar que os *outliers* apresentam uma associação direta com valores elevados do Cinf, em sua maioria, maiores do que 0,6 (Figura 5.9). Ainda, estão vinculados ao evento em si, ou seja, foram encontrados *outliers* em praticamente todos os cenários de chuva de um mesmo evento de estiagem. Portanto, há de se ter um cuidado especial em relação à escolha do evento. Além disso, a constatação de que os outliers estão correlacionados aos valores de Cinf maiores que 0,6 corrobora a recomendação de Horn (2016) para o uso de valores desse parâmetro em uma faixa entre 0,1 e 0,6.

Figura 5.9 Outliers identificados no box-plot



Em relação à amplitude interquartílica, observou-se uma diminuição quando se utiliza dados de precipitação de mais de um pluviômetro tanto para vazões Q50% quanto para as vazões Q95%. Essa tendência indica melhora das simulações quando se utilizam informações de pelo menos dois postos de medição da precipitação. Isso é também observado na Figura 5.8 e na Tabela 5.13, onde o comprimento entre os extremos dos “bigodes” tende a diminuir na medida em que se utilizam dados de pelo menos duas estações pluviométricas.

Tabela 5.13 Resumo estatístico dos erros entre os agrupamentos para as vazões de permanência Q50% e Q95%.

Percentis	Estatísticas	Bacias Hidrográficas													
		Comandaí (817 Km²)				Jaguarizinho (926 Km²)				Piratini (932 Km²)				Vacacai (965 Km²)	
		Grupos				Grupos				Grupos				Grupos	
		1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv	3 Pluv	4 Pluv	1 Pluv	2 Pluv
50%	Máximo	21,75	21,96	21,07	19,30	36,31	35,40	33,49	31,98	14,02	12,98	11,79	10,67	24,11	21,73
	Mínimo	-6,43	-6,44	6,37	-6,30	-13,21	-11,21	-9,69	-9,39	-13,65	-14,21	-13,78	-13,13	-5,11	-4,98
	Média	1,70	1,40	1,52	1,45	3,15	3,31	3,76	3,87	-1,63	-1,09	-0,85	-0,61	2,56	2,61
	Variância	29,46	24,65	26,57	27,95	107,21	100,67	100,07	103,54	39,90	39,39	37,99	38,54	55,47	57,57
	Amplitude interquartilica	7,09	6,31	5,97	6,08	13,21	13,01	11,14	10,31	8,73	8,23	8,30	8,45	6,14	5,51
	Assimetria	1,20	1,17	1,40	1,53	1,00	1,04	1,09	1,29	0,07	0,09	-0,26	-0,39	1,46	1,66
95%	Máximo	5,95	5,26	5,22	4,86	8,12	8,11	7,70	7,63	8,56	7,88	7,23	7,02	12,42	12,25
	Mínimo	-2,91	-2,89	-2,60	-2,12	-1,84	-1,06	-1,01	-0,93	-1,24	-1,45	-1,42	-1,29	-2,88	-2,59
	Média	1,18	1,26	1,39	1,47	1,66	1,87	2,04	2,08	2,58	2,67	2,76	2,85	0,05	0,30
	Variância	4,09	3,82	3,78	4,03	3,64	3,78	4,03	4,26	4,80	4,51	4,21	4,15	7,90	8,54
	Amplitude interquartilica	2,70	2,65	2,88	2,95	2,78	2,56	2,24	2,33	2,68	2,65	2,48	2,67	2,82	3,13
	Assimetria	0,14	-0,08	-0,12	-0,18	0,98	1,03	1,08	1,17	0,30	0,15	-0,06	-0,18	2,67	2,67

Logo, dentre as análises efetuadas essa última forneceu as informações importantes a partir das quais há um norteamento no que se refere ao número de postos a ser utilizados em bacias nessa escala. Apesar de as medidas escalares de precisão e o teste de ANOVA não apontarem para diminuição dos erros de previsão quando se utilizam séries de dados de chuva de mais de um posto pluviométrico, o gráfico box-plot proveu informações que vem ao encontro dos indícios apresentados por Horn (2016). Em seu trabalho o autor verificou diminuição dos erros quando se usam dados de mais de um posto de medição em bacias médias.

Sendo assim, em bacias nessa escala de área, é importante o uso de séries de no mínimo de dois postos pluviométricos para uso do método Silveira. Ressalta-se que com três postos os resultados tendem a ter a dispersão ainda mais reduzida, em alguns casos, sendo recomendado que se utilize, sempre que possível, esse número de postos na aplicação do método Silveira em bacias na escala que esse estudo abrangeu. Embora haja uma maior cobertura de monitoramento de chuvas por meio dos postos pluviométricos (SILVEIRA, 1997; TUCCI, 2014; HORN, 2016), ainda assim devido a sua localização, em determinadas regiões o número de postos pluviométricos diminui.

Portanto, idealmente ter-se-ia a utilização de informações de séries de chuvas de três postos na aplicação do método Silveira em bacias nessa escala de área, bacias médias. Entretanto, em muitos casos esse número pode se tornar inviável devido à indisponibilidade de um maior número de postos em determinadas bacias.

Nessa situação, os resultados obtidos indicam que o método fornece estimativas de vazões razoáveis, se comparados com a regionalização de vazões, e, portanto, pode ser utilizado mesmo com informações de precipitação de apenas um posto pluviométrico.

Além disso, quando os erros percentuais obtidos nessa pesquisa são comparados com os erros determinados por meio da utilização do método da regionalização de vazões, conforme as equações anuais sugeridas em estudo realizado por UFSM e UFRGS (2001), os resultados podem ser considerados satisfatórios. Vale lembrar que essa comparação foi possível devido aos estudos citados ter abrangido as regiões de inserção das bacias e suas equações são válidas para a escala das bacias desta pesquisa. Na Tabela 5.14 pode ser verificado o EPA da regionalização de vazão dos percentis de 50% e 95%. Observa-se que o EPA variou entre -56,6 % a 11% e de -81,1% a 3,4% para os percentis de 50% e 95%, respectivamente. Contudo, observaram-se indícios de que ambos os métodos produzem resultados com boa aderência na maior parte dos casos nas bacias estudadas. Ainda, com base dos gráficos box-plot (Figura 5.8) pode-se observar que na maioria dos casos o método Silveira apresentou uma melhor performance quando comparado a regionalização.

Porém, como salienta Tucci (2015), em estudos de regionalização as equações não devem ser extrapoladas entre as escalas de áreas.

Dessa forma, na total indisponibilidade de dados para predição de vazões de referência, esses resultados podem ser considerados satisfatórios, sobretudo por meio do método Silveira, objeto desse estudo. No entanto, é necessário enfatizar que os estudos que envolvem a determinação das vazões de referência por meio dessa metodologia em bacias com essa escala de área devem fazer referência à possibilidade de maiores incertezas.

Tabela 5.14 Erro percentual absoluto da regionalização de vazões.

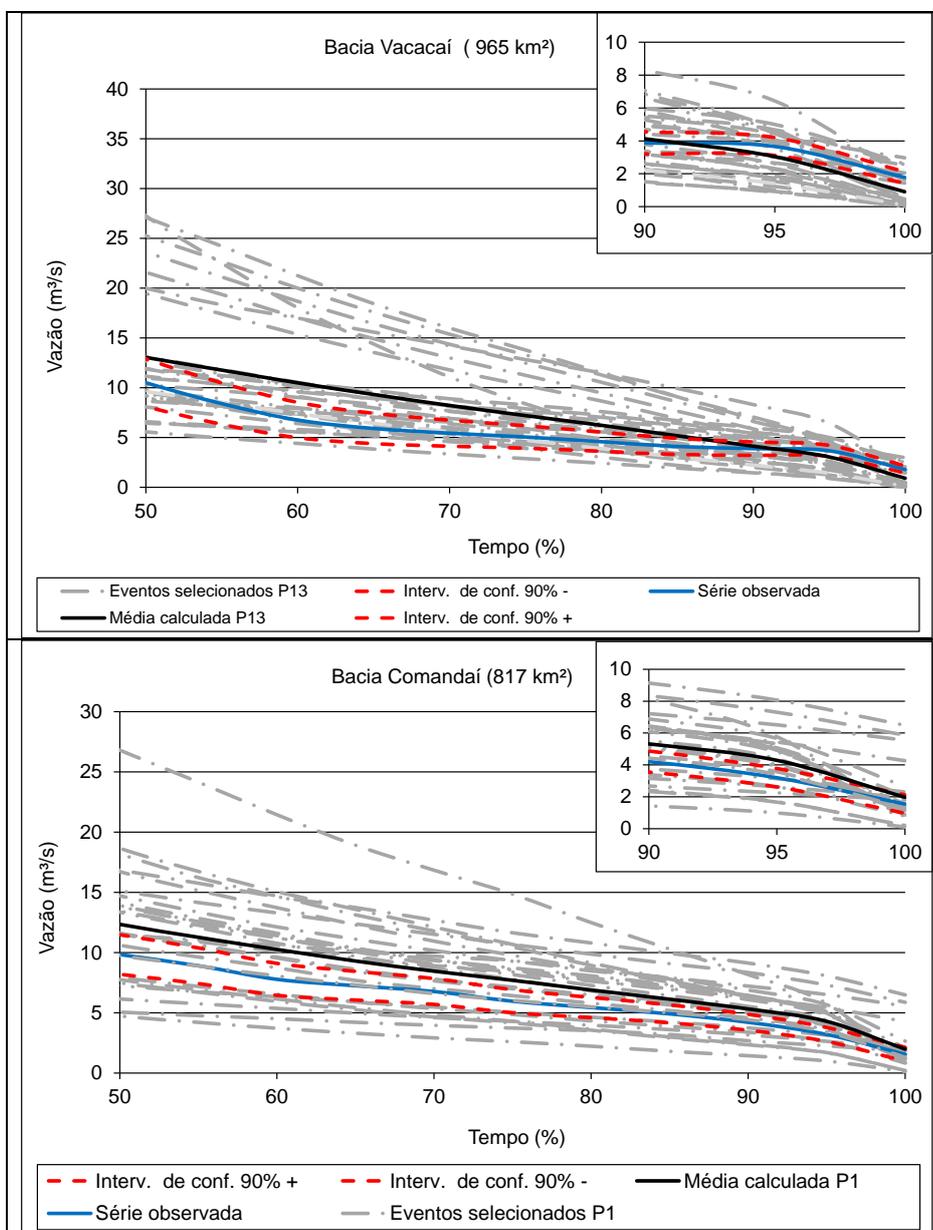
Bacias	Área (km <sup>2</sup> )	Qobs. (L/s.km <sup>2</sup> )		Qreg. (L/s.km <sup>2</sup> )		EPA (%)	
		Q50	Q95	Q50	Q95	Q50	Q95
Comandaí	817	12,04	3,92	13,37	2,80	11,0	-28,5
Jaguarizinho	926	16,2	1,84	7,03	0,71	-56,6	-61,3
Piratini	932	18,21	2,91	13,43	2,81	-26,2	-3,4
Vacacaí	965	10,88	3,79	7,14	0,72	-34,4	-81,1

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES DE VAZÕES CALCULADAS E AS OBSERVADAS CONSIDERANDO A LOCALIZAÇÃO ESPACIAL DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS EM RELAÇÃO À ÁREA DA BACIA.

Visando atender ao segundo objetivo específico, foram realizadas comparações entre as vazões calculadas e observadas tendo como critério a localização dos postos na área e no entorno das bacias analisadas. Inicialmente foram calculadas as curvas de permanência para todo o universo de simulações considerando cada posto pluviométrico e também a combinação destes. Optou-se por apresentar as curvas de permanência em duas situações distintas no que tange a aderência das curvas calculadas em relação às observadas (Figura 5.10). O intuito dessa explanação foi ilustrar as possíveis diferenças entre os resultados do universo de simulações realizadas. Na ilustração na bacia Vacacaí o P13 apresentou as melhores situações em contraponto ao P14 onde se obtiveram resultados mais dispersos.

É conveniente descrever que os resultados das curvas de permanência são traduzidos nas medidas escalares de precisão utilizadas. Importante ressaltar ainda, que há uma correspondência entre o distanciamento das curvas calculadas em relação a observada e os valores de Cinf. Já na bacia Comandaí, os cenários do P1 apresentaram maior divergência nas curvas de permanência, principalmente nos percentis maiores que 90%.

Figura 5.10 Curvas de Permanência das vazões calculadas, observada e intervalos de confiança.

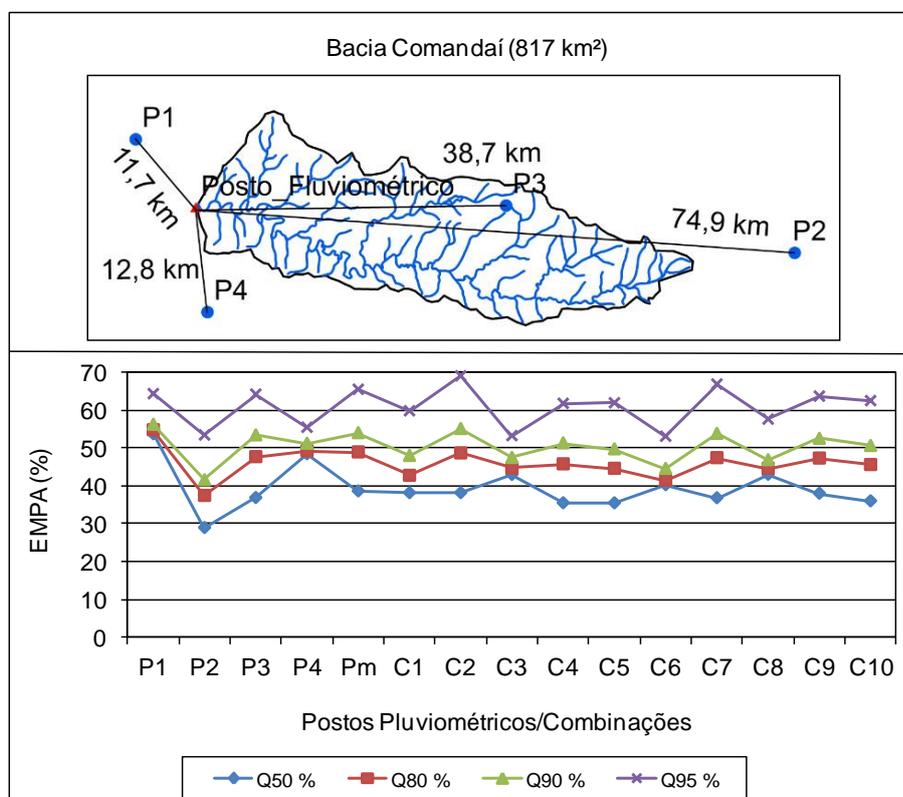


### 5.4.1.1 Medidas escalares de precisão

De forma análoga ao que foi realizado na comparação das vazões calculadas com as observadas em relação ao número de pluviômetros, neste item foram calculados os valores escalares de precisão para análise dos erros das simulações por meio do método Silveira.

Quando se verifica nas situações expostas, a dispersão das curvas são traduzidas nos valores escalares utilizados. Por exemplo, na bacia Comandaí, os menores erros percentuais absolutos foram verificados nas simulações oriundas da série de dados do pluviômetro P2. Já a pior, no P1. Isso pode ser observado na Figura 5.11 onde são apresentados os resultados das métricas utilizadas para cada um dos pluviômetros e as suas combinações.

Figura 5.11 Medidas escalares de precisão para a bacia Comandaí.

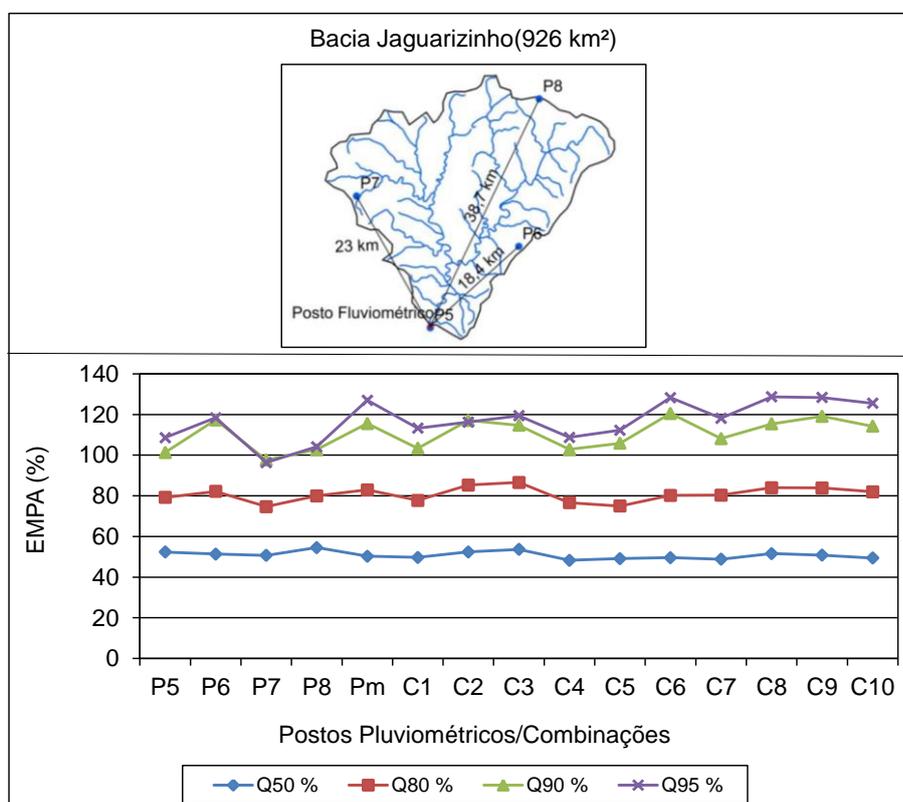


Coincidentemente, o pluviômetro P2 é o mais distante em relação ao posto fluviométrico da bacia. Cabe salientar que o P2 está localizado a montante da área da bacia ao contrário do P1, localizado a jusante do posto de medição das vazões.

Na Figura 5.12 podem-se verificar as medidas dos erros para a bacia Jaguarizinho. Observa-se que nesta bacia o posto P7 está localizado a uma distância média do posto fluviométrico. Destaca-se que pode ser observado que os erros obtidos com a série do pluviômetro P8, o mais distante em termos de localização em relação à seção fluviométrica da bacia, os erros são semelhantes aos obtidos no pluviômetro P7.

Já na bacia Piratini (Figura 5.13) o pluviômetro localizado mais a jusante – P9 - da bacia foi o que apresentou a melhor convergência entre as vazões simuladas e as observadas e conseqüentemente, os menores erros. O pluviômetro P12, o mais distante dos quatro utilizados, em relação ao posto fluviométrico, também apresentou resultados das simulações satisfatórios. Todavia, o pluviômetro P10, o mais próximo do posto fluviométrico foi o que apresentou resultados aquém do esperado para as vazões de maior permanência Q90% e Q95%.

Figura 5.12 Medidas escalares de precisão para a bacia Jaguarizinho.



Por fim, para a bacia Vacacaí, observou-se que o pluviômetro P13 foi onde as simulações resultaram em menores erros (Figura 5.14). Destaca-se que nesta bacia foram utilizadas séries de dados de apenas dois pluviômetros e a distância entre os dois e a seção fluviométrica são similares.

Em uma análise geral dos resultados pode ser observado que não foi verificada uma tendência de grandes variações nos erros em relação à disposição espacial dos pluviômetros na bacia.

Analisando as curvas de permanência e as medidas escalares não houve convergência em apontar se o pluviômetro localizado a montante, fora, ou dentro dos limites da bacia produziu melhores resultados. Essa verificação pode ser realizada observando-se a Tabela 5.15, onde é apresentada uma síntese das medidas escalares utilizadas.

Figura 5.13 Medidas escalares de precisão para a bacia Piratini.

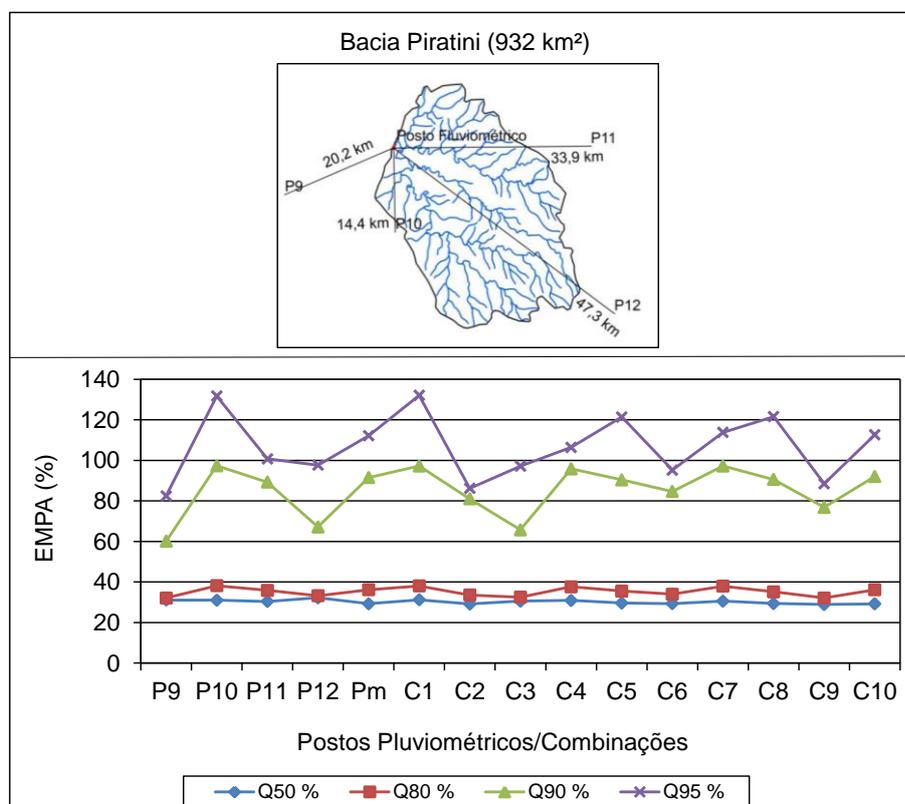


Figura 5.14 Medidas escalares de precisão para a bacia Vacacaí.

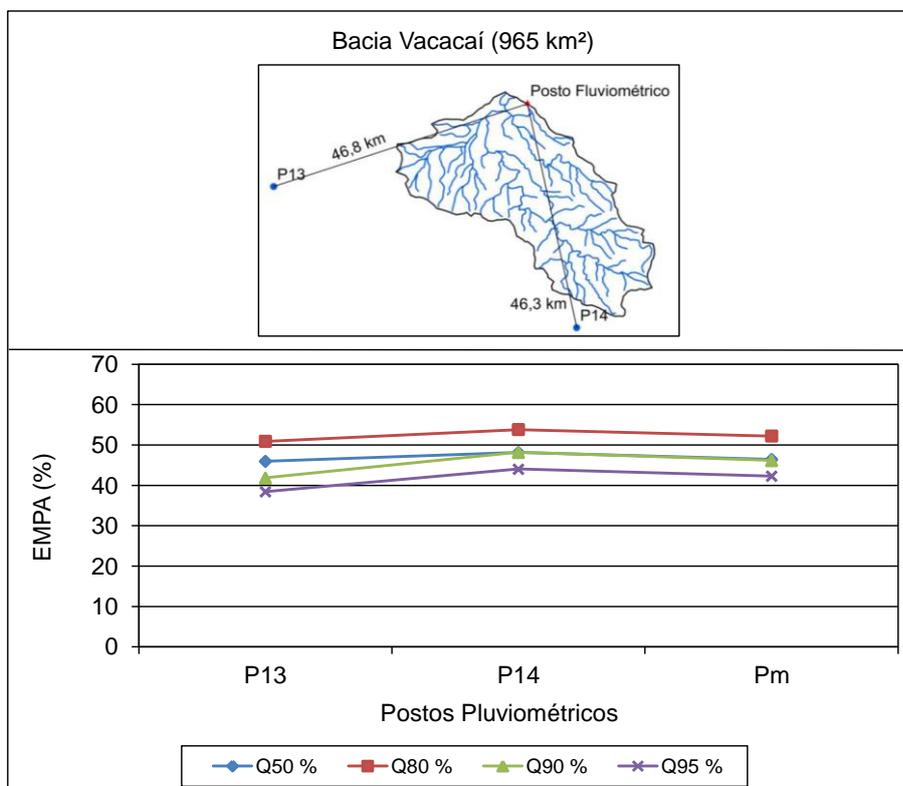


Tabela 5.15 Sumário estatístico dos erros entre as vazões observadas e calculadas para os percentis de 50% e 95%.

		Comandáí														
Percentis	Estatísticas	P1	P2	P3	P4	Pm	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
50%	EM	3,07	0,45	0,53	2,77	1,45	1,79	1,16	1,87	0,33	1,01	2,28	1,08	2,56	1,35	1,10
	EAM	5,28	2,84	3,62	4,76	3,79	3,75	3,75	4,22	3,48	3,48	3,95	3,61	4,22	3,73	3,53
	REMQ	6,72	3,83	4,53	6,92	5,38	4,78	5,00	6,01	4,31	4,79	5,76	4,94	6,14	5,38	4,84
	EMPA	54%	29%	37%	48%	39%	38%	38%	43%	35%	35%	40%	37%	43%	38%	36%
95%	EM	1,33	1,03	1,38	0,98	1,47	1,34	1,61	0,92	1,28	1,38	1,03	1,55	1,20	1,43	1,40
	EAM	2,06	1,71	2,05	1,77	2,09	1,91	2,21	1,70	1,97	1,98	1,70	2,14	1,84	2,03	2,00
	REMQ	2,49	2,10	2,42	2,30	2,46	2,27	2,59	2,21	2,34	2,35	2,12	2,53	2,24	2,41	2,34
	EMPA	64%	53%	64%	55%	65%	60%	69%	53%	62%	62%	53%	67%	58%	64%	62%
		Jaguarizinho														
Percentis	Estatísticas	P5	P6	P7	P8	Pm	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
50%	EM	2,87	3,38	2,57	3,77	3,87	2,95	3,53	3,92	2,60	3,15	3,70	3,23	4,07	3,98	3,74
	EAM	7,86	7,70	7,61	8,18	7,54	7,45	7,86	8,05	7,24	7,37	7,43	7,32	7,74	7,62	7,41
	REMQ	10,40	10,92	9,92	11,81	10,76	9,68	11,04	11,45	9,92	10,09	10,96	10,01	10,86	11,14	10,57
	EMPA	52%	51%	51%	55%	50%	50%	52%	54%	48%	49%	50%	49%	52%	51%	49%
95%	EM	1,66	1,93	1,48	1,57	2,08	1,79	1,88	1,92	1,72	1,81	2,12	1,89	2,10	2,11	2,07
	EAM	1,85	2,01	1,64	1,77	2,16	1,93	1,98	2,03	1,85	1,91	2,18	2,01	2,19	2,18	2,13
	REMQ	2,54	2,84	2,21	2,47	2,91	2,53	2,81	2,84	2,50	2,54	2,93	2,64	2,93	2,99	2,87
	EMPA	109%	118%	96%	104%	127%	113%	116%	119%	109%	112%	128%	118%	129%	128%	125%
		Piratini														
Percentis	Estatísticas	P9	P10	P11	P12	Pm	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
50%	EM	-1,74	-0,69	-0,44	-1,83	-0,18	-0,84	-0,59	-1,04	-0,16	-0,73	-0,53	-0,14	-0,67	-0,70	-0,11
	EAM	5,28	5,27	5,16	5,47	4,96	5,30	4,95	5,19	5,25	5,03	4,98	5,19	4,99	4,91	4,96
	REMQ	6,38	6,35	6,61	6,62	6,11	6,41	6,38	6,26	6,47	6,21	6,36	6,29	6,15	6,23	6,08
	EMPA	31%	31%	30%	32%	29%	31%	29%	31%	31%	30%	29%	31%	29%	29%	29%
95%	EM	2,75	3,97	3,36	3,05	3,56	3,93	2,94	3,05	3,43	3,73	3,17	3,57	3,76	2,99	3,58
	EAM	2,24	3,57	2,73	2,65	3,04	3,58	2,34	2,64	2,89	3,29	2,58	3,09	3,30	2,40	3,06
	REMQ	2,76	4,09	3,31	3,21	3,48	4,08	2,84	3,14	3,36	3,75	3,09	3,51	3,76	2,90	3,49
	EMPA	83%	132%	101%	98%	112%	132%	86%	97%	106%	121%	95%	114%	122%	89%	113%
		Vacacai														
Percentis	Estatísticas	P13	P14													Pm
50%	EM	3,27	2,97													3,17
	EAM	4,83	5,06													4,88
	REMQ	7,19	8,05													7,76
	EMPA	46%	48%													46%
95%	EM	-0,24	0,11													0,16
	EAM	1,41	1,61													1,55
	REMQ	1,65	1,93													1,87
	EMPA	38%	44%													42%

Vale ressaltar que são tendências observadas já que deve ser considerado que os postos utilizados podem apresentar inconsistências nos valores medidos, que foge a capacidade e detecção. Por exemplo, pode ser que justamente em um posto pluviométrico localizado nas proximidades do posto fluviométrico a série de dados de chuvas podem ter erros de medição não contabilizados mesmo sendo esses consistidos.

Entretanto, por meio dos resultados avaliados pode-se inferir que não há prejuízos nas simulações quando da utilização de série de dados de pluviômetros localizados em diferentes pontos em relação à área da bacia. Entretanto,

evidentemente que desde que tomadas os cuidados necessários em relação à qualidade dos dados.

#### 5.4.1.2 Avaliação estatística dos erros entre os pluviômetros e as combinações

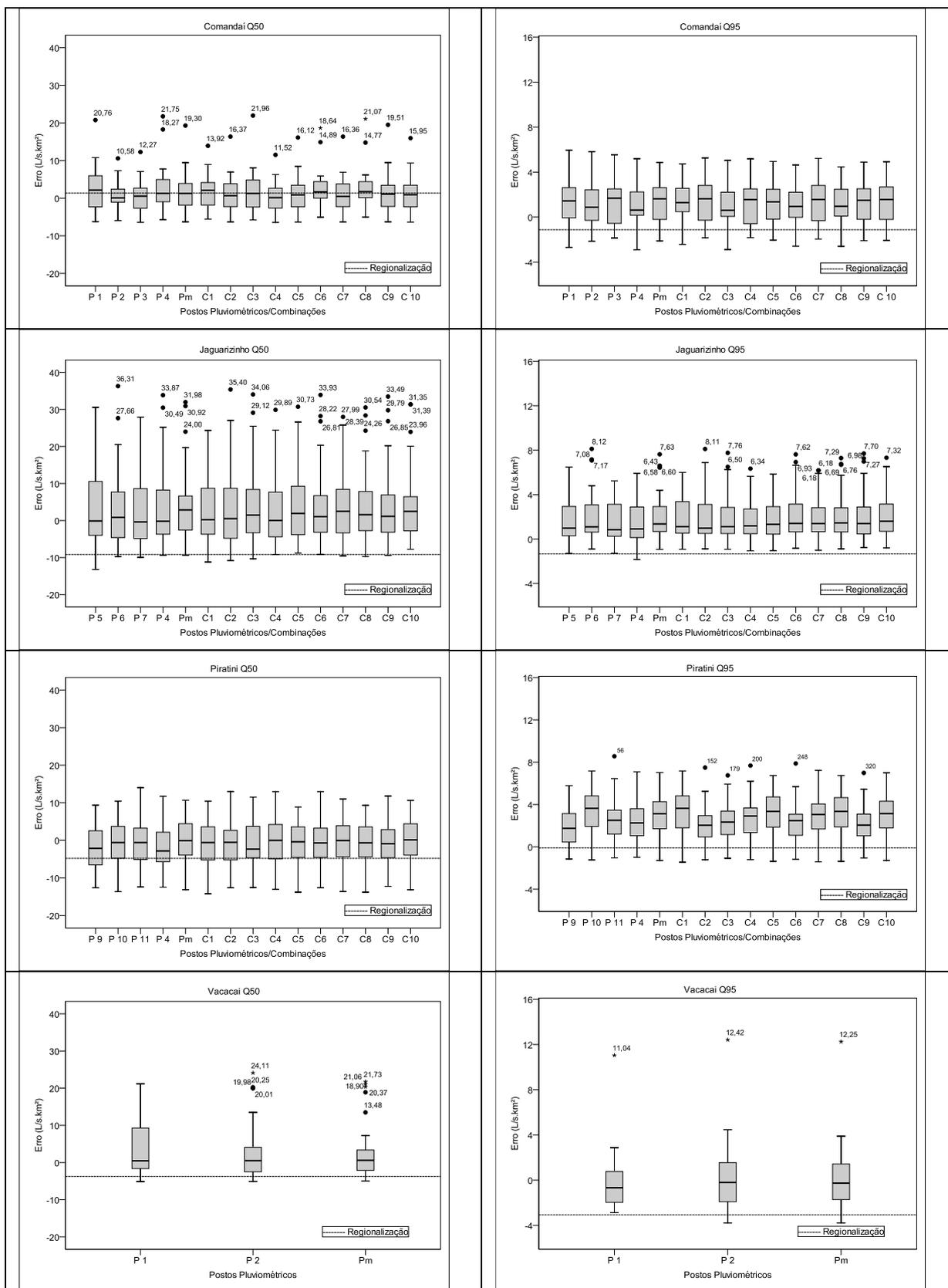
O teste de ANOVA foi realizado para os erros das simulações oriundos de cada um dos pluviômetros e das combinações entre estes. Dessa forma, conforme pode ser observado na Tabela 5.16, onde são apontados as significâncias do teste de ANOVA entre os grupos, verifica-se que em todas as bacias, a significância foi superior ao *p*-valor ( $< 0,05$ ).

Tabela 5.16 Sumário do teste de ANOVA

Bacia	Erro (L/s.km <sup>2</sup> ) Inter-Pluv/Comb. (Combinadas)	Soma dos Quadrados	gl	Média Quadrática	F	Sig.
Comandai	Q50%	253,351	14	18,097	0,676	0,798
	Q95%	15,762	14	1,126	0,283	0,995
Jaguarizinho	Q50%	137,984	14	9,856	0,095	1,000
	Q95%	22,652	14	1,618	0,415	0,97
Piratini	Q50%	91,752	14	6,554	0,163	1,000
	Q95%	67,905	14	4,85	1,094	0,362
Vacacaí	Q50%	2,411	2	1,205	0,21	0,979
	Q95%	3,368	2	1,684	0,206	0,815

Portanto, a significância indica que a hipótese inicial de igualdade ( $H_0$ ) entre as médias dos erros dos agrupamentos pode ser aceita, rejeitando-se, por conseguinte, a hipótese alternativa de desigualdade ( $H_1$ ). Ou seja, estatisticamente não foi verificada diferença na utilização de dados de pluviômetros localizados em diferentes pontos em relação à área da bacia. Em uma última análise em relação a esse item, foram elaborados gráficos do tipo Box-plot. Os resultados dos gráficos para as vazões de menor e maior permanência são (Q50% e Q95%) apresentados na Figura 5.15.

Figura 5.15 Box-plot dos erros entre os pluviômetros e as combinações para as vazões Q50 e Q95.



Avaliando-se os gráficos, não foi possível identificar tendências com maior evidência em relação aos erros e a disposição espacial dos postos. Sendo assim, tanto para as vazões com menor ou maiores permanência ao longo do tempo, como a Q50 e a Q95, obtiveram-se erros com dispersão e assimetrias bastante variadas. Isso serve de embasamento para argumentar que no que se refere à disposição espacial, não se verificou diferenças discrepantes na comparação entre os erros.

Essa constatação serve de apoio na aplicação do protocolo na utilização do método Silveira. Em suma, desde que tomados certos cuidados em relação à qualidade dos dados de chuva, pode-se utilizar série de dados de postos independente da sua localização em relação à área da bacia. Evidentemente desde que estejam na área e no entorno da bacia de interesse.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo elucidar a hipótese de que a espacialização das precipitações poderia resultar em discrepâncias na aplicação do método Silveira em bacias com áreas de até 1000 km<sup>2</sup>.

Por intermédio da análise os resultados obtidos no universo das simulações pode se observar que os resultados convergiram para a recomendação de utilização de séries de dados de pelo menos dois postos pluviométricos em bacias nessa escala.

Evidentemente que na impossibilidade de obter dados de mais de uma estação pluviométrica, a aplicação do método ainda é possível. Essa conclusão é pertinente quando se analisa os erros sob a ótica das diferentes medidas estatísticas que foram usadas nas avaliações dos resultados. Quando se verificou somente as análises realizadas mediante as medidas escalares, os resultados indicaram inclusive que a utilização de dados de apenas um posto pluviométrico é suficiente. Entretanto, realizando uma análise mais criteriosa, foi possível identificar as dispersões do conjunto de simulações e observou-se uma tendência de diminuição da dispersão dos erros quando foram usadas séries de precipitações de mais de um pluviômetro.

Diante disso, recomenda-se que sejam utilizados série de dados de precipitação de pelo menos duas estações pluviométricas para aplicação do método Silveira em bacias nessa escala.

Identificaram-se também indícios de que bacias com formato mais alongado apresentam menores erros quando comparadas às bacias de formato mais circulares. Essa constatação deve ser investigada em estudos futuros.

Em relação à influência da disposição espacial dos postos em relação à área da bacia, não foram constatadas tendências entre as bacias avaliadas. Observou-se que a disposição espacial dos postos não representa uma limitação na aplicação do método. Evidentemente lembrando sempre da necessidade de devidos cuidados em relação à qualidade dos dados disponíveis.

Também se avaliou, de forma geral, a correlação entre os erros e o parâmetro  $C_{inf}$ , e do parâmetro  $K_{sub}$  com os erros. No primeiro, identificaram-se forte

correlação entre os erros e aquele parâmetro corroborando com as recomendações feitas por Silveira (1997) e Horn (2016). Dessa forma, essa análise sustenta a indicação de uso de um intervalo de valores de  $C_{inf}$  entre 0,1 e 0,6, conforme sugerido por Horn (2016). Já em relação à correlação dos erros e o  $K_{sub}$ , não foram identificadas correlações significativas. Todavia, ainda assim recomenda-se a utilização do  $K_{sub}$ , cujos valores correspondam a uma diferença inferior a 100 %, entre os  $K_{sub1}$  e o  $K_{sub2}$ , conforme esse critério sugerido por Horn (2016).

Sendo assim, os resultados obtidos nas simulações hidrológicas por meio do método Silveira podem ser considerados satisfatórios para bacias nessa escala de área, ou seja, até 1000 km<sup>2</sup>, mesmo utilizando-se de séries de dados de apenas um posto pluviométrico, independente de sua localização no espaço de abrangência da bacia de interesse. Isso pode ser verificado mediante a comparação dos resultados das simulações por meio dessa metodologia e o método da regionalização hidrológica. Isso conduz a concluir que as avaliações realizadas nesse estudo são relevantes e apresentam novas contribuições no que tange ao protocolo de utilização do método Silveira (SILVEIRA, 1997) em bacias nessa escala de área.

Portanto, baseado nos estudos anteriores (SILVEIRA, 1997; HORN, 2016) e nos resultados dessa pesquisa, o protocolo de utilização do método Silveira (SILVEIRA, 1997) em bacias nessa escala de área deve ser:

1 – Dias sem chuvas antecedentes a primeira medição: 14 dias antecedentes as três campanhas de medição locais;

2 – Total de chuvas nesse período: admitido até 30 mm, desde que não ultrapasse um total de 5 mm diários;

3 – Em relação ao parâmetro  $K_{sub}$ : recomenda-se que a diferença relativa entre as três medições locais não exceda 100%;

4 – Em relação ao parâmetro  $C_{inf}$ : recomenda-se que a faixa de valores do  $C_{inf}$  seja em um intervalo entre 0,1 e 0,6;

5- Quanto ao n° de postos pluviométricos: aconselha-se o uso de séries de precipitações de no mínimo dois postos pluviométricos;

6 - Quanto à disposição espacial dos postos na bacia: não representou um condicionante, convergindo para o uso de séries de dados de postos que independem de sua posição espacial, desde que esteja localizado na área ou no entorno da bacia de interesse.

## REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2013.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil. Caderno de Recursos Hídricos. Volume 4. Agência Nacional de Águas. Disponível em: Brasília. 2007. 168 p.

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 85 a 87 - Integrantes da bacia 8 – Atlântico Sudeste. Executado por Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Hidráulica e Saneamento. 2001b.

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.

ARHEIMER, B.; LINDSTRO, G. Implementing the eu water framework directive in sweden. In: BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. Runoff Prediction in Ungauged Basins. Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge University Press. Cambridge-UK, 2013. P 353-360.

Armstrong, J.S. and F. Collopy. (1992). Error Measures for Generalizing about Forecasting Methods: Empirical Comparisons. *International Journal of Forecasting* 8: 69-80.

BAUMHARDT, E. Balanço 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.

Becker, A. (1992) Criteria for a Hydrologically Sound Structuring of Large Scale Land Surface Process Models. In: O’Kane, J.P., Ed., *Advances in Theoretical Hydrology*, Elsevier, Amsterdam, 97-111.

Benetti, A. D., Lanna, A. E., Cobalchini, M.S., 2003. Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*: Vol. 8, n. 2 Abr/Jun.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade espacial da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí, RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.43, n.12, p.2160-2167, dez, 2013.

BUSSAB, W. O., MORETTIN, P. A. Estatística Básica. 3a ed. São Paulo, Atual, 1986.

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. 2013. Runoff Prediction in Ungauged Basins. Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge University Press. Cambridge-UK.

CGEE- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS . Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o plano nacional de adaptação às mudanças climáticas - Eixo II-Geração, Sistematização e Disponibilização de Conhecimento. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – Ciência, Tecnologia e Inovação. TUCCI, C.E.M. (cons.). Porto Alegre. 2014.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

CORDEIRO, J.L.P.; HASENACK, H. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: Pillar, V. D.; Müller, S. C.; Castilhos, Z. M. S.; Jacques, A. V. A. (ed.) Campos Sulinos conservação e uso sustentável da biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2009, 403 p. il. col. Capítulo 23. p. 285 - 299.

CRUZ, J. C. Disponibilidade Hídrica para Outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. 2001. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

FEPAM- Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler– RS. OI.N.º FEPAM/DICOPI/SELM/9737/2016 Ref. Proc. n.º 007245-05.67/15-7.2016. Termo de Referência para apresentação de Laudo Técnico Hidrológico para fins de determinação da Vazão de Referência conforme definido na Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente CONSEMA 128/2006.

FERNANDES. E. M. da G. P.. Estatística aplicada. Braga: American Mathematical Society. 313 p. 1999.

FILHO, K. T. et al. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.40, n.4, p.311-322, abr. 2005.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. F. de. Princípios de Hidrologia Ambiental. UFSC/UFAL. 2005.

GENOVEZ, M .M. (2001) Vazões Máximas – Generalidades. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: Editora ABRH, p. 33-112.

Gomes F.P. Curso de estatística experimental. 14ª ed. Piracicaba, Degaspari. 477p. 2000.

GONÇALVES, J. M. S.; DOS SANTOS, N. M. Análise das classificações do relevo para o Rio Grande do Sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 13, n. 1.1985.

GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE – SEMA. Instrução Normativa nº. 001, de 08 de abril de 2009. HOLTZ, A.C.T. Precipitação – Generalidades. In: Hidrologia Básica.

HORN, J. F.C. Estimativa de Vazão com Dados Escassos: novas hipóteses para o Método Silveira. 2016. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Solo e Água, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

HORN, J. F.C. Regime Hidrológico de duas microbacias contíguas: um comparativo entre uso urbano e rural. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

Hrachowitz, M. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review, *Hydrological Sciences Journal*, 58:6, 1198-1255, DOI: 10.1080/02626667.2013.803183. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>> Acesso em outubro de 2016.

IBGE 2003. **Mapas temáticos do Projeto RADAMBRASIL do Rio Grande do Sul na escala 1:250.000**. IBGE/SAA-RS, Florianópolis, CD-ROM (Convênio entre IBGE e Secretaria da Agricultura e Abastecimento do RS).

ISHIHARA, Júnior et al. Avaliação do monitoramento pluviométrico da Amazônia Legal. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, v. 10, n. 3, 2013.

MARTINS, E .S.P.R e PAIVA, J.B.de Dias. (2001) Quantidade de Recursos Hídricos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: Editora ABRH, p. 531-566.

MCCUEN, Richard H. et al. *Hydrologic analysis and design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.

MENDIONDO, E., TUCCI, C.E.M., 1997. Escalas Hidrológicas. I: Conceitos, ABRH-RBRH, V. 2, n.2, p. 21-44, Jul/Dez.

MENDONÇA, A .S. (2001) Introdução: Razões para a quantificação. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: Editora ABRH, p. 32.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 16 nov. 2015.

MORENO, J. A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre; Secretaria do Estado do Rio Grande do Sul, 1961. 82 p.

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

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRASSIAN, V. Does a large numbers of parameters enhance model performance? Comparative assessment of commom catchment model structures on 429 catchments. Journal os hydrology. V. 242. p. 275-301. 2001.

PAIVA, E.M.C.D. (2001) Rede de Monitoramento Hidrológico. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: Editora ABRH, p. 493-506.

PIMENTEL, Luciene. Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente. Elsevier Brasil, 2015.

PINTO, L. de Sousa. N.São Paulo. Edgard Blucher; Rio de Janeiro, Fundação de Material Escolar. 1976. p. 7-35.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João Vianeí. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. São José dos Campos: INPE, 2000.

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.

SILVEIRA, P. da Costa. Precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Vacacaí, RS. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2012. 57 p.

SILVEIRA, G.L., TUCCI, C.E.M., SILVEIRA, A.L.L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 3, nº 3 pag. 111-131. Porto Alegre, 1998.

SILVEIRA, G. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias com carência de dados fluviométricos. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

TAMIOSSO, M. Avaliação do método Silveira com uso de dois modelos chuva-vazão para estimativa da disponibilidade hídrica em pequenas bacias com pequenas amostragens de vazão. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TUCCI, C. E.M. Processos Hidrológicos e os Impactos do Uso do Solo. In: Clima e Recursos Hídricos no Brasil. TUCCI, C.E.M. e BRAGA, B. Org. Porto Alegre. ABRH. P 31-74. 2015.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: Tucci, C. E. M.(Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 4.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2009. p.573-620

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

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre, ed. ABRH/UFRGS, 2002. 256 p.

TUCCI, C. E.M e CLARKE, R.T (2001) Regionalização Hidrológica. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: Editora ABRH, p. 169 a 222.

UFSM - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - Projeto bacias vertentes: estratégias metodológicas para monitoramento, modelagem e gestão. Rede de pesquisa: UFSM, EPUSP e IPH/UFRGS. Relatório Final: FINEP, 2012.

UFSM/SEMA (2004a). Desenvolvimento de ações para a implantação da outorga na Bacia do rio Santa Maria: Relatório Final. Porto Alegre: Universidade Federal de Santa Maria, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, RS e Secretaria de Obras Públicas e Saneamento, RS.

UFRGS-IB-Centro de Ecologia. Mapeamento da cobertura vegetal do Bioma Pampa: Ano-base 2009. Porto Alegre: UFRGS-IB-Centro de Ecologia. 2016.

WILKS, D. S. 2006. Statistical Methods in the Atmospheric sciences, 2nd Ed., Academic Press, 627 pp.

WMO, World Meteorological Organization. Guide to hydrological practices. WMO-n.168.2008.734p, Geneva.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.