

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – *CAMPUS* CASCAVEL**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIQUIRI**

**FERNANDA CRISTINA ARAUJO**

**CASCAVEL**

**2015**

**FERNANDA CRISTINA ARAUJO**

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIQUIRI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

**CASCADEL - PARANÁ - BRASIL**

**2015**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

A689r

Araujo, Fernanda Cristina  
Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Rio Piquiri./Fernanda  
Cristina Araujo. Cascavel, 2015.

118 p.

Orientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.  
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Recursos hídricos. 2. Vazões. 3. Método tradicional. 4. Método  
interpolação linear. 5. Método de Chaves. I Mello, Eloy Lemos de. II. Costa,  
José Carlos da. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

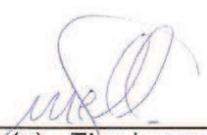
CDD 21.ed. 551.48

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

# FERNANDA CRISTINA ARAUJO

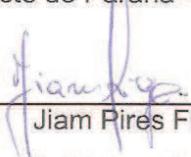
## Regionalização de vazões na bacia Hidrográfica do Rio Piquiri

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos hídricos e saneamento ambiental, linha de pesquisa Saneamento ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



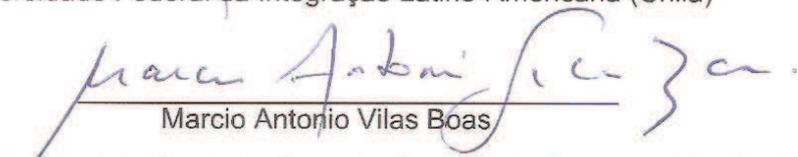
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) - Eloy Lemos de Mello

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



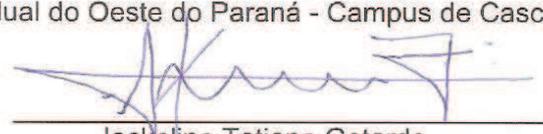
\_\_\_\_\_  
Jiam Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)



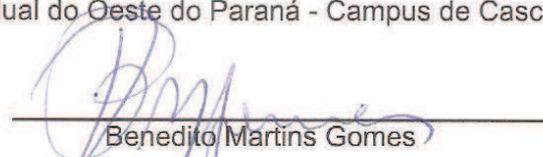
\_\_\_\_\_  
Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



\_\_\_\_\_  
Jackeline Tatiane Gotardo

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



\_\_\_\_\_  
Benedito Martins Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 12 de fevereiro de 2015

## BIOGRAFIA

Fernanda Cristina Araujo, nascida em 13 de agosto de 1990 na cidade de Cascavel – PR, filha de Antonio Araujo e Antonia Iria Souza Araujo. Formada em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) *campus* de Cascavel, em 2012. Em 2013 iniciou o curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, nível mestrado, na área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais Antonio Araujo e Antonia Iria Araujo, ao meu irmão Luciano Cristian Araujo, a minha cunhada Fabiola Scopel e aos meus sobrinhos Gustavo Gabriel e Maria Sophia, pelo carinho, companheirismo e apoio à realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pela inspiração e conforto em todos os momentos desta caminhada;

À minha família, meus queridos pais Antonio e Antonia Iria, a meu irmão Luciano e à minha cunhada Fabiola, que sempre acreditaram na minha capacidade de vencer e que sempre me auxiliaram em tudo, obrigada por todo carinho e pelo apoio, por proporcionarem a realização deste sonho, agradeço o amor e o esforço de cada dia, tudo que consegui devo a vocês;

A meu orientador Eloy Lemos de Mello, pela dedicação constante, ajuda e compreensão no desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, pelas orientações que foram essenciais para o meu crescimento;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e aos seus professores e funcionários, pela oportunidade de aprendizado com ótima qualidade.

À CAPES, pelo auxílio financeiro na concessão da bolsa de estudos;

Às minhas colegas Gisele, Izabela, Larissa, Luciana e Angélica, pelo apoio e ajuda sempre;

Aos meus amigos Rodrigo Henrique e Bruno Bonembergner, que sempre estiveram prontos para me auxiliar, principalmente nos momentos mais difíceis, obrigada por tudo e pelo companheirismo;

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos momentos de descontração, conhecimentos compartilhados e companheirismo.

Ao *campus* da UNIOESTE de Cascavel e aos seus funcionários, pela colaboração;

A todos os professores que contribuíram de uma ou outra forma na minha formação;

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para minha formação.

# REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIQUIRI

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi regionalizar as vazões mínimas com sete dias de duração, média anual de longa duração, máxima e vazões de permanência de 90 e 95% da bacia hidrográfica do Rio Piquiri - PR. As vazões máximas foram regionalizadas associadas a um período de retorno específico (2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos) e a mínima com duração de sete dias foi associada ao período de retorno de 10 anos. Para representar as séries de vazões máximas e mínimas foram utilizadas as distribuições de probabilidade de Pearson tipo III, Log-Normal a dois e três parâmetros e Log-Pearson tipo III, Gumbel (apenas para máximas) e Weibull (apenas para mínima). A distribuição Log-pearson tipo III obteve em 100% dos casos, o menor erro padrão, apresentando-se com o melhor ajuste aos dados de vazão mínima. Cerca de 70% dos dados das estações apresentaram o menor erro padrão quando ajustadas a esta distribuição Log-Normal a três parâmetros. Desta maneira a distribuição Log-Normal a três parâmetros, foi adotada de forma padrão para as vazões máximas, porém as estações 64765000 (Porto Paiquerê), 64771500 (Porto Guarani), 64785000 (Ponte do Goio-Bang) que não obtiveram ajuste a esta distribuição, utilizou a distribuição Log-Normal a dois parâmetros. A vazão média de longo período, por ser caracterizada como a média das vazões médias anuais, foi regionalizada sem considerar o nível de risco. Para a obtenção da curva de permanência realizou-se o procedimento baseado na obtenção de classes de frequência. No procedimento de regionalização foram empregados: o método Tradicional descrito por Eletrobrás (1985a), o método de Interpolação linear (ELETROBRÁS, 1985b), o método de Chaves et al. (2002), Interpolação linear modificado e Chaves modificado (NOVAES *et al.*, 2007). Como variáveis explicativas, para o método Tradicional, foram utilizadas as características físicas: área de drenagem; o comprimento do rio principal; declividade média da bacia; declividade média do rio principal; densidade de drenagem, e as características climáticas: precipitação total anual; precipitação do trimestre mais chuvoso; precipitação do trimestre mais seco. Os modelos de regressão que melhor se ajustam aos dados de vazão são o potencial simples e o potencial múltiplo. A área e a densidade de drenagem são as melhores variáveis explicativas para a estimativa da vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ). O comprimento do rio principal é a melhor variável explicativa para a estimativa das vazões com 90 e 95% de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , respectivamente). A área e a densidade de drenagem são as melhores variáveis explicativas para a estimativa da vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ), o comprimento do rio principal e a área para a estimativa das vazões com 90 e 95% de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , respectivamente) e o comprimento do rio principal é a melhor variável explicativa para a estimativa das vazões máximas considerando todos os períodos de retorno estudados. O método da interpolação linear faz estimativas semelhantes ao método Tradicional e pode ser utilizado em situações, principalmente quando não há informações suficientes para o ajuste dos modelos de regressão. As estimativas das vazões mínimas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) e vazão média ( $Q_{med}$ ), realizadas pelo método de Chaves são semelhantes ao Tradicional, enquanto que as estimativas das vazões máximas, para todos os períodos de retorno estudados, apresentaram erros muito elevados. Os métodos modificados não promoveram a melhora expressiva das estimativas em comparação com os métodos originais.

**Palavras-chaves:** método tradicional, método interpolação linear, método de Chaves.

# FLOW REGIONALIZATION OF THE PIQUIRI RIVER BASIN

## ABSTRACT

The objective of this research was to regionalize the minimum seven-day flows, annual average long-term duration, maximum and permanence flows of 90 and 95% of the catchment area of the Piquiri River - PR. The peak flows were regionalized associated with a specific return period (2, 5, 10, 25, 50 and 100 years) and the minimum flow lasting seven days was associated with a 10-year return period. To represent the series of maximum and minimum flows probability Pearson type III distributions, two- and three-parameter Log-normal and type III Log-Pearson, Gumbel (for maximum flows) and Weibull (for minimum flows only) were used. Type III Log-Pearson distribution obtained in 100% of cases, the lowest standard error, presenting the best adjustment with the minimum flow data. About 70% of the data stations showed the lowest standard error when adjusted to this three-parameter log-normal distribution. Thus, the three-parameter Log-Normal distribution was adopted as default, but stations 64765000 (Porto Paiquerê), 64771500 (Porto Guarani), 64785000 (Goio Bang Bridge), which did not obtain adjustment with this distribution, used the two-parameter Log-Normal distribution. The period average flow, once it is characterized as the average of the annual average flow, was regionalized without considering the risk level. In order to obtain the permanence curve, the procedure based on obtaining the frequency classes was carried out. In the regionalization procedure the following methods were employed: the traditional method described by Eletrobrás (1985a), the linear interpolation method (ELETROBRÁS, 1985b), the method proposed by Chaves *et al.* (2002), the modified linear interpolation and the modified Chaves (NOVAES *et al.*, 2007). As explanatory variables for the traditional method, the following physical characteristics were used: drainage area; the length of the main river; the basin mean land slope; the mean land slope of the main river; drainage density, and climatic characteristics: the total annual rainfall; the precipitation of the wettest quarter; the precipitation of the driest quarter. The regression models that best fit the flow data are the simple potential and the multiple potential ones. The area and the density drainage are the best explanatory variables for the estimate the minimum seven-day flow and ten-year return period ( $Q_{7,10}$ ). The length of the main river is the best explanatory variable for the estimate of flow rates of 90 and 95% of permanence ( $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ , respectively). The area and the drainage density are the best explanatory variables to estimate the minimum seven-day flow and the ten-year return period of ( $Q_{7,10}$ ), the length of the main river and the area for the flow estimate with 90 and 95% of permanence ( $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ , respectively) and the length of the main river is the best explanatory variable for the estimate of maximum flows considering all return periods studied. The method of linear interpolation produces similar estimates to the ones obtained with the Conventional method and can be used in situations, especially when there is sufficient information for adjustment of the regression models. Estimates of minimum flows ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ ) and of average flow ( $Q_{med}$ ), performed by using the Chaves method are similar to the ones obtained with the Conventional method, while the estimates of peak flows for all return periods studied, presented major errors. The modified methods did not promote significant improvement of the estimates compared to the original methods.

**Keywords:** traditional method, linear interpolation method, Chaves method.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 Objetivo geral .....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
3.1 Gestão de recursos hídricos .....	4
3.2 Vazão máxima.....	5
3.3 Vazão média de longo período .....	6
3.4 Vazão mínima .....	6
3.5 Curva de permanência .....	7
3.6 Redes hidrológicas brasileiras .....	7
3.7 Regionalização hidrológica.....	8
3.7.1 Método tradicional .....	9
3.7.2 Método da interpolação linear .....	11
3.7.3 Método da interpolação linear modificado .....	11
3.7.4 Método de Chaves .....	11
3.7.5 Método de Chaves modificado .....	12
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>13</b>
4.1 Descrição da área de estudo.....	13
4.2 Seleção, análise e tratamento dos dados .....	14
4.2.1 Dados pluviométricos .....	14
4.2.2 Dados fluviométricos .....	17
4.3 Obtenção das variáveis dependentes.....	18
4.4 Obtenção das variáveis independentes .....	20
4.4.1 Características físicas .....	20
4.4.2 Características climáticas .....	21
4.5 Métodos de regionalização.....	22
4.5.1 Método tradicional .....	22
4.5.2 Método baseado na interpolação linear .....	23

4.5.3	Método da interpolação linear modificado .....	25
4.5.4	Método proposto por Chaves <i>et al.</i> (2002).....	26
4.5.5	Método de Chaves modificado .....	28
4.6	Enquadramento dos postos fluviométricos existentes nos diferentes casos .....	28
4.7	Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias.....	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
5.1	Variáveis dependentes .....	32
5.2	Características físicas e climáticas .....	34
5.3	Modelos de regressão - método tradicional .....	38
5.4	Comparação dos métodos de regionalização de vazões .....	39
5.4.1	Vazões mínimas com 7 dias de duração e períodos de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ )... 39	
5.4.2	Vazão de permanência de 90% ( $Q_{90}$ ) .....	44
5.4.3	Vazão de permanência de 95% ( $Q_{95}$ ) .....	48
5.4.4	Vazão média ( $Q_{med}$ ).....	52
5.4.5	Vazões máximas associadas aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $Q_{máx,2}$ , $Q_{máx,5}$ , $Q_{máx,10}$ , $Q_{máx,25}$ , $Q_{máx,50}$ , e $Q_{máx,100}$ ) .....	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>76</b>
	<b>Apêndice A Diagrama de barras das estações pluviométricas e fluviométricas .....</b>	<b>77</b>
	<b>Apêndice B Valores das vazões máximas, intervalos de confiança superior e inferior e erro padrão das distribuições estudadas para cada estação da bacia do rio Piquiri .....</b>	<b>79</b>
	<b>Apêndice C Distribuição espacial dos erros relativos entre as vazões máximas, obtidos das distribuições de probabilidade e as estimadas pelos métodos: tradicional; interpolação linear; interpolação linear modificado; Chaves (e) Chaves modificado.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Estações pluviométricas selecionadas .....	14
<b>Tabela 2</b>	Estações fluviométricas selecionadas .....	17
<b>Tabela 3</b>	Resumo da metodologia para extração das características físicas.....	21
<b>Tabela 4</b>	Enquadramento das situações dos postos fluviométricos existentes em relação ao posto fluviométrico mais próximo.....	30
<b>Tabela 5</b>	Distribuições de probabilidade que obtiveram o menor erro padrão, aplicadas em cada estação e a cada período de retorno, para determinação das vazões mínimas associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) e máximas ( $Q_{máx,2}$ , $Q_{máx,5}$ , $Q_{máx,10}$ , $Q_{máx,25}$ , $Q_{máx,50}$ e $Q_{máx,100}$ ) .....	32
<b>Tabela 6</b>	Vazões mínimas ( $m^3 s^{-1}$ ), associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ), segundo a distribuição Log-Person Tipo III, vazões de 90 e 95 % de permanência ( $Q_{90}$ e $Q_{95}$ ) e vazão média ( $Q_{med}$ ), obtidas para cada uma das estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri .....	33
<b>Tabela 7</b>	Vazões máximas diárias ( $m^3 s^{-1}$ ), associadas a diferentes períodos de retorno ( $Q_{máx,2}$ , $Q_{máx,5}$ , $Q_{máx,10}$ , $Q_{máx,25}$ , $Q_{máx,50}$ e $Q_{máx,100}$ ), obtidas após o ajuste das distribuições de probabilidade, para cada uma das estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri.....	34
<b>Tabela 8</b>	Características físicas das sub-bacias associadas às estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri .....	35
<b>Tabela 9</b>	Valores de precipitação total anual, do trimestre mais seco e do trimestre mais chuvoso, obtidos pelo método de interpolação do quadrado médio da distância (IDW) das sub-bacias, associados às estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri .....	36
<b>Tabela 10</b>	Equações selecionadas para estimar vazões de mínimas ( $Q_{7,10}$ , $Q_{90}$ e $Q_{95}$ ), médias ( $Q_{med}$ ) e máximas ( $Q_{máx,2}$ , $Q_{máx,5}$ , $Q_{máx,10}$ , $Q_{máx,25}$ , $Q_{máx,50}$ e $Q_{máx,100}$ ), em $m^3 s^{-1}$ na bacia hidrográfica do rio Piquiri .....	38
<b>Tabela 11</b>	Valores de $Q_{7,10}$ , obtidos da análise probabilística das séries observadas de $Q_7$ e $Q_{7,10}$ estimadas e erro relativo (ER) entre as $Q_{7,10}$ , estimadas pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3 s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	40
<b>Tabela 12</b>	Valores de vazão de permanência de 90% ( $Q_{90}$ ), obtidos pelo método de classes de frequência, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3 s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	45
<b>Tabela 13</b>	Valores de vazão de permanência de 95% ( $Q_{95}$ ), obtidos pelo método de classes de frequência, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3 s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	49

<b>Tabela 14</b>	Valores de vazão média ( $Q_{med}$ ), obtidos a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da média das vazões médias anuais), estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	53
<b>Tabela 15</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 2 anos ( $Q_{máx,2}$ ), obtidos pela análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	58
<b>Tabela 16</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 5 anos ( $Q_{máx,5}$ ), obtidos pela análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	59
<b>Tabela 17</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{máx,10}$ ), obtidos da análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	60
<b>Tabela 18</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 25 anos ( $Q_{máx,25}$ ), obtidos pela análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	61
<b>Tabela 19</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 50 anos ( $Q_{máx,50}$ ), obtidos pela análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	62
<b>Tabela 20</b>	Valores das vazões máximas associadas ao período de retorno de 100 anos ( $Q_{máx,100}$ ), obtidos pela análise probabilística, estimados pelas cinco metodologias avaliadas ( $m^3s^{-1}$ ) e os erros relativos (ER).....	63

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Piquiri - PR. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S. ....	13
<b>Figura 2</b>	Localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S. ....	16
<b>Figura 3</b>	Localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S. ....	18
<b>Figura 4</b>	Situação de um ponto de interesse, situado em trecho de canal a montante (a) e a jusante (b) de um posto com vazão de referência conhecida. ....	24
<b>Figura 5</b>	Situação de um ponto de interesse, situado entre dois postos com vazão de referência conhecida. ....	24
<b>Figura 6</b>	Situação de um ponto de interesse localizado em um canal efluente, cuja foz se encontra entre dois postos de vazão conhecida, em um canal de ordem superior. ....	25
<b>Figura 7</b>	Enquadramento das situações dos postos fluviométricos existentes em relação ao posto fluviométrico mais próximo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S. ....	29
<b>Figura 8</b>	Mapa das isoietas, referente à precipitação total anual (a), trimestre mais chuvoso (b) e trimestre mais seco (c) para a bacia hidrográfica do rio Piquiri. ....	37
<b>Figura 9</b>	Erros relativos entre as vazões mínimas com 7 dias de duração e períodos de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ), obtidos a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	41
<b>Figura 10</b>	Relação entre as vazões mínimas com 7 dias de duração e períodos de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	43
<b>Figura 11</b>	Erros relativos entre as vazões de permanência de 90 % ( $Q_{90}$ ), obtidos a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da curva de permanência) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	46

<b>Figura 12</b>	Relação entre as vazões de permanência de 90 % ( $Q_{90}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da curva de permanência) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	47
<b>Figura 13</b>	Erros relativos entre as vazões de permanência de 95 % ( $Q_{95}$ ), obtidos a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da curva de permanência) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	50
<b>Figura 14</b>	Relação entre as vazões de permanência de 95 % ( $Q_{95}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da curva de permanência) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	51
<b>Figura 15</b>	Erros relativos entre as vazões médias ( $Q_{med}$ ), obtidos a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da média das vazões médias anuais) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	54
<b>Figura 16</b>	Relação entre as vazões médias ( $Q_{med}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da média das vazões médias anuais) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Interpolação linear modificado; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	56
<b>Figura 17</b>	Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 2 anos ( $Q_{máx,2}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	65
<b>Figura 18</b>	Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 5 anos ( $Q_{máx,5}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	66
<b>Figura 19</b>	Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{máx,10}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	67
<b>Figura 20</b>	Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 25 anos ( $Q_{máx,25}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. ....	68

- Figura 21** Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 50 anos ( $Q_{máx,50}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. .... 69
- Figura 22** Relação entre as vazões máximas associada ao período de retorno de 100 anos ( $Q_{máx,100}$ ), obtida a partir da análise da série histórica (Vazão obtida da distribuições de probabilidade) e as estimadas pelos métodos: (a) Tradicional; (b) Interpolação linear; (c) Chaves; (d) Chaves (e) Chaves modificado. .... 70

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das vazões é extremamente importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, pois, auxilia em projetos de barragens e construções hidrelétricas; na avaliação da disponibilidade de água para irrigação e outros usos da água; na avaliação de riscos de cheias e secas e outras preocupações (MASIH *et al.*, 2010).

Um dos instrumentos adotados na Lei nº 9.433/97, para dar suporte à gestão dos recursos hídricos é a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, condicionada a uma percentagem da vazão mínima de referência, a qual varia de acordo com o regime e a jurisdição do rio. Em rios de regime permanente ou rios perenes a outorga é usualmente feita com base na vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) ou, nas vazões mínimas associadas às permanências de 90% e 95% no tempo ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , respectivamente), atribuindo-se valores percentuais a elas, ou seja, outorgando-se apenas parcelas das vazões mínimas de referência (FERREIRA, 2010).

Neste âmbito de gerenciamento, é importante também a determinação da vazão média, a qual auxilia usuários e órgãos gestores no estudo da possibilidade de implantação de reservatórios de regularização, como alternativa para solucionar problemas de quantidade de água e atender aos usos múltiplos (ALMEIDA, 2010). Já o conhecimento da vazão máxima, além de ser utilizado em estudos básicos de projetos e implantação de obras hidráulicas, pode ser usado como instrumento de gestão, uma vez que é essencial o conhecimento de sua frequência, visto que é causadora de enchentes, que trazem impactos negativos para a sociedade como perdas econômicas, danos ao desenvolvimento e, até mesmo, perdas de vidas humanas (ARAÚJO, 2008).

No Brasil, ainda existem regiões sobre as quais os dados hidrológicos básicos são reduzidos ou inexistentes, devido aos elevados custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, principalmente em grandes bacias. Além disso, muitos postos hidrológicos têm dados de poucos anos, que não compõem uma amostra representativa sobre a vazão (CASTRO; RUHOFF, 2009). A falta de dados para estimar as vazões em bacias hidrográficas é um problema fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos e um grande desafio para a comunidade científica (LI; SHAO; ZHANG, 2010).

A regionalização vem sendo utilizada para superar esta falta de dados hidrológicos em lugares onde há pouca ou nenhuma informação disponível (SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011). A técnica da regionalização visa transferir informações das regiões

monitoradas para as áreas carentes de dados. Além disso, o estudo possibilita a identificação de áreas que necessitam de melhoria da rede hidrometeorológica.

Diversos métodos têm sido testados e utilizados, em inúmeros estudos hidrológicos realizados, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Almeida (2010) relata que os métodos têm buscado agregar características hidrológicas a análises estatísticas, procurando uma forma mais objetiva de obter Equações que possam ser aplicadas a uma determinada região.

Em 1985, a Eletrobrás em parceria com o Instituto de Pesquisa Hidráulicas – IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação e coordenação do Departamento de Recursos Energéticos – DEEN, divulgou um guia metodológico para regionalização de vazões, no qual apresenta os procedimentos, passo a passo, para elaboração da regionalização. O objetivo geral do guia foi estabelecer uma padronização desse procedimento (ELETROBRÁS, 1985a). O método ficou conhecido como método tradicional (MT) ou método da Eletrobrás, e que consiste em duas etapas: 1) identificação de regiões hidrologicamente homogêneas; 2) ajuste de equações de regressão, entre as variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem, para cada região homogênea.

Entretanto, quando as bases de dados disponíveis em uma bacia hidrográfica são reduzidas, a regionalização de vazões por esse método apresenta grandes restrições. Como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras possui escassez de informações, a precisão e o uso deste método de regionalização pode se tornar não recomendável (NOVAES, 2005).

Algumas metodologias têm sido desenvolvidas de modo a superar esta limitação. Dentre elas, destacam-se: a metodologia baseada na interpolação linear descrita pela Eletrobrás (1995b), o método proposto por Chaves *et al.* (2002) e as modificações propostas por Novaes *et al.* (2007).

Visto que a Bacia Hidrográfica do Piquiri possui uma área total de 24.156 km<sup>2</sup> (IAP, 2008), em torno de 12% da área do estado do Paraná (PARANÁ, 2013), banhando totalmente ou parcialmente 68 municípios (IAP, 2008) com uma população de 609.473 habitantes (IBGE, 2004) cerca de 6% do total do estado (PARANÁ, 2013), este estudo teve como objetivo analisar e comparar os diferentes métodos de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Piquiri.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Comparar diferentes métodos de regionalização de vazões para a bacia hidrográfica do rio Piquiri, no estado do Paraná: método tradicional (Eletrobrás), método da interpolação linear, método de Chaves, método da interpolação linear modificado, e método de Chaves modificado.

### 2.2 Objetivos específicos

- Dentre as variáveis físicas e climáticas, definir qual melhor explica as vazões mínimas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), a vazão média ( $Q_{med}$ ) e as vazões máximas ( $Q_{máx}$ ) para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos;
- Definir o modelo de regressão (linear, potencial, exponencial ou logarítmico) que melhor se ajusta aos dados, no emprego do método tradicional.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Gestão de recursos hídricos

A disponibilidade de água doce para o consumo humano é um dos maiores problemas ambientais do mundo. Em face da iminente situação de escassez de água, ocasionada pela poluição dos recursos hídricos, emerge uma nova forma de gestão pautada no planejamento e manejo desse recurso de forma integrada, participativa e descentralizada (MELO *et al.*, 2010).

A existência de problemas sérios relacionados à disponibilidade de água para a humanidade foi apontada formalmente na Conferência Internacional de Água e Meio Ambiente, em Dublin, Irlanda, em 1992, quando representantes de 100 países e 80 organismos internacionais, intergovernamentais e não governamentais reuniram-se e diagnosticaram que a situação futura dos recursos hídricos no mundo era crítica (ICWE, 1992).

Na ocasião, foram estabelecidos quatro princípios para a gestão sustentável da água, assim sistematizados: i) a água doce é um recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, para o desenvolvimento e para o meio ambiente; ii) seu gerenciamento deve ser baseado na participação dos usuários, dos planejadores e dos formuladores de políticas, em todos os níveis; iii) as mulheres desempenham papel essencial na provisão, no gerenciamento e na proteção da água; iv) o reconhecimento do valor econômico da água (ICWE, 1992).

Em seguida, os princípios de Dublin sobre a água foram referendados na Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento (Cnumad), também conhecida como Rio – 92 ou Eco – 92, realizada no Rio de Janeiro em 1992. Entre os vários documentos produzidos, o de maior importância foi a Agenda 21, apesar de ser tratada em diversos capítulos do documento, a questão dos recursos hídricos é especificada no capítulo 18, no qual são propostos programas de ações referentes às águas doces (ONUBR, 1992).

Em 1997, ocorreu o 1º Fórum Mundial da Água, em Marrakesh, Marrocos. Na ocasião, o Conselho Mundial da Água foi incumbido de preparar o trabalho intitulado: “Visão sobre a Água no Mundo, Vida e Meio Ambiente no Século XXI”. Também foram estabelecidas as bases para a criação da Comissão Mundial sobre a Água no Século XXI e estrutura para Ação e a Parceria Global da Água (MELO *et al.*, 2010).

Nesse contexto, no Brasil, em 8 de janeiro de 1997, por meio da Lei nº 9.433 foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos o qual tem como objetivos:

I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;  
II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;  
III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997, p. 15).

A Lei nº 9.433/1997, por seu caráter inovador, constitui-se em uma das mais modernas e arrojadas propostas de gestão pública das águas no Brasil, apresentando-se como ponto de convergência dos princípios da Agenda 21 e representando um marco histórico para a implementação do sistema de gestão integrado e participativo no Brasil (ANA, 2012).

Nesse sentido, o conhecimento das vazões é extremamente importante e possibilita o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (MASHI *et al.*, 2010). As vazões máximas, médias, mínimas e a curva de permanência, entre outras aplicações, possibilitam avaliar a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, estimar os riscos de inundação e o dimensionamento de obras hidráulicas para o controle de enchentes e, ainda, auxiliam no estudo da implantação de reservatórios regularizadores etc.

### 3.2 Vazão máxima

A vazão máxima de um rio é entendida como sendo um valor de vazão associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado (SANTOS, 2010). É utilizada na prevenção de enchentes e no projeto de obras hidráulicas, tais como canais, bueiros, vertedores de barragens, galerias de águas pluviais e sistemas de drenagem (PRUSKI; PRUSKI, 2011). Segundo Araújo (2008), a segurança de qualquer uma dessas obras depende da precisão e/ou da confiabilidade da vazão máxima, também entendida como vazão de projeto ou de dimensionamento.

Os valores das vazões de projeto, para dimensionamento das estruturas hidráulicas, são associados a tempos de retorno notáveis que, por sua vez, são estabelecidos em função de riscos, porte da obra, localização e cronograma de construção (TUCCI, 2009). Deve-se definir o risco de um projeto de acordo com os objetivos do projeto.

Segundo Tucci e Mendes (2006), a vazão máxima pode ser estimada a curto ou longo prazo. A estimativa em curto prazo é feita por meio do acompanhamento de um evento resultante de uma precipitação em tempo real. A previsão em longo prazo é alcançada por meio da previsão estatística da vazão máxima (diária ou instantânea) em qualquer ano.

### 3.3 Vazão média de longo período

Segundo Pruski e Pruski (2011), a vazão média permite caracterizar a disponibilidade hídrica potencial de uma bacia sendo, a maior vazão possível de ser regularizada no curso d'água, abstraindo-se as perdas por evaporação e infiltração. Os autores explicam que a vazão média de longa duração relaciona-se com a disponibilidade potencial e, para a adequada gestão dos recursos hídricos, é necessário, tal como na gestão de um orçamento doméstico, conhecer essa disponibilidade (natural e potencial) de água a fim de compatibilizá-la com as demandas já existentes e futuras.

Para calcular a vazão média de longo período, utiliza-se a média aritmética dos valores de vazão médios diários (WOLFF, 2013), visto que a probabilidade de ocorrência dessas vazões médias é pouco utilizada em projetos hidrológicos, mas pode ser utilizada para indicar os limites de variação dentro de determinados riscos, caracterizando a variabilidade anual (TUCCI, 2002).

### 3.4 Vazão mínima

A disponibilidade natural de água na hidrografia pode ser avaliada pela análise das vazões mínimas observadas nos períodos de estiagem, refletindo o potencial disponível para o abastecimento de água para populações, indústrias, irrigação, navegação, dessedentação animal, lançamento de poluentes e outras atividades, sem que lhes seja necessária a regularização de vazão dos cursos d'água (PRUSKI; PRUSKI, 2011).

Na prática pouca utilidade têm as vazões mínimas instantâneas, que devem ser muito próximas da vazão mínima diária. Normalmente durações maiores, como sete dias, apresentam maior interesse ao usuário, pois a sequência de vazões baixas é que representa uma situação desfavorável para a demanda ou para as condições de conservação ambiental (TUCCI; MENDES, 2006).

Apesar da diversificação dos critérios utilizados para avaliação dos pedidos de outorga, tem-se adotado pelos órgãos gestores a  $Q_{7,10}$  (ANA, 2007a). A  $Q_{7,10}$  corresponde à vazão mínima com sete dias de duração e tempo de retorno de dez anos, ou seja, a cada dez anos, em média, há o risco de ocorrerem sete dias seguidos com esta vazão mínima média (FIOREZE; OLIVEIRA; FRANCO, 2010).

### 3.5 Curva de permanência

Nem sempre o interesse do usuário de água está voltado para o conhecimento das vazões médias, máximas ou mínimas. Muitas vezes, o interesse consiste em conhecer a amplitude de variação das vazões e, principalmente, a frequência com que cada valor de vazão ocorre em determinada seção do curso d'água. A resposta para essa questão é obtida por intermédio da determinação da curva de permanência (LEMOS, 2006).

A curva de permanência de vazões é a relação entre as vazões diárias de um ponto num trecho do rio e a frequência em que elas são igualadas ou superadas, permitindo estimar a probabilidade de excedência das vazões no tempo. Esta curva retrata as características de regularização natural do rio e, geralmente, apresenta inflexões que distinguem três partes da mesma: a primeira e a última descrevem o comportamento das máximas e mínimas, respectivamente, enquanto o trecho médio representa a faixa dominante de vazões (VIRÕES, 2013).

Em alguns estados, para avaliação dos pedidos de outorga, a vazão associada às permanências de 90% ( $Q_{90}$ ) ou 95% ( $Q_{95}$ ) são usadas como valores de referência para o processo de outorga, sendo disponibilizado apenas um percentual destas vazões de referência (ANA, 2007a).

### 3.6 Redes hidrológicas brasileiras

O levantamento das informações necessárias à Hidrologia é realizado por meio de redes de estações hidrométricas, cujas séries de dados têm sua importância proporcional à sua extensão temporal. O cadastro de estações hidrométricas no Brasil foi iniciado por volta de 1968, capitaneado pelo então Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE (ANA, 2007b). Criada em 17 de julho de 2000 e instituída em 19 de dezembro do mesmo ano, a Agência Nacional de Águas – ANA recebeu, dentre outras, a atribuição de promover a coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional.

Segundo a ANA, existem cerca de 14.822 estações hidrometeorológicas 63 em todo o país (ANA, 2007b). Com essas estações, é possível mensurar o volume de chuvas, evaporação da água, nível e vazão dos rios, quantidade de sedimentos e qualidade das águas em estações, respectivamente, pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas, sedimentométricas e de qualidade da água.

Do número total de estações cadastradas, 8.102 são pluviométricas e 5.283 são fluviométricas. As informações oriundas desse monitoramento encontram-se disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH.

O estabelecimento de uma boa rede hidrológica e sua manutenção ininterrupta são peças fundamentais na condução de estudos hidrológicos, pois a precisão das estimativas das variáveis hidrológicas depende da disponibilidade de dados primários confiáveis (OLIVEIRA, 2008). Entretanto uma rede hidrométrica dificilmente cobre todos os locais de interesse, necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. A escassez de dados, em especial os fluviométricos, é decorrente do elevado custo que envolve a implantação, operação e manutenção de uma rede de monitoramento (ARAÚJO, 2008).

Sob coordenação da ANA, a Rede Hidrometeorológica monitora menos de 20% dos rios, cerca de 2.176 dos 12.963 mil rios brasileiros cadastrados no Sistema de Informações Hidrológicas, inclusive os fronteirços e transfronteirços (ANA, 2007b). Como a maioria dos postos fluviométricos estão localizados nas grandes bacias hidrográficas, a escassez de séries históricas em pequenas bacias é uma realidade.

No caso das bacias sem monitoramento, adota-se a técnica da regionalização, que objetiva, dentre outros aspectos, transferir informações daquelas regiões onde são realizados monitoramentos para as áreas ainda carentes de dados (VIRÕES, 2013).

### **3.7 Regionalização hidrológica**

A regionalização hidrológica apresenta-se como uma técnica por meio da qual é possível a transferência de informações dentro de uma área com comportamento hidrológico uniforme (REIS *et al.*, 2013). Objetiva, principalmente, estimar o escoamento superficial (vazão) da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica e é realizada a partir das séries históricas de vazão (CASTRO; RUHOFF, 2009).

De acordo com Tucci (2009), os dados hidrológicos passíveis de serem regionalizados são: variáveis, funções e parâmetros. Variáveis: a vazão média de longo termo, a precipitação média anual e a evapotranspiração potencial e real; funções: curvas de permanência e de regularização, distribuições de probabilidades empíricas e teóricas de chuva, e descarga diárias máximas e mínimas anuais; parâmetros: sejam eles de modelos ou representantes de características das bacias hidrográficas.

A importância da regionalização de vazões não se deve apenas ao fato de ela ser capaz de espacializar as informações hidrológicas, mas também por identificar aquelas áreas que necessitam de melhoria da rede hidrometeorológica, seja pela instalação de

novas ou relocação de estações existentes. Além disso, podem fornecer um diagnóstico da qualidade dos dados das estações, funcionando como ferramenta de auxílio à análise de consistência dos dados (VIRÕES, 2013).

Diversos métodos têm sido testados e utilizados, em inúmeros estudos hidrológicos realizados. Almeida (2010) relata que os métodos têm buscado agregar características hidrológicas a análises estatísticas, procurando uma forma mais objetiva de obter equações que possam ser aplicadas a uma determinada região.

### 3.7.1 Método tradicional

O método tradicional consiste na identificação de região hidrológicamente homogênea e no ajuste de equações de regressão regionais entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas (vazões) e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea (ELETROBRÁS, 1985a), aplicável às vazões mínimas, máximas e médias, bem como às curvas de permanência. Dependendo da variável, algumas configurações complementares passam a ser requeridas. Para a vazão mínima deverão ser informados o tempo de retorno e a duração; para a vazão máxima o tempo de retorno; para a curva de permanência a probabilidade de excedência da vazão no tempo (SOUZA, 2009).

Inicialmente, o procedimento deste método envolve a definição prévia das regiões hidrológicamente homogêneas e, em uma segunda etapa, a obtenção de equações que permitam associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas da bacia de interesse (PRUSKI *et al.*, 2012).

Regiões homogêneas podem ser definidas como aquelas que exibem comportamento hidrológico similar, que por sua vez é função da reunião de fatores climáticos e físicos (WOLFF, 2013). Habitualmente não se estendem por grandes áreas, devido à variabilidade do clima, da topografia, da cobertura vegetal e do tipo de solo. No entanto, a delimitação de áreas excessivamente reduzidas resulta numa carência de dados que prejudica a confiabilidade das estimativas (LEMOS, 2006).

A Eletrobrás (1985a) apresentou dois critérios para delimitação das regiões homogêneas: primeiro considera que, as séries de vazão são transformadas em séries de vazão adimensionalizadas, dividindo os seus valores pelas correspondentes médias, e a distribuição de frequência dessas séries adimensionalizadas devem ser próximos. O segundo baseia-se na análise do ajuste de um modelo matemático de regressão múltipla das vazões mínimas, máximas e médias, com as características físicas e climáticas servindo como variáveis independentes.

Quando os dois critérios apresentarem bons resultados, a região é definida como hidrologicamente homogênea para as vazões estudadas. Entretanto, nos casos em que isso não ocorreu, haverá a necessidade de subdividir a região ou reorganizar as estações dentro das regiões e reiniciar o processo (ELETROBRÁS, 1985a)

Definidas as regiões homogêneas, o próximo passo é aplicar a regressão múltipla entre estas vazões e as variáveis explicativas selecionadas, para o estudo, conforme a função:

$$Q = f (V_1, V_2, \dots, V_n) \quad (1)$$

em que:

- $Q$  é a vazão de interesse;
- $f (V_1, V_2, \dots, V_n)$  representa uma função (linear, exponencial, potencial, logarítmica ou outra) das variáveis explicativas, sendo elas as características físicas ou climáticas da região em estudo.

Torna-se necessário investigar a melhor combinação possível de variáveis independentes que representem a distribuição dos valores da variável dependente (CASTRO; RUHOFF, 2009). As variáveis explicativas empregadas nos modelos de regressão são características físicas e climáticas da bacia hidrográfica (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Almeida (2010), a consideração de determinadas características na regionalização dependerá do seu grau de importância na região a ser estudada, bem como, se a utilização das mesmas implica ou não há existência de modelos de regionalização mais condizentes com a realidade.

Em estudos de regionalização de vazão, é importante conhecer as características físicas e climáticas que influenciam e explicam o comportamento e a distribuição das vazões a serem regionalizadas, priorizando aquelas que sejam de fácil determinação (OLIVEIRA, 2013). Essas características, físicas e climáticas, devem ser determinadas para a área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas existentes na bacia (ARAÚJO, 2008).

Geralmente as variáveis físicas utilizadas na regionalização são: área de drenagem, comprimento do rio principal, declividade média do rio principal, densidade de drenagem e desnível médio da bacia (CASTRO; RUHOFF, 2009). Dentre as características físicas, a precipitação tem sido utilizada como variável explicativa em diversos trabalhos de regionalização de vazões, pois é o fenômeno climático que influencia diretamente o regime de escoamento de um curso d'água (OLIVEIRA, 2013). As precipitações mais utilizadas são a anual, as semestrais e as trimestrais (RODRIGUEZ, 2008).

### 3.7.2 Método da interpolação linear

Em 1985, a Eletrobrás apresentou, no Manual de Minicentrais Hidrelétricas, uma solução para quando não se dispõe de registros fluviométricos. O manual traz o procedimento de translação dos dados. De acordo com Eletrobrás (1985b), a translação dos dados só pode ser considerada válida se as áreas de drenagem nos locais do posto e da seção em que se quer determinar a vazão não forem excessivamente diferentes.

Este método, parte do princípio de que a vazão na seção de interesse pode ser obtida por uma relação de proporcionalidade entre as vazões e as áreas de drenagem dos postos fluviométricos mais próximos, sendo baseado na vazão específica (NOVAES *et al.*, 2007). A interpolação linear não necessita da divisão da área de estudo em regiões homogêneas, sendo a metodologia aplicável em seções de rio de uma mesma bacia hidrográfica que possua estações com série histórica de vazão (ALMEIDA, 2010).

### 3.7.3 Método da interpolação linear modificado

Conforme já descrito, o método baseado na Interpolação linear considera que a vazão na seção de interesse é uma proporcionalidade entre as áreas de drenagem da seção de interesse e os postos fluviométricos mais próximos. Considerando que o processo físico de formação das vazões é mais dependente dos volumes precipitados do que das áreas de drenagem, Novaes *et al.* (2007) propuseram a modificação do método de interpolação linear. Essa modificação consiste em inserir a variável precipitação média, considerando assim que a vazão na seção de interesse é também proporcional à relação entre os volumes precipitados. Esse método ficou conhecido como Interpolação linear modificado.

### 3.7.4 Método de Chaves

A metodologia descrita por Chaves *et al.* (2002) tem a finalidade de propor um método que seja condizente com a realidade da maioria das bacias hidrográficas. Lemos (2006) afirma que, como geralmente há escassez de informações ou bases de dados reduzidas, a precisão do método tradicional é prejudicada, podendo até não se tornar recomendável, em razão da dificuldade na identificação das regiões homogêneas, bem como na obtenção das equações de regressão regionais.

A proposição de uma metodologia de regionalização de vazões que necessite menos informações que o método tradicional e que proporcione uma boa confiabilidade é uma grande contribuição para o gerenciamento dos recursos hídricos, colaborando, assim, para a

otimização do uso da água e, conseqüentemente, para a minimização dos conflitos entre os usuários (NOVAES, 2005).

Devido ao advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), a espacialização de variáveis hidrológicas tornou-se uma tarefa mais fácil, explorando-se de forma mais acentuada as informações existentes, seja a montante ou a jusante do local de interesse (CHAVES *et al.*, 2002). O objetivo desses autores foi propor uma metodologia simples para a regionalização de vazões mínimas em bacias hidrográficas com série de dados limitada, utilizando técnicas de interpolação em um ambiente SIG.

A metodologia baseia-se na interpolação e extrapolação de vazões mínimas, a qual apresenta soluções que dependem da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos. As variáveis utilizadas para a estimativa das vazões nas seções de interesse são a área de drenagem e as distâncias entre a seção de interesse e o posto fluviométrico considerado (FERREIRA, 2010).

Para validação do método, Chaves *et al.* (2002) comparam o resultado do método proposto com os valores de vazão mínima obtidos na regionalização com método tradicional. O estudo foi realizado na bacia do Itapicuru, localizada na porção nordeste do estado da Bahia, por ser uma bacia hidrográfica com baixa densidade de postos hidrométricos (típica da situação brasileira).

Ao final do estudo os autores, concluíram que a metodologia descrita por eles, apresentou melhores resultados quando comparada ao método de equações de regressão, uma vez que os erros relativos médios foram de 45% e 289%, respectivamente.

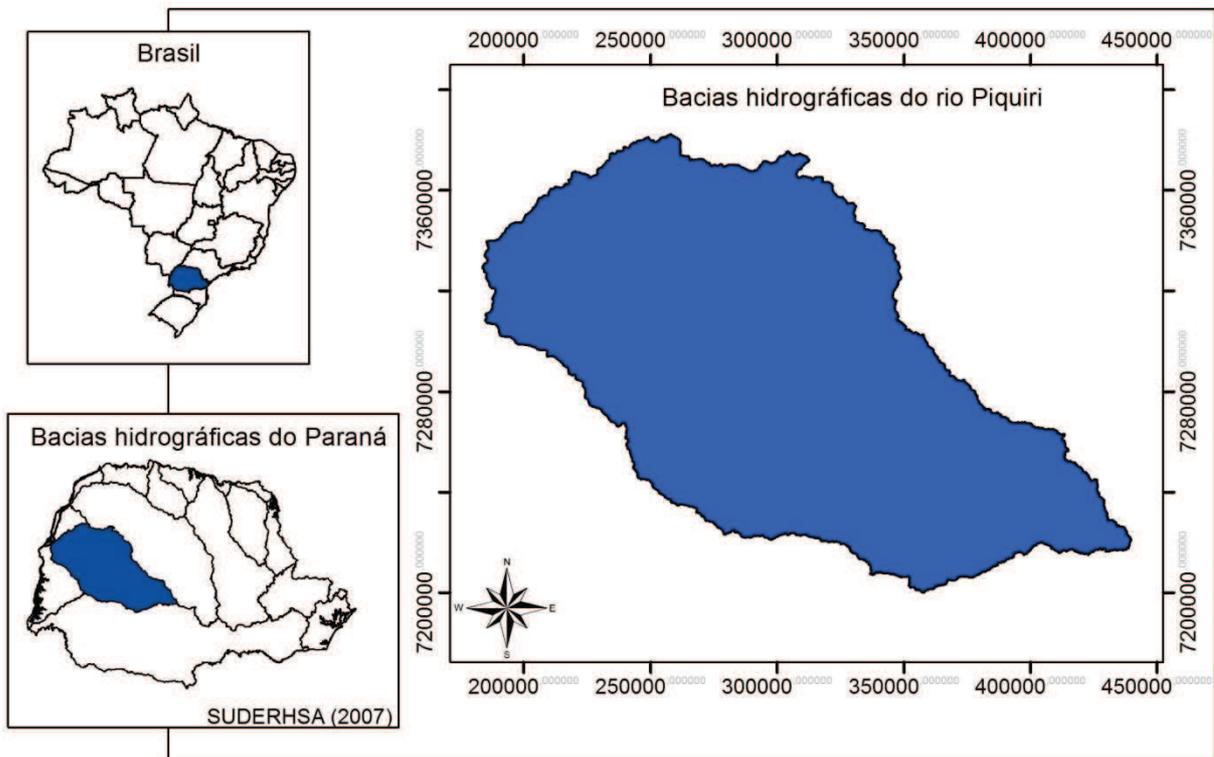
### **3.7.5 Método de Chaves modificado**

Considerando o mesmo princípio utilizado na remodelação do método da Interpolação linear modificado, ou seja, considerando o processo físico de formação das vazões serem mais dependentes dos volumes precipitados do que das áreas de drenagem, Novaes *et al.* (2007) alteraram o método proposto por Chaves *et al.* (2002), inserindo a variável precipitação média, intitulado como método de Chaves modificado.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Piquiri abrange uma área de drenagem de 24.156 km<sup>2</sup>. Localizada integralmente no estado do Paraná, no quadrilátero formado pelas projeções universal transversas de Mercator de 7384962,29 e 7199801,53 norte e 439551,83 e 183689,15 oeste (Figura 1) (IAP, 2008).



**Figura 1** Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Piquiri - PR. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S.

O rio Piquiri, principal curso de água da bacia, tem suas nascentes no terceiro planalto, região centro-sul do Estado, próximas ao município de Campina do Simão e foz no rio Paraná. Ao longo do seu percurso recebe como principais contribuintes, de montante para jusante, os rios do Cobre, Bandeira, Cascudo, Feio, São Francisco, Tourinho, Melissa, Jesuítas, Verde, Encanto e Azul, pela margem esquerda. Pela margem direita, contribuem os rios Cantu, Sapucaí, Goio-Bang, Goio-erê, Jangada e Xambê (IAP, 2008).

Os solos predominantes na bacia são Latossolo, Argissolo e Nitossolo vermelhos e, a leste, há porções mais significativas de Neossolos. Ao norte, as texturas variam pouco

entre arenosa e média arenosa, prevalecendo texturas mais argilosas nas demais regiões (PARANÁ, 2013).

A temperatura média no mês mais frio é inferior a 18 °C; no mês mais quente é acima de 22 °C, verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (IAP, 2008).

A atividade econômica principal é a agropecuária e as culturas mais importantes são: a soja, o trigo, a cana de açúcar e a mandioca; Há também áreas de pastagens. A bacia é bem dividida entre as classes de uso misto, agricultura intensiva e pastagens artificiais e campos naturais. Há, ainda, pequenas áreas de cobertura florestal e concentrações urbanas e industriais, com destaque para a região de Cascavel (PARANÁ, 2013).

## 4.2 Seleção, análise e tratamento dos dados

Para a execução deste trabalho, utilizaram-se os dados de 18 estações pluviométricas e 48 pluviométricas, que fazem parte da rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB), da Agência Nacional de Águas.

### 4.2.1 Dados pluviométricos

Na Tabela 1 estão apresentadas as 48 estações pluviométricas, com base nos respectivos códigos, nomes, períodos de dados e coordenadas UTM. Na Figura 2 é possível visualizar a distribuição espacial das estações sobre a bacia hidrográfica do rio Piquiri.

**Tabela 1** Estações pluviométricas selecionadas

Código	Estação	Período de dados		Localização (UTM)	
		Início	Fim	Latitude	Longitude
2352026	Canaã	1976	2011	7354773	301057
2353003	Altônia	1967	2011	7359434	206381
2353004	Cruzeiro do oeste	1957	2011	7368863	287864
2353005	Xambrê	1967	2011	7373032	246579
2353006	Mariluz	1967	2011	7345997	279604
2353016	Pérola	1976	2011	7365727	227416
2353047	Iguaipora	1976	2011	7348176	198092
2451010	Londrina	1967	2011	7242187	410856
2451021	Faxinal	1975	2011	7259209	403556
2452000	Balsa do Cantu	1967	2012	7261829	327937
2452001	Ponte do Goio-Bang	1967	2012	7276163	304326

Continua...

Tabela 1 (Continuação)

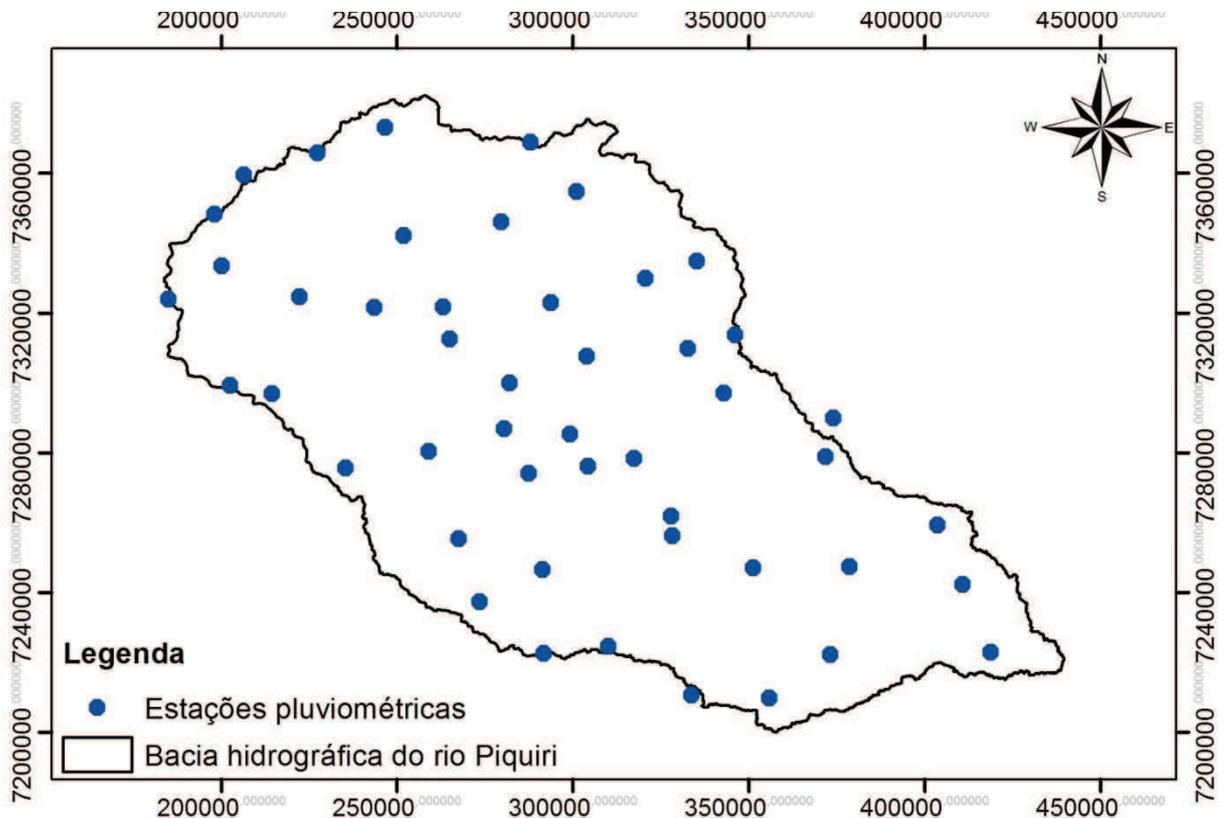
Código	Estação	Período de dados		Localização (UTM)	
		Início	Fim	Latitude	Longitude
2452009	Ubiratã	1965	2011	7285322	299130
2452010	Janiópolis	1967	2011	7329922	320520
2452011	Campina da Lagoa	1966	2012	7278218	317379
2452012	Altamira do Paraná	1966	2011	7256170	328203
2452014	Mamborê	1965	2011	7313638	346108
2452015	Roncador	1965	2011	7278795	371806
2452016	Palmital	1965	2011	7247353	378552
2452019	Laranjal	1975	2011	7246930	351165
2452029	Farol	1975	2011	7334837	335231
2452033	Primavera	1975	2011	7307577	303914
2452035	Guarani	1974	2011	7296989	342910
2452040	Pensamento	1975	2011	7309762	332618
2452041	Santo Antônio	1975	2011	7289828	374042
2453000	Balsa Santa Maria	1972	2012	7324649	222322
2453001	Ponte do Piquiri	1970	2012	7286888	280523
2453008	Alto Piquiri	1967	2011	7342035	251874
2453009	Porto Formosa	1966	2012	7321694	263042
2453010	Formosa do Oeste	1967	2011	7312521	264887
2453012	Corbélia	1965	2011	7255282	267536
2453013	Salto Sapucaí	1964	2012	7274070	287477
2453014	Ponte tourinho - Braganey	1966	2011	7246458	291269
2453016	Goio-erê	1967	2011	7322911	293653
2453030	Bragantina	1975	2011	7275639	235363
2453037	Palmitópolis	1975	2011	7280285	259009
2453043	Novo Porto 2	1978	2012	7299839	282011
2453047	Vila Maripá	1976	2011	7296779	214410
2453048	Alto Santa Fé	1976	2011	7299276	202599
2453050	Brasilândia do Sul	1976	2011	7321539	243505
2453052	Rio Bonito	1976	2011	7333467	200099
2453056	São João do Oeste	1975	2011	7237343	273507
2454006	Terra Roxa do Oeste	1967	2011	7323872	185043
2551009	Campina do Simão	1967	2011	7222763	418741
2552006	Guaraniaçu	1965	2011	7224544	310103
2552008	Marquinhos	1967	2011	7222077	373174
2552019	Campo verde (faxinal dos índios)	1975	2011	7209690	355882
2552047	Vila Guarani	1976	2011	7210665	333645
2553019	Ibema	1976	2011	7222427	291636

Os dados analisados são de 31 anos (de 1980 a 2010). Nesse período, foram identificadas as falhas nas séries, com auxílio de um diagrama de barras (Apêndice A - Figura 19), as quais foram preenchidas por meio do método de ponderação regional, baseado nas correlações com as estações vizinhas. Foram estabelecidos os coeficientes de correlação entre o posto pluviométrico com falha (Y) e três postos vizinhos (X1, X2, X3). Para o posto Y, o preenchimento da falha foi realizado pela Equação 2.

$$P_Y = \frac{r_{YX1}P_{X1} + r_{YX2}P_{X2} + r_{YX3}P_{X3}}{r_{YX1} + r_{YX2} + r_{YX3}} \quad (2)$$

em que:

- $P_Y$  é a precipitação a ser estimada (mensal) para o posto Y;
- $r_{YX1}, r_{YX2}, r_{YX3}$ , representam, respectivamente, os coeficientes de correlação das precipitações entre Y e  $X_1$ , Y e  $X_2$ , e Y e  $X_3$ ;
- $P_{X1}, P_{X2}, P_{X3}$ , representam as precipitações dos postos  $X_1, X_2$  e  $X_3$ .



**Figura 2** Localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S.

Para a aplicação do método foi adotado como critério mínimo a obtenção de um coeficiente de determinação superior a 0,7, segundo recomendações de Barbosa *et al.* (2005) e Pruski *et al.* (2004) e a proximidade das estações.

Em seguida, foi realizada a análise da consistência de cada estação, dentro de uma visão regional, com o objetivo de comprovar o grau de homogeneidade dos dados disponíveis num posto, com relação às observações registradas em postos vizinhos. Para tanto, foi utilizado o método da dupla massa.

O método consiste em comparar os valores acumulados anuais (ou sazonais) da estação X com os valores da estação de referência, que é, usualmente, a média de diversos postos vizinhos (FREIRE; OMENA, 2005).

#### 4.2.2 Dados fluviométricos

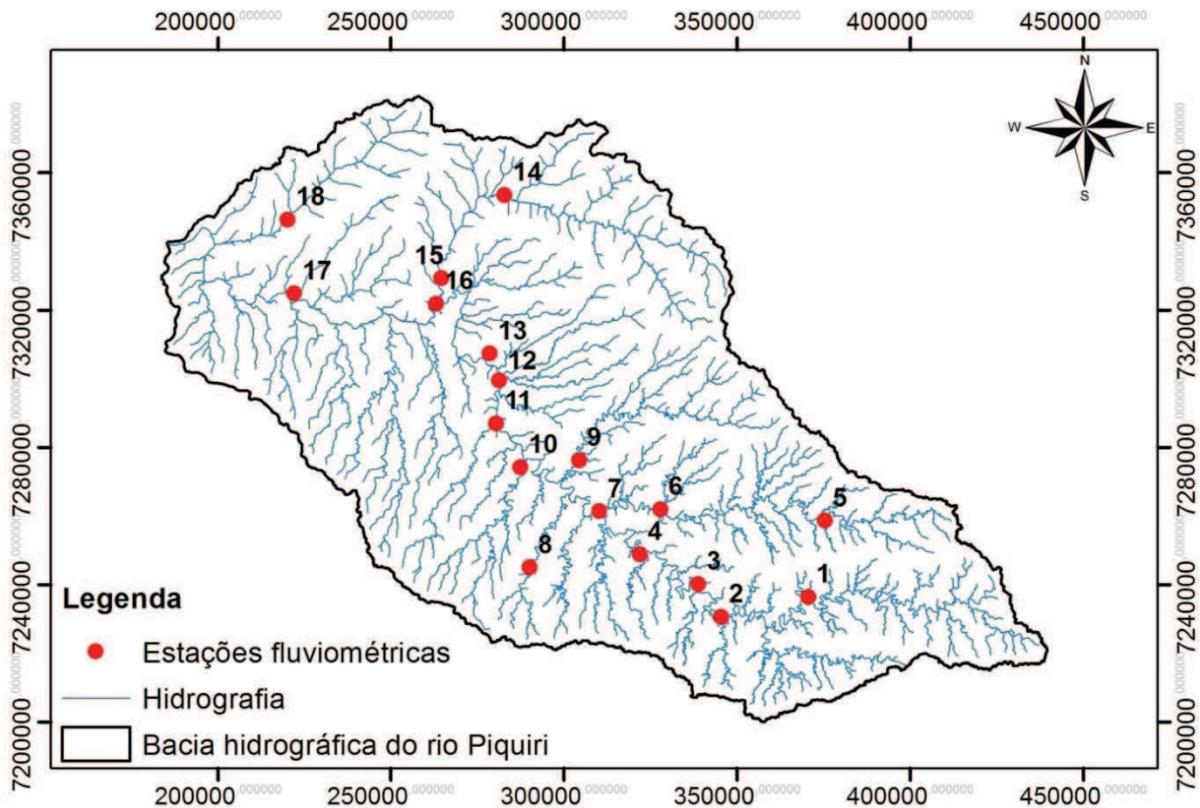
Na Tabela 2 são apresentadas as 18 estações fluviométricas, com base nos respectivos códigos, nomes, períodos de dados e coordenadas UTM. Na Figura 3 é possível visualizar a distribuição espacial das estações sobre a bacia hidrográfica do rio Piquiri.

**Tabela 2** Estações fluviométricas selecionadas

ID	Código	Nome	Rio	Localização (UTM)		Período de dados	
				Latitude	Longitude	Início	Fim
1	64764000	Guampará	Rio Piquiri	7236358	370545	1984	2002
2	64765000	Porto Paiquerê	Rio Piquiri	7230558	345372	1971	1983
3	64767000	Porto Carriel	Rio Piquiri	7240053	338869	1981	2010
4	64771500	Porto Guarani	Rio Piquiri	7248767	321951	1976	2005
5	64773000	Ponte Leôncio Primo	Rio Cantu	7258554	375392	1978	2003
6	64775000	Balsa do Cantu	Rio Cantu	7261859	327852	1967	2005
7	64776100	Foz do Cantu	Rio Piquiri	7261259	310268	1986	2005
8	64780000	Ponte Tourinho	Rio Tourinho	7244873	290199	1966	1979
9	64785000	Ponte do Goio-Bang	Rio Goio-Bang	7276164	304354	1967	2005
10	64790000	Salto Sapucaí	Rio Sapucaí	7274101	287476	1966	2005
11	64795000	Ponte do Piquiri	Rio Piquiri	7286889	280523	1970	2003
12	64799500	Novo Porto 2	Rio Piquiri	7299365	281258	1978	2003
13	64800000	Porto 2	Rio Piquiri	7307202	278542	1962	1978
14	64810000	Balsa do Goio-erê	Rio Goio-erê	7353403	282914	1963	2004
15	64815000	Fazenda Uberana	Rio Goio-erê	7329138	264612	1978	2005
16	64820000	Porto Formosa	Rio Piquiri	7321694	263070	1966	2004
17	64830000	Balsa Santa Maria	Rio Piquiri	7324706	222066	1969	2003
18	64833000	Iporã	Rio Xambê	7346254	220203	1994	2001

É importante ressaltar a dificuldade que se tem para encontrar, numa mesma região, séries históricas de vazão e chuvas, sem falhas ou em um mesmo período de registro. O ideal, nas análises históricas, é utilizar dados com o mesmo período base, mas isto nem sempre é possível. Por esta razão, foram utilizados dados de vazão disponíveis nos postos de monitoramento.

Foram computados os registros de períodos contínuos e dados faltantes, expressos no diagrama de barras (Figura 20 - Apêndice A). Para os postos utilizados, foram eliminados os meses que apresentarem mais de 5% de registros sem informação e as demais falhas não foram preenchidas.



**Figura 3** Localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S.

#### 4.3 Obtenção das variáveis dependentes

As variáveis dependentes utilizadas para a regionalização de vazões na bacia hidrográfica do rio Piquiri foram: a vazão mínima ( $Q_{7,10}$ ), vazão média de longa duração ( $Q_{med}$ ), vazão máxima ( $Q_{máx,tr}$ ) e vazões de permanência de 90% e 95% ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ).

Para tanto, utilizou-se o Sistema Computacional para Análise Hidrológica (SisCAH 1.0), que é um *software* desenvolvido pela rede de pesquisa 2 do SNIRH, supervisionada pela ANA e que é composta pelas seguintes instituições: Universidade Federal de Viçosa (instituição coordenadora), Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal do Espírito Santo, Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

As vazões máximas foram regionalizadas associadas a um período de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos e as vazões mínimas com duração de sete dias foram associadas ao período de retorno de 10 anos.

As séries anuais de vazões máximas diárias e mínimas com sete dias de duração, para cada estação, foram submetidas à análise estatística para identificação do modelo probabilístico que melhor se ajustasse aos dados.

Para representar as séries de vazões máximas e mínimas foram testadas as distribuições de probabilidade disponíveis no SisCAH: Pearson tipo III, Log-Normal a dois e três parâmetros e Log-Pearson tipo III, Gumbel (apenas para máximas) e Weibull (apenas para mínimas).

O critério para a escolha da distribuição de probabilidade das vazões, utilizado pelo SisCAH 1.0, é o menor erro padrão e, conseqüentemente, o menor intervalo de confiança.

Conforme Chow, Maidment e Mays (1988), o erro padrão da estimativa é uma medida do desvio padrão das grandezas dos eventos calculados a partir de amostras sobre a verdadeira grandeza evento. Os autores também descrevem que o intervalo de confiança depende do nível de confiança. No SisCAH 1.0 é utilizado o nível de confiança de 95% e, segundo Kite (1988), a estimativa dos limites do intervalo é calculada utilizando-se a Equação 3.

$$M - 1,96 \delta < IC < M + 1,96 \delta \quad (3)$$

em que:

M = magnitude do evento;

$\delta$  = erro padrão pertinente a cada função de probabilidade;

IC = intervalo de confiança, ao nível de confiança de 95%.

Esse intervalo foi analisado para todas as estações fluviométricas e aquela distribuição que apresentou mais vezes o menor intervalo de confiança foi adotada para a estimativa dessas vazões.

A vazão média de longa duração, por ser caracterizada como a média das vazões médias diárias, foi regionalizada sem se considerar um período de retorno.

O procedimento para a obtenção da curva de permanência para cada estação fluviométrica foi baseado na obtenção de classes de frequência e que segue os passos definidos a seguir.

Definição de 50 intervalos de classe das vazões diárias, sendo a subdivisão das classes feita com base na escala logarítmica, devido à grande variação de magnitude das vazões envolvidas. O cálculo do intervalo de classe ( $\Delta X$ ) é feito conforme Equação 4:

$$\Delta X = \frac{[\ln(Q_{máx}) - \ln(Q_{mín})]}{50} \quad (4)$$

em que:

- $Q_{m\acute{a}x}$  é a vazão máxima;
- $Q_{m\acute{i}n}$  é a vazão mínima da série.

Definição dos limites dos intervalos de classe, pela Equação 5, a partir de  $Q_{m\acute{i}n}$ , adicionando-se o intervalo calculado anteriormente, o que resulta na vazão do limite superior do intervalo  $i$ .

$$Q_{i+1} = \exp[\ln(Q_i) + \Delta X] \quad (5)$$

Determinação, com base nos dados de vazão da série histórica de cada estação fluviométrica, do número de vazões classificadas em cada intervalo. Cálculo da frequência ( $f_i$ ) associada a cada intervalo, conforme Equação 6.

$$f_i = \frac{Nq_i}{NT} 100 \quad (6)$$

em que :

- $Nq_i$  é o número de vazões de cada intervalo;
- $NT$  é o número total de vazões.

Para obtenção da curva de permanência plotando-se na ordenada os limites inferiores dos intervalos de classe de vazão e na abscissa a frequência de ocorrência.

#### 4.4 Obtenção das variáveis independentes

##### 4.4.1 Características físicas

Para os procedimentos que foram realizados com o intuito de se obterem as características físicas da área de estudo, utilizou-se o *software* ArcGis 10.1, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute* – ESRI, que permite gerenciar bancos de dados georreferenciados e realizar análises espaciais e bases cartográficas digitais no formato vetorial *Shapefile* (.shp) e matricial *raster* (.GRID/.TIN).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) do estado do Paraná, utilizado neste estudo, foi disponibilizado por Valeriano (2004), o qual foi gerado a partir do projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) que advém de cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), do Departamento de Defesa (DOD) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha

e da Itália (VALERIANO; ABDON, 2007), em escala 1:250.000 e em resolução espacial de 30 metros.

A delimitação da bacia hidrográfica, utilizada neste estudo em formato *Shapefile*, foi disponibilizada pela SUDERHSA (2007) no *site* do Instituto de Águas do Paraná e elaborada com base nas cartas do DSG/IBGE nas escalas 1:50.000 e 1:100.000.

As características físicas escolhidas para a construção dos modelos de regionalização foram: área de drenagem (A), comprimento do rio principal (Lp), declividade entre a nascente e a foz do rio principal (SI), declividade média da bacia (Sm) e densidade de drenagem (Dd). Na Tabela 3 é apresentado o resumo da metodologia que foi utilizada para extração das características físicas das sub-bacias.

**Tabela 3** Resumo da metodologia para extração das características físicas

Característica física	Ferramenta utilizada no ArcGis	Forma de obtenção
Área de drenagem (A)	Delimitação: Hydrology > Watershed. Conversão da imagem: Spatial Analyst > Convert Raster to Features.	A partir da localização das estações fluviométricas.
Comprimento do rio principal (Lp)	Isolamento: Map Algebra > Raster Calculator Conversão da imagem: Conversion Tools > From Raster > Raster to Polyline Valor direito na tabela de atributos	A partir do mapa de direção de fluxo e de fluxo acumulado.
Declividade do rio principal (SI)	Definição dos pontos: Data management tools > Features > Feature Vertices To Points Obtenção das cotas : 3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape	Razão entre a diferença das cotas dos pontos iniciais e finais do rio pelo comprimento total do mesmo.
Declividade média da bacia (Sm)	Declividade da bacia: Surface Analysis Tools > Surface > Slope Declividade média das sub-bacias: Surface Analysis Tools > Zonal > Zonal Statistics as Table	Média das declividades de todas as células de cada sub-bacia (área de drenagem).
Densidade de Drenagem (Dd)	Isolamento: Map Algebra > Raster Calculator Conversão da imagem: Conversion Tools > From Raster > Raster to Polyline Comprimento total dos rios → Soma dos valores na tabela de atributos.	Razão entre os comprimentos totais dos cursos d' água ( $\sum L_{tot}$ ) de cada sub-bacia por sua respectiva área (A). $Dd = \frac{\sum L_{tot}}{A}$

Fonte: adaptado de ALMEIDA (2010).

#### 4.4.2 Características climáticas

As características climáticas utilizadas foram: a precipitação total anual (Ptot), a precipitação do trimestre mais seco (Ptris) e a precipitação do trimestre mais chuvoso (Ptric). Essas variáveis foram obtidas para cada estação pluviométrica e, a partir da localização de

cada uma delas, são produzidos os mapas de isoietas, visando à determinação das precipitações médias nas áreas de drenagem das sub-bacias consideradas. As isoietas foram traçadas utilizando-se o método de interpolação pelo quadrado médio da distância (IDW).

#### 4.5 Métodos de regionalização

Foram utilizados cinco métodos para a regionalização de vazões na bacia hidrográfica do rio Piquiri:

- Método tradicional, descrito por Eletrobrás (1985a);
- Método da interpolação linear, descrito por Eletrobrás (1985b);
- Método da interpolação linear, modificado por Novaes *et al.* (2007) ;
- Método proposto por Chaves *et al.* (2002);e
- Método de Chaves modificado por Novaes *et al.* (2007).

##### 4.5.1 Método tradicional

Segundo o procedimento descrito por Eletrobrás (1985a), inicialmente, buscou-se determinar, para todas as estações da região de estudo, a melhor equação de regressão das vazões estudadas, considerando-se as características físicas e climáticas da bacia escolhida.

Foram aplicadas regressões múltiplas entre as variáveis dependentes e independentes. No presente estudo, foram analisados os modelos: linear, múltiplo, potencial, exponencial e logarítmico, expressos pelas Equações 7 a 11, respectivamente.

- Modelo linear

$$Q = \beta_0 + \beta_1 V_1 \quad (7)$$

- Modelo múltiplo

$$Q = \beta_0 + \beta_1 V_1 + \beta_2 V_2 + \dots + \beta_n V_n \quad (8)$$

- Modelo potencial

$$Q = \beta_0 V_1^{\beta_1} \dots V_n^{\beta_n} \quad (9)$$

- Modelo exponencial

$$Q = e^{\beta_0 + \beta_1 V_1 + \dots + \beta_n V_n} \quad (10)$$

- Modelo logarítmico

$$Q = \beta_0 + \beta_1 \ln V_1 + \dots + \beta_n \ln V_n \quad (11)$$

em que:

- $Q$  é vazão que se deseja determinar;
- $V_1, V_n$  são as variáveis explicativas (características físicas e/ou climáticas);
- $\beta_0, \beta_1, \beta_n$  são os coeficientes de ajuste.

Os modelos de regressão múltipla foram selecionados com base nos critérios de simplicidade do modelo e qualidade do ajuste.

A qualidade dos modelos gerados foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), resíduos, significância do modelo pelo teste F, teste de hipóteses para os parâmetros do modelo e análise dos resíduos. O teste F e o teste de hipóteses para os parâmetros foram realizados ao nível de 5% de significância.

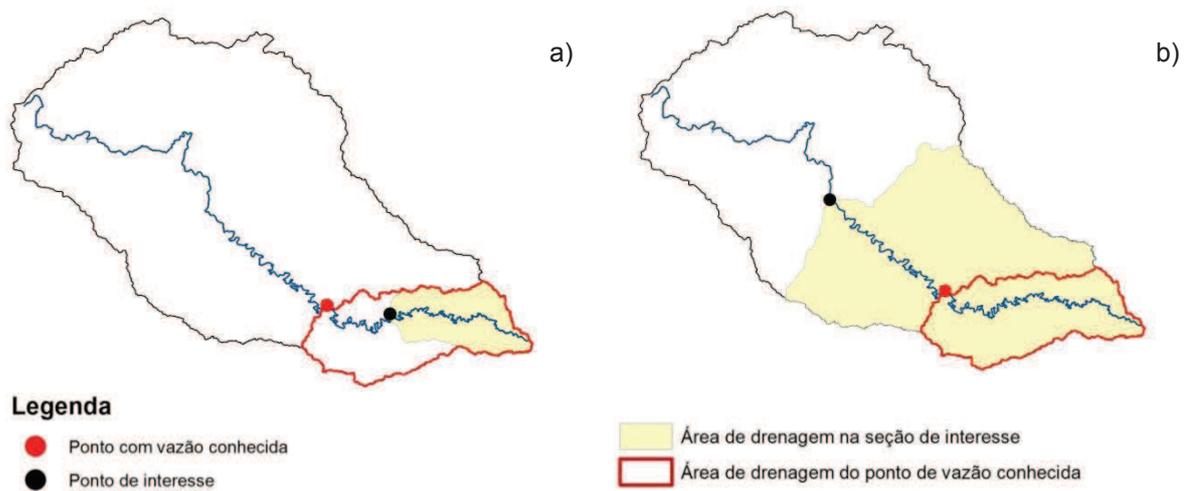
Foram comparados com os demais métodos os modelos que apresentaram concomitantemente: a) menor resíduo; b) resultados significativos pelo teste F para o modelo; c) resultados significativos pelo teste t para os parâmetros ajustados; d) coeficiente de determinação ajustado maior que 0,7.

#### 4.5.2 Método baseado na interpolação linear

Baseado no princípio de que a vazão na seção de interesse é obtida pela relação de proporcionalidade entre as vazões e as áreas de drenagem dos postos fluviométricos mais próximos (ELETROBRÁS, 1985b), aplicou-se método da interpolação linear, no qual foi necessário proceder ao enquadramento, dependendo da posição relativa do ponto de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, conforme os quatro casos descritos a seguir.

- **Casos 1 e 2 - Ponto de interesse localizado a montante e a jusante de um ponto com vazão conhecida**

Quando o ponto de interesse está localizado a montante (Caso 1) ou a jusante (Caso 2), conforme a Figura 4, a vazão desejada foi estimada pela Equação 12.



**Figura 4** Situação de um ponto de interesse, situado em trecho de canal a montante (a) e a jusante (b) de um posto com vazão de referência conhecida.

$$Q_z = \left( \frac{A_{m,j}}{A_z} \right) Q_{m,j} \quad (12)$$

em que:

$Q_z$  = vazão na seção de interesse,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

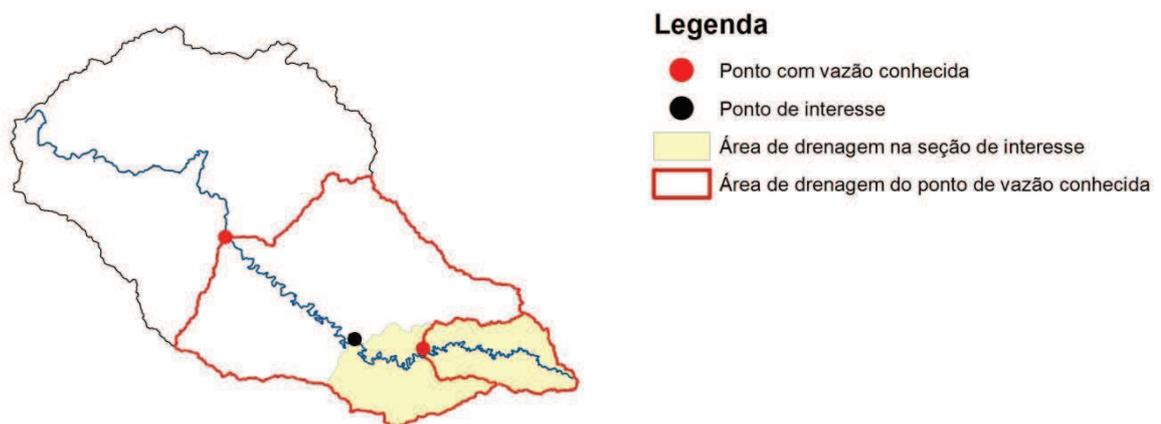
$Q_{m,j}$  = vazão no posto de montante ou de jusante,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$A_z$  = área de drenagem na seção de interesse,  $\text{km}^2$ ;

$A_{m,j}$  = área de drenagem do posto de montante ou de jusante,  $\text{km}^2$ .

- **Caso 3 - Ponto de interesse localizado entre dois pontos com vazão conhecida**

Quando o ponto de interesse está situado num trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão conhecida, conforme a Figura 5, a vazão de referência incógnita é estimada por meio da Equação 13.



**Figura 5** Situação de um ponto de interesse, situado entre dois postos com vazão de referência conhecida.

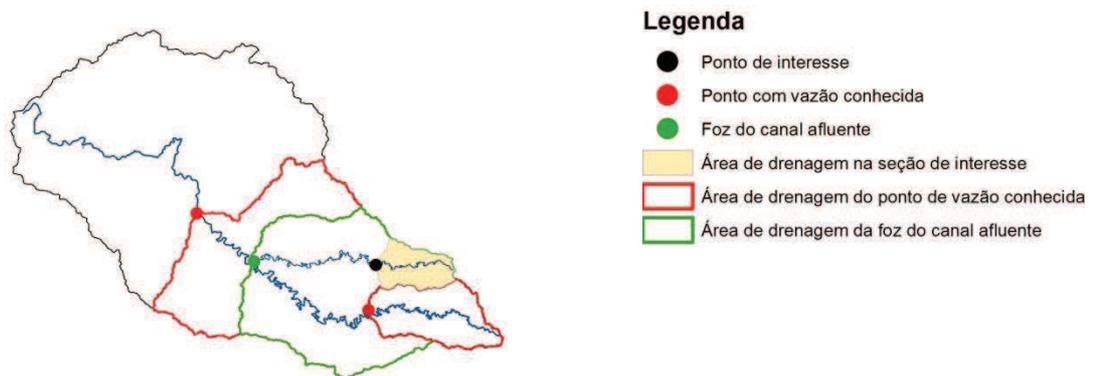
$$Q_z = Q_m + \left( \frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (13)$$

em que:

- $Q_z$  = vazão na seção de interesse,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $Q_m$  = vazão no posto de montante,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $Q_j$  = vazão no posto de jusante,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $A_z$  = área de drenagem na seção de interesse,  $\text{km}^2$ ;
- $A_m$  = área de drenagem do posto de montante,  $\text{km}^2$ ;
- $A_j$  = área de drenagem do posto de jusante,  $\text{km}^2$ .

- **Caso 4 - Ponto de interesse situado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior**

Este ponto é definido quando a seção de interesse está situada em um trecho de um rio afluente cuja foz localiza-se entre dois postos fluviométricos, situados em um rio de ordem superior, conforme Figura 6. Neste caso, aplica-se uma combinação das outras duas situações descritas anteriormente, sendo primeiramente calculada a vazão na seção de confluência, utilizando-se a Equação 13. Em seguida, estima-se a vazão na seção de interesse utilizando as vazões nas confluências dos rios, aplicando-se a Equação 12 e estimando-se a vazão na seção de interesse.



**Figura 6** Situação de um ponto de interesse localizado em um canal efluente, cuja foz se encontra entre dois postos de vazão conhecida, em um canal de ordem superior.

#### 4.5.3 Método da interpolação linear modificado

O método da interpolação linear modificado originou-se de uma adaptação do método de interpolação linear, a partir da adição da variável precipitação na execução dos cálculos, ou seja, considera que a vazão na seção de interesse possui relação direta e

proporcional à quantidade de chuva na respectiva área de contribuição (NOVAES *et al.*, 2007).

Desta forma, as Equações 12 e 13 utilizadas no método baseado na interpolação linear passam a ser expressas pelas Equações 14 e 15, respectivamente.

$$Q_z = \left( \frac{A_{m,j}P_{m,j}}{A_zP_z} \right) Q_{m,j} \quad (14)$$

$$Q_z = Q_m + \left( \frac{A_zP_z - A_mP_m}{A_jP_j - A_mP_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (15)$$

em que:

$Q_z$  = vazão na seção de interesse,  $m^3.s^{-1}$ ;

$Q_{m,j}$  = vazão no posto de montante ou de jusante,  $m^3.s^{-1}$ ;

$Q_m$  = vazão no posto de montante,  $m^3.s^{-1}$ ;

$Q_j$  = vazão no posto de jusante,  $m^3.s^{-1}$ ;

$A_z$  = área de drenagem na seção de interesse,  $km^2$ ;

$A_{m,j}$  = área de drenagem do posto de montante ou de jusante,  $km^2$ ;

$A_m$  = área de drenagem do posto de montante,  $km^2$ ;

$A_j$  = área de drenagem do posto de jusante,  $km^2$ ;

$P_z$  = precipitação média anual na área de drenagem da seção de interesse, mm;

$P_{m,j}$  = precipitação média anual na área de drenagem do posto de montante ou de jusante, mm;

$P_m$  = precipitação média anual na área de drenagem do posto de montante, mm;

$P_j$  = precipitação média anual na área de drenagem do posto de jusante, mm.

Para a situação em que a seção de interesse está situada em um trecho de rio afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos situados em um rio de ordem superior, aplicou-se o mesmo procedimento do método original, porém usando as novas equações propostas neste método (Equações 14 e 15).

#### 4.5.4 Método proposto por Chaves *et al.* (2002)

O método proposto por Chaves *et al.* (2002), também, apresenta quatro situações distintas, dependendo da localização da seção de interesse em relação às seções de vazão conhecida, entretanto, além das áreas de drenagem, considera as distâncias entre as seções analisadas.

- **Caso 1 e 2 - Ponto de interesse localizado a montante e a jusante de um ponto com vazão conhecida**

Quando a seção de interesse está situada a montante (caso 1) ou a jusante (caso 2) de um posto fluviométrico (Figura 4), a metodologia é idêntica à interpolação linear, sendo, portanto, a vazão na seção de interesse calculada pela Equação 12.

- **Caso 3 - Ponto de interesse localizado entre dois pontos com vazão conhecida**

Já no caso do ponto de interesse, situado em um trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão de referência conhecida (Figura 5), a vazão de incógnita é estimada pela Equação 16.

$$Q_z = A_z \left[ \left( \frac{p_m Q_m}{A_m} + \frac{p_j Q_j}{A_j} \right) \right] \quad (16)$$

Sendo:

$$p_m = \frac{d_j}{(d_m + d_j)} \quad (17)$$

$$p_j = \frac{d_m}{(d_m + d_j)} \quad (18)$$

em que:

$Q_z$  = vazão na seção de interesse,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$Q_m$  = vazão no posto de montante,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$Q_j$  = vazão no posto de jusante,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$A_z$  = área de drenagem na seção de interesse,  $km^2$ ;

$A_m$  = área de drenagem do posto de montante,  $km^2$ ;

$A_j$  = área de drenagem do posto de jusante,  $km^2$ ;

$p_m$  = peso relativo à estação de montante, adimensional; e

$p_j$  = peso relativo à estação de jusante, adimensional.

$d_m$  = distância entre o posto de montante e a seção de interesse, km;

$d_j$  = distância entre o posto de jusante e a seção de interesse, km.

- **Caso 4 - Ponto de interesse situado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior**

Assim como apresentado no método da interpolação linear, a quarta situação (caso 4) ocorre quando a seção de interesse está situada em um trecho de rio afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos situados em um rio de ordem superior (Figura 6). Neste caso, aplicou-se uma combinação das outras duas situações descritas anteriormente, sendo primeiramente calculada a vazão na seção de confluência dos rios (Equação 16), em seguida, utilizando a Equação 12, estimou-se a vazão na seção de interesse.

#### 4.5.5 Método de Chaves modificado

Baseado no Método de Chaves *et al.* (2002), assim como no método da interpolação linear modificado, esta modificação se refere à inserção da variável precipitação nos cálculos, pois também considera que a vazão é influenciada pela precipitação e não somente pela área de drenagem (NOVAES *et al.*, 2007).

Desta forma, as Equações 12 e 16 utilizadas no método de Chaves *et al.* (2002) passam a ser expressas pelas Equações 14 e 19, respectivamente.

$$Q_z = (A_z P_z) \left[ \left( \frac{p_m Q_m}{A_m P_m} + \frac{p_j Q_j}{A_j P_j} \right) \right] \quad (19)$$

em que:

$Q_z$  = vazão na seção de interesse,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$Q_m$  = vazão no posto de montante,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$Q_j$  = vazão no posto de jusante,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;

$A_z$  = área de drenagem na seção de interesse,  $km^2$ ;

$A_m$  = área de drenagem do posto de montante,  $km^2$ ;

$A_j$  = área de drenagem do posto de jusante,  $km^2$ ;

$P_z$  = precipitação média anual na área de drenagem da seção de interesse, mm;

$P_m$  = precipitação média anual na área de drenagem do posto de montante, mm;

$P_j$  = precipitação média anual na área de drenagem do posto de jusante, mm;

$p_m$  = peso relativo à estação de montante, adimensional;

$p_j$  = peso relativo à estação de jusante, adimensional.

#### 4.6 Enquadramento dos postos fluviométricos existentes nos diferentes casos

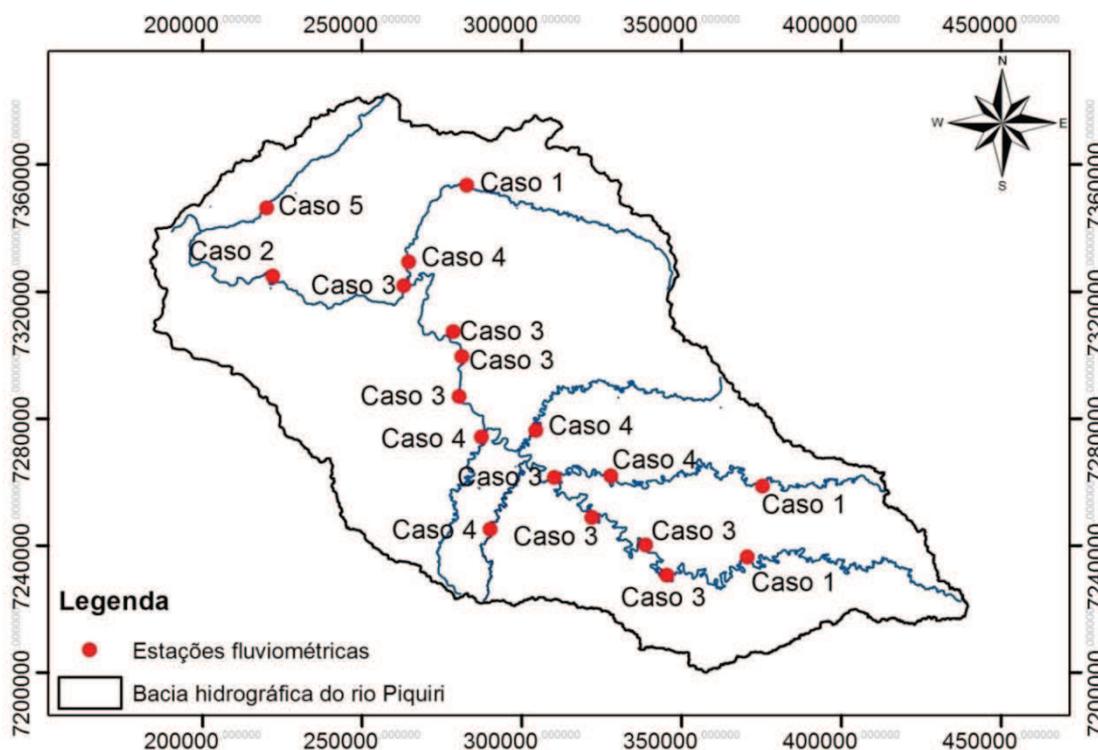
Para aplicação do método de interpolação linear, Chaves *et al.* (2002), método da interpolação modificado e Chaves modificado, primeiramente observando o mapa da bacia

com as estações fluviométricas plotadas, foi identificada cada situação possível, em relação aos postos fluviométricos existentes (Figura 7).

Visualiza-se na Figura 7 a estação Iporã (64833000), que se localiza em um rio afluente cuja a foz encontra-se a jusante de uma estação fluviométrica, situação não descrita pelas metodologias aplicadas. Chaves *et al.* (2002) descrevem que é possível que outras bacias, distintas daquela a que se aplicou primeiramente o método (Bacia do Itapicuru), requeiram equações distintas, em função de suas particularidades (rede de drenagem, distribuição de postos etc.). No caso da estação Iporã, aqui denominado de Caso 5, utilizou-se uma combinação dos casos já descritos. Para a aplicação dos métodos interpolação linear, interpolação linear modificado, Chaves e Chaves modificado. Primeiramente, calculou-se a vazão na foz do rio Piquiri, utilizando-se a equação do caso 2 e, em seguida, utilizando as equações do caso 4, calculou-se a vazão para a estação Iporã (64833000).

Partindo-se da nascente para a foz, determinou-se as  $Q_{\max,Tr}$ ,  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{\text{med}}$ , para todos os postos fluviométricos de vazão conhecida, cujas vazões foram supostas como desconhecidas apenas para efeito de teste, em posterior comparação entre os valores das vazões estimadas com as demais metodologias e os valores observados.

Desta maneira, na Tabela 4 encontra-se o enquadramento das situações dos postos fluviométricos existentes na bacia hidrográfica do rio Piquiri, em relação ao (aos) posto (os) fluviométrico (s) mais próximo (s).



**Figura 7** Enquadramento das situações dos postos fluviométricos existentes em relação ao posto fluviométrico mais próximo. Datum WGS-84, coordenadas UTM, zona 22 S.

**Tabela 4** Enquadramento das situações dos postos fluviométricos existentes em relação ao posto fluviométrico mais próximo

Casos	Código	Estação	Rio
Caso 1	64764000	Guampará	Rio Piquiri
Caso 3	64765000	Porto Paiquerê	Rio Piquiri
Caso 3	64767000	Porto Carriel	Rio Piquiri
Caso 3	64771500	Porto Guarani	Rio Piquiri
Caso 1	64773000	Ponte Leôncio Primo	Rio Cantu
Caso 4	64775000	Balsa do Cantu	Rio Cantu
Caso 3	64776100	Foz do Cantu	Rio Piquiri
Caso 4	64780000	Ponte Tourinho	Rio Tourinho
Caso 4	64785000	Ponte do Goio-Bang	Rio Goio-Bang
Caso 4	64790000	Salto Sapucaí	Rio Sapucaí
Caso 3	64795000	Ponte do Piquiri	Rio Piquiri
Caso 3	64799500	Novo Porto 2	Rio Piquiri
Caso 3	64800000	Porto 2	Rio Piquiri
Caso 1	64810000	Balsa do Goio-erê	Rio Goio-erê
Caso 4	64815000	Fazenda Uberana	Rio Goio-erê
Caso 3	64820000	Porto Formosa	Rio Piquiri
Caso 2	64830000	Balsa Santa Maria	Rio Piquiri
Caso 5	64833000	Iporã	Rio Xambre

#### 4.7 Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias

Uma vez obtidos os valores das vazões estudadas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{max,tr}$ ,  $Q_{med}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), utilizando-se as cinco metodologias (método tradicional, interpolação linear, interpolação linear modificado, Chaves e Chaves modificado), procedeu-se a avaliação dos métodos.

Como indicadores estatísticos foram utilizados os seguintes índices: a) erro relativo (ER) entre o valor obtido a partir da análise da série histórica e o estimado pelos métodos de regionalização (Equação 20); b) erro médio (EM) (Equação 21); c) índice de eficiência proposto por Nash e Sutcliffe (N-S) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) (Equação 22); d) raiz do erro médio quadrático (RMSE) (Equação 23) e) coeficiente de concordância modificado de Willmott *et al.* (2012) ( $dr$ ) (Equação 24).

$$ER = 100 \times \left| \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right| \quad (20)$$

$$EM = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{est}) \quad (21)$$

$$N - S = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{est})^2} \quad (23)$$

$$dr = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{est}|}{2 \sum_{i=1}^n |Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}|} \quad (24)$$

em que:

- $Q_{obs}$  é vazão obtida a partir da análise da série histórica ( $m^3 s^{-1}$ );
- $Q_{est}$  é vazão estimada com base nas metodologias de regionalização ( $m^3 s^{-1}$ );
- $n$  é o número de estações fluviométricas;
- $\overline{Q_{obs}}$  é a média das vazões observadas ( $m^3 s^{-1}$ ).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Variáveis dependentes

As distribuições de probabilidade mais adequada, ou seja, as que obtiveram o menor intervalo de confiança, para cada estação fluviométrica, associadas a cada período de retorno estudado, para as vazões extremas (mínimas e máximas), são apresentadas na Tabela 5. Os intervalos de confiança superior e inferior (95%), o erro padrão, os parâmetros para os cálculos das distribuições de probabilidades, de cada estação fluviométrica para cada período de retorno, encontram-se no Apêndice B - Tabelas 21 a 37.

Segundo Naguettini e Pinto (2007), o intervalo de confiança varia em função do período de retorno, ou seja, a escolha da melhor distribuição de probabilidade pode variar, de acordo com o período de retorno adotado. Por essa razão, verificam-se na Tabela 5 diferentes distribuições de probabilidade em uma mesma estação.

**Tabela 5** Distribuições de probabilidade que obtiveram o menor erro padrão, aplicadas em cada estação e a cada período de retorno, para determinação das vazões mínimas associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) e máximas ( $Q_{máx,2}$ ,  $Q_{máx,5}$ ,  $Q_{máx,10}$ ,  $Q_{máx,25}$ ,  $Q_{máx,50}$  e  $Q_{máx,100}$ )

Código	Estação	Distribuição						
		$Q_{máx,2}$	$Q_{máx,5}$	$Q_{máx,10}$	$Q_{máx,25}$	$Q_{máx,50}$	$Q_{máx,100}$	$Q_{7,10}$
64764000	Guampará	G	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 2	P III
64765000	Porto Paiquerê	Log-P III	Log-N 2	Log-N 2	Log-N 2	P III	P III	P III
64767000	Porto Carriel	Log-P III	Log-P III	Log-P III	G	G	G	P III
64771500	Porto Guarani	Log-P III	P III	P III	P III	P III	P III	P III
64773000	Ponte Leôncio Primo	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 2	P III
64775000	Balsa do Cantu	Log-N 2	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64776100	Foz do Cantu	Log-N 2	P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III	P III
64780000	Ponte Tourinho	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64785000	Ponte do Goio-Bang	Log-P III	P III	P III	P III	P III	P III	P III
64790000	Salto Sapucaí	Log-N 2	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	G	G	P III
64795000	Ponte do Piquiri	G	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64799500	Novo Porto 2	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64800000	Porto 2	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64810000	Bolsa do Goio-erê	G	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 2	Log-N 2	P III
64815000	Fazenda Uberana	Log-P III	Log-P III	Log-P III	Log-P III	Log-P III	Log-P III	P III
64820000	Porto Formosa	Log-P III	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	P III
64830000	Balsa Santa Maria	G	Log-P III	Log-P III	Log-P III	Log-N 2	Log-N 2	P III
64833000	Iporã	Log-P III	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 3	Log-N 2	Log-N 2	P III

**Notas:** \* P III: Pearson tipo III, Log-N 2: Log-Normal a dois, Log-N 3: Log-Normal a três parâmetros, Log-P III = Log-Pearson tipo III, G: Gumbel.

A distribuição Log-Pearson tipo III obteve, em 100% dos casos, o menor erro padrão, apresentando-se com o melhor ajuste aos dados de vazão mínima:  $Q_{7,10}$  (Tabela 5). Os valores das vazões mínimas e médias ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{med}$ ) determinados para as estações fluviométricas, utilizando os dados das séries históricas de vazões, são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** Vazões mínimas ( $m^3 s^{-1}$ ), associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ), segundo a distribuição Log-Person Tipo III, vazões de 90 e 95 % de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) e vazão média ( $Q_{med}$ ), obtidas para cada uma das estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri

Código	Estação	Vazões ( $m^3 s^{-1}$ )			
		$Q_{7,10}$	$Q_{90}$	$Q_{95}$	$Q_{med}$
64764000	Guampará	4,48	11,57	8,90	53,80
64765000	Porto Paiquerê	6,31	16,47	12,78	81,06
64767000	Porto Carriel	7,45	15,76	12,42	108,71
64771500	Porto Guarani	6,69	19,00	12,50	120,50
64773000	Ponte Leôncio Primo	0,45	2,12	1,36	29,62
64775000	Balsa do Cantu	5,28	10,80	8,35	66,39
64776100	Foz do Cantu	17,70	36,31	28,25	219,35
64780000	Ponte Tourinho	1,42	2,45	1,90	6,47
64785000	Ponte do Goio-Bang	8,40	12,85	9,49	29,63
64790000	Salto Sapucaí	6,31	5,74	4,80	17,83
64795000	Ponte do Piquiri	27,56	65,60	48,44	303,27
64799500	Novo Porto 2	28,15	75,59	54,04	360,37
64800000	Porto 2	34,08	70,89	56,92	253,63
64810000	Balsa do Goio-erê	15,53	21,27	19,48	45,40
64815000	Fazenda Uberana	19,82	30,75	26,76	61,31
64820000	Porto Formosa	72,70	129,36	108,33	419,96
64830000	Balsa Santa Maria	93,91	177,44	144,84	514,59
64833000	Iporã	8,89	11,42	10,97	19,01

Para as vazões máximas, cerca de 70% dos dados das estações apresentaram o menor intervalo de confiança, quando ajustados à distribuição Log-Normal a três parâmetros (Tabela 5). Desta maneira, a distribuição Log-Normal a três parâmetros foi adotada de forma padrão para a maioria, apenas para as estações 64765000 (Porto Paiquerê), 64771500 (Porto Guarani), 64785000 (Ponte do Goio-Bang), que não obtiveram ajuste à Log-Normal a três parâmetros, utilizou-se a distribuição Log-Normal a dois parâmetros.

Os valores das vazões máximas ( $Q_{máx,2}$ ,  $Q_{máx,5}$ ,  $Q_{máx,10}$ ,  $Q_{máx,25}$ ,  $Q_{máx,50}$  e  $Q_{máx,100}$ ) associados a diferentes períodos de retorno, determinados para as estações fluviométricas, utilizando os dados das séries históricas de vazões, são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** Vazões máximas diárias ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), associadas a diferentes períodos de retorno ( $Q_{\text{máx},2}$ ,  $Q_{\text{máx},5}$ ,  $Q_{\text{máx},10}$ ,  $Q_{\text{máx},25}$ ,  $Q_{\text{máx},50}$  e  $Q_{\text{máx},100}$ ), obtidas após o ajuste das distribuições de probabilidade, para cada uma das estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri

Código	Estação	Vazões máximas ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )					
		$Q_{\text{máx},2}$	$Q_{\text{máx},5}$	$Q_{\text{máx},10}$	$Q_{\text{máx},25}$	$Q_{\text{máx},50}$	$Q_{\text{máx},100}$
64764000	Guampará	589,50	761,06	859,10	970,38	1046,17	1117,10
64765000	Porto Paiquerê	718,42	827,22	890,56	963,43	1013,63	1061,01
64767000	Porto Carriel	1205,69	1709,64	2091,66	2624,46	3055,82	3515,46
64771500	Porto Guarani	1414,01	1665,51	1919,77	2233,71	2463,24	2689,74
64773000	Ponte Leôncio Primo	474,89	639,29	739,82	859,65	944,69	1026,77
64775000	Balsa do Cantu	821,04	1086,31	1235,19	1402,03	1514,43	1618,76
64776100	Foz do Cantu	3480,12	4951,45	5784,04	6722,61	7358,14	7950,24
64780000	Ponte Tourinho	52,29	88,98	111,02	136,94	155,15	172,58
64785000	Ponte do Goio-Bang	99,51	132,61	154,11	180,88	200,60	220,16
64790000	Salto Sapucaí	82,52	132,28	164,22	203,65	232,47	260,91
64795000	Ponte do Piquiri	2871,79	3681,26	4122,40	4606,50	4926,91	5220,40
64799500	Novo Porto 2	3614,56	4672,56	5229,29	5825,18	6211,33	6559,50
64800000	Porto 2	2143,39	3019,44	3485,16	3987,28	4314,67	4611,22
64810000	Bolsa do Goio-erê	150,37	192,67	217,44	246,07	265,86	284,59
64815000	Fazenda Uberana	211,37	295,51	351,79	423,39	477,07	531,04
64820000	Porto Formosa	2728,94	3627,27	4105,45	4621,47	4958,20	5263,38
64830000	Balsa Santa Maria	3003,97	3756,49	4222,63	4783,43	5184,60	5574,05
64833000	Iporã	44,44	55,43	61,68	68,77	73,59	78,09

## 5.2 Características físicas e climáticas

Na Tabela 8 são apresentados os valores das características físicas das 18 sub-bacias, utilizadas no estudo de regionalização.

Na obtenção dos comprimentos totais dos rios das bacias, observou-se que, em alguns locais, o modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 30 metros, superestima os valores dos mesmos, tendo em vista a quantidade de afluentes que foram delimitados, interferiu na somatória do comprimento total, tornando a rede de drenagem muito densa. Como este parâmetro é muito influenciado pela resolução do mapa, a partir do qual o mesmo é determinado, não foi possível assegurar que os valores obtidos refletiam as reais condições de drenagem das sub-bacias estudadas.

Os valores de precipitações médias obtidas para as bacias dos postos fluviométricos considerados são apresentados na Tabela 9. O mapa de isoietas da área de estudo é apresentado na Figura 8: a) precipitação total anual; b) precipitação do trimestre mais seco e c) precipitação do trimestre mais chuvoso.

**Tabela 8** Características físicas das sub-bacias associadas às estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri

Código	Nome	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio principal (km)	Densidade de drenagem (m.Km <sup>2</sup> )	Declividade do rio principal (m.Km <sup>-1</sup> )	Declividade média da bacia (%)
64764000	Guampará	1687,5	151,4	0,71	3,58	14,68
64765000	Porto Paiquerê	3281,0	248,2	0,72	2,71	17,18
64767000	Porto Carriel	3536,4	261,1	0,72	2,64	17,38
64771500	Porto Guarani	4162,2	313,8	0,72	2,35	17,72
64773000	Ponte Leôncio Primo	754,6	73,8	0,69	7,08	20,09
64775000	Balsa do Cantu	2521,0	184,4	0,69	3,61	16,62
64776100	Foz do Cantu	7649,7	359,3	0,71	2,15	17,28
64780000	Ponte Tourinho	274,3	34,8	0,63	7,14	10,71
64785000	Ponte do Goio-Bang	1335,3	134,1	0,64	3,46	8,64
64790000	Salto Sapucaí	695,2	95,4	0,66	5,10	10,64
64795000	Ponte do Piquiri	11235,3	428,3	0,69	1,86	15,33
64799500	Novo Porto 2	12073,9	444,6	0,69	1,81	14,83
64800000	Porto 2	13100,4	454,2	0,68	1,78	14,19
64810000	Bolsa do Goio-erê	2035,1	102,3	0,62	3,19	6,98
64815000	Fazenda Uberana	2957,5	143,0	0,62	2,61	6,92
64820000	Porto Formosa	17415,9	501,3	0,67	1,65	12,39
64830000	Balsa Santa Maria	20943,8	561,4	0,66	1,53	11,39
64833000	Iporã	1065,5	60,6	0,62	3,03	7,73
64764000	Guampará	1687,5	151,4	0,71	3,58	14,68

Nota-se (Figura 8a) que a bacia do rio Piquiri apresenta um núcleo de chuvas cujos valores anuais ultrapassam 2000 mm ano<sup>-1</sup>, mas há áreas, ao norte da bacia, sujeitas a precipitações variando de 1440 a 1700 mm ano<sup>-1</sup>.

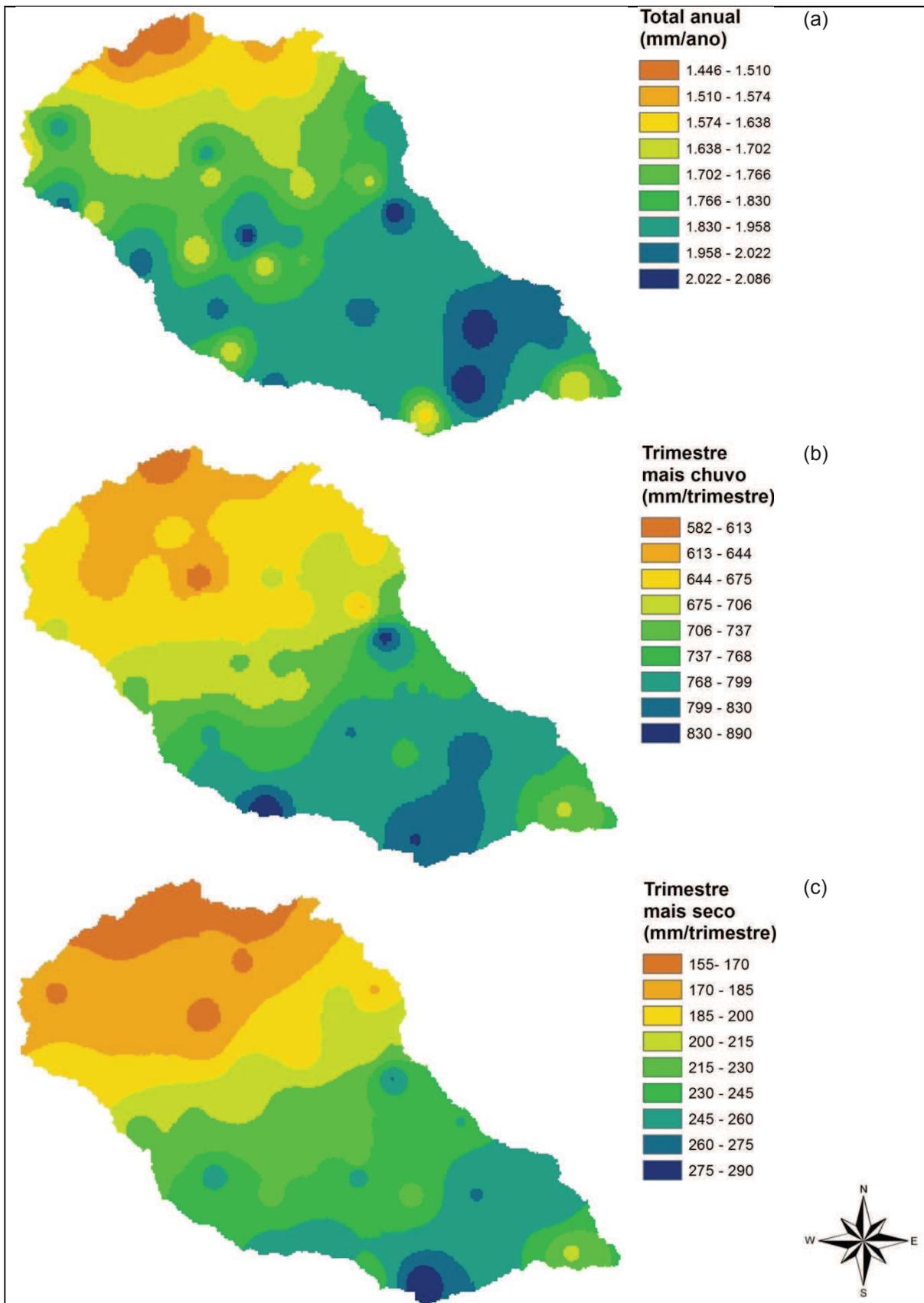
Correia (2013), em estudo realizado com 73 postos pluviométricos (41 postos intrabacia e 32 postos extrabacia), com 35 anos (1976-2010), na bacia hidrográfica do rio Piquiri, observou que a distribuição anual média da precipitação em toda a extensão da bacia varia entre 1400 a 2000 mm ano<sup>-1</sup>, dados corroborados com os resultados encontrados neste estudo.

A precipitação do trimestre mais chuvoso (Figura 8b) varia em torno de 580 a 890 mm trimestre<sup>-1</sup>, os valores mais altos são observados no sul e sudeste. Já o trimestre mais seco (Figura 8c) varia em torno de 155 a 290 mm trimestre<sup>-1</sup> e os valores menores são observados no norte e nordeste.

Não se conseguiu achar padrão em relação aos meses mais secos e mais chuvosos. Segundo o IAP (2008), a bacia do rio Piquiri, situa-se em uma região que apresenta aspecto climatológico tipicamente temperado, caracterizado por um regime de precipitação quase equitativa ao longo do ano, ou seja, é quase impossível pela climatologia prever a época ou o trimestre do ano que as máximas e mínimas concentrações irão se verificar, devido à circulação atmosférica.

**Tabela 9** Valores de precipitação total anual, do trimestre mais seco e do trimestre mais chuvoso, obtidos pelo método de interpolação do quadrado médio da distância (IDW) das sub-bacias, associados às estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Precipitação total anual (mm ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Precipitação trimestre mais chuvoso (mm trimestre<sup>-1</sup>)</b>	<b>Precipitação do trimestre mais seco (mm trimestre<sup>-1</sup>)</b>
64764000	Guampará	1902,3	766,3	243,8
64765000	Porto Paiquerê	1900,1	783,4	250,6
64767000	Porto Carriel	1901,4	783,5	250,0
64771500	Porto Guarani	1904,1	783,5	248,7
64773000	Ponte Leôncio Primo	1993,5	787,8	253,5
64775000	Balsa do Cantu	1952,9	777,8	242,3
64776100	Foz do Cantu	1918,2	779,9	245,3
64780000	Ponte Tourinho	1889,1	800,5	243,1
64785000	Ponte do Goio-Bang	1869,2	738,1	227,0
64790000	Salto Sapucaí	1799,2	764,0	236,1
64795000	Ponte do Piquiri	1895,2	769,3	240,5
64799500	Novo Porto 2	1893,9	765,9	239,3
64800000	Porto 2	1883,1	758,6	236,3
64810000	Bolsa do Goio-erê	1719,0	668,7	188,2
64815000	Fazenda Uberana	1688,4	659,6	182,6
64820000	Porto Formosa	1837,4	734,3	223,3
64830000	Balsa Santa Maria	1824,3	723,8	218,7
64833000	Iporã	1532,9	620,2	165,5



**Figura 8** Mapa das isoietas, referente à precipitação total anual (a), trimestre mais chuvoso (b) e trimestre mais seco (c) para a bacia hidrográfica do rio Piquiri.