

ALDO ARAÚJO AZEVEDO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES
MÍNIMAS DE REFERÊNCIA PARA A SUB-BACIA
DO RIO PARANÁ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2004

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A994a
2004

Azevedo, Aldo Araújo, 1959-

Avaliação de metodologias de regionalização de vazões
mínimas de referência para a sub-bacia do Rio Paranã /
Aldo Araújo Azevedo. – Viçosa : UFV, 2004.
xiii, 101f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Demetrius David da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 89-92

1. Bacias hidrográficas. 2. Correntes fluviais - Medição.
3. Análise de regressão. 4. Paranã, Rio. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 20.ed. 551.48

ALDO ARAÚJO AZEVEDO

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES
MÍNIMAS DE REFERÊNCIA PARA A SUB-BACIA DO RIO PARANÁ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de outubro de 2004.

Prof. Dr. Fernando Falco Pruski
(Conselheiro)

Prof. Dr. Rubens Alves de Oliveira
(Conselheiro)

Prof. Dr. Paulo Afonso Ferreira

Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis

Prof. Dr. Demetrius David da Silva
(Orientador)

Aos meus pais, Ernesto e Dejanira.
Aos meus filhos Robson e Ana Carolina.
Á minha esposa Inês.
A minha avó Velumina.
A todos os meus irmãos e sobrinhos.

**Pelo apoio, pelo incentivo e pela amizade,
Dedico este trabalho.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte eterna de vida e luz nos momentos difíceis.

À minha esposa Inês e aos meus filhos Robson e Ana Carolina, pelo amor, pela amizade, pelo estímulo e pela valiosa ajuda.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e oportunidade de realização do curso.

Ao governo do Estado do Tocantins, por meio da Secretaria de Recursos Hídricos, pela liberação e apoio financeiro.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela orientação valiosa, pelos ensinamentos, pela compreensão, pelo profissionalismo, pela amizade, pela confiança e dedicação demonstrados ao longo da condução deste trabalho.

Aos meus conselheiros Prof. Fernando Falco Pruski e Prof. Rubens Alves de Oliveira, pelo apoio, pela amizade, pelas idéias, sugestões e críticas oportunas durante a realização deste trabalho.

Aos professores Paulo Afonso Ferreira e Edvaldo Fialho dos Reis, pela participação no comitê de avaliação e pelas críticas e sugestões valiosas.

Aos professores, Alice Maria Correia Jhan, Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro, Demetrius David da Silva, Everardo Chartuni Montovani, Fernando Falco Pruski, Jadir Nogueira da Silva, Luiz Cláudio Costa, Paulo Afonso Ferreira, Vicente Paulo Soares, pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas.

Aos amigos do curso de Pós-Graduação, Felipe Marques, Luciano Novaes, Alysson Lemos, Wendy Ataíde, Luiz Gustavo, Silvio Bueno, Renata Del Giudice,

Roberto Cecílio, Flávio Gonçalves, Catalunha, Elder Sânzio, Denise Freitas, pela valiosa ajuda e agradável convivência durante a realização deste estudo.

Aos amigos bolsistas do GPRH, Leônidas, Denise e Agnaldo, pelo apoio, amizade e convivência durante a condução deste trabalho.

Aos professores e aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela dedicação e amizade .

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALDO ARAÚJO AZEVEDO, filho de Ernesto Martins Azevedo e Dejanira Araújo Azevedo, nasceu em 26/01/1959, em Porto Nacional, TO, Brasil.

Em março de 1979, ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal Rural da Amazônia, em Belém, PA, graduando-se em janeiro de 1983.

Em maio de 1984, foi aprovado em concurso público para a Secretaria Estadual de Agricultura do Estado de Goiás, onde trabalhou até dezembro de 1993.

Em dezembro de 1993, foi aprovado em concurso público para a Secretaria Estadual de Agricultura do Estado do Tocantins, onde trabalhou até julho de 2002.

Em julho de 2002, foi transferido para a Secretaria Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Tocantins, onde permanece lotado até a presente data.

Em setembro de 2002, iniciou o curso de Pós-Graduação, em nível de mestrado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, na área de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, submetendo-se à defesa de tese em outubro de 2004, obtendo o título de *Magister Scientiae*.

ÍNDICE

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Uso de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) na regionalização hidrológica.....	5
2.2. Características físicas e climáticas utilizadas na regionalização hidrológica.....	8
2.2.1. Características Físicas.....	8
2.2.2. Características Climáticas.....	11
2.3. Variáveis e funções hidrológicas utilizadas no estudo de regionalização de vazões mínimas de referência.....	12
2.3.1. Vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$).....	12
2.3.2. Curva de permanência.....	13
2.4. Regionalização hidrológica.....	14
2.4.1. Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas.....	14

2.4.2. Distribuições de probabilidade aplicadas a eventos extremos.....	16
2.4.3. Equações de regressão entre as diferentes variáveis regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Caracterização da sub-bacia em estudo.....	21
3.2. Geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.....	24
3.2.1. Amostragem.....	24
3.2.2. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem.....	27
3.2.3. Geração do modelo digital de elevação (MDE).....	27
3.2.4. Pós-processamento para geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC).....	28
3.2.5. Validação do MDEHC.....	28
3.3. Seleção e análise dos dados básicos.....	29
3.4. Obtenção das características físicas das sub-bacias.....	35
3.5. Determinação das características climáticas de cada sub-bacia.....	36
3.6. Preenchimento de Falhas.....	38
3.7. Determinação das vazões mínimas de referência.....	39
3.8. Metodologia de regionalização de vazões baseadas na utilização de equações de regressão regionais (ELETROBRÁS, 1985).....	44
3.8.1. Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas.....	44
3.8.2. Regionalização das vazões mínimas de referência.....	45
3.9. Metodologia de regionalização de vazões baseada na utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automática em ambiente de sistemas de informações geográficas.....	46
3.9.1. Seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida.....	47
3.9.2. Seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida.....	47
3.9.3. Seção de interesse localizada a jusante de um postos com vazão conhecida.....	48

3.9.4. Seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior.....	48
3.10. Metodologia de regionalização de vazões baseada no princípio da vazão específica.....	49
3.10.1. Seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida.....	50
3.10.2. Seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida.....	50
3.10.3. Seção de interesse a jusante de um posto com vazão conhecida....	50
3.10.4. Seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior..	50
3.11. Comparação dos resultados obtidos com base nas três metodologias com as vazões observadas nos postos fluviométricos da sub-bacia estudada.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1. Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.....	53
4.2. Características físicas e de precipitação média pluvial da sub-bacia.....	58
4.3. Preenchimento de falhas e extensão de séries.....	60
4.4. Regionalização de vazões mínimas baseada na utilização de equações de regressão regionais (ELETROBRÁS, 1985).....	62
4.4.1. Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas.....	62
4.4.2. Regionalização da $Q_{7,10}$	66
4.4.3. Regionalização da Q_{90} e Q_{95}	71
4.5. Regionalização de vazões mínimas baseada na utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas.....	76
4.5.1. Regionalização da $Q_{7,10}$	76
4.5.2. Regionalização da Q_{90} e Q_{95}	78
4.6. Regionalização de vazões mínimas baseada na metodologia de vazão específica.....	79
4.6.1 Regionalização da $Q_{7,10}$	79

4.6.2. Regionalização da Q_{90} e Q_{95}	81
4.7. Comparação das metodologias de regionalização de vazões utilizadas....	82
4.7.1. Vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$).....	82
4.7.2. Vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanências de 90 e 95% (Q_{90} e Q_{95}).....	85
5. CONCLUSÕES.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICES.....	93
APÊNDICE A.....	94
APÊNDICE B.....	96

RESUMO

AZEVEDO, Aldo Araújo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2004.
Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã. Orientador: Demetrius David da Silva. Conselheiros: Fernando Falco Pruski e Rubens Alves de Oliveira.

No presente trabalho foram avaliadas três metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) para a sub-bacia do rio Paranã: 1) ELETROBRÁS (1985), tendo como princípio básico a utilização de equações de regressão aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas; 2) CHAVES et al. (2002), que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas; e 3) vazão específica, que é calculada com base nas áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e, ou, a jusante da seção onde se deseja calcular a vazão. As características físicas utilizadas na regionalização pelo método ELETROBRÁS (1985) foram a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a densidade de drenagem, a declividade média da bacia e do rio principal, extraídas a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente da sub-bacia do rio Paranã. As características climáticas utilizadas foram a precipitação total anual e as precipitações do semestre e do trimestre mais secos. Os modelos probabilísticos de distribuição de eventos extremos testados para as séries de vazões mínimas foram: Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull. Após a identificação do modelo probabilístico com melhor ajuste aos dados de vazões foram obtidas, para cada

estação fluviométrica, as vazões mínimas com sete dias de duração associadas ao período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Os valores das vazões associadas a 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) de permanência no tempo foram obtidos da curva de permanência de valores diários de cada estação fluviométrica. Nas regionalizações feitas com aplicação das metodologias proposta por CHAVES et al. (2002) e da vazão específica, procurou-se distinguir quatro possíveis situações: seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida, seção de interesse localizada entre dois postos com vazões conhecidas, seção de interesse localizada a jusante de um posto com vazão conhecida e seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior. Tanto na metodologia proposta por CHAVES et al. (2002) quanto na de vazões específicas, os valores de vazões foram estimados por meio da aplicação de equações específicas para cada uma das situações mencionadas anteriormente, de acordo com a localização na rede de drenagem da seção onde se deseja conhecer a vazão em relação aos postos fluviométricos existentes. Com os resultados das vazões mínimas estimadas com base nas três metodologias e os valores de vazões observados para os postos fluviométricos da bacia, foi avaliada a precisão das metodologias por meio da aplicação de dois índices: erro relativo e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe. Os resultados obtidos permitiram concluir que: os modelos probabilísticos Log-Normal a dois parâmetros e Log-Normal a três parâmetros foram os que melhor se ajustaram aos dados de vazão mínima com sete dias de duração (Q_7) para as regiões homogêneas I e II, respectivamente; a área de drenagem e a precipitação total anual foram as características mais expressivas para a representação das vazões regionalizadas pelo método Eletrobrás para as duas regiões homogêneas estudadas; a metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas apresentou baixa eficiência na estimativa de vazões para as situações em que as sub-bacias envolvidas na extrapolação ou interpolação apresentam grandes diferenças de áreas; a metodologia da vazão específica foi mais eficiente na estimativa de vazões em situações onde a seção em que se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazões conhecidas; a melhor metodologia de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã foi a baseada na utilização de equações de regressão regionais, com erro relativo médio de 13,58% e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe médio de 0,97.

ABSTRACT

AZEVEDO, Aldo Araújo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, October 2004.
Evaluating the methodologies for regionalization of the minimum reference flow rates for the sub-basin of Paranã river. Adviser: Demetrius David da Silva. Committee members: Fernando Falco Pruski and Rubens Alves of Oliveira.

Three methodologies for the regionalization of the minimum reference flow rates ($Q_{7,10}$, Q_{90} and Q_{95}) were evaluated for the sub-basin of Paranã river: 1) ELETROBRÁS (1985) is based on regression equations applied to hydrologically homogenous regions; 2) CHAVES et al. (2002) apply the automatic interpolation and extrapolation techniques in ambient of the geographical information systems; and 3) the specific flow rate is calculated based on the drainage areas in fluvimetric gaging stations located upstream and downstream of the section where the rate flow will be calculated. The physical characteristics used in the regionalization by ELETROBRÁS (1985) method were the drainage area, the main river length, the drainage density, the average slopings of the basin and main river, extracted from the hydrological consistent elevation digital model of the Paranã river sub-basin. The annual total precipitation and the precipitations of the driest semester and trimester were the climatic characteristics used. The distribution probabilistic models of extreme events tested for the minimum flow rate series were: Log-normal at two and three parameters, Pearson III, Log-Pearson III, and Weibull. After the identification of the probabilistic model with better adjustment to the data of flow rates for each

fluviometric gaging station, the minimum flows associated to the return period of 10 years ($Q_{7,10}$) were obtained. The values of the flow rates associated to the permanence times of 90% (Q_{90}) and 95% (Q_{95}) were obtained from the permanence curve of daily values in each fluviometric gaging station. In the regionalizations performed with application of either the methodology proposed by CHAVES et al. (2002) and that of the specific flow rate, it was tried to distinguish four possible situations: the interesting section is located at upstream of the station where the flow rate is known; the interesting section is located between two stations where the flow rates are known; interesting section is located at downstream of the station where the flow rate is known; and interesting section is located in an affluent channel from which the firth is between two fluviometric gaging stations of a superior-ordered channel. In either the methodology by CHAVES et al. (2002) and the specific flow rates, the flow rate values were estimated by applying specific equations for each one of the previously mentioned situations, according to the localization of the drainage net in the section where the flow rate is to be known in relation to the existent fluviometric gaging stations. With the results of the minimum flow rates estimated on the basis of the three methodologies, as well as the values of the flow rates observed in the fluviometric gaging stations in the basin, the accuracy of the methodologies were evaluated by applying two indexes: relative error and the efficiency coefficient by Nash and Sutcliffe. According to the obtained results, the following conclusions may be drawn: the probabilistic models of Log-normal at two parameters and Log-normal at three parameters were the ones showing the best adjustment to the data of minimum flow rate with 7-days duration for the homogenous regions I and II, respectively; the drainage area and the total annual precipitation were the most expressive characteristics for representation of the flow rates regionalized by the ELETROBRÁS method for both homogenous regions studied; the interpolation and extrapolation methodology in the geographical information systems presented low efficiency in estimating the flow rates for the situations where the sub-basins involved into extrapolation or interpolation presented wide differences between the areas; the specific flow rate methodology was most efficient in estimating the flow rates under situations in which the section where the flow rate was determined is located between two fluviometric gaging stations with well-known flow rates; the best methodology for regionalization of the minimum reference flow rates in the sub-basin of the Paranã river was the one based on the regional regression equations, with an average relative error of 13.58% and an average efficiency coefficient by Nash and Sutcliffe of 0.97.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de água para satisfazer a seus usos múltiplos tem contribuído para o aumento de seu consumo e, conseqüentemente, dos conflitos entre usuários em diversas bacias hidrográficas do Brasil. Neste sentido, é crescente a discussão sobre a melhor forma de gerenciar e normatizar o uso da água para atender a suas diferentes demandas como abastecimento humano e industrial, geração de energia, dessedentação animal, irrigação, entre outros.

A partir do estabelecimento do domínio público das águas, com a promulgação da Constituição Federal de 1988, previsto também na lei 9.433/97 e nas legislações estaduais que tratam da política de recursos hídricos, a outorga de direito de uso de recursos hídricos tornou-se o mais importante instrumento de gestão e elemento disciplinador do uso da água nas bacias hidrográficas. Todos os usuários que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um curso d'água, excetuando-se os casos isentos previstos em lei, devem dirigir-se ao órgão gestor e solicitar a outorga para garantir seus direitos de uso de determinada vazão ou volume de água.

Em rios de regime permanente ou perene a outorga é usualmente feita com base na $Q_{7,10}$ (vazão mínima com duração de 7 dias e período de retorno de 10 anos), na Q_{90} ou na Q_{95} (vazões mínimas com 90% e 95% de permanência no tempo, respectivamente, obtidas da curva de permanência), atribuindo-se valores percentuais a elas, ou seja, outorgando-se apenas parte destes valores de vazões mínimas. Para

rios de regime temporário ou intermitente o processo de outorga torna-se mais complexo, pois na época seca a vazão do rio é nula (SILVA e RAMOS, 2001).

Diversos estados do Brasil vêm buscando, atualmente, alternativas eficientes a fim de melhor aplicar esse instrumento de concessão de direito de uso da água, por meio de técnicas de estimativas confiáveis das variáveis hidrológicas envolvidas no processo ao longo de toda bacia hidrográfica, como forma de assegurar uma maior confiabilidade no gerenciamento e aproveitamento dos recursos hídricos e no controle ambiental.

De acordo com IBIAPINA et al. (1999), para o aproveitamento adequado dos recursos hídricos disponíveis no Brasil é fundamental conhecer o comportamento dos rios e seus regimes de variação de vazões, assim como os regimes pluviométricos das diversas bacias hidrográficas, considerando as suas distribuições espaciais e temporais, o que exige um trabalho permanente de coleta e interpretação de dados, uma vez que a confiabilidade torna-se maior à medida que as séries históricas ficam mais extensas.

A variabilidade das condições hidrológicas é decorrente da interação de vários fatores, como: precipitação; evapotranspiração; relevo; geologia; geomorfologia; solos; e uso e manejo do solo. Este conjunto grande de fatores que influenciam as variáveis hidrológicas transforma a estimativa de seus valores num problema muito complexo.

Uma rede hidrométrica, composta de postos pluviométricos e fluviométricos, dificilmente cobre todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Sempre existirão lacunas temporais e espaciais que precisarão ser preenchidas com base em metodologias apropriadas. No Brasil, segundo ANA (2003), existe, em média, uma estação fluviométrica para cada 2.013 km² e devido aos altos custos de implantação e manutenção da rede hidrométrica torna-se importante a otimização das informações disponíveis, visto que a grande maioria dos postos fluviométricos estão localizados predominantemente no curso d'água principal das bacias hidrográficas.

Para suprir a deficiência da rede hidrométrica no Brasil uma técnica que tem sido utilizada com resultados satisfatórios é a regionalização hidrológica (ELETROBRÁS, 1985). De acordo com FILL (1987), em sentido amplo, entende-se por regionalização hidrológica qualquer processo de transferência de informações das estações pluviométricas e fluviométricas para outros locais. Essa transferência

pode abranger diretamente as séries de vazões e, ou, precipitações, ou até mesmo determinados parâmetros estatísticos relevantes, tais como: média, variância, máximos e mínimos ou, ainda, equações e parâmetros relacionados com estas estatísticas.

Dentre os métodos mais utilizados de regionalização de vazões mínimas está o uso de equações de regressão regionais ajustadas com base em características fisiográficas e climáticas das bacias, aplicadas dentro de regiões hidrologicamente homogêneas previamente definidas (ELETROBRÁS, 1985).

Entretanto, segundo STEDINGER et al. (1992), erros de predição expressivos podem ocorrer quando equações de regressão regionais são utilizadas na estimativa de vazões mínimas. Estes erros tendem a ser mais expressivos em situações com baixa densidade de postos fluviométricos, como é o caso da maioria das bacias hidrográficas brasileiras, devido ao pequeno grau de liberdade disponível para as análises de regressão.

Após verificar os problemas relacionados à utilização da metodologia tradicional de regionalização de vazões, CHAVES et al. (2002) propuseram uma metodologia alternativa baseada na utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas.

Tendo em vista a necessidade de avaliar as metodologias empregadas para estimar as variáveis hidrológicas nas seções dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, o presente trabalho teve por objetivos:

- obter um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a sub-bacia do rio Paranã;
- proceder a regionalização de vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) para a sub-bacia do rio Paranã com base nas metodologias propostas pela ELETROBRÁS (1985), por CHAVES et al. (2002) e na metodologia de vazões específicas; e
- comparar os resultados estimados com base nas três metodologias com as vazões observadas nos postos fluviométricos da sub-bacia do rio Paranã.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A regionalização hidrológica é um instrumento eficaz em estudos de planejamento e administração de recursos hídricos, possibilitando a obtenção de variáveis hidrológicas, como vazões máximas, mínimas e médias de longo período, de maneira simples e rápida, de acordo com a agilidade que a administração dos recursos hídricos requer para suas decisões.

A regionalização pode ser realizada nas seguintes situações:

- a) quando uma variável, como a vazão mínima, precipitação média, entre outras, é determinada numa região com base em relações estabelecidas a partir de dados pontuais existentes;
- b) quando uma função hidrológica, como a curva de permanência ou de duração, a curva de regularização, a curva de intensidade-duração-frequência, entre outras, é determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes; e
- c) quando os parâmetros de uma função ou modelo matemático são determinados pela sua relação com características físicas das bacias, a partir do ajuste de um modelo com base em dados observados em algumas bacias representativas.

2.1. Uso de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) na regionalização hidrológica

As características físicas das bacias hidrográficas eram, até pouco tempo, obtidas unicamente por meio de um processo demorado e trabalhoso, em que o especialista examinava os detalhes das curvas de nível e da rede de drenagem das bases cartográficas e manualmente interpretava e delimitava os seus limites.

Atualmente, com a geração de modelos digitais de elevação (MDEs), têm sido implementados diversos algoritmos utilizados em módulos específicos dos sistemas de informações geográficas que permitem a obtenção automática das características físicas das bacias hidrográficas.

O TOPOGRID, pertencente ao módulo ARC do software ARC/INFO, destaca-se entre os algoritmos disponíveis comercialmente no mercado devido à incorporação da rede de drenagem digital real, extraída das bases cartográficas, durante o processo de geração do MDE. O traçado da hidrografia mapeada é respeitado sempre que há a violação das condições de altimetria favoráveis ao escoamento, garantindo, assim, a coincidência espacial da drenagem mapeada com as células de menor altitude do modelo e configurando a criação de um MDEHC. Essa forma de abordar o problema advém de uma constatação óbvia na natureza, onde o curso d'água é um elemento real de fácil delimitação nas fotografias aéreas, enquanto que a curva de nível não é, pois se trata de um elemento abstrato.

Qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço pode ser considerada como um MDE. Por meio de um método ou modelo matemático gerado a partir de dados de altitude, adquiridos por meio dos mapas topográficos, de técnicas de aerofotogrametria e de imagens de satélite, o MDE permite modelar e representar digitalmente uma superfície. Entretanto, após o processo de geração do modelo normalmente são verificadas depressões, ou seja, células cercadas por outras com maiores elevações. A presença dessas depressões em um MDE produz a descontinuidade do escoamento superficial para a célula vizinha. Algumas destas descontinuidades podem ser naturais, mas a maioria é considerada espúria, em decorrência do próprio processo de geração do MDE.

Segundo VERDIN e JENSON (1996), qualquer estudo hidrológico de superfície pode ser seriamente comprometido com a presença dessas depressões e a conseqüente descontinuidade do escoamento. Sendo assim, um modelo digital de

elevação que não seja hidrológicamente consistente torna-se de pouca utilidade para estudos dessa natureza.

A expansão do uso dos SIGs proporcionou o desenvolvimento de MDEHCs que podem ser definidos como sendo a melhor representação digital do relevo no formato matricial (Raster) capaz de reproduzir, com exatidão, o caminho preferencial de escoamento da água superficial observado no mundo real (ESRI, 1997).

De acordo com FURTADO (1988), as vantagens da automação em relação aos procedimentos manuais são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a reprodutibilidade dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais, bem como o tempo de processamento notadamente menor.

A utilização crescente de MDEs é atribuída, em parte, pela facilidade de acesso aos dados, cobertura completa e contínua em diferentes resoluções e pelo avanço das potencialidades dos sistemas de informações geográficas (SIGs) para processar os dados. A qualidade e a resolução do MDE são duas características importantes que podem interferir nos resultados de sua aplicação. A qualidade refere-se à exatidão com que os valores de elevação são relatados e a resolução refere-se à discrepância da variação dos valores de elevação. A resolução deve ser menor ou igual à menor distância entre duas curvas de nível com cotas diferentes. A geração de uma grade muito densa demandará um maior tempo para a sua criação e, por outro lado, um espaçamento maior poderá gerar perda de informação. Assim, na escolha da resolução da malha, deve haver uma análise considerando o objetivo da aplicação, a precisão dos dados e o tempo de geração da mesma (GARBRECHT e MARTZ, 1999).

Segundo PAREDES (1994), as ferramentas dos SIGs atingiram um elevado grau de integração, disponibilizando uma grande capacidade de análise espacial e temporal, tornando-se um ambiente natural para armazenamento e processamento das informações hidrológicas, possibilitando diferentes formas de representação e apresentação das informações coletadas e geradas com base nas análises.

A qualidade do modelo digital de elevação e do algoritmo utilizado está diretamente relacionada com a eficiência da extração das informações hidrológicas, medidas em termos de precisão e de exatidão. O modelo digital deve garantir sua consistência hidrológica, representando o relevo de forma exata e assegurando a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada.

A comprovação da exatidão da representação digital da rede de drenagem e dos limites das bacias é efetuada, geralmente, por meio da comparação visual com as informações contidas nas cartas planialtimétricas disponíveis. A comparação com a rede de drenagem mapeada é relativamente fácil, pois é uma feição facilmente observável, enquanto que os limites das bacias precisam ser extraídos a partir da análise de curvas de nível e estão sujeitos a erros de interpolação e interpretação.

Na obtenção das características físicas das bacias e para proceder a análise da distribuição da precipitação e vazão normalmente são necessários mapas em diferentes escalas. Os mapas que permitem obter maior nível de detalhamento estão nas escalas 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000; entretanto, nem todo o território nacional possui cobertura em escalas maiores que 1:250.000. Esses mapas são obtidos junto ao Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (SGE) ou ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Em trabalho de regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, BAENA (2002) trabalhou com cartas topográficas na escala de 1:50.000 para a obtenção dos temas de hidrografia e altimetria visando a geração do MDEHC, utilizando para este intuito, a digitalização das curvas de nível espaçadas de 80 em 80 metros.

Gerando MDEHCs para a bacia Amazônica, CHAVES (2002) trabalhou com cartas topográficas na escala 1:250.000 para obtenção dos temas de hidrografia e altimetria. Neste estudo verificou que, em regiões planas, como é o caso da bacia Amazônica, a geração de um MDEHC com base nessa escala (curvas de nível de 100 em 100 metros) não produziu resultados satisfatórios. Mesmo a implementação e aplicação conjunta de técnicas de pós-processamento do MDEHC mostraram-se insuficientes para geração de um modelo com ausência de depressões espúrias. A utilização de escalas maiores, como 1:100.000 ou 1:50.000, com curvas de nível menos espaçadas tenderia a propiciar resultados mais satisfatórios, principalmente em estudos para áreas menos declivosas.

2.2. Características físicas e climáticas utilizadas na regionalização hidrológica

2.2.1. Características físicas

As características físicas de uma bacia são elementos de grande importância na definição do seu comportamento hidrológico. Para VILLELA e MATTOS (1975), o conhecimento dessas características é de grande utilidade prática pois, ao estabelecer relações e comparações entre elas e os dados hidrológicos conhecidos pode-se determinar indiretamente os fatores hidrológicos em seções ou locais de interesse nos quais faltem dados ou em regiões onde, por causa de fatores de ordem física ou econômica, não seja possível a instalação de estações hidrométricas.

Em estudos de regionalização devem ser consideradas as características físicas e climáticas das bacias que mais explicam a distribuição da vazão e que sejam mais facilmente mensuráveis. Normalmente são usadas como características físicas a área da bacia, o comprimento do curso d'água principal e a densidade de drenagem e, como característica climática, a precipitação. Na definição das características físicas utilizadas no estudo de regionalização deve-se levar em conta que a característica deve ser representativa dos fenômenos que se deseja representar (CARONI et al., 1982; TUCCI et al., 1983).

As características físicas e climáticas nos estudos de regionalização hidrológica devem ser determinadas para a área de drenagem a montante de cada uma das estações fluviométricas existentes na bacia. Geralmente denominadas de bacias de contribuição, estas áreas de drenagem de cada estação podem ter sua delimitação realizada manualmente ou automaticamente, com a utilização de sistemas de informações geográficas.

A área de drenagem é a área plana delimitada pelo divisor de águas, constituindo numa das principais variáveis explicativas na quase totalidade dos estudos de regionalização de vazões, em função da sua influência na potencialidade hídrica da bacia hidrográfica. O processo de individualização da área de uma bacia segue as regras conhecidas em hidrologia, em que o traçado dos contornos é realizado unindo os pontos de máxima cota entre sub-bacias, atravessando o curso d'água somente no ponto de saída. (GARCEZ e ALVAREZ, 1988).

Outra característica física usada na regionalização hidrológica é o comprimento do rio principal da bacia hidrográfica, definido como sendo aquele que drena a maior área no interior da bacia.

A densidade de drenagem é o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água, sejam eles perenes, intermitentes ou efêmeros, e a área total da bacia, conforme a equação:

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A} \quad (1)$$

em que:

L_i = comprimento do segmento i ;

A = área total da bacia; e

N = número total de segmentos da bacia.

Segundo VILLELA e MATTOS (1975), este índice varia de 0,5 km/km² para bacias com drenagem pobre a 3,5 km/km² ou mais para bacias bem drenadas. No entanto, em estudos realizados no Estado de Minas Gerais, utilizando mapas na escala de 1:250.000, este índice variou de 0,36 a 0,50 km/km² nas sub-bacias do rio Verde Grande (EUCLYDES et al., 1994a); de 0,17 a 0,57 km/km² nas sub-bacias do rio Paracatu (EUCLYDES et al., 1997), de 0,45 a 0,46 nas sub-bacias do rio Pardo, de 0,42 a 0,70 km/km² nas sub-bacias do rio Jequitinhonha (EUCLYDES et al., 1994b) e de 0,42 a 0,73 km/km² nas sub-bacias do rio Doce (EUCLYDES et al., 1996).

Em estudo hidrológico na área de drenagem do córrego da Posse, pertencente à bacia do rio Doce, SANTOS (2001) encontrou uma densidade de drenagem de 4,82 km/km². BAENA (2002) encontrou índices variando de 1,96 a 3,44 para a bacia do rio Paraíba do Sul. Ressalta-se, porém, que os referidos autores utilizaram mapas na escala de 1:50.000, demonstrando que este índice varia muito conforme a escala utilizada no estudo.

Deve-se considerar, portanto, que qualquer índice ou medida referente à rede de drenagem está diretamente relacionado à escala do mapa utilizado. Conseqüentemente, uma precisa identificação do mapa fonte e da sua escala é um dado que deve acompanhar os índices de drenagem.

A velocidade do escoamento superficial é controlada, em parte, pela declividade média da bacia, afetando diretamente o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais da rede de drenagem, afetando principalmente os valores de enchentes máximas. A magnitude dos picos de enchente e a maior ou

menor oportunidade de infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia (VILLELA e MATTOS 1975). Em função destes fatos, a declividade média é muitas vezes usada como variável explicativa, principalmente na regionalização de vazões máximas. Com o auxílio do geoprocessamento pode-se automatizar o processo de obtenção da declividade média da bacia quando se possui um modelo digital de elevação do terreno no qual se tem para cada célula ou quadrícula um valor de declividade.

A velocidade de escoamento de um rio depende da declividade dos canais fluviais. Assim, quanto maior a declividade, maior será a velocidade de escoamento e bem mais pronunciados e estreitos serão os hidrogramas das enchentes, sendo, portanto, a declividade média do rio principal (S_{rp}) uma outra importante variável explicativa para o comportamento das vazões máximas.

Um procedimento muito adotado para a obtenção da S_{rp} é por intermédio do conceito de declividade equivalente constante, ou seja, obtém-se uma declividade constante para um curso d'água hipotético, de tal forma que o tempo de percurso da água seria equivalente ao tempo necessário para percorrer o perfil acidentado natural do curso d'água. Partindo da fórmula de Chézy-Manning, que aponta o tempo como uma função do inverso da raiz quadrada da declividade, chega-se à seguinte equação para o cálculo da declividade equivalente constante:

$$S_{rp} = \left(\frac{L}{\sum (l_j \cdot I_j^{-0,5})} \right)^2 \quad (2)$$

em que:

L = comprimento total, em planta, do curso de água; e

l_j e I_j = comprimento e declividade de cada sub-trecho, respectivamente, com $j = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de sub-trechos considerado no cálculo.

Com o auxílio do geoprocessamento pode-se obter rapidamente o comprimento e a declividade de cada sub-trecho necessários para o cálculo da declividade equivalente constante do curso d'água principal de uma bacia.

Também podem ser utilizadas outras características físicas das bacias para serem correlacionadas com as variáveis hidrológicas, devendo-se considerar a representatividade das características dos fenômenos que se deseja estudar como também ser levado em conta que a característica deve ser de fácil medição a partir dos mapas, já que em caso contrário dificultará o uso futuro dos resultados da regionalização.

2.2.2. Características climáticas

A precipitação influencia diretamente o comportamento da vazão de um curso d'água, tanto das vazões extremas (máxima e mínima), quanto da própria vazão média de longo período, sendo uma das principais variáveis explicativas nos estudos de regionalização hidrológica.

A precipitação máxima diária anual, por exemplo, é bastante utilizada como variável explicativa do comportamento das vazões máximas. Já a precipitação total anual é utilizada na regionalização tanto da vazão mínima quanto das vazões médias de longo período.

Em estudo de regionalização de vazões máximas, médias de longo período, mínimas, das curvas de permanência e de regularização para a bacia do rio Paraíba do Sul, BAENA (2002) utilizou para a regionalização de vazões máximas, as seguintes precipitações: máxima diária anual, a do semestre mais chuvoso, a do trimestre mais chuvoso e a do mês mais chuvoso; para vazão média de longo período: a precipitação total anual; para vazões mínimas: a precipitação total anual; a do semestre mais seco e a do trimestre mais seco; para as curvas de permanência e de regularização: a precipitação total anual; a precipitação do semestre mais seco e a precipitação do trimestre mais seco. A precipitação total anual foi a variável climática que melhor explicou o comportamento da vazão mínima.

SILVA et al. (2002a), estudando a regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas para a bacia do rio Paraguaçu, utilizaram para a regionalização de vazões máximas as seguintes precipitações: máxima diária anual; semestre mais chuvoso; trimestre mais chuvoso e mês mais chuvoso; para vazão média de longo período: a precipitação total anual e para vazões mínimas: a precipitação total anual; a do semestre mais seco e do trimestre mais seco. A precipitação total anual foi a variável climática mais expressiva para a representação das vazões mínimas, média de longo período e das vazões correspondentes aos diferentes níveis de permanência.

2.3. Variáveis e funções hidrológicas utilizadas no estudo de regionalização de vazões mínimas de referência

2.3.1. Vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$)

Uma das conseqüências esperadas do regime de variação de vazões de um curso d'água, são as reduções das vazões em determinados períodos, ao ponto de comprometer as diversas formas de utilização, atingindo valores inferiores às necessidades demandadas, caracterizando as chamadas vazões de estiagem. Segundo esta interpretação, as vazões mínimas não são características exclusivas de uma série histórica, mas de uma necessidade para o uso dos recursos hídricos.

Segundo TUCCI (2002), o conhecimento da vazão mínima e de sua distribuição temporal e espacial assume papel importante no planejamento regional em setores como geração de energia elétrica e navegação, bem como em projetos setoriais de abastecimento, regularização artificial, outorga de uso da água, qualidade de água, estudos de autodepuração, na diluição de efluentes em corpos d'água, entre outros. As vazões mínimas que ocorrem em época de estiagem são utilizadas nestes estudos dentro de uma das seguintes finalidades: análise, projeto, previsão ou estimativa, regulamentação legal, operação e planejamento.

A vazão mínima é caracterizada por dois fatores: a sua magnitude e a sua duração. Na prática, pouca utilidade tem a vazão mínima instantânea que deve ser muito próxima da vazão mínima diária. Normalmente, durações maiores, como sete ou 30 dias, apresentam maior interesse ao usuário, já que a seqüência de vazões baixas é que representa uma situação crítica para a demanda ou para as condições de conservação ambiental. A vazão mínima com sete dias de duração é utilizada, com freqüência, como indicador da disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água. A principal vantagem do uso deste valor reside no fato de não sofrer tanta influência de erros operacionais e de intervenções humanas no curso d'água, e de ser mais minuciosa que a vazão mínima mensal (TUCCI, 2002).

A vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$) é normalmente utilizada em estudos relacionados à qualidade da água em rios tanto nos Estados Unidos como no Brasil (SILVA e NOVO, 1988).

Em certos tipos de aproveitamentos a prática da engenharia já fixou critérios de projeto para o período de retorno e para a duração, como, por exemplo, para a irrigação, onde também se usa a duração de sete dias com período de retorno de dez anos (WILKEN, 1978).

Em alguns estados do Brasil a legislação relativa à outorga para utilização dos recursos hídricos superficiais em cursos d'água estabelece uma porcentagem da ($Q_{7,10}$) como vazão residual mínima a ser mantida a jusante das derivações. O Estado de Goiás, por exemplo, estabelece que o limite máximo das derivações consuntivas a serem outorgadas em cada seção da bacia hidrográfica considerada é de 10% da $Q_{7,10}$, enquanto Minas Gerais estabelece como limite máximo 30% da $Q_{7,10}$ e São Paulo 50% da $Q_{7,10}$ (GARRIDO, 2003).

2.3.2. Curva de permanência

Nem sempre o interesse do usuário de água está voltado para o conhecimento das vazões médias, máximas e 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 numa determinada seção do curso d'água. A resposta para esta questão é obtida por intermédio da determinação da curva de permanência para uma seção específica do curso d'água, pois para cada vazão possível de ocorrência na seção associa-se a frequência (ou número de vezes) com que ela é excedida. A curva de permanência indica a porcentagem de tempo em que um determinado valor de vazão foi igualado ou ultrapassado durante um período de observações. Ela permite visualizar, de imediato, a potencialidade natural do curso d'água, destacando-se a vazão mínima e o grau de permanência para qualquer valor da vazão (TUCCI, 2002).

As curvas de permanência, além dos resultados diretos que fornecem para o estudo do aproveitamento das disponibilidades do curso d'água, constituem um instrumento valioso de comparação entre bacias hidrográficas, representando os efeitos do relevo, da vegetação e uso do solo e da precipitação, na distribuição das vazões (EUCLYDES et al., 2001b).

Da curva de permanência são obtidas as vazões associadas às permanências de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}), muito utilizadas como vazões mínimas de referência para outorga de uso da água. Em alguns estados do Brasil a legislação relativa à outorga estabelece uma porcentagem da Q_{90} ou Q_{95} como referência para a concessão de outorga. A União, por exemplo, adota 70% da Q_{95} , enquanto o Distrito Federal, a Bahia e Pernambuco adotam 80% da Q_{90} como limites máximos das derivações a serem outorgadas (GARRIDO, 2003).

2.4. Regionalização hidrológica

Após a delimitação da área em estudo, a definição das variáveis dependentes e independentes a serem usadas nos modelos de regressão e a seleção das séries históricas a serem usadas na regionalização, segundo a metodologia proposta pela ELETROBRÁS (1985), as etapas seguintes consistem na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, no ajuste de distribuições probabilísticas aos eventos extremos e na aplicação das equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem.

2.4.1. Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

As regiões que subdividem uma área maior são escolhidas, teoricamente, com base na homogeneidade das características hidrológicas. Na prática, a homogeneidade na regionalização é traduzida por um alto coeficiente de determinação, obtido da aplicação da regressão múltipla das vazões com as características físicas e climáticas das sub-bacias.

No desenvolvimento de um estudo de regionalização a delimitação de regiões hidrológica ou estatisticamente homogêneas (regiões com várias estações que tenham séries oriundas de populações regidas pela mesma distribuição de probabilidades, com os parâmetros variando entre as estações) é uma fase considerada primordial para o alcance dos objetivos esperados.

Regiões hidrologicamente homogêneas habitualmente não se estendem por grandes áreas, devido à variabilidade do clima, da topografia, da cobertura vegetal e do tipo de solo. Por outro lado, a delimitação de áreas excessivamente reduzidas resulta numa carência de dados que prejudica a confiabilidade das estimativas.

A identificação de regiões homogêneas deve ser feita em duas etapas consecutivas: a primeira, consistindo de uma delimitação preliminar baseada unicamente nas características locais, e a segunda consistindo de um teste estatístico construído com base somente nas estatísticas locais, cujo objetivo é o de verificar os resultados preliminares obtidos (HOSKING e WALLIS, 1997).

Normalmente são utilizados dois critérios estatísticos para identificação das regiões homogêneas:

a) Critério baseado na análise da distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas de cada estação.

O princípio em que se baseia este critério é que as distribuições de frequências das vazões mínimas das estações em uma região hidrologicamente homogênea seguem uma mesma tendência, sendo as diferenças proporcionais à média das séries de vazões consideradas. Essa característica permite que, ao se obter séries transformadas de vazões, através da divisão dos seus valores pelas respectivas médias, as distribuições de frequências dessas séries transformadas sejam idênticas.

O gráfico formado pelos pontos representativos dos valores de vazões, anotados em papel probabilístico adequado, é o de uma linha reta, sendo ajustada uma equação da reta do tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ às vazões adimensionalizadas de cada estação. As estações que apresentarem valores do coeficiente de regressão “ β_1 ” próximos são consideradas, para efeito do estudo, como pertencentes a uma região homogênea do ponto de vista hidrológico.

b) Critério baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla.

Neste critério são estabelecidas regressões múltiplas entre as séries de vazões mínimas e as diferentes características físicas e climáticas das bacias, com base na seguinte função:

$$Q = F(A, L, D_d, S_m, S_{rp}, P) \quad (3)$$

em que:

A = área de drenagem;

L = comprimento do rio principal;

D_d = densidade de drenagem;

S_m = declividade média da bacia;

S_{rp} = declividade média do rio principal; e

P = precipitação média da bacia.

As regiões hidrologicamente homogêneas são definidas em função da distribuição geográfica das estações e da combinação de estações que apresentar o melhor ajuste, avaliado por intermédio do teste da função F, do coeficiente de determinação ajustado, do desvio padrão dos erros do ajustamento, também chamado de erro padrão da estimativa e dos erros percentuais (%dr) entre os valores das vazões observados e estimados pelos modelos de regressão obtidos para cada uma das regiões homogêneas.

Quando os dois critérios apresentarem bons resultados, a região é definida como hidrológicamente homogênea para as vazões estudadas. Entretanto, nos casos em que isso não ocorrer, há a necessidade de subdividir a região ou reorganizar as estações dentro das regiões e reiniciar o processo.

Estudando regionalização de vazões máxima, mínima e média de longo período para a bacia do rio Paraguaçu, SILVA et al. (2002a) subdividiram-na em três diferentes regiões hidrológicamente homogêneas com dez, oito e nove estações fluviométricas e áreas de drenagem de 12.066,13; 19.626,63 e 33.940,19 km², respectivamente. SILVA et al. (2002b), em estudo semelhante para a bacia do rio de Contas, encontraram duas regiões homogêneas, com áreas de drenagem de 21.498,89 e 32.610,67 km², cada uma contendo sete e seis estações fluviométricas, respectivamente.

2.4.2. Distribuições de probabilidade aplicadas a eventos extremos

As séries históricas de vazões máximas e mínimas, em um estudo de regionalização hidrológica, devem ser submetidas à análise estatística, para identificação do modelo probabilístico que melhor se ajusta aos dados.

Os dados de eventos extremos apresentam um padrão peculiar de distribuição e as funções probabilísticas acumuladas possuem formas bem caracterizadas. É comum o emprego destas expressões matemáticas na forma parametrizada em relação à média, variância, coeficiente de assimetria e outros momentos estatísticos da distribuição. A utilização destas expressões matemáticas facilita a análise estatística dos eventos extremos, já que a determinação da respectiva função pode ser feita a partir de elementos amostrais, com o uso de processos tradicionais, como os métodos dos momentos, dos mínimos quadrados ou da máxima verossimilhança (HIDROSSISTEMAS, 1993) ou pelo método dos momentos-L (HOSKING e WALLIS, 1997).

As distribuições de probabilidade de dois e três parâmetros mais indicadas e utilizadas, segundo PINHEIRO e NAGHETTINI (1998), nos eventos de valores extremos são as do Tipo I – Gumbel, Tipo II – Fréchet e Tipo III – Weibull, além de outros modelos não-extremos como a distribuição Log-Normal, Pearson Tipo III e Log-Pearson Tipo III, e também distribuições de quatro parâmetros como a Kappa ou de cinco parâmetros, como as distribuições Wakeby e Boughton.

A seleção da distribuição de probabilidade a ser adotada é comumente baseada em resultados de testes de aderência, já que, a priori, não se pode definir a melhor distribuição de probabilidade para descrever a frequência de ocorrência de vazões extremas. Dispõe-se de vários testes para julgar se uma distribuição teórica de probabilidades descreve adequadamente uma série de observações. Entre os mais utilizados citam-se os descritos a seguir.

- **Teste de Kolmogorov-Smirnov**

O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) pressupõe que se duas sub-amostras são de uma mesma população, então as distribuições de probabilidades acumuladas das duas sub-amostras devem estar muito próximas. Se duas distribuições acumuladas são "muito discrepantes" em determinado ponto, então as sub-amostras podem ser de populações diferentes. Assim, um grande desvio é uma indicação para rejeitar-se a hipótese H_0 (de serem da mesma população).

- **Teste do Qui-quadrado (χ^2)**

O teste do χ^2 é aplicado para verificar o ajustamento de uma distribuição de probabilidade específica, conhecida, a uma amostra de dados de uma distribuição desconhecida.

No teste do χ^2 , a hipótese de nulidade admite que a distribuição seja a especificada (Gama, Weibull, etc...) com os seus parâmetros estimados com base nos dados amostrais.

A hipótese de nulidade é testada fazendo-se a comparação entre as frequências observadas e as frequências teóricas, em cada classe de frequência da amostra, com a variável aleatória χ^2 dada por

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{(F_{oi} - F_{ei})^2}{F_{ei}} \right) \quad (4)$$

em que:

k = número de classes;

F_{oi} = frequência observada; e

F_{ei} = frequência esperada.

Se $P \geq \alpha$ (nível de significância), aceita-se a hipótese de que não há diferença estatística entre as frequências observadas e as frequências teóricas.

Esta variável χ^2 tem uma distribuição com um único parâmetro, o grau de liberdade (GL), dado por

$$GL = k - p - 1 \quad (5)$$

em que:

k = número de classes; e

p = número de parâmetros da distribuição sob teste

A hipótese posta em prática é que $\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha, k-p-1}$

em que:

$\chi^2_{1-\alpha, k-p-1}$ = distribuição de χ^2 com (k-p-1) graus de liberdade e (α) nível de significância estabelecido.

Para uso deste teste é feita uma restrição: que sejam reunidas em uma única classe as classes com frequência esperada F_{ei} baixas, ou seja, menores do que seis ou cinco.

HAAN (1977) recomenda a combinação dos intervalos de forma que o número esperado de cada classe não seja inferior a cinco ou que os intervalos sejam divididos de maneira desigual, de modo que o número esperado de observações seja o mesmo em qualquer classe.

Pode-se perceber intuitivamente que, quanto maior o valor de χ^2 , maior será a probabilidade de as frequências observadas não serem provenientes da população teórica, admitida a priori.

Valores de χ^2 além do valor crítico, com graus de liberdade e nível de significância especificado, levam à rejeição da hipótese de nulidade. Porém, se χ^2 for pequeno, ou seja, menor do que o valor crítico, é porque existe concordância entre as frequências observadas e esperadas, e a amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade testada.

Quando $\chi^2 = 0$ as frequências esperadas e observadas concordam plenamente. Mas isso raramente acontece. Se acontecer deve ser encarado com suspeita.

- **Teste Visual**

A avaliação gráfica da adequabilidade de uma distribuição ajustada a uma série de dados amostrais pode ser realizada pela observação de plotagem, tal que os pontos amostrais caiam aproximadamente numa linha reta, se a distribuição postulada for a verdadeira e aquela cujas observações foram extraídas.

Isso pode ser feito por meio de papeis especiais de probabilidade, disponíveis para algumas distribuições. Esse teste possui um alto grau de subjetividade, já que não é utilizado nenhum critério preciso para concluir se a concavidade da curva, relativa à função de distribuição acumulada na cauda superior está bem ajustada. Porém, de acordo com NAGHETTINI (1994), a simplicidade e o procedimento intuitivo permitido pelo teste justificam o uso do mesmo como um complemento para outros testes mais elaborados.

2.4.3. Equações de regressão entre as diferentes variáveis regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem

Em estudos de regionalização de vazões, após a obtenção das vazões máximas e mínimas associadas aos diferentes períodos de retorno, aplica-se então a regressão múltipla entre as variáveis dependentes (vazões) e as diferentes variáveis explicativas (características físicas e de precipitação) (SILVA et al., 2002b).

Na regionalização hidrológica realizada pela ELETROBRÁS (1985), envolvendo vazões máxima, média de longo período e mínima para a região do Alto Paraguai, as variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem da bacia, a declividade média e o comprimento do curso d'água principal, a densidade de drenagem, a precipitação média anual e a precipitação média do semestre mais chuvoso. Os resultados mostraram que as variáveis que melhor explicaram a variação, tanto da vazão de cheia quanto da vazão média de longo período, foram a precipitação e a área da bacia. Para vazões mínimas com duração de sete dias, as variáveis selecionadas foram a área, a precipitação média anual e a densidade de drenagem.

Na regionalização de vazões máxima, mínima e média de longo período para as sub-bacias dos rios Verde Grande, Pardo e Jequitáí, EUCLYDES et al. (1994a) verificaram que a variável que melhor explicou a variação da vazão máxima para os períodos de retorno estudados foi a área de drenagem da bacia. As variáveis

que melhor explicaram a variação da vazão mínima foram a densidade de drenagem e o comprimento do curso d'água principal. Já para a vazão média de longo período foi utilizada apenas a área de drenagem da bacia.

Em estudo de regionalização de vazões máxima, mínima e média de longo período e das curvas de permanência e de regularização para a bacia do rio Paraguaçu, SILVA et al. (2002a) verificaram que as variáveis que melhor explicaram a variação da vazão máxima para os períodos de retorno estudados foram a área de drenagem da bacia e o comprimento do curso d'água principal. Já para as vazões mínimas com sete dias de duração e período de retorno de dez anos as variáveis utilizadas foram a área de drenagem e a precipitação total anual. A variável que melhor explicou a variação da vazão média de longo período foi também a área de drenagem da bacia, juntamente com o comprimento do curso d'água principal. Já o comportamento das vazões associadas aos diferentes níveis de permanência foi melhor explicado pela área de drenagem e precipitação total anual, enquanto que a densidade de drenagem se mostrou uma variável expressiva na regionalização das diferentes vazões regularizadas.

BAENA (2002), em estudo semelhante para a bacia do rio Paraíba do Sul, verificou que a área de drenagem, associada ao comprimento do rio principal ou a declividade média da bacia, caracterizou-se como a variável mais expressiva para a representação da vazão máxima. A área de drenagem e o comprimento do rio principal foram as variáveis que melhor representaram a vazão mínima. Para a vazão média de longo período a área de drenagem foi a variável mais representativa acompanhada do comprimento do rio principal e, ou, da precipitação total anual. A área e a densidade de drenagem foram as variáveis mais expressivas para a representação da vazão em todos os níveis de permanência regionalizados. Também a área de drenagem foi a variável que melhor explicou o comportamento das diferentes vazões regularizadas, sendo acompanhada do comprimento do curso d'água principal e da precipitação total anual.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da sub-bacia em estudo

A sub-bacia do Rio Paranã, a montante da estação fluviométrica Paranã (sub-bacia 21 segundo a codificação da Agência Nacional de Águas - ANA), drena as águas de uma área de aproximadamente 60.000 km², sendo 32.640 km² no Estado de Goiás e os 27.360 km² restantes no Estado do Tocantins, ocupando menos de 10% da área da bacia dos rios Tocantins e Araguaia. Situada entre os paralelos 11° 38' e 15° 43'S e os meridianos 46° 03' e 48° 59'W, encontra-se subdividida com metade na região Centro Oeste e a outra metade na região Norte (Figura 1).

O rio Paranã nasce no Planalto Central Brasileiro, na serra do Paranã, no Estado de Goiás, a uma altitude de aproximadamente 1.000m, apresentando sentido de escoamento de Sul para Norte, percorrendo cerca de 465 km até a divisa com o Estado do Tocantins. Daí continua seu trajeto por mais 180 km até a foz com o rio Maranhão, dando origem ao rio Tocantins a uma altitude de 300 m, logo após o município de Paranã. Tem como principais afluentes da margem direita os rios Palma, Palmeiras, Mosquito, Bezerra, Atalaia, São Domingos, São Vicente, São Mateus, Corrente, Santa Maria, Macacos, Cana Brava e Paraim, e da margem esquerda os rios Corrente, Prata, das Almas, das Pedras, São Bartolomeu e Macacão (Figura 2).

O relevo da região em estudo é classificado como Planalto de Goiás, associado em menor escala à Depressão do Tocantins, caracterizado por terrenos

levemente acidentados com altitudes superiores a 200 m, em que os processos de erosão superam os de sedimentação (ROSS, 1995).

Com relação à geologia, a região em estudo estrutura-se essencialmente sobre rochas da era arqueozóica e proterozóica, classificadas como do Núcleo Goiano (SENE e MOREIRA, 1998).

A vegetação nativa da região é constituída predominantemente pelo cerrado segundo AB`SÁBER (1997), que é uma vegetação caracterizada por gramíneas, arbustos e árvores de médio porte com troncos e galhos retorcidos e folhas espessas e coriáceas.

Quanto ao clima, a sub-bacia insere-se totalmente na zona de clima tropical alternadamente úmido e seco identificado nos períodos chuvoso e seco, respectivamente, segundo SENE e MOREIRA (1998), com temperatura média anual de 26° C. O período chuvoso ocorre entre os meses de outubro a março e a estiagem de abril a setembro. As precipitações crescem do Sul para o Norte, sendo que a média anual é em torno 1.400 mm. A evapotranspiração real média é da ordem 1.250 mm/ano (ANA, 2003).

O grande potencial hidrelétrico da região e a sua localização estratégica frente aos mercados consumidores da região Nordeste colocam-na como prioritária para o investimento nesse setor.

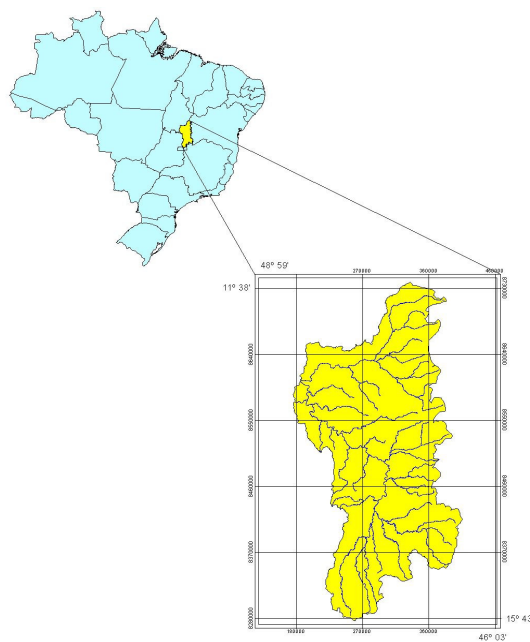


Figura 1 – Localização da sub-bacia do rio Paranã.

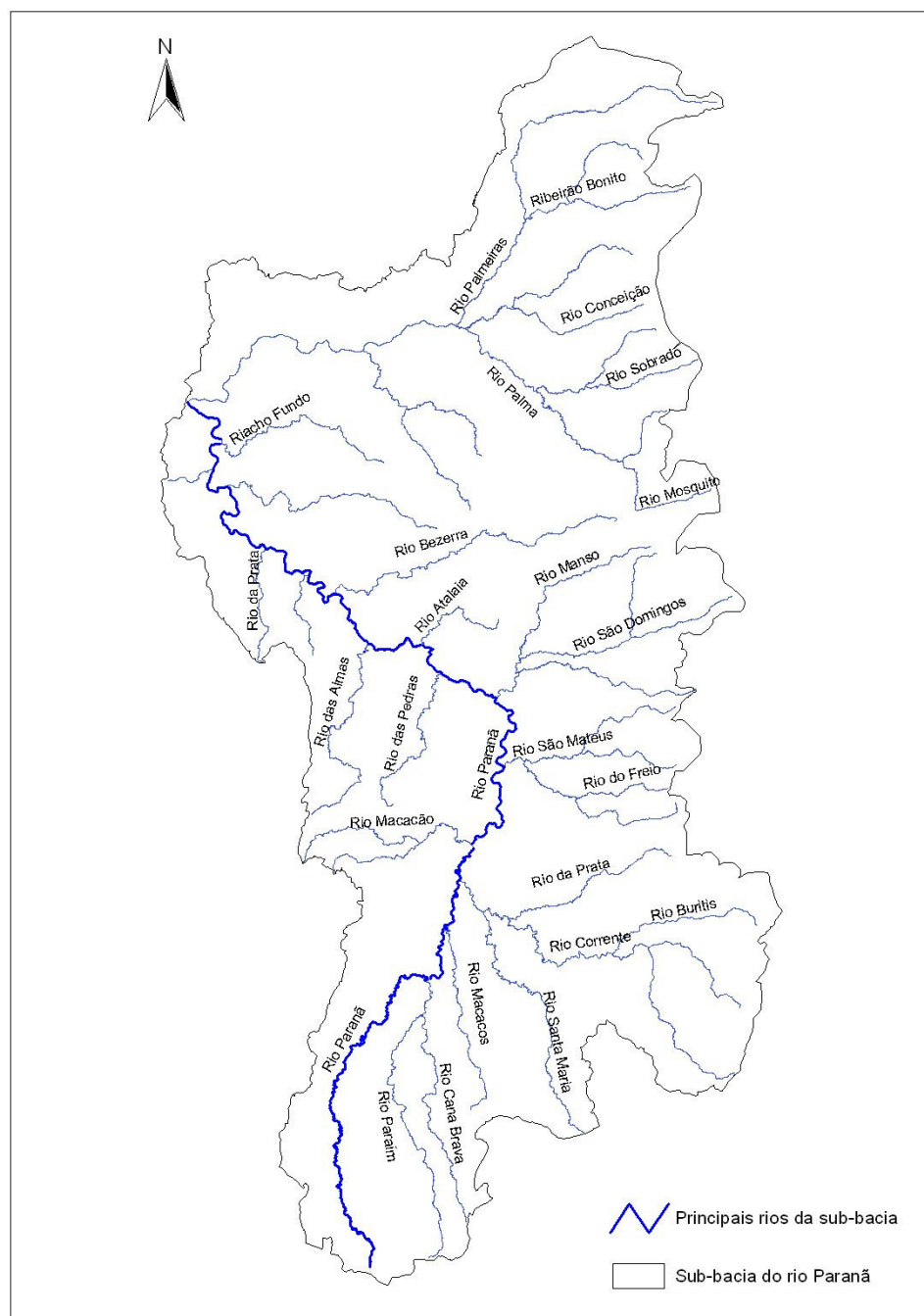


Figura 2 – Hidrografia da sub-bacia do rio Paranã.

3.2. Geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente

A obtenção do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) seguiu a metodologia descrita a seguir:

3.2.1. Amostragem

Foram confeccionados 13 mapas digitais a partir da base de dados do IBGE e do Ministério do Exército - DSG, na escala 1: 250.000 (Quadro 2).

Foram digitalizadas as curvas de nível (Figura 3), a hidrografia (Figura 4) e o contorno, utilizando-se mesa digitalizadora e o software Cartalinx. As curvas de nível foram digitalizadas com espaçamento de 100 metros. A hidrografia foi digitalizada de montante para jusante, sempre acompanhando o sentido do escoamento dos cursos d'água.

Após a digitalização de todas as cartas, os arquivos individuais obtidos para as curvas de nível, a hidrografia e o contorno foram unidos em um único arquivo, para cada tema individualizado, no software Cartalinx. A partir daí foi feita a exportação dos arquivos para o software ArcView, no formato Shape.

Quadro 1 - Identificação das cartas geográficas na escala 1:250.000 utilizadas no estudo de regionalização

Mapa Índice	Carta	Editora	UF
SC-22-Z-D	Gurupi	DSG	TO
SD-22-X-B	Peixe	IBGE	TO
SD-22-X-D	Porangatu	IBGE	GO/TO
SC-23-Y-C	Dianópolis	DSG	TO
SD-23-V-A	Arraias	IBGE	TO
SD-23-V-C	Campos Belos	IBGE	GO/TO
SD-23-Y-A	Iaciara	IBGE	GO
SD-23-Y-C	Brasília	DSG	GO/DF/MG
SC-23-Y-D	Formosa R. Preto	IBGE	TO/BA
SD-23-V-B	Barreiras	IBGE	TO/BA
SD-23-V-D	São Domingos	IBGE	GO/BA
SD-23-Y-B	Posse	IBGE	GO/BA
SD-23-Y-D	Buritit	IBGE	GO/MG

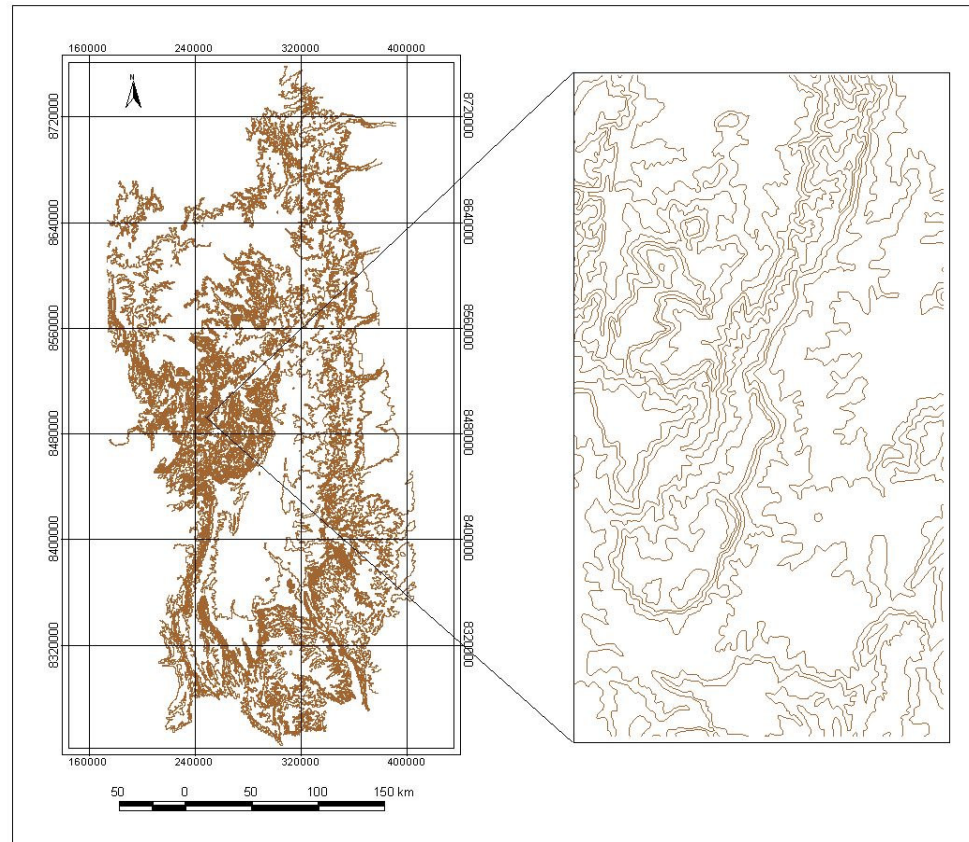


Figura 3 - Curvas de nível digitalizadas da sub-bacia em estudo.

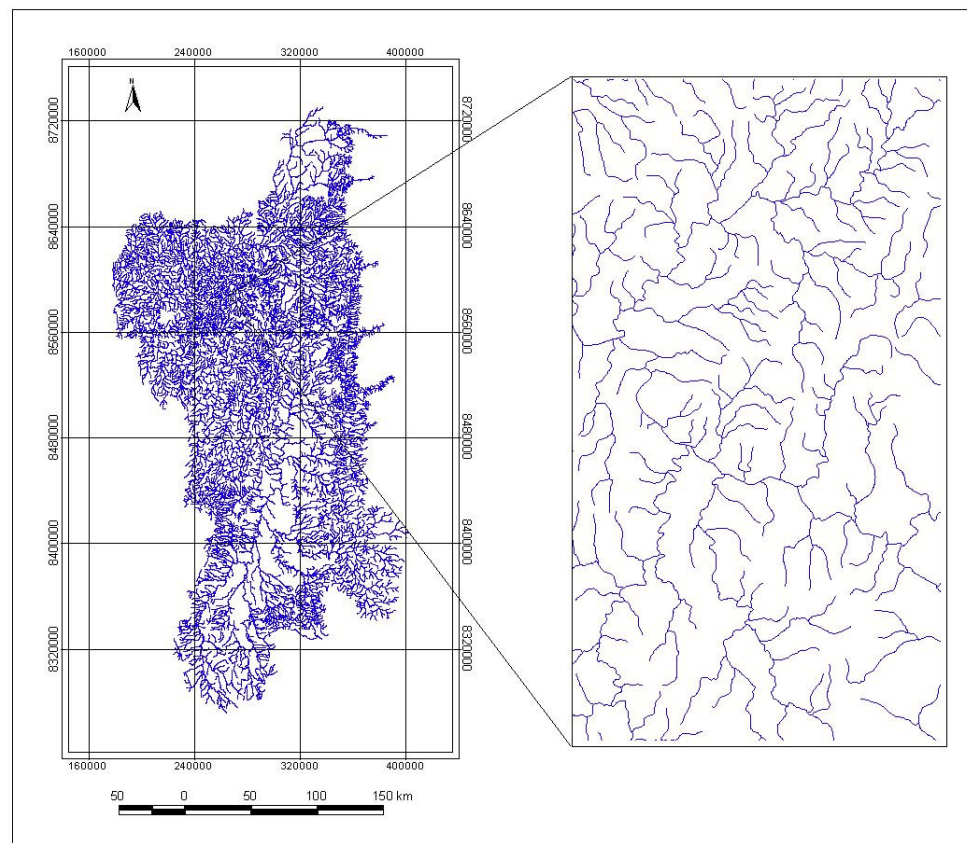


Figura 4 - Hidrografia digitalizada da sub-bacia em estudo.

3.2.2. Pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem

Foram gerados arquivos individuais contendo os limites da área de trabalho, a hidrografia digital conectada e orientada no sentido do escoamento superficial, o contorno dos lagos e os dados de altimetria discriminados em curvas de nível e pontos cotados.

As curvas de nível, devido à presença de inconsistências decorrentes do processo de aquisição em mesa digitalizadora, foram visualmente ajustadas à hidrografia orientada. Já a hidrografia foi processada e verificada de forma que se obtivesse a orientação de todas as feições para o sentido do escoamento, além de se certificar que todas essas feições estivessem conectadas, utilizando o software ArcView.

3.2.3. Geração do modelo digital de elevação (MDE)

O MDE foi gerado a partir da interpolação das curvas de nível digitalizadas, utilizando o procedimento de interpolação do TOPOGRID, disponível no software ArcInfo. Este algoritmo permite a incorporação da rede de drenagem digital real, extraída das bases cartográficas, durante o processo de geração do MDE. Sempre que houve a violação das condições de altimetria favoráveis ao escoamento, o traçado da hidrografia mapeada foi respeitado. Com isso, garantiu-se a coincidência espacial da drenagem mapeada com as células de menor altitude do modelo, configurando, assim, a criação de um MDEHC.

Este método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas e é otimizado para ter a eficiência computacional dos interpoladores locais sem perder a continuidade da superfície proporcionada pelos interpoladores globais (ESRI, 1997), gerando uma grade regular a partir de pontos, isolinhas e linhas de drenagem.

A resolução utilizada no estudo foi de 50 x 50 m, tendo em vista que as curvas de nível foram digitalizadas com distância de 100 m entre si, e com essa resolução atenderia o preconizado por GARBRECHT e MARTZ (1999), que afirmam que a mesma deve ser menor ou igual à menor distância entre duas curvas de nível com cotas diferentes, como forma de assegurar a qualidade e a resolução do MDE.

3.2.4. Pós-processamento para geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC)

Esta etapa visou eliminar as depressões espúrias, ou seja, células cercadas por outras com maiores valores de elevação, remanescentes ou que foram introduzidas no MDE durante o processo de imposição da rede de drenagem. Com a eliminação dessas depressões garantiu-se a consistência do escoamento superficial ao longo da rede de drenagem gerada pelo modelo. Buscou-se também garantir a coincidência espacial da drenagem gerada pelo modelo com a drenagem vetorial digitalizada das bases cartográficas. Para isso utilizou-se o comando FILL, do ArcView.

Os dados necessários para esse pós-processamento foram o MDE, gerado pelo TOPOGRID, e a hidrografia mapeada, conectada e orientada no sentido do escoamento.

A aplicação desta técnica não garante que o modelo digital de elevação passe a ser considerado hidrologicamente consistente, já que novas depressões espúrias podem ser geradas. Por isso, passou-se para a etapa de validação do modelo gerado efetuando-se a eliminação dos erros existentes até obter o resultado desejado.

3.2.5. Validação do MDEHC

Todo modelo digital de elevação, seja ele hidrologicamente consistente ou não, deve ser avaliado para certificar-se de que os dados, o próprio método e seus parâmetros sejam capazes de gerar uma representação real da paisagem. Essa representação é limitada pela qualidade e quantidade dos dados altimétricos e pela eficiência dos interpoladores.

Um MDEHC, além da representação real da paisagem, deve também descrever, com exatidão, o caminho do escoamento superficial. Essa verificação foi realizada analisando-se o trajeto de escoamento superficial ao longo do modelo e por intermédio da comparação visual da drenagem numérica matricial gerada pelo modelo com a drenagem vetorial digitalizada. A coincidência espacial dessas duas feições é um parâmetro qualitativo de verificação da consistência hidrológica do modelo, pelo menos no que diz respeito à representação espacial da drenagem. Uma outra forma de verificação adotada foi a delimitação automática de bacias hidrográficas de contribuição a montante de pontos escolhidos de forma aleatória. Neste caso verificou-se a existência de possíveis erros, como cortes na hidrografia,

localização errada de divisores de água etc. Estes foram os dois métodos utilizados para a validação do MDEHC gerado no presente trabalho, permitindo a identificação de dois tipos de erros:

- existência de depressões que não ocorrem na realidade e que alteram a direção do escoamento (depressões espúrias); e
- desvios dos canais de drenagem e dos limites das bacias identificadas pelo modelo em relação aos observados nas cartas topográficas.

Estes erros foram editados no próprio software ArcInfo e os procedimentos anteriormente citados foram repetidos até que se obtivesse um modelo hidrologicamente consistente, ou seja, sem depressões e desvios da rede de drenagem.

3.3. Seleção e análise dos dados básicos

Para a realização do estudo foram utilizados dados fluviométricos e pluviométricos pertencentes à rede da Agência Nacional de Águas (ANA). Levantamento preliminar feito com base no inventário de estações fluviométricas (ANEEL, 2001a) e pluviométricas (ANEEL, 2001b) mostraram a existência de 12 estações fluviométricas e 29 estações pluviométricas disponíveis para a realização do estudo, respectivamente.

Após a obtenção dos dados elaborou-se um diagrama de barras para as estações fluviométricas (Quadro 2) e pluviométricas (Quadro 3), objetivando a caracterização dos períodos de dados disponíveis para todas as estações, de forma a facilitar a escolha do período-base e das estações a serem efetivamente utilizadas no estudo de regionalização. Foram incluídas nos diagramas de barras apenas as estações que possuíam um período de dados superior a oito anos.

Com base nas coordenadas geográficas de cada uma das estações fluviométricas e pluviométricas elaborou-se um mapa com a localização das estações (Figuras 5 e 6, respectivamente), utilizando o software ArcView 3.2a, para a verificação da distribuição das mesmas dentro da área em estudo.

De posse do diagrama de barras e do mapa de localização das estações fluvio-pluviométricas procedeu-se a análise das estações quanto à localização em relação ao sistema fluvial, período de operação e qualidade das observações, visando a identificação do período-base (período comum de observações) a ser usado na regionalização, tendo sido escolhido o período compreendido entre 1975 e 2001 (27 anos).

Quadro 2 - Diagrama de barras para as estações fluviométricas da sub-bacia do rio Paranã e identificação do período base

Código das estações	Início da Série	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01
21220000	1970																															
21300000																																
21500000																																
21510000																																
21560000																																
21580000	1969																															
21600000																																
21650000																																
21750000																																
21850000																																
21890000																																
21900000																																
												Período - base																				

* Branco representam falhas (ausência de dados) na série histórica.

Quadro 3 - Diagrama de barras para as estações pluviométricas da sub-bacia do rio Paranã e identificação do período base.

Código das estações	Início da Série	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01
01145013																																
01146000																																
01147001																																
01147003																																
01245015																																
01246000																																
01246001																																
01247002																																
01247005																																
01248001																																
01346000	1969																															
01346001	1969																															
01346002	1969																															
01346003	1969																															
01346004																																
01346005																																
01346006																																
01347000	1969																															
01347001	1969																															
01348003																																
01446001	1969																															
01446004																																
01447000	1969																															
01447001	1969																															
01447002																																
01546001																																
01546005																																
01547001	1969																															
01547002																																

Período - base

* Branco representam falhas (ausência de dados) na série histórica.

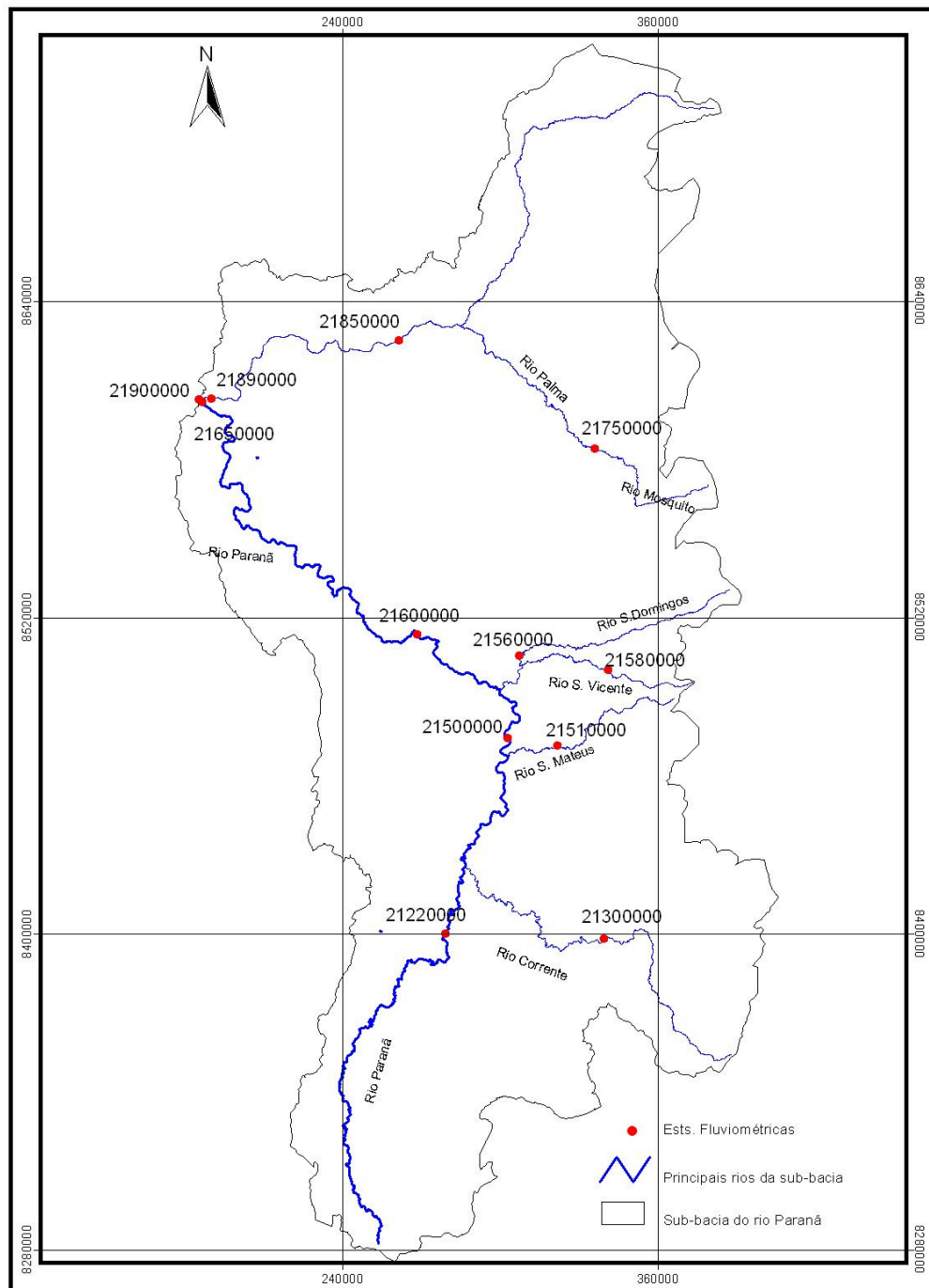


Figura 5 - Mapa de localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

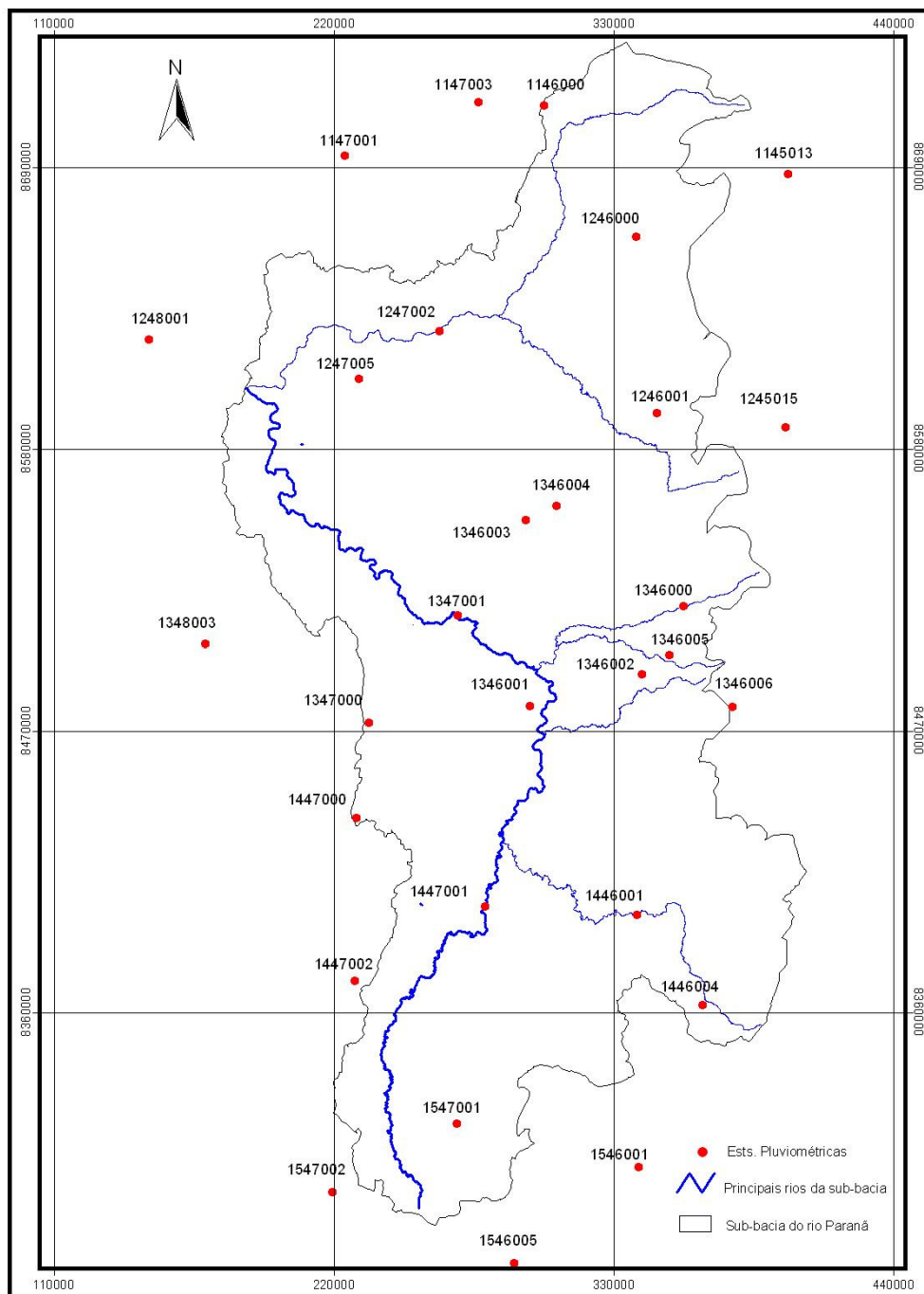


Figura 6 - Mapa de localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo.

Nos Quadros 4 e 5 são apresentados, respectivamente, informações sobre as estações fluviométricas e pluviométricas localizadas no interior da sub-bacia do rio Paranã utilizadas no estudo de regionalização.

No caso dos dados pluviométricos também foram consideradas algumas estações localizadas fora da área de abrangência da sub-bacia do rio Paranã visando aumentar a precisão na estimativa da precipitação média na área de drenagem das diferentes estações fluviométricas usadas no estudo (Quadro 6).

Quadro 4 - Identificação das estações fluviométricas localizadas na sub-bacia do rio Paranã, selecionadas para a realização da regionalização

Código	Estação	Curso d'água	Entidade	Latitude	Longitude
21220000	Flores de Goiás	Paraná	ANA	-14°27'03''	-47°02'50''
21300000	Alvorada do Norte	Corrente	ANA	-14°28'37''	-46°29'26''
21500000	Nova Roma	Paraná	ANA	-13°45'45''	-46°50'13''
21510000	Pte. São Mateus	S. Mateus	ANA	-13°48'35''	-46°38'58''
21560000	Fazenda Veneza	S. Domingos	ANA	-13°29'55''	-46°46'49''
21580000	São Vicente	S. Vicente	ANA	-13°33'05''	-46°28'10''
21600000	Pte. Paranã	Paraná	ANA	-13°25'31''	-47°08'21''
21650000	Mont. Barra do Palma	Paraná	ANA	-12°37'16''	-47°53'10''
21750000	Lavandeira	Palma	ANA	-12°47'35''	-46°30'42''
21850000	Rio da Palma	Palma	ANA	-12°24'57''	-47°11'44''
21890000	Barra do Palma	Palma	ANA	-13°36'12''	-47°51'41''
21900000	Paraná	Paraná	ANA	-12°36'49''	-47°53'40''

Quadro 5 - Identificação das estações pluviométricas localizadas na sub-bacia do rio Paranã, selecionadas para a realização da regionalização

Código	Estação	Entidade	Altitude(m)	Latitude	Longitude
01146000	Dianópolis	ANA	713	-11°37'33''	-46°48'37''
01246000	Pte. Alta Bom Jesus	ANA	600	-12°05'30''	-46°28'48''
01246001	Aurora do Norte	ANA	700	-12°42'47''	-46°24'30''
01247002	Rio da Palma	ANA	400	-12°25'12''	-47°11'30''
01247005	Fazenda Sta Rita	ANA	-	-12°35'07''	-47°29'12''
01346000	S. Domingos	ANA	-	-13°23'51''	-46°19'00''
01346001	Nova Roma	ANA	-	-13°44'33''	-46°52'38''
01346002	Fazenda Ingazeiro	ANA	-	-13°34'05''	-46°22'02''
01346003	Monte Alegre	ANA	-	-13°05'24''	-46°53'12''
01346004	Campos Belos	ANA	600	-13°02'20''	-46°46'27''
01346005	São Vicente	ANA	-	-13°38'01''	-46°28'02''
01346006	Fazenda Planalto	ANA	947	-13°45'07''	-46°08'24''
01347000	Cavalcante	ANA	-	-13°47'48''	-47°27'42''
01347001	Ponte Paranã	ANA	-	-13°25'28''	-47°08'10''
01446001	Alvorada do Norte	ANA	-	-14°29'00''	-46°29'30''
01446004	Sítio D'Abadia	ANA	-	-14°48'14''	-46°15'12''
01447000	Alta Paraíso	ANA	-	-14°08'04''	-47°30'43''
01447001	Flores de Goiás	ANA	200	-14°27'00''	-47°02'45''
01547001	Fazenda Sta Fé	ANA	-	-15°12'58''	-47°09'25''

Quadro 6 - Identificação das estações pluviométricas selecionadas fora da área de abrangência da sub-bacia do rio Paranã, utilizadas na regionalização

Código	Estação	Entidade	Altitude(m)	Latitude	Longitude
01145013	Pte. Serafim-Mont.	ANA	700	-11°53'46''	- 45°36'43''
01147001	Natividade	ANA	272	-11°41'49''	- 47°43'43''
01147003	Porto Alegre	ANA	-	-11°36'45''	- 47°02'42''
01245015	Roda Velha	ANA	761	- 2°45'55''	- 45°56'38''
01248001	Colonha	ANA	-	- 2°23'29''	- 48°42'41''
01348003	Trombas	ANA	450	- 3°30'42''	- 48°44'42''
01447002	São João D' Aliança	ANA	-	-14°42'26''	- 47°31'25''
01546001	Buritis-Jusante	ANA	-	- 5°36'57''	- 46°24'54''
01546005	Cabeceiras	ANA	900	- 5°48'03''	- 46°55'29''
01547002	Planaltina	ANA	1000	- 5°27'12''	- 47°36'48''

3.4. Obtenção das características físicas das sub-bacias

A delimitação das sub-bacias de drenagem (no estudo de regionalização entende-se por sub-bacia a área de drenagem de cada uma das estações fluviométricas) e a obtenção das características físicas foram feitas de forma automatizada, com base no MDEHC obtido, bastando para tal a localização exata de cada uma das estações fluviométricas e a utilização de extensões específicas no software ArcView.

Para a implementação da delimitação automática foram utilizadas duas bases de dados, geradas a partir do MDEHC:

- base de dados contendo a direção do escoamento de cada célula; e
- base de dados contendo o valor do escoamento acumulado de cada célula.

A direção do escoamento superficial foi obtida por meio do método determinístico de oito células vizinhas, que considera apenas uma das oito direções possíveis de escoamento para cada uma das células do modelo digital de elevação (Norte, Sul, Leste, Oeste, Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste). Cada uma dessas opções foi associada a uma codificação numérica específica em um novo arquivo digital de mesma resolução espacial. O sentido de escoamento foi sempre descendente, modelando o comportamento da água no mundo real.

Por meio do algoritmo “flowaccumulation”, disponível no software ArcView 3.2a, foi calculado o número de células localizadas a montante de cada célula, obtendo-se o escoamento acumulado para cada uma delas. Células que possuem valor acumulado igual a zero correspondem, em geral, às cristas e picos.

A delimitação dos limites da bacia hidrográfica necessitou da base de dados da direção do fluxo e da criação de uma nova base de dados contendo o ponto de

partida para a delimitação da bacia, que neste trabalho foi a localização de cada estação fluviométrica.

De posse da delimitação da área de cada bacia, passou-se então à determinação das diferentes características físicas usadas no estudo de regionalização: área da bacia (A), comprimento do rio principal (L), densidade de drenagem (D_d), declividade média da bacia (S_m) e declividade do rio principal (S_{rp}). A área de drenagem e o comprimento do rio principal de cada bacia foram obtidos a partir dos arquivos no formato ShapeFile utilizando a ferramenta Calculate e a extensão Geoprocessing, respectivamente, do Software ArcView. O cálculo da D_d foi realizado a partir da estimativa de variáveis primárias como a área de drenagem e o comprimento total dos cursos d'água (L_{total}). Os cursos d'água principais foram identificados como aqueles que drenam a maior área, em suas respectivas bacias. Já as determinações da S_m e da S_{rp} foram feitas com o auxílio do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC). A S_m foi calculada pela média aritmética das declividades de todas as células do interior de cada área de drenagem. Já a S_{rp} foi calculada com base no critério de declividade equivalente constante, utilizando-se a equação 2.

3.5. Determinação das características climáticas das sub-bacias

As características climáticas utilizadas no estudo de regionalização foram: precipitação total anual (P_a), precipitação do semestre mais seco (P_{ss}) e precipitação do trimestre mais seco (P_{ts}), que foram calculadas com base no ano civil.

Para o cálculo da precipitação média sobre a sub-bacia foi utilizado o método do Polígono de Thiessen. Este método atribui um fator de peso aos totais precipitados em cada pluviômetro, proporcional à área de influência de cada um. Estas áreas de influência (pesos) foram determinadas em mapas da bacia contendo as estações, unindo-se os pontos adjacentes por linhas retas e, em seguida, traçando-se as mediatrizes dessas retas formando polígonos (Figura 7).

A precipitação média (P_m) foi calculada pela média ponderada entre a precipitação de cada estação (P_i) e o peso a ela atribuído (A_i), que é a área de influência de P_i .

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (6)$$

em que:

P_i = precipitação pluviométrica de cada estação (mm);

A_i = área de influência de cada estação (km^2); e

n = número de estações pluviométricas consideradas na análise.

Foi utilizada para a obtenção da precipitação média na área de drenagem das diferentes estações fluviométricas uma rotina computacional desenvolvida no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV e disponibilizada no software RH 3.0 (EUCLYDES et al., 1999), bastando para tal o fornecimento de arquivo contendo as coordenadas geográficas das estações pluviométricas, com os respectivos valores de precipitação no período a ser analisado (total anual, semestre mais seco, trimestre mais seco) e o contorno da área de drenagem de cada estação fluviométrica (extensão vec ou dxf).

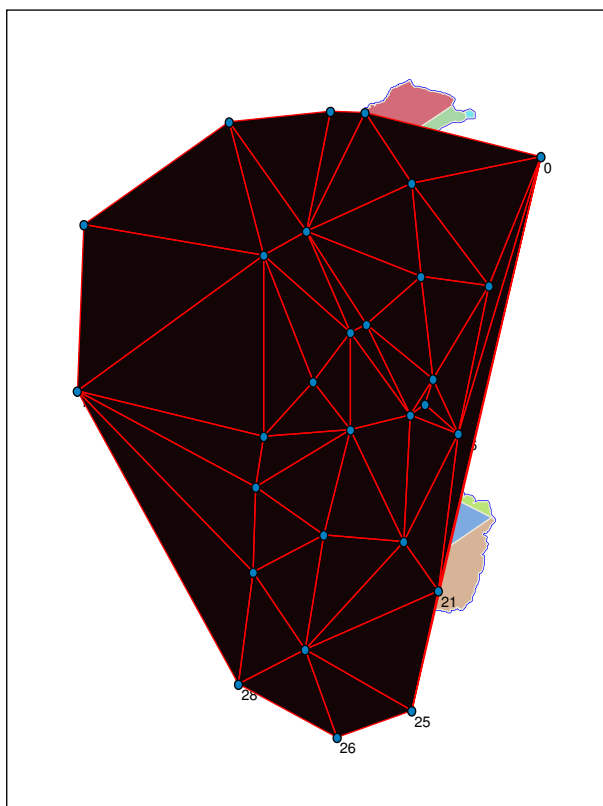


Figura 7 - Aplicação do polígono de Thiessen para a determinação da precipitação média nas sub-bacias.

3.6. Preenchimento de falhas

Após a análise dos dados hidrológicos, àqueles inexistentes ou considerados inconsistentes foram atribuídas falhas para posterior preenchimento. O preenchimento de falhas foi realizado por meio de correlações, segundo critérios consagrados de escolha de bases para as regressões.

Para um mesmo curso d'água, iniciou-se, preferencialmente, pela estação mais próxima e quando esta condição não pode ser atendida, foi aplicado o princípio da semelhança hidrológica, tendo nos coeficientes de correlação a base para a tomada de decisão.

Para o preenchimento de falhas de vazão foi utilizada a regressão linear simples.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (7)$$

em que:

Y = vazão do posto com falhas;

X_1 = vazão do posto com dados; e

β_0 e β_1 = parâmetros ajustados na regressão.

Para o preenchimento de falhas em séries pluviométricas foi utilizado o método da ponderação regional com base em regressões lineares, que consiste em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos, Y , e cada um dos postos vizinhos, $X_1, X_2, \dots, X_n$. De cada uma das regressões lineares efetuadas obtém-se o coeficiente de correlação (r), sendo o preenchimento realizado com base na seguinte expressão:

$$Y = \frac{r_{YX_1} X_1 + r_{YX_2} X_2 + \dots + r_{YX_n} X_n}{r_{YX_1} + r_{YX_2} + \dots + r_{YX_n}} \quad (8)$$

em que:

r_{YX} = coeficiente de correlação entre os postos Y e X ; e

n = número total de postos vizinhos considerados.

Para a aplicação do método foi adotado como critério mínimo a obtenção de coeficiente de determinação superior a 0,7 e a existência de pelos menos oito pares de eventos entre as estações para a realização da regressão. Nos casos em que a estação em análise apresentou boa correlação com apenas uma estação de apoio, foi utilizado, para o preenchimento dos dados de chuva, o procedimento de regressão linear simples, igualmente utilizado para a vazão.

3.7. Determinação das vazões mínimas de referência

As vazões mínimas de referência utilizadas no estudo de regionalização foram a $Q_{7,10}$, a Q_{90} e a Q_{95} .

A estimativa da $Q_{7,10}$ para cada estação fluviométrica utilizada na regionalização foi feita com base no seguinte procedimento:

a) obtenção das médias dos “7” menores valores diários consecutivos de vazão para cada ano da série de dados (Q_7);

b) estabelecimento da série anual com os valores de Q_7 para cada ano;

c) identificação do modelo probabilístico com melhor ajuste às séries de Q_7 .

Os modelos probabilísticos que foram utilizados para representar esses eventos foram: Log-Normal a dois parâmetros, Log-Normal a três parâmetros, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull.

As funções densidade de probabilidade, $f(x)$, e as funções de distribuição acumulada, $F(x)$, das distribuições teóricas Log-Normal a dois parâmetros, Log-Normal a três parâmetros, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull são representadas pelas expressões apresentadas a seguir (STEDINGER et al., 1992).

- **Distribuição Log-Normal a dois parâmetros:**

$$f(x) = \frac{1}{x \sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right]; \quad x > 0 \quad (9)$$

em que:

$f(x)$ = função densidade ou de intensidade de probabilidade de uma variável aleatória contínua qualquer;

μ_Y = parâmetro de posição da distribuição Log-Normal;

σ_Y^2 = parâmetro de escala da distribuição Log-Normal;

X = variável aleatória; e

$Y = \ln(X)$.

A função de distribuição acumulada é dada pela expressão

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \left\{ \frac{1}{x \sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right] \right\} \quad (10)$$

ou,

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \int_0^x f(x)dx = P[X \leq x] \quad (11)$$

ou seja, a integral da função densidade de probabilidade fornece a probabilidade de que uma variável aleatória normal X , de parâmetros μ_Y e σ_Y , seja igual ou inferior a um valor dado x .

- **Distribuição Log-Normal a três parâmetros:**

Esta distribuição difere da distribuição Log-Normal a dois parâmetros pela introdução de um parâmetro de posição x_0 , tal que $Y = \ln(x - x_0)$.

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_Y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x - x_0) - \mu_Y]^2}{2\sigma_Y^2}\right\} \quad (12)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{(x - x_0)\sigma_Y\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x - x_0) - \mu_Y]^2}{2\sigma_Y^2}\right\} dx \quad (13)$$

- **Distribuição Pearson tipo III:**

$$f(x) = \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x - x_0}{\alpha} \right\}^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{x - x_0}{\alpha}\right\} \quad (14)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^z \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x - x_0}{\alpha} \right\}^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{x - x_0}{\alpha}\right\} dx \quad (15)$$

em que:

α = parâmetro de escala da distribuição Pearson tipo III;

β = parâmetro de forma da distribuição Pearson tipo III;

x_0 = parâmetro de posição da distribuição Pearson tipo III; e

$\Gamma(.)$ = função Gamma.

- **Distribuição Log-Pearson tipo III:**

$$f(x) = \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{\ln x - x_0}{\alpha} \right\}^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{\ln x - x_0}{\alpha}\right\} \quad (16)$$

$$F(x) = \int_{x_0}^z \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{\ln x - x_0}{\alpha} \right\}^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{\ln x - x_0}{\alpha}\right\} dx \quad (17)$$

- **Distribuição Weibull:**

$$f(x) = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (18)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (x > 0) \quad (19)$$

A seleção da distribuição de probabilidade ajustável a cada série histórica foi efetuada utilizando-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 20% de probabilidade, associado ao menor coeficiente de variação (CV) entre a função de distribuição e os dados, e o ajuste dos parâmetros de cada distribuição realizado por intermédio do método dos momentos, que consiste em igualar os momentos populacionais da série aos momentos amostrais de uma série de eventos aleatórios, quais sejam, a média, o desvio padrão e os coeficientes de assimetria e de curtose.

O teste é baseado nos desvios da função de distribuição da amostra de eventos $P(x)$ em relação à função de distribuição contínua escolhida $P_o(x)$, assim:

$$D_n = \max |P(x) - P_o(x)| \quad (20)$$

O teste requer que o valor de D_n obtido seja menor que o valor tabelado para um determinado nível de confiança. Se o valor de D_n for maior que o valor crítico, rejeita-se H_o . No Quadro 7 encontram-se os valores críticos para os níveis de significância usuais.

Ao se analisar os dados do Quadro7 verifica-se que os valores críticos de D_n para o nível de significância de 20% são menores que para 5 ou 1% e, em função disso, maior a possibilidade do valor de D_n obtido ser maior que o valor tabelado, tornando o teste mais rigoroso.

Quadro 7 - Valores críticos de D_n para o teste de Kolmogorov-Smirnov

Tamanho da amostra (n)	Nível de significância para $D_n = \max P(x) - Po(x) $				
	$\alpha = 20\%$	$\alpha = 15\%$	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
> 35	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Fonte: HAAN (1977).

d) após a seleção da distribuição probabilística com melhor ajuste aos dados de vazões foram obtidos os valores das vazões mínimas com sete dias de duração associadas ao período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), para cada estação.

A determinação dos valores da Q_{90} e Q_{95} para cada estação fluviométrica foi efetuado com base na curva de permanência ou de duração, que representa a frequência de ocorrência das vazões correspondentes a dada estação fluviométrica, retratando a parcela do tempo que uma determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado.

O procedimento adotado no presente estudo para a obtenção da curva de permanência para cada estação fluviométrica foi o seguinte:

a) seleção da série de dados de vazões diárias utilizadas para a obtenção da curva (utilizou-se apenas os anos das séries históricas com mais de 95% dos dados diários de vazão, o que totaliza um mínimo de 347 dias);

b) definição de 50 intervalos de classe das vazões diárias;

c) sub-divisão dos intervalos de classe com base na escala logarítmica devido à grande magnitude de variação das vazões envolvidas;

d) cálculo do intervalo de classe pela equação:

$$\Delta X = \frac{[\ln(Q_{\text{máx}}) - \ln(Q_{\text{mín}})]}{50} \quad (21)$$

em que:

$Q_{\text{máx}}$ = vazão máxima da série; e

$Q_{\text{mín}}$ = vazão mínima da série.

e) cálculo dos limites dos intervalos, a partir de $Q_{\text{mín}}$, adicionando o intervalo calculado anteriormente, o que resulta na vazão do limite superior do intervalo i:

$$Q_{i+1} = \exp[\ln(Q_i) + \Delta X] \quad (22)$$

f) determinação, com base nos dados de vazão da série histórica de cada estação fluviométrica, do número de vazões classificadas em cada intervalo;

g) determinação da frequência (f_i), associada ao limite inferior de cada intervalo:

$$f_i = \frac{Nq_i}{NT} \cdot 100 \quad (23)$$

em que:

Nq_i = número de vazões de cada intervalo; e

NT = número total de vazões.

h) 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;

i) obtenção dos valores das vazões associadas a 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) de permanência no tempo.

3.8. Metodologia de regionalização de vazões baseada na utilização de equações de regressão regionais (ELETROBRÁS, 1985)

A metodologia proposta pela ELETROBRÁS (1985) tem como característica principal a utilização de equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas, visando a obtenção das vazões em qualquer posição da rede de drenagem da bacia em estudo.

3.8.1. Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas

Foram utilizados dois critérios estatísticos para identificação das regiões homogêneas.

Critério 1 - critério baseado na análise da distribuição de frequência em papel probabilístico das vazões adimensionalizadas de cada estação.

O princípio em que se baseia este critério é que as distribuições de frequência das vazões mínimas das estações em uma região hidrologicamente homogênea seguem uma mesma tendência, sendo as diferenças proporcionais à média das séries de vazões consideradas. Essa característica permite que ao se obter séries transformadas de vazões, por meio da divisão dos seus valores pelas respectivas médias, as distribuições de frequência dessas séries transformadas sejam idênticas.

O gráfico formado pelos pontos representativos dos valores de vazão, anotados em papel probabilístico adequado, é o de uma linha reta. A equação da reta de regressão da forma $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$ foi ajustada às vazões adimensionalizadas de cada estação plotadas em papel probabilístico. Os parâmetros foram estimados pelo método gráfico e o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

As estações que apresentaram valores do coeficiente de regressão linear “ β_1 ” próximos foram consideradas, para efeito do estudo, como pertencentes a uma região homogênea do ponto de vista hidrológico.

Inicialmente realizou-se uma tentativa no sentido de agrupar todas as estações em uma única região hidrologicamente homogênea, com a utilização do critério 1, o que não foi possível, tendo em vista a grande variação observada dos valores do coeficiente de regressão linear “ β_1 ” das estações. Após esse pré-

agrupamento, passou-se então para o critério 2, sendo este o critério determinante para a formação final das regiões consideradas hidrologicamente homogêneas.

Critério 2 - critério baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla das vazões mínimas às características físicas e climáticas da sub-bacia.

Para a definição das regiões hidrologicamente homogêneas foram analisados os coeficientes da regressão, a tendência e a classificação dos resíduos padronizados e o erro percentual entre os valores das vazões observadas e as estimadas pelo modelo de regionalização obtido.

As regiões hidrologicamente homogêneas foram definidas em função da distribuição geográfica das estações e da combinação de estações que apresentou o melhor ajuste.

Quando os dois critérios apresentaram bons resultados a região foi definida como hidrologicamente homogênea para as vazões estudadas, entretanto, nos casos em que isso não ocorreu, houve necessidade de subdividir a região ou reorganizar as estações dentro das regiões e reiniciar o processo.

Na identificação das regiões hidrologicamente homogêneas, com base nos dois critérios citados anteriormente, foi utilizado o software RH 3.0 – Regionalização Hidrológica (EUCLYDES et al. 1999).

3.8.2. Regionalização das vazões mínimas de referência

De posse dos valores de $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} e das características físicas (A , L , D_d , S_m e S_{rp}) e de precipitação média pluvial (P_a , P_{ss} , P_{ts}) correspondentes às áreas de drenagem das diferentes estações fluviométricas pertencentes a uma mesma região homogênea foi aplicada a regressão múltipla entre as vazões mínimas de referência e as diferentes características físicas e climáticas das sub-bacias, para obtenção das equações de regressão regionais para cada região hidrologicamente homogênea, com base nos seguintes modelos:

- Modelo linear

$$Q = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 D_d + \beta_4 S_m + \beta_5 S_{rp} + \beta_6 P \quad (24)$$

- Modelo Potencial

$$Q = \beta_0 A^{\beta_1} L^{\beta_2} D_d^{\beta_3} S_m^{\beta_4} S_{rp}^{\beta_5} P^{\beta_6} \quad (25)$$

- Modelo Exponencial

$$Q = e^{(\beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dd + \beta_4 Sm + \beta_5 Srp + \beta_6 P)} \quad (26)$$

- Modelo Logarítmico

$$Q = \beta_0 + \beta_1 \ln A + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln Dd + \beta_4 \ln Sm + \beta_5 \ln Srp + \beta_6 \ln P \quad (27)$$

- Modelo Recíproco

$$Q = (\beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L_p + \beta_3 Dd + \beta_4 Sm + \beta_5 Srp + \beta_6 P)^{-1} \quad (28)$$

Para fins de verificação do ajuste de um determinado modelo aos dados foi adotado o coeficiente de determinação ajustado, o erro padrão da estimativa e o teste da função F.

Os melhores modelos resultantes da aplicação da regressão múltipla foram selecionados observando-se: maiores valores do coeficiente de determinação ajustado, menores valores de erro padrão fatorial, resultados significativos pelo teste F e menor número de variáveis independentes.

Foi utilizado para a obtenção dos diversos modelos de regressão múltipla o software RH 3.0, desenvolvido por EUCLYDES et al. (1999).

3.9. Metodologia de regionalização de vazões baseada na utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas

Essa metodologia tem como princípio básico a utilização do método de razão de áreas de drenagem, sendo realizadas interpolações e extrapolações de vazões mínimas em diferentes situações da bacia, dependendo da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos. Por se tratar de um método interpolativo, o mesmo dispensa a definição de regiões hidrologicamente homogêneas, possibilitando sua aplicação em bacias com baixa densidade de postos fluviométricos, pois não há limitação em termos de graus de liberdade para as análises de regressão (CHAVES et al. 2002).

As vazões mínimas de referência que foram regionalizadas com base na metodologia em questão também foram a $Q_{7,10}$, a Q_{90} e a Q_{95} .

Partindo-se da rede de drenagem da bacia e da distribuição da rede hidrométrica existente, os canais foram classificados de acordo com quatro situações distintas, detalhadas a seguir:

3.9.1. Seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida

Neste caso aplicou-se diretamente o método da razão de área de drenagem, conforme utilizado por STEDINGER et al. (1992), para o cálculo da vazão mínima de referência em uma seção de vazão desconhecida (Q_z), dentro da área de influência de um posto com vazão conhecida (Q_x), ou seja:

$$Q_z = \left(\frac{A_z}{A_x} \right) Q_x \quad (29)$$

em que:

Q_z = vazão mínima de referência em uma seção da bacia de vazão desconhecida;

Q_x = vazão de referência em um posto fluviométrico próximo com vazão conhecida; e

A_z e A_x = áreas de drenagem relativas à seção de vazão desconhecida e ao posto próximo, respectivamente.

3.9.2. Seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida

No caso de uma seção de interesse Z situada num trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão de referência conhecida, X e Y, a vazão de referência desconhecida, Q_z , foi estimada utilizando a equação:

$$Q_z = A_z \left[\left(p_x \frac{Q_x}{A_x} \right) + \left(p_y \frac{Q_y}{A_y} \right) \right] \quad (30)$$

em que:

A_x , A_y e A_z = áreas de drenagem relativas aos postos X, Y e Z, respectivamente;

Q_x e Q_y = vazões mínimas de referência relativas aos postos X e Y, respectivamente; e

p_x e p_y = pesos relativos a X e Y calculados utilizando as equações:

$$p_x = \left(\frac{dy}{dx + dy} \right) \quad (31)$$

$$p_y = \left(\frac{dx}{dx + dy} \right) \quad (32)$$

em que:

dx = distância entre X e Z medida ao longo do canal; e

dy = distância entre Y e Z medida ao longo do canal.

3.9.3. Seção de interesse localizada a jusante de um posto com vazão conhecida

Este caso ocorre geralmente em áreas próximas à foz da bacia, onde existem apenas dados a montante. Esta situação é semelhante a primeira e a vazão na seção de interesse Z foi calculada com base na equação 29.

3.9.4. Seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior

Este último caso refere-se à situação em que uma seção com vazão desconhecida se situa em um canal de ordem i que contribui para um canal de ordem superior $(i+1)$, e cuja confluência está localizada entre dois postos de vazão conhecida, X e Y.

Este caso é uma combinação dos casos descritos nos itens 3.9.1 e 3.9.2, ou seja, a vazão na seção de interesse é diretamente proporcional às áreas de drenagem e inversamente proporcional às distâncias relativas aos postos. Para tanto, foi usado o seguinte procedimento: aplicou-se o caso descrito no item 3.9.2 (equação 30) entre os postos X e Y, calculando-se a vazão na seção de confluência do canal de ordem i (Z') e posteriormente obteve-se a vazão de referência correspondente à seção de interesse Z usando a vazão calculada previamente em Z' e aplicando-se o mesmo procedimento descrito no item 3.9.1 (equação 29).

Diante das quatro situações citadas nos itens 3.9.1 a 3.9.4, as possíveis condições de interpolação e extrapolação de vazões na bacia foram contempladas.

No mapa da bacia com as estações fluviométricas plotadas identificou-se cada situação possível em relação aos postos fluviométricos existentes e, partindo da nascente para a foz, foi feita a determinação da vazão mínima pelo método proposto para todos os postos fluviométricos de vazão conhecida, cujas vazões foram supostas como desconhecidas apenas para efeito de teste em posteriores comparações entre os valores das vazões estimadas com a aplicação da metodologia citada e os valores observados. Utilizou-se como base de dados os valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise

probabilística das séries de Q_7 e de Q_{90} e Q_{95} observadas nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Para os postos 21220000 e 21750000, os resultados foram obtidos aplicando-se a equação 29 tendo em vista que esses postos se enquadraram no caso 1 descrito no item 3.9.1.

Nos postos 21500000, 21600000, 21650000 e 21850000, os resultados foram obtidos com aplicação da equação 30 por se enquadrarem no caso 2, descrito no item 3.9.2 da metodologia em questão.

Nos postos 21890000 e 21900000, os resultados foram também obtidos com a aplicação da equação 29, por se enquadrarem no caso 3, descrito no item 3.9.3, conforme preconizado na metodologia.

Já para os postos 21300000, 21510000, 21560000 e 21580000, a obtenção dos resultados foi com base na aplicação das equações 30 e 29, por se enquadrarem no caso 4, descrito no item 3.9.4 da metodologia.

3.10. Metodologia de regionalização de vazões baseada no princípio da vazão específica

Essa metodologia é uma alternativa proposta pela ELETROBRÁS (1985), em que se realiza o cálculo das vazões tendo como base as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e, ou, a jusante do local onde se deseja estimar a vazão. Também não trabalha com o conceito de regiões hidrologicamente homogêneas, o que viabiliza a sua aplicação em pequenas bacias hidrográficas com número reduzido de postos hidrométricos, pois não há limitação em termos de graus de liberdade, tendo em vista não utilizar equações de regressão nas estimativas das vazões.

As vazões mínimas de referência que foram regionalizadas com base nesta metodologia também foram a $Q_{7,10}$, a Q_{90} e a Q_{95} .

Partindo-se da rede de drenagem da bacia e da distribuição da rede hidrométrica existente, os canais foram também classificados de acordo com quatro situações distintas, detalhadas a seguir:

3.10.1. Seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida

Neste caso aplicou-se diretamente o método da razão de área de drenagem, conforme utilizado por STEDINGER et al. (1992), para o cálculo da vazão mínima de referência em uma seção de vazão desconhecida (Q_z), dentro da área de influência de um posto com vazão conhecida (Q_x), utilizando a equação 29.

3.10.2. Seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida

No caso de uma seção de interesse Z situada num trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão conhecida, Q_m e Q_j , a vazão desconhecida, Q_z , foi estimada utilizando a equação:

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) \times (Q_j - Q_m) \quad (33)$$

em que:

Q_z = vazão mínima na seção de interesse;

Q_m = vazão mínima do posto a montante;

Q_j = vazão mínima do posto a jusante;

A_z = área de drenagem da seção de interesse;

A_m = área de drenagem do posto a montante; e

A_j = área de drenagem do posto a jusante.

3.10.3. Seção de interesse localizada a jusante de um posto com vazão conhecida

Esta situação é semelhante a descrita no item 3.10.1 e a vazão na seção de interesse Z também foi calculada com base na equação 29.

3.10.4. Seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior

Esta situação é uma combinação das situações descritas nos itens 3.10.1 e 3.10.2, sendo usado o seguinte procedimento para a estimativa da vazão na seção de interesse: aplicou-se o caso descrito no item 3.10.2 (equação 33) entre os postos a montante e a jusante, calculando-se a vazão na seção de confluência do canal de ordem i (Z') e posteriormente obteve-se a vazão de referência correspondente a seção

de interesse Z usando a vazão calculada previamente em Z' e aplicando-se o mesmo procedimento descrito no item 3.10.1 (equação 29).

No mapa da bacia com as estações fluviométricas plotadas identificou-se cada situação possível em relação aos postos fluviométricos existentes e, partindo da nascente para a foz, foi estimada a vazão mínima pelo método proposto para todos os postos fluviométricos de vazão conhecida, cujas vazões foram supostas como desconhecidas apenas para efeito de teste em posteriores comparações entre os valores das vazões estimadas com a aplicação da metodologia citada e os valores observados. Utilizou-se como base de dados os valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 e de Q_{90} e Q_{95} observadas nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Para os postos 21220000 e 21750000 os resultados foram obtidos aplicando-se a equação 29 tendo em vista que esses postos se enquadraram na situação descrita no item 3.10.1.

Nos postos 21500000, 21600000, 21650000 e 21850000, os resultados foram obtidos com a aplicação da equação 33 por se enquadrarem na situação descrita no item 3.10.2 da metodologia em questão.

Nos postos 21890000 e 21900000, os resultados foram também obtidos com a aplicação da equação 29, por se enquadrarem na situação descrita no item 3.10.3, conforme preconizado na metodologia.

Já para os postos 21300000, 21510000, 21560000 e 21580000, a obtenção dos resultados foi com base na aplicação das equações 33 e 29, por se enquadrarem na situação descrita no item 3.10.4 da metodologia.

3.11. Comparação dos resultados obtidos com base nas três metodologias com as vazões observadas nos postos fluviométricos da sub-bacia estudada

Com os resultados das vazões mínimas estimadas ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) com base nas três metodologias (equações de regressão regionais, interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas e vazão específica) e os valores de vazões observados para esses mesmos postos fluviométricos da bacia, foi avaliada a precisão das metodologias por meio da aplicação de dois índices:

a) erro relativo entre o valor observado e o estimado, obtido pela equação:

$$ER = 100 \times Abs \left(\frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right) \quad (34)$$

em que:

ER = erro relativo, %;

Abs = valor absoluto;

Q_{obs} = vazão observada no posto fluviométrico; e

Q_{est} = vazão estimada com base nas metodologias de regionalização.

b) coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970):

$$E = \frac{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 - \sum (Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (35)$$

Foi considerada a melhor metodologia de regionalização para a sub-bacia em estudo aquela que apresentou o menor valor de erro relativo e o maior valor de coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe que varia de 0 a 1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente

O modelo digital de elevação obtido pode ser considerado hidrologicamente consistente tendo em vista que a rede de drenagem gerada apresentou boa sobreposição com a rede de drenagem mapeada (Figura 8). Além da comparação entre as redes de drenagem mapeada e gerada fez-se também a verificação da consistência nas delimitações automáticas das áreas de drenagem das diferentes estações fluviométricas (Figura 9), comprovada pela inexistência de cortes na hidrografia e localização correta de divisores de água. Na Figura 9 apresenta-se, em detalhe, a delimitação da bacia de contribuição correspondente à estação fluviométrica 21580000, sendo que as delimitações das outras estações podem ser visualizadas na Figura 10. As setas que aparecem na Figura 9 correspondem à direção de escoamento de cada segmento de drenagem.

Na Figura 11 é apresentada uma visão geral do MDEHC gerado para a sub-bacia do rio Paranã, indicando a cota para cada célula da área. A Figura 12 apresenta uma vista do MDEHC utilizando efeito de sombreamento para permitir melhor visualização do relevo da área estudada.

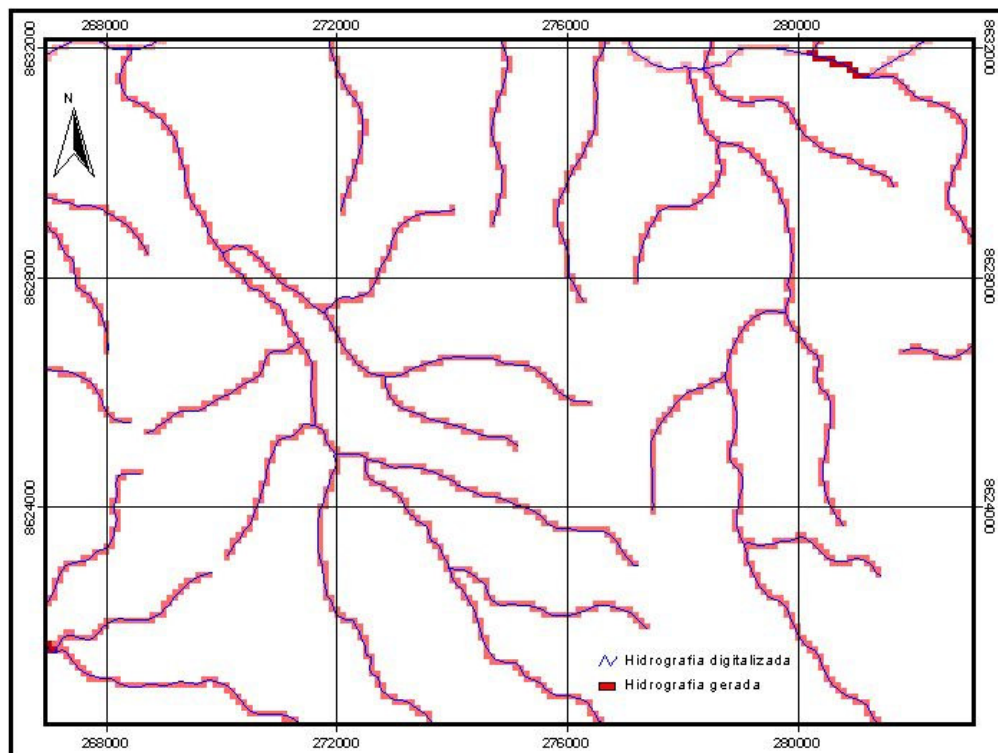


Figura 8 - Comparação visual da rede de drenagem gerada pelo modelo com a rede de drenagem mapeada.

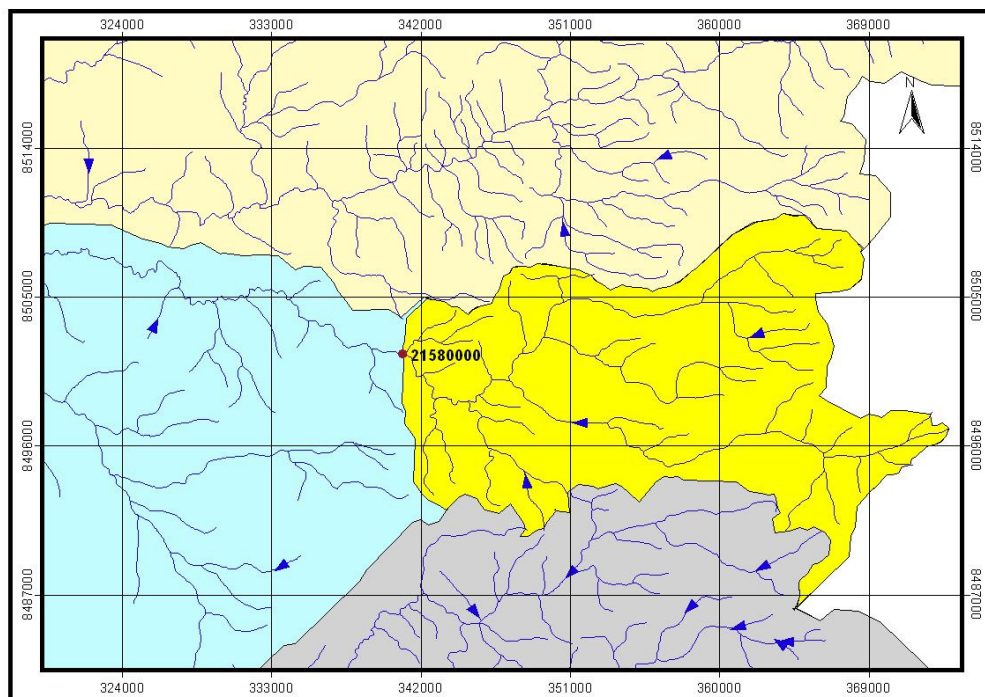


Figura 9 - Verificação da delimitação automática da bacia de contribuição a montante da estação fluviométrica 21580000.

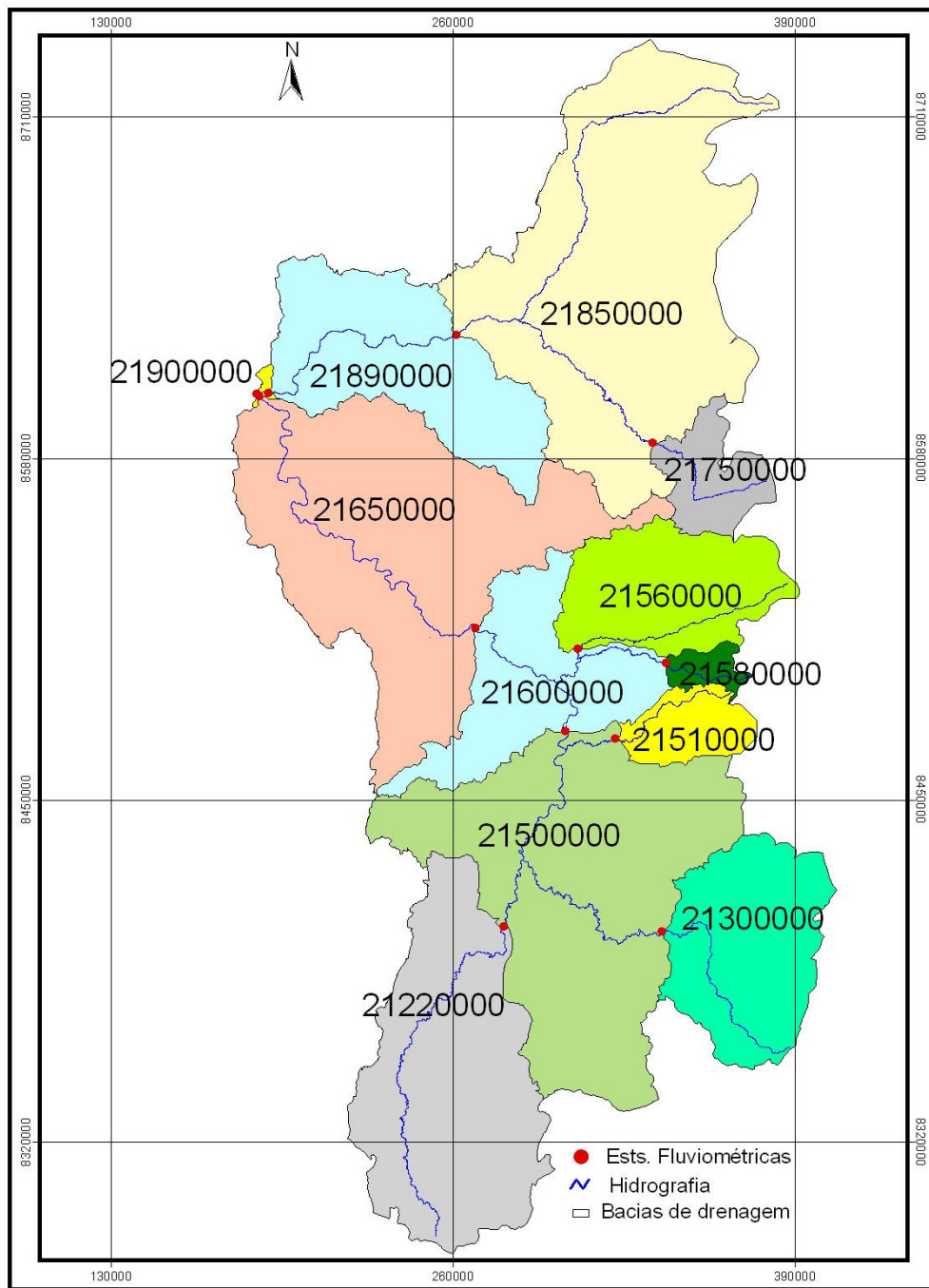


Figura 10 - Delimitação das bacias de contribuição de cada estação fluviométrica utilizada no estudo de regionalização.

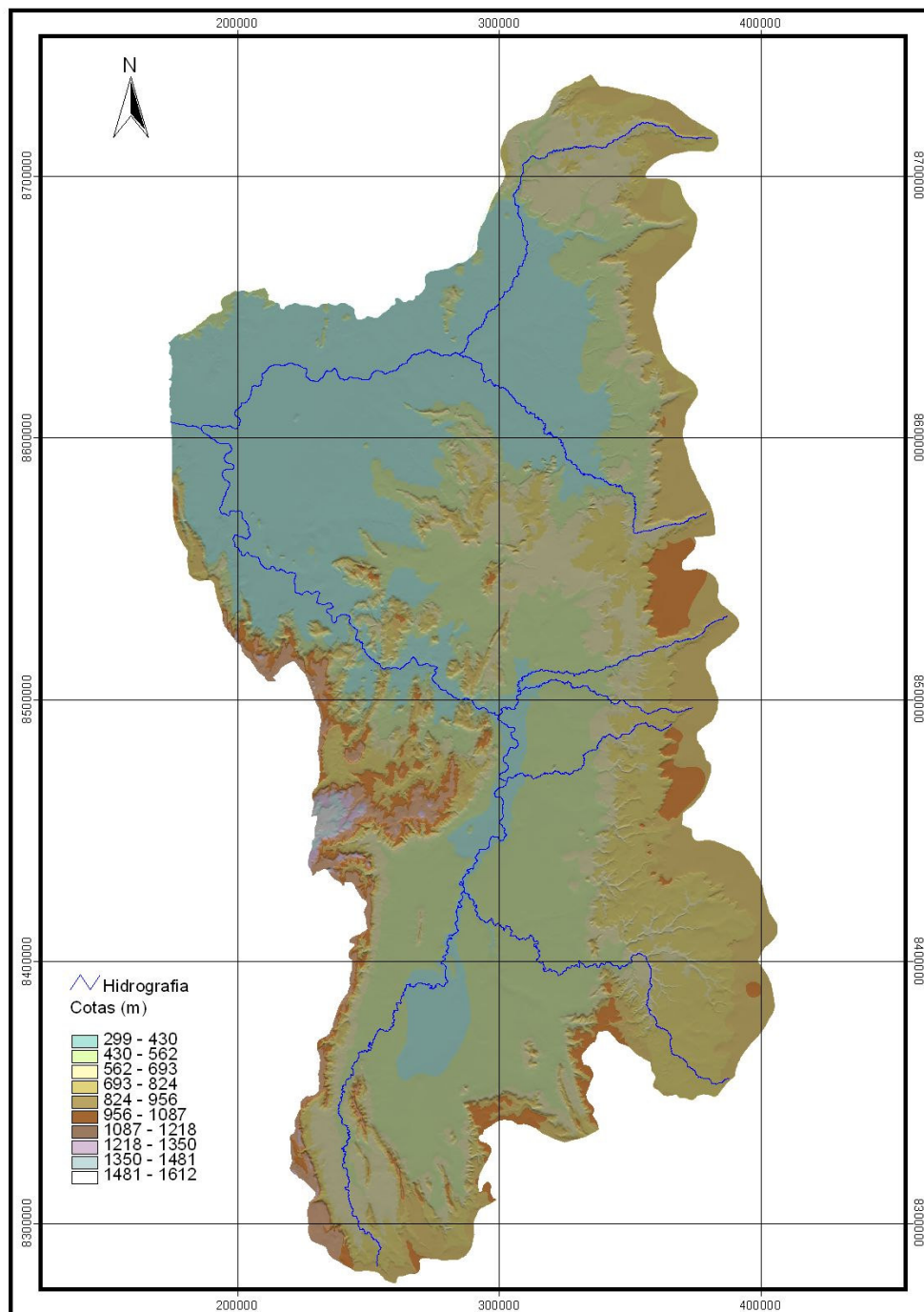


Figura 11 - Modelo digital de elevao hidrológicamente consistente contendo as cotas para a sub-bacia do rio Paran.

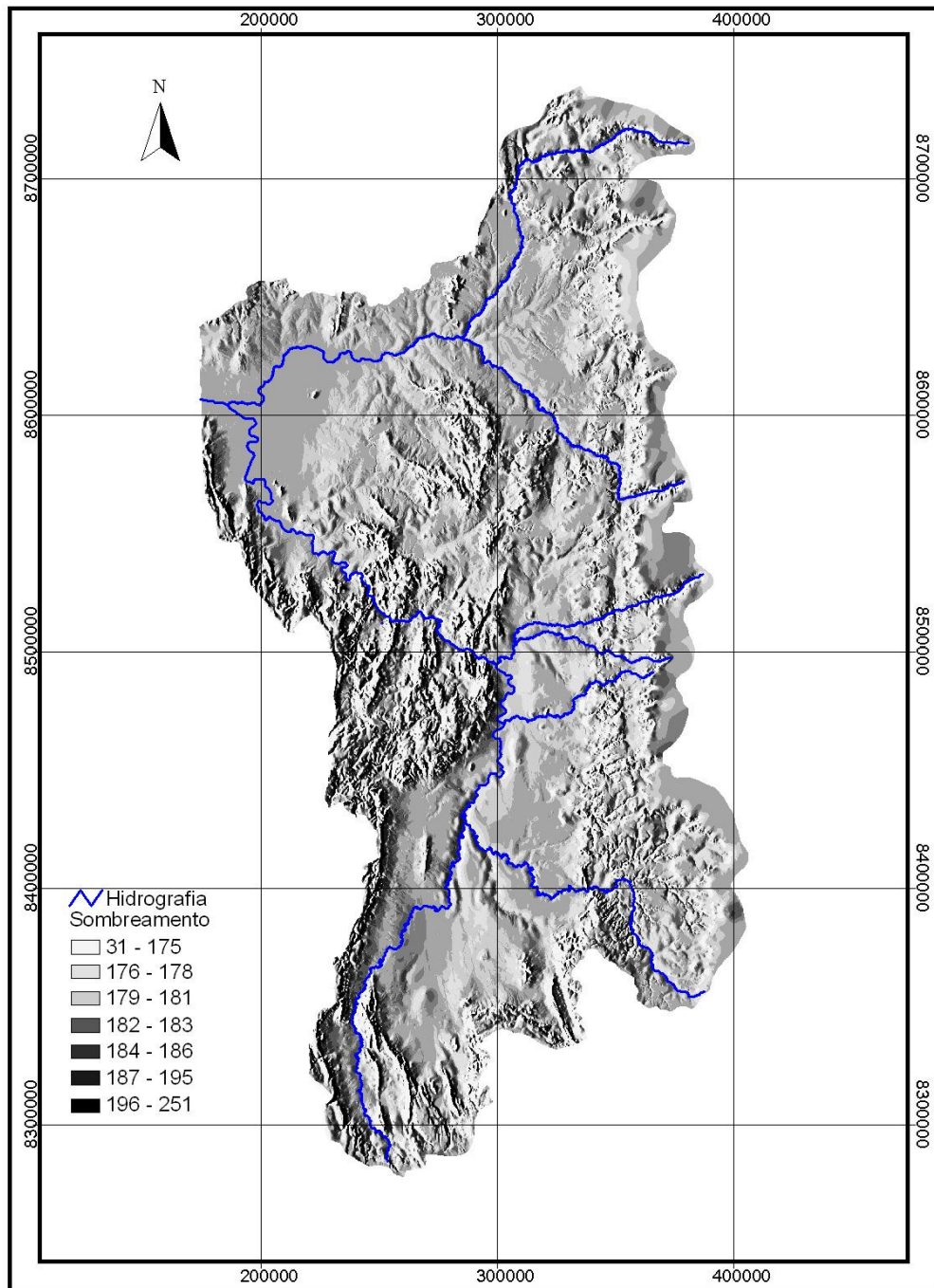


Figura 12 - Vista do MDEHC utilizando efeito de sombreamento para melhor visualização do relevo da sub-bacia do rio Paraná.

4.2. Características físicas e de precipitação média pluvial da sub-bacia

No Quadro 8 são apresentados os valores das características físicas da área de drenagem de cada uma das 12 estações fluviométricas efetivamente utilizadas no estudo de regionalização.

Verifica-se pelo Quadro 8 que a área de drenagem das estações fluviométricas utilizadas variou de valores de 396,26 km², como é o caso da estação com código 21580000, até valores de 59.955,13 km² para a estação 21900000, localizada na foz da sub-bacia e, portanto, a estação que delimita toda a área objeto do estudo. A densidade de drenagem variou de 0,34 a 0,57 km km⁻². Estes valores são altamente influenciados pela escala dos mapas utilizados para a geração do MDEHC, que no presente trabalho foi de 1:250.000. Diversos pesquisadores (EUCLYDES, 2001a, EUCLYDES, 2002, SILVA, 2002a, SILVA, 2002b), trabalhando em outras bacias hidrográficas com mapas nessa mesma escala, obtiveram valores de densidade de drenagem variando de 0,17 a 0,88 km km⁻². BAENA (2002), entretanto, ao trabalhar com mapas na escala de 1:50.000 para a bacia do rio Paraíba do Sul obteve valores para essa característica que variaram de 1,96 a 3,43 km km⁻². Nota-se também que o comprimento do rio principal variou de 42,26 a 615,64 km para as áreas de drenagem correspondentes às diferentes estações fluviométricas. Os valores de declividade média variaram de 2,7% até 5,11%, sendo a declividade média da área em estudo em torno de 4,0 % . Por último, os valores de declividade média dos cursos d'água principais variaram de 0,02% até 0,55%.

Na obtenção da precipitação média pluvial na região em estudo, apresentada no Quadro 9, verificou-se que a precipitação total anual variou de 1.714,70 a 1.213,10 mm. Enquanto que a precipitação do semestre mais seco teve uma variação de 330,70 a 105,80 mm. Já a precipitação do trimestre mais seco foi a que apresentou menor variação com médias de 30,60 a 39,40 mm no trimestre.

Quadro 8 - Características físicas das sub-bacias utilizadas na regionalização

Código da Estação	Nome da Estação	Curso D'água	A (km ²)	L (km)	L(total) (km)	Dd (km/km ²)	Sm (m m ⁻¹)	Srp (m m ⁻¹)
21220000	Flores de Goiás	Paranã	7.365,86	221,10	2.865,05	0,39	0,0511	0,0008
21300000	Alvorada do Norte	Corrente	4.145,11	102,73	1.404,64	0,34	0,0508	0,0018
21500000	Nova Roma	Paranã	23.090,13	332,03	9.138,81	0,39	0,0423	0,0002
21510000	Ponte S. Mateus	S. Mateus	1.141,85	70,04	534,3	0,47	0,0385	0,0024
21560000	Fazenda Veneza	S. Domingos	3.445,51	107,55	1.596,57	0,46	0,0284	0,0019
21580000	São Vicente	S. Vicente	396,26	42,26	228,24	0,57	0,0418	0,0055
21600000	Ponte Paranã	Paranã	30.811,32	411,43	12.703,38	0,41	0,0437	0,0003
21650000	Mont.Barra do Palma	Paranã	41.305,87	611,93	18.365,27	0,44	0,0471	0,0002
21750000	Lavandeira	Palma	1.369,10	72,46	666,79	0,48	0,0499	0,0003
21850000	Rio da Palma	Palma	13.597,32	203,73	6.242,19	0,46	0,0294	0,0007
21890000	Barra do Palma	Palma	18.585,14	306,64	9.470,92	0,51	0,027	0,0003
21900000	Paranã	Paranã	59.955,13	615,64	27.779,43	0,46	0,0408	0,0002

Quadro 9 - Características de precipitação média das sub-bacias utilizadas na regionalização

Código da Estação	Nome da Estação	Curso D'água	Precipitação média (mm)		
			Total Anual (Pa)	Semestre mais seco (Pss)	Trimestre mais seco (Pts)
21220000	Flores de Goiás	Paraná	1.422,60	330,70	30,60
21300000	Alvorada do Norte	Corrente	1.258,40	289,80	33,90
21500000	Nova Roma	Paraná	1.310,20	282,70	31,70
21510000	Ponte S. Mateus	S. Mateus	1.215,60	105,80	37,50
21560000	Fazenda Veneza	S. Domingos	1.327,90	133,60	35,10
21580000	São Vicente	S. Vicente	1.213,10	128,70	33,60
21600000	Ponte Paranã	Paraná	1.309,00	243,90	31,80
21650000	Mont.Barra do Palma	Paraná	1.318,30	211,20	32,70
21750000	Lavandeira	Palma	1.590,50	145,30	39,40
21850000	Rio da Palma	Palma	1.714,70	152,80	33,70
21890000	Barra do Palma	Palma	1.600,20	140,80	33,90
21900000	Paraná	Paraná	1.405,60	189,20	33,10

4.3. Preenchimento de falhas e extensão de séries

No Quadro 10 são apresentadas as informações referentes às estações utilizadas no preenchimento de falhas das séries de vazões mínimas com sete dias de duração, assim como as equações de regressão obtidas, o valor do coeficiente de determinação (R^2) e o período de dados preenchidos para as estações com falhas em seus registros. Para a maioria das estações não foi possível realizar o preenchimento devido ao fato dos valores de R^2 obtidos na regressão terem sido inferiores ao valor mínimo adotado de 0,7.

Ressalta-se que, para fins de preenchimento de falhas, só foram consideradas as estações que estavam próximas das estações em análise, a montante ou jusante e, de preferência, localizadas no mesmo rio.

Nos Quadros 11, 12 e 13 são apresentadas as informações pertinentes ao preenchimento de falhas nas séries de precipitação total anual (P_a), precipitação do semestre mais seco (P_{ss}) e precipitação do trimestre mais seco (P_{ts}), respectivamente. Os dados originais e os dados preenchidos de vazão e de precipitação são apresentados nos Apêndices A e B, respectivamente.

Quadro 10 - Informações pertinentes ao preenchimento de falhas de vazões mínimas com sete dias de duração

Estação com falhas	Estação Correlacionada	Equação	R ²	Período Preenchido
21220000	21650000	$Y = 0,1558X - 8,0787$	0,82	1991; 1992
21500000	21650000	$Y = 0,5237X + 4,3861$	0,85	1980; 1985; 1991; 1992
21650000	21220000	$Y = 5,2658X + 61,066$	0,82	1976; 1977
21900000	21220000	$Y = 5,8833X + 185,89$	0,77	1977; 1989; 1995; 1999

Quadro 11 - Informações pertinentes ao preenchimento de falhas de precipitação total anual (Pa)

Estação com falhas	Estação Correlacionada	Equação	R ²	Período Preenchido
01346001	01347000	$Y = 0,5647X + 178,39$	0,71	1976; 1992; 2001
01346002	01447001	$Y = 1,1094X - 61,178$	0,73	1976; 1980; 1988; 1989; 2000

Quadro 12 - Informações pertinentes ao preenchimento de falhas de precipitações do semestre mais seco (Pss)

Estação com falhas	Estação Correlacionada	Equação	R ²	Período Preenchido
01346003	01446004	$Y = - 0,2199X + 200,5$	0,76	1988 a 1994; 1996 a 2001
01446001	01446004	$Y = 1,0962X - 46,542$	0,87	1990; 1992 a 1994; 1996 a 2001
01446004	01346003 01446001	ponderação regional	0,76 0,87	1975 a 1983

Quadro 13 - Informações pertinentes ao preenchimento de falhas de precipitações do trimestre mais seco (Pts)

Estação com falhas	Estação Correlacionada	Equação	R ²	Período Preenchido
01346003	01347000	$Y = 1,2372X + 8,9405$	0,71	1988 a 2001
01347001	01346004	$Y = 0,8277X + 2,3648$	0,82	1990; 1992; 1994
01446001	01247005	$Y = 0,8566X + 23,669$	0,75	1992; 1995 a 2001

4.4. Regionalização de vazões mínimas baseada na utilização de equações de regressão regionais (ELETROBRÁS, 1985)

4.4.1. Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas

Inicialmente fez-se uma tentativa preliminar de reunir todas as estações em uma só região; entretanto, todos os modelos de regressão resultantes da aplicação da regressão múltipla aos dados das 12 estações fluviométricas apresentaram coeficientes de determinação ajustados (R^2_a) insatisfatórios, com valores inferiores a 0,7. A bacia foi então dividida em mais regiões, baseando-se na distribuição geográfica das estações, na homogeneidade das características de relevo e climáticas, na similaridade dos coeficientes de regressão " β_1 ", nos coeficientes de determinação das equações obtidas para cada região e na dispersão dos valores observados em relação aos estimados pelos modelos de regressão selecionados para cada região homogênea.

Mesmo considerando-se todos os critérios citados anteriormente, um número mínimo de estações em cada região homogênea precisou ser respeitado pois, em caso contrário, a utilização de um número maior de variáveis explicativas nos modelos de regressão múltipla testados ficaria impossibilitada. Procurou-se, então, não individualizar regiões com menos do que seis estações fluviométricas, o que proporcionaria a utilização de pelo menos duas variáveis explicativas nos modelos de regressão.

Após diversas tentativas, identificou-se duas regiões hidrologicamente homogêneas para as vazões estudadas com seis estações fluviométricas cada uma (Figura 13).

Na execução do critério 2 de identificação de regiões homogêneas foram testados diversos modelos de regressão, utilizando-se várias combinações de variáveis explicativas (características físicas e climáticas), sendo que as equações recomendadas para estimar as vazões mínimas para as duas regiões homogêneas são apresentadas no Quadro 14.

Analisando-se os modelos recomendados no Quadro 14 verifica-se que a área de drenagem, a densidade de drenagem e a precipitação do semestre mais seco da bacia foram as variáveis que melhor explicaram o comportamento da vazão mínima para a região homogênea I, enquanto que para a região homogênea II, o comprimento do rio principal e a precipitação total anual foram as variáveis mais expressivas.

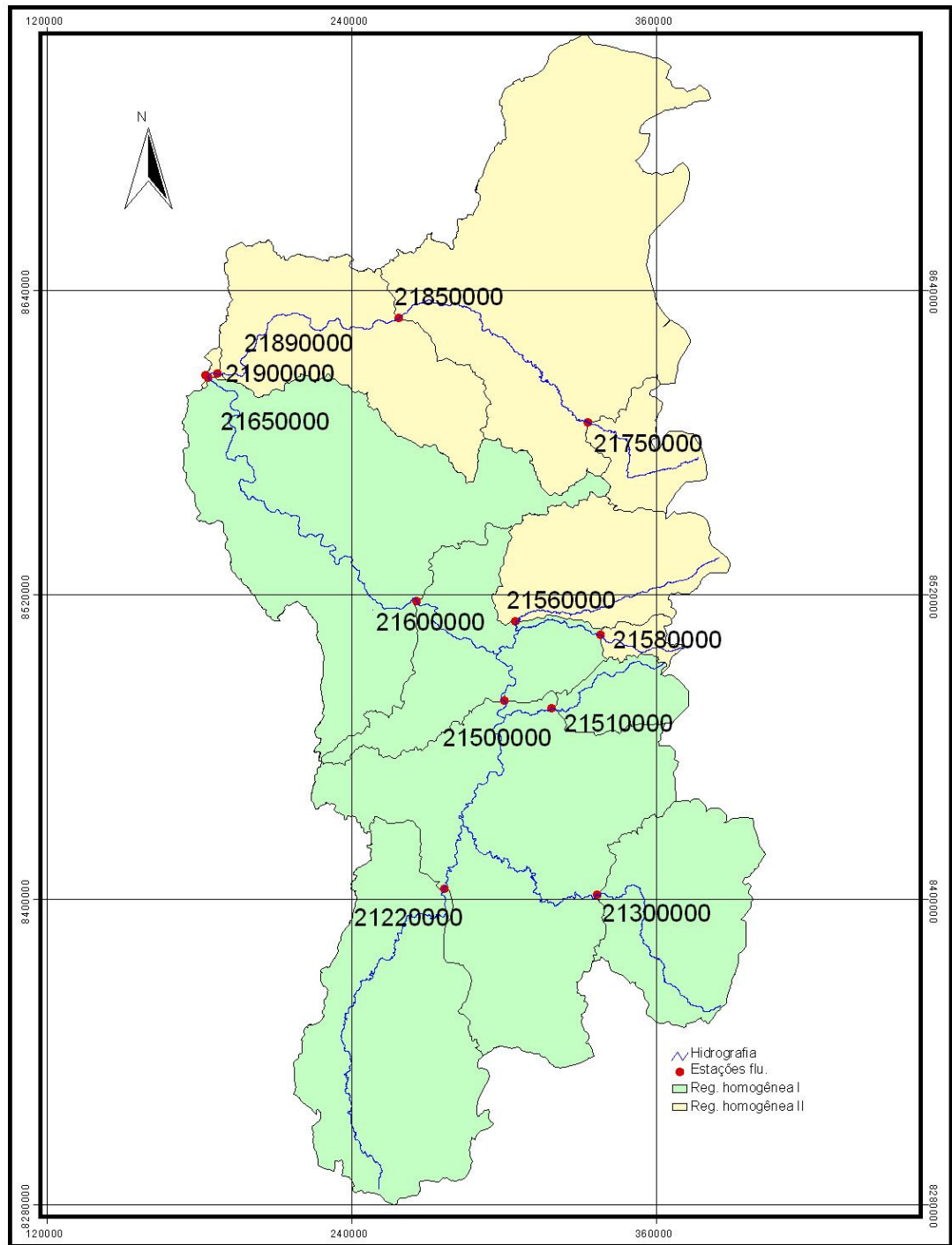


Figura 13 - Delimitação das regiões hidrologicamente homogêneas para vazões mínimas da sub-bacia estudada.

Quadro 14 – Modelos de regressão recomendados para a representação das vazões médias mínimas (Q_7 , $m^3 s^{-1}$) e parâmetros estatísticos a eles associados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas.

Região	Modelos recomendados	R^2	σF	F(%)
Vazão mínima				
I	$Q_7 = A^{1,201699} Dd^{-9,81166} Pss^{-3,04226}$	0,96	1,23	0,28
II	$Q_7 = 5,9 \times 10^{-11} L^{1,128865} Pa^{2,991727}$	0,98	1,14	0,05

De posse das equações recomendadas obteve-se os valores das vazões estimadas (Q_7 Est) para os locais das estações fluviométricas, os quais foram comparados com os valores das vazões observadas (Q_7 Obs) em cada uma das estações situadas nas duas diferentes regiões homogêneas. No Quadro 15 são apresentados os resultados dessa comparação, contendo também os valores dos resíduos padronizados (r.p.) e do erro percentual (% dr) entre os valores das vazões observadas e estimadas, para as vazões mínimas estudadas.

Para a tomada de decisão final sobre a definição de regiões homogêneas adotou-se como referência a obtenção de valores de r.p. entre -1,5 e 1,5, os quais indicam uma boa estimativa do modelo de regressão, conforme EUCLYDES et al. (1999), além de menores valores de % dr.

Pode-se observar, pelos valores apresentados no Quadro 15, que a subdivisão da bacia nas duas regiões gerou valores satisfatórios para r.p. e % dr, concluindo-se então que, com base nos critérios adotados, as duas regiões podem ser consideradas hidrologicamente homogêneas. Apesar de terem sido encontrados desvios percentuais (% dr) elevados para algumas estações, estes valores foram os melhores dentro de todas as possibilidades existentes para cada região homogênea. Portanto, caso as equações com estes desvios não fossem adotadas, nenhuma outra equação regional poderia ser apresentada.

Quadro 15 - Valores dos resíduos padronizados (r.p.) e do erro percentual (% dr) entre as vazões médias mínimas observadas (Q_7 Obs, $m^3 s^{-1}$) e estimadas (Q_7 Est, $m^3 s^{-1}$) pelos modelos de regressão obtidos para cada região homogênea

Região Homogênea	Nome da Estação	Q_7Obs	Q_7Est	r.p.	% dr
I	Ponte São Mateus	7,00	5,40	1,21	22,9
	Montante Barra do Palma	102,85	93,98	0,42	8,62
	Alvorada do Norte	29,72	28,43	0,20	4,33
	Ponte Paranã	83,26	85,27	- 0,11	- 2,40
	Nova Roma	57,37	62,84	- 0,42	- 9,53
	Flores de Goiás	7,89	9,88	- 1,05	- 25,15
II	Rio da Palma	130,58	112,97	1,06	13,48
	São Vicente	7,24	6,79	0,46	6,17
	Paranã	229,47	217,20	0,40	5,34
	Lavandeira	26,83	28,08	- 0,33	- 4,67
	Fazenda Veneza	23,65	25,56	- 0,56	- 8,06
	Barra do Palma	126,68	145,76	- 1,02	- 15,06

As duas regiões hidrologicamente homogêneas obtidas para a sub-bacia do rio Paranã (Figura 13) ficaram assim definidas:

- Região I: compreende o leito principal do rio Paranã, desde a sua nascente, ainda no Estado de Goiás, até a penúltima estação em estudo nesse canal, que é a estação Montante Barra do Palma próximo à foz da bacia já no Estado do Tocantins, como também os tributários rio Corrente e São Mateus. Abrange uma área de drenagem de 37.464,1 km^2 , englobando as seguintes estações fluviométricas: Flores de Goiás, Alvorada do Norte, Nova Roma, Ponte São Mateus, Ponte Paranã e Montante Barra do Palma.

- Região II: compreende o leito principal do rio Palma, segundo maior rio da bacia em estudo, desde a sua nascente até a foz com o rio Paranã, continuando até a foz da bacia na altura da estação fluviométrica Paranã, incluindo ainda os rios São Vicente e São Domingos. Abrange uma área de 22.491,03 km^2 , englobando as seguintes estações fluviométricas: São Vicente, Fazenda Veneza, Lavandeira, Rio da Palma, Barra do Palma e Paranã.

A área das duas regiões homogêneas totaliza 59.955,13 km^2 , sendo que a região I apresentou uma área bem maior que a da região II. Não foi possível subdividir a região I, tendo em vista o seu reduzido número de estações fluviométricas, o que impossibilitaria o ajuste das equações de regressão múltiplas. Isso teve como reflexo um maior erro percentual médio para as estações pertencentes a essa região em decorrência do pior ajuste do modelo de regressão múltipla.

4.4.2. Regionalização da $Q_{7,10}$

As vazões mínimas anuais com sete dias de duração associadas ao período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), resultantes da aplicação das distribuições Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull, para as duas regiões homogêneas, são apresentadas no Quadro 16. Neste quadro são também apresentados os valores de significância pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (%K-S) e o coeficiente de variação entre a função de distribuição e os dados (CV).

Observa-se no Quadro 16 que a distribuição que melhor se ajustou aos dados das estações fluviométricas da região homogênea I foi a Log-Normal a dois parâmetros, enquanto que para a região homogênea II foi o modelo probabilístico Log-Normal a três parâmetros, visto que apresentaram significância a 20% de probabilidade pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para todas as estações, além de ter proporcionado valores baixos de coeficiente de variação para as respectivas regiões. A distribuição Log-Pearson III não apresentou significância a 20% de probabilidade pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para nenhuma estação fluviométrica da região homogênea I e, por isso, os resultados dessa distribuição não foram apresentados para essa região. BAENA (2002), em estudo de regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, verificou que o modelo Log-Normal a três parâmetros foi o que melhor se ajustou aos dados de todas as estações fluviométricas para as quatro regiões homogêneas identificadas na área em estudo. SILVA et al. (2002a), em trabalho de regionalização na sub-bacia 51, também testaram vários modelos probabilísticos para vazões mínimas, verificando que aqueles que melhor se ajustaram foram a Log-Normal a dois parâmetros, Log-Normal a três parâmetros e a Weibull. Já EUCLYDES et al. (2001), trabalhando com regionalização hidrológica para a bacia do Alto São Francisco, selecionaram a distribuição de Weibull para representar os eventos mínimos.

Quadro 16 - Vazões mínimas com sete dias de duração, associadas ao período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$, $m^3 s^{-1}$), obtidas após o ajuste das distribuições de probabilidade para cada uma das estações fluviométricas das regiões homogêneas utilizadas na regionalização

Estação	$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)	Distribuição	CV*	% K-S**
Região I				
Ponte Paranã	71,451	L-Normal 2	3,259	20
	71,579	L-Normal 3	3,486	20
	70,579	Pearson III	2,529	20
	70,488	Weibull	2,445	20
Ponte São Mateus	5,747	L-Normal 2	7,678	20
	6,026	L-Normal 3	10,186	20
	5,839	Pearson III	4,400	5
	8,096	Weibull	26,315	1
Alvorada do Norte	24,101	L-Normal 2	5,510	20
	24,521	L-Normal 3	6,639	20
	23,609	Pearson III	3,662	20
	23,674	Weibull	4,198	20
Mont. Barra do Palma	80,297	L-Normal 2	2,760	20
	79,236	L-Normal 3	2,574	20
	79,398	Pearson III	2,662	20
	78,585	Weibull	2,558	20
Nova Roma	44,199	L-Normal 2	3,295	20
	43,648	L-Normal 3	3,325	20
	43,794	Pearson III	3,377	20
	43,274	Weibull	3,161	20
Flores de Goiás	4,417	L-Normal 2	11,129	20
	3,889	L-Normal 3	9,768	20
	3,948	Pearson III	10,000	20
	3,783	Weibull	8,942	20

Continua...

Quadro 16 – Continuação.

Região II				
Estação	$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)	Distribuição	CV*	% K-S**
Fazenda Veneza	22,041	L-Normal 2	1,384	20
	22,163	L-Normal 3	1,155	20
	22,256	Pearson III	1,166	20
	22,207	L-Pearson III	1,155	20
	22,146	Weibull	1,192	20
Lavandeira	24,879	L-Normal 2	2,170	20
	25,224	L-Normal 3	1,898	20
	25,514	Pearson III	2,148	20
	25,380	L-Pearson III	1,971	20
	25,294	Weibull	2,262	20
Rio da Palma	120,099	L-Normal 2	1,612	20
	120,125	L-Normal 3	1,648	20
	120,222	Pearson III	1,723	20
	120,129	L-Pearson III	1,723	20
	119,838	Weibull	1,491	20
Paraná	202,946	L-Normal 2	1,450	20
	203,850	L-Normal 3	1,242	20
	204,677	Pearson III	1,130	20
	204,053	L-Pearson III	1,176	20
	203,311	Weibull	1,425	20
Barra do Palma	110,706	L-Normal 2.	1,746	20
	110,229	L-Normal 3	1,632	20
	110,236	Pearson III	1,679	20
	106,846	L-Pearson III	23,265	1
	109,785	Weibull	1,691	20
São Vicente	6,135	L-Normal 2	3,052	20
	6,174	L-Normal 3	2,840	20
	6,227	Pearson III	2,645	20
	6,183	L-Pearson III	2,850	20
	6,156	Weibull	2,762	20

*Coeficiente de variação entre a função de distribuição e os dados.

**Valor de significância pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

No Quadro 17 encontram-se os modelos de regressão selecionados para vazão específica mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($q_{7,10}$, $L s^{-1} km^{-2}$), os quais apresentaram ajustes satisfatórios e, portanto, possíveis de serem aplicados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas, assim como os respectivos parâmetros advindos da análise estatística.

No Quadro 18 estão apresentados os modelos de regressão recomendados para estimar a $q_{7,10}$, e os parâmetros estatísticos a eles associados, para as duas regiões hidrologicamente homogêneas. Os quais foram obtidos a partir dos resultados apresentados no Quadro 17 com base nos seguintes critérios: simplicidade (menor número de variáveis e, ou, maior facilidade de obtenção das variáveis), coeficiente de determinação ajustado (R^2_a), erro padrão fatorial (σ_F) e significância pelo teste F.

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 18 verifica-se que os modelos de regressão múltipla recíproco para a região I e potencial para a região II contemplando a área de drenagem e a precipitação total anual como as características físicas e climáticas, respectivamente, foram os que melhor explicaram o comportamento da $q_{7,10}$ nas duas regiões homogêneas.

Quadro 17 – Modelos de regressão selecionados para a representação da vazão específica mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($q_{7,10}$, $L s^{-1} km^{-2}$) e os parâmetros estatísticos a eles associados, nas duas regiões hidrologicamente homogêneas

Variáveis associadas aos parâmetros			R ² _a	σF	F(%)	Modelos ajustados	Parâmetros ajustados			
X ₁	X ₂	X ₃					β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
Região I										
S _m	P _a		0,98	1,118	0,11	Exponencial	9,232685	0,049043	-0,01343	
S _m	P _a		0,97	1,133	0,16	Potencial	1,153 x	2,260004	-17,7967	
D _d	P _{ss}		0,96	1,164	0,29	Exponencial	9,632022	-27,2527	-0,01893	
D _d	P _{ss}		0,94	0,0004	0,55	Logarítmico	0,023078	-0,02609	-0,00805	
D _d	P _{ss}		0,94	0,0004	0,59	Linear	0,043816	-0,07260	-0,00005	
A	P _a		0,92	0,0066	0,93	Recíproco	-9604,80	-0,01018	7,943788	
S _m	P _a		0,89	0,0006	1,48	Logarítmico	0,295395	0,009320	-0,04573	
D _d	S _m	P _{ss}	0,89	0,0006	1,65	Logarítmico		-0,02384	0,007773	-0,00888
S _m	P _a		0,89	0,0006	1,68	Linear	0,038353	0,000208	-0,00003	
D _d	S _m	P _{ts}	0,82	0,0008	3,39	Linear		-0,03877	-0,00014	0,000764
A	L	P _{ss}	0,74	1,508	5,90	Potencial		2,061987	-3,51159	-1,11259
D _d	P _{ss}		0,72	1,533	1,94	Potencial		-8,14328	-2,47350	
Região II										
A	P _a		0,94	1,167	0,67	Potencial	4,19 x 10 ⁻⁹	-0,38322	2,442195	
L	P _a		0,87	1,246	1,94	Potencial	1,61 x 10 ⁻⁷	-0,68016	1,957644	
L	P _{ss}		0,82	0,027	0,75	Recíproco		0,351101	0,416090	
A	P _{ts}		0,79	0,024	1,11	Recíproco		0,003718	2,315812	
A	P _{ss}		0,77	0,024	1,27	Recíproco		0,003071	0,610917	
A	P _a		0,75	0,023	1,50	Recíproco		0,003639	0,054517	
A	P _a		0,72	0,003	1,94	Logarítmico		-0,00296	0,004838	
S _m	P _{ss}		0,72	1,395	6,73	Exponencial	-3,06118	0,044672	-0,02255	
L	P _{ss}		0,71	1,402	2,10	Potencial		-0,53760	-0,41776	
A	P _{ts}		0,71	0,0031	2,15	Logarítmico		-0,00264	0,009164	
A	P _{ss}		0,70	0,0032	2,24	Logarítmico		-0,00321	0,007493	
L	P _{ss}		0,70	0,0032	2,27	Logarítmico		-0,00610	0,008107	

Quadro 18 – Modelos de regressão recomendados para a representação da vazão específica mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($q_{7,10}$, $L s^{-1} km^{-2}$) e parâmetros estatísticos a eles associados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas

Região	Modelos recomendados	R^2_a	σF	F(%)
I	$q_{7,10} = (-9604,80 - 0,01018 A + 7,943788 P_a)^{-1}$	0,92	0,006	0,93
II	$q_{7,10} = 4,19 \times 10^{-9} A^{-0,38322} P_a^{2,442195}$	0,94	1,167	0,67

4.4.3. Regionalização da Q_{90} e Q_{95}

Os modelos de regressão selecionados para a representação das vazões correspondentes aos níveis de permanência de 90 e 95% que apresentaram ajustes satisfatórios e, portanto, possíveis de serem aplicados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas e os parâmetros estatísticos a eles associados são apresentados nos Quadros 19 e 20, respectivamente.

No Quadro 21 estão apresentados os modelos de regressão recomendados para a representação da Q_{90} e Q_{95} nas duas regiões homogêneas, os quais foram obtidos a partir dos resultados apresentados nos Quadros 19 e 20, tendo sido adotados como critérios para a escolha os mesmos apresentados na regionalização da $Q_{7,10}$.

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 21 evidencia-se que o modelo de regressão múltipla potencial utilizando área de drenagem e precipitação total anual foi o que melhor representou a Q_{90} e a Q_{95} nas duas regiões homogêneas. Tendo em vista que a área de drenagem é uma das características físicas da bacia mais fáceis de ser obtida assim como a precipitação total anual representa dentre as características climáticas estudadas a mais facilmente determinável é também a que melhor influencia as vazões mínimas por ser esta precipitação a responsável pelo abastecimento do lençol freático e portanto a mais importante fonte de alimentação das nascentes no períodos seco do ano quando são observadas as menores vazões em um curso d'água.

Quadro 19 – Modelos de regressão selecionados para a representação da vazão correspondente ao nível de permanência de 90% (Q_{90} , $m^3 s^{-1}$) e parâmetros estatísticos a eles associados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas

Variáveis associadas aos parâmetros			R ² a	σF	F(%)	Modelos ajustados	Parâmetros ajustados			
X ₁	X ₂	X ₃					β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
Região I										
A	D _d	P _{ss}	0,96	1,25	0,3286	Potencial		1,216412	-9,85072	-3,06996
A	D _d	P _{ts}	0,95	1,30	0,5144	Exponencial		0,000092	-16,5385	0,257502
L	D _d	P _{ss}	0,94	1,30	0,5394	Potencial		2,353442	-16,6523	-4,48657
A	P _a		0,94	1,32	0,5985	Potencial	3,59 x 10 ³⁵	0,972284	-12,1827	
A	L	P _{ss}	0,92	1,38	0,9739	Potencial		2,694640	-2,97321	-0,97144
L	D _d	P _{ss}	0,95	9,21	0,4884	Logarítmico		80,19689	-432,082	-142,749
A	P _{ts}		0,93	10,49	0,7219	Logarítmico	-1688,13	41,43209	387,9583	
L	P _a		0,91	12,14	1,1188	Logarítmico	3.042,090	58,99014	-461,732	
A	P _a		0,88	14,32	1,8366	Logarítmico	2.440,045	33,68685	-376,502	
A			0,72	1,87	2,0182	Exponencial	2,281857	0,000064		
A	P _{ts}		0,70	1,90	2,2769	Exponencial		0,000070	0,066045	
Região II										
L	P _a		0,98	1,15	0,0593	Potencial	5,12 x10 ⁻¹¹	1,148363	2,998274	
A	P _a		0,98	1,18	0,0957	Potencial	1,39 x 10 ⁻⁰⁸	0,633167	2,273145	

Continua...

Quadro 19 - Continuação.

Variáveis associadas aos parâmetros			R ² a	σF	F(%)	Modelos ajustados	Parâmetros ajustados			
X ₁	X ₂	X ₃					β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
A	S _m	P _a	0,98	1,19	0,1024	Exponencial		0,000044	-0,04243	0,003226
L	S _m	P _a	0,97	1,24	0,1958	Exponencial		0,004711	-0,03380	0,002787
L	D _d	P _a	0,96	1,30	0,3558	Exponencial		0,004594	-3,65239	0,003168
L	S _m	P _{ts}	0,95	19,11	0,4479	Logarítmico		90,21005	98,40661	-200,608
A			0,94	1,38	0,0870	Potencial	0,112555	0,710227		
A	P _{ss}		0,93	1,40	0,1000	Potencial		0,733497	-0,47745	
A	P _{ts}		0,93	1,41	0,1093	Potencial		0,694558	-0,57700	
A	P _a		0,92	1,43	0,1316	Potencial		0,707926	-0,29637	
A	S _m		0,91	1,47	0,1688	Potencial		0,655107	-0,47723	
L			0,90	1,52	0,2368	Potencial	0,069701	1,312318		
L	P _{ss}		0,89	1,53	0,2567	Potencial		1,371235	-0,59268	
L	P _{ts}		0,89	1,55	0,2883	Potencial		1,275141	-0,69734	
L	P _a		0,88	1,58	0,3478	Exponencial		0,004811	0,001959	
L	P _a		0,87	1,59	0,3642	Potencial		1,296009	-0,35336	
S _m	P _{ss}		0,82	1,74	3,3118	Potencial	8,02 x 10 ⁻¹⁴	-2,80596	0,831752	

Quadro 20 – Modelos de regressão selecionados para a representação da vazão correspondente ao nível de permanência de 95% (Q_{95} , $m^3 s^{-1}$) e parâmetros estatísticos a eles associados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas

Variáveis associadas aos parâmetros			R ² a	σF	F(%)	Modelos ajustados	Parâmetros ajustados			
X ₁	X ₂	X ₃					β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
Região I										
A	P _a		0,94	1,34	0,6558	Potencial	2,4539 x10 ⁴¹	0,998580	-14,1059	
A	D _d	P _{ss}	0,93	1,35	0,7138	Potencial		1,264607	-10,9198	-3,35229
A	D _d	P _{ts}	0,93	1,35	0,6946	Exponencial		0,000093	-17,8151	0,268975
L	D _d	P _{ss}	0,91	1,42	1,1049	Potencial		2,441465	-17,9470	-4,81250
A	D _d	P _{ss}	0,93	9,77	0,8137	Logarítmico		37,07481	-192,430	-86,6550
L	D _d	P _{ss}	0,94	8,96	0,6286	Logarítmico		72,38215	-405,222	-131,396
A	P _{ts}		0,92	10,12	0,9054	Logarítmico	-1522,32	37,04442	350,6775	
L	P _a		0,90	11,50	1,3264	Logarítmico	2.818,323	52,68143	-426,457	
A	L	P _{ss}	0,90	1,46	1,4353	Potencial		2,929350	-3,33772	-1,02856
A	P _a		0,89	12,23	1,5974	Logarítmico	2.297,218	30,28151	-352,904	
L	P _a		0,75	1,82	5,4963	Potencial	1,3191 x 10 ⁴⁶	1,628988	-15,5725	
Região II										
L	P _a		0,98	1,15	0,0598	Potencial	3,20 x 10 ⁻¹¹	1,134256	3,066415	
A	P _a		0,98	1,17	0,0755	Potencial	8,37 x 10 ⁻⁹	0,626162	2,345008	

Continua...

Quadro 20 - Continuação.

Variáveis associadas aos parâmetros			R ² a	σF	F(%)	Modelos ajustados	Parâmetros ajustados			
X ₁	X ₂	X ₃					β ₀	β ₁	β ₂	β ₃
A	S _m	P _a	0,98	1,20	0,1237	Exponencial		0,000044	-0,04306	0,003219
L	S _m	P _a	0,97	1,25	0,2317	Exponencial		0,004640	-0,03456	0,002787
L	D _d	P _a	0,95	1,30	0,3746	Exponencial		0,004518	-3,77095	0,003188
A			0,93	1,39	0,0925	Potencial	0,111951	0,705658		
A	P _{ss}		0,93	1,40	0,1048	Potencial		0,729378	-0,47933	
A	P _{ts}		0,93	1,42	0,1169	Potencial		0,689721	-0,57784	
A	P _a		0,92	1,44	0,1406	Potencial		0,703021	-0,29670	
A	S _m		0,91	1,47	0,1725	Potencial		0,651409	-0,48095	
L			0,89	1,53	0,2631	Potencial	0,070222	1,301937		
L	P _{ss}		0,89	1,54	0,2825	Potencial		1,361200	-0,59156	
L	P _{ts}		0,88	1,56	0,3195	Potencial		1,264424	-0,69475	
L	S _m		0,88	1,57	0,3231	Potencial		1,209158	-0,61293	
L	P _a		0,87	1,61	0,4012	Potencial		1,284834	-0,35177	

Quadro 21 – Modelos de regressão recomendados para a representação das vazões correspondentes aos níveis de 90% (Q_{90} , $m^3 s^{-1}$) e 95% (Q_{95} , $m^3 s^{-1}$) de permanência e parâmetros estatísticos a eles associados nas duas regiões hidrologicamente homogêneas

Modelos recomendados	R^2_a	σF	F(%)
Região I			
$Q_{90} = 3,59 \times 10^{35} A^{0,972284} P_a^{-12,1827}$	0,94	1,32	0,5985
$Q_{95} = 2,4539 \times 10^{41} A^{0,998580} P_a^{-14,1059}$	0,94	1,34	0,6558
Região II			
$Q_{90} = 1,39 \times 10^{-8} A^{0,633167} P_a^{2,273145}$	0,98	1,15	0,0593
$Q_{95} = 8,37 \times 10^{-9} A^{0,626162} P_a^{2,345008}$	0,98	1,17	0,0755

4.5. Regionalização de vazões mínimas baseada na utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas

4.5.1. Regionalização da $Q_{7,10}$

No Quadro 22 estão apresentados os valores estimados das vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$ Est), obtidos com base na metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas, para os 12 postos fluviométricos cujas vazões foram supostas como desconhecidas apenas para efeito de teste em posteriores comparações entre os valores das vazões estimadas com a aplicação da metodologia citada e os valores obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 observadas.

Os resultados apresentados no Quadro 22 foram conseguidos por meio da aplicação das equações 29, 30, 31 e 32, após o enquadramento de cada caso específico de acordo a sua localização em relação aos postos fluviométricos existentes na rede de drenagem. Procurou-se contemplar todas as quatro situações abordadas na metodologia em questão, tendo sido utilizado como base de dados os valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 observadas nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 22 observa-se que, para a bacia estudada, a metodologia em questão apresentou uma melhor estimativa da vazão (menor erro relativo) para as situações que se enquadram no caso 2. Nesses casos, a vazão na seção sem observações foi obtida pela interpolação de duas vazões conhecidas, uma a montante e outra a jusante da seção analisada. Ainda com relação

a esse mesmo caso observou-se uma situação incomum demonstrada na predição da vazão do posto 21850000 (incógnita), utilizando os postos 21750000 a montante e 21890000 a jusante como apoio, em que a vazão estimada foi superior à vazão a jusante utilizada na equação. Sabendo-se que a equação utilizada nesse caso é fundamentada no princípio da interpolação, o resultado da vazão estimada por este procedimento não poderia ser um valor fora do intervalo das duas estações utilizadas como apoio (montante e jusante). Observa-se, então, que a metodologia em questão merece um certo cuidado quando aplicada em situações de interpolação, em que as áreas das estações envolvidas são proporcionalmente muito diferentes.

Quadro 22 – Valores de $Q_{7,10}$ estimados com a utilização da metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informação geográfica ($Q_{7,10}$ Est, $m^3 s^{-1}$) e valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries observadas de Q_7 nas estações fluviométricas usadas na regionalização ($Q_{7,10}$ Prob, $m^3 s^{-1}$)

Código da Estação	Área (km ²)	Caso*	$Q_{7,10}$ Prob	$Q_{7,10}$ Est	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	1	4,41	14,10	219,73
21300000	4.145,11	4	24,10	3,95	83,61
21500000	23.090,13	2	44,20	36,86	16,61
21510000	1.141,85	4	5,74	2,01	64,98
21560000	3.445,51	4	22,16	7,08	68,05
21580000	396,26	4	6,17	2,15	65,15
21600000	30.811,32	2	71,45	59,24	17,09
21650000	41.305,87	2	80,29	140,44	74,92
21750000	1.369,10	1	25,22	12,09	52,06
21850000	13.597,32	2	120,12	155,37	29,35
21890000	18.585,14	3	110,23	164,18	48,94
21900000	59.955,13	3	203,85	116,54	42,83
Erro Méd.					65,28
Coef. N-S.**					0,59

*Caso = Enquadramento das estações em cada situação preconizada na metodologia (CHAVES et al. 2002)

**Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970).

Para os casos 1 e 3 as vazões estimadas apresentaram maior erro relativo que no caso 2, o que demonstrou uma menor eficiência na estimativa das vazões por meio do procedimento da extrapolação de uma vazão a montante (caso 1) ou a jusante (caso 3) tomando como base o princípio da razão de áreas de drenagem entre os dois postos. Quando as áreas das sub-bacias envolvidas têm uma diferença

proporcional muito grande, como na situação encontrada na estimativa da vazão no local do posto 21220000 utilizando como estação para extrapolação a 21500000 com área muito superior, caracterizada como caso 1, que acarretou uma estimada de vazão com um erro relativo muito alto (219,73%).

O caso 4 acabou sendo menos eficiente que os casos 2 e 3, porém mais eficiente que o caso 1 na estimativa das vazões mínimas para a sub-bacia do rio Paranã.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe apresentou um índice de 0,59 considerado um valor baixo comprovando assim baixa eficiência da metodologia de regionalização de vazões mínimas avaliada para a sub-bacia estudada, tendo em vista que quanto menor este índice, que pode variar de 0 a 1, menor será a eficiência da metodologia avaliada.

CHAVES et al. (2002) aplicando a metodologia em questão para a bacia do rio Itapicuru, localizada na porção Nordeste do Estado da Bahia, com área de 36.440 km² e uma rede de postos fluviométricos de 11 estações, verificaram que os resultados indicaram uma melhor eficiência da metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas em relação à metodologia tradicional proposta pela ELETROBRÁS (1985), com base em dois índices: o erro relativo, que foi de 45,1% no método alternativo contra 289,7% para o método tradicional, e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, que foi de 0,88 no método alternativo e de 0,73 no tradicional.

4.5.2. Regionalização da Q₉₀ e Q₉₅

O Quadro 23 apresenta os valores das vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 90 (Q₉₀ Est, m³ s⁻¹) e 95% (Q₉₅ Est, m³ s⁻¹) estimadas com a utilização da metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informação geográfica para os 12 postos fluviométricos. O procedimento usado neste caso foi idêntico ao utilizado para a regionalização da Q_{7,10}, descrito no item anterior.

Os resultados apresentados no Quadro 23 foram conseguidos por meio da aplicação das equações 29, 30, 31 e 32, após o enquadramento de cada caso específico de acordo com a sua localização em relação aos postos fluviométricos existentes na rede de drenagem e utilizando como base de dados os valores observados de Q₉₀ e Q_{95%} nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Quadro 23 – Vazões mínimas estimadas pela metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informação geográfica associadas as permanências de 90 (Q_{90} Est, $m^3 s^{-1}$) e 95% (Q_{95} Est, $m^3 s^{-1}$) e valores observados de Q_{90} (Q_{90} Obs, $m^3 s^{-1}$) e Q_{95} (Q_{95} Obs, $m^3 s^{-1}$) nas estações utilizadas na regionalização

Código da Estação	Área (km ²)	Caso*	Q_{90} Obs	Q_{90} Est	Erro relat. (%)	Q_{95} Obs	Q_{95} Est	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	1	7,93	17,96	126,48	5,89	16,14	174,02
21300000	4.145,11	4	30,03	5,96	80,15	28,63	4,93	82,78
21500000	23.090,13	2	55,70	50,70	8,98	50,61	44,53	12,01
21510000	1.141,85	4	7,10	2,57	63,80	6,68	2,31	65,42
21560000	3.445,51	4	24,08	9,03	62,50	23,50	8,22	65,02
21580000	396,26	4	6,98	2,31	66,91	6,64	2,27	65,81
21600000	30.811,32	2	92,62	75,42	18,57	84,61	67,86	19,80
21650000	41.305,87	2	104,69	163,35	56,03	92,08	151,43	64,45
21750000	1.369,10	1	26,68	13,45	49,59	25,80	13,00	49,61
21850000	13.597,32	2	133,61	168,02	25,75	129,15	161,52	25,06
21890000	18.585,14	3	125,55	182,62	45,46	119,06	176,53	48,27
21900000	59.955,13	3	238,26	151,95	36,23	221,50	133,65	39,66
Erro					53,37	59,36		
Coef. N-					0,69	0,64		

* Caso = Enquadramento das estações em cada situação preconizada na metodologia (CHAVES et al. 2002)

** Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

Os valores de Q_{90} e Q_{95} apresentados no Quadro 23 seguem a mesma tendência observada para a $Q_{7,10}$, com melhores resultados (erro relativo menor) para os postos enquadrados no caso 2, seguido dos casos 3 e 4, e por último com maior erro relativo os postos enquadrados no caso 1.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe apresentou índices de 0,69 e 0,64 para a Q_{90} e Q_{95} , respectivamente, portanto considerados baixos, o que comprovam também a baixa eficiência da metodologia avaliada para essas vazões.

4.6. Regionalização de vazões mínimas baseada na metodologia de vazão específica

4.6.1. Regionalização da $Q_{7,10}$

No Quadro 24 estão apresentados os valores estimados das vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$ Est), obtidos com base na metodologia de vazões específicas para os 12 postos fluviométricos da sub-bacia. Também para a aplicação dessa metodologia as vazões foram supostas como

desconhecidas apenas para efeito de teste nas comparações entre os valores estimados das vazões e os valores obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 observadas ($Q_{7,10}$ Prob).

Os resultados apresentados no Quadro 24 foram conseguidos por meio da aplicação das equações 29 e 33, descritas nos itens 3.9.1 e 3.10.2, respectivamente, de acordo com a localização na rede de drenagem da seção onde se deseja conhecer a vazão em relação aos postos fluviométricos existentes. Procurou-se contemplar as quatro situações preconizadas na metodologia estudada, utilizando-se como base de dados os valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 observadas nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Quadro 24 - Valores de $Q_{7,10}$ estimados com a utilização da metodologia de vazão específica, ($Q_{7,10}$ Est, $m^3 s^{-1}$) e valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries observadas de Q_7 nas estações fluviométricas usadas na regionalização ($Q_{7,10}$ Prob, $m^3 s^{-1}$)

Código da Estação	Área (km²)	$Q_{7,10}$ Prob	$Q_{7,10}$ Est	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	4,41	14,10	219,73
21300000	4.145,11	24,10	7,10	70,54
21500000	23.090,13	44,20	49,37	11,70
21510000	1.141,85	5,74	2,07	63,94
21560000	3.445,51	22,16	10,70	51,71
21580000	396,26	6,17	2,20	64,34
21600000	30.811,32	71,45	59,50	16,72
21650000	41.305,87	80,29	119,13	48,37
21750000	1.369,10	25,22	12,09	52,06
21850000	13.597,32	120,12	85,56	28,77
21890000	18.585,14	110,23	164,18	48,94
21900000	59.955,13	203,85	116,54	42,83
Erro Méd.				60,00
Coef. N-S.*				0,65

*Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

Analisando os resultados apresentados no Quadro 24 percebe-se que a metodologia em questão apresentou um menor erro relativo na estimativa de vazões, em situações em que a seção onde se deseja determinar a vazão encontra-se localizada entre dois postos de vazões conhecidas. Já para as situações em que essa seção está localizada a montante ou a jusante do posto de vazão conhecida, a metodologia apresentou um maior erro relativo na predição das vazões mínimas.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe apresentou um índice de 0,65 considerado um valor baixo o que comprova assim baixa eficiência da metodologia

de regionalização de vazões mínimas avaliada para a sub-bacia estudada, tendo em vista que este índice varia de 0 a 1.

4.6.2. Regionalização da Q_{90} e Q_{95}

O Quadro 25 apresenta os valores das vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 90 (Q_{90} Est, $m^3 s^{-1}$) e 95% (Q_{95} Est, $m^3 s^{-1}$), estimadas pela metodologia de vazão específica para os 12 postos fluviométricos, onde as vazões foram supostas como desconhecidas apenas para efeito de teste nas comparações entre os valores das vazões estimados pela metodologia e os valores observados em cada posto fluviométrico.

Os resultados apresentados no Quadro 25 também foram conseguidos por meio da aplicação das equações 29 e 33, descritas nos itens 3.9.1 e 3.10.2, respectivamente, de acordo com a localização na rede de drenagem da seção onde se deseja estimar a vazão em relação aos postos fluviométricos existentes, visando o enquadramento das quatro situações preconizadas na metodologia em questão e utilizando como base de dados os valores observados de Q_{90} e $Q_{95\%}$ nas estações fluviométricas da sub-bacia em estudo.

Quadro 25 – Vazões mínimas estimadas pela metodologia de vazão específica associadas às permanências de 90 (Q_{90} Est, $m^3 s^{-1}$) e 95% (Q_{95} Est, $m^3 s^{-1}$), e valores observados de Q_{90} (Q_{90} Obs, $m^3 s^{-1}$) e Q_{95} (Q_{95} Obs, $m^3 s^{-1}$) nas estações fluviométricas utilizadas na regionalização

Código da Estação	Área (km ²)	Q_{90} Obs	Q_{90} Est	Erro relat. (%)*	Q_{95} Obs	Q_{95} Est	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	7,93	17,96	126,48	5,89	16,14	174,02
21300000	4.145,11	30,03	9,15	69,53	28,63	8,20	71,36
21500000	23.090,13	55,70	64,73	16,21	50,61	58,69	15,97
21510000	1.141,85	7,10	2,64	62,82	6,68	2,40	64,07
21560000	3.445,51	24,08	13,86	42,44	23,5	12,70	45,96
21580000	396,26	6,98	2,45	64,90	6,64	2,40	63,86
21600000	30.811,32	92,62	76,47	17,44	84,61	68,19	19,41
21650000	41.305,87	104,69	145,06	38,56	92,08	133,90	45,42
21750000	1.369,10	26,68	13,45	49,59	25,8	13,00	49,61
21850000	13.597,32	133,61	96,86	27,51	129,15	92,00	28,77
21890000	18.585,14	125,55	182,62	45,46	119,06	176,53	48,27
21900000	59.955,13	238,26	151,95	36,23	221,5	133,65	39,66
Erro Méd.				50,00	55,50		
Coef. N-S.*				0,73	0,68		

*Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

Analisando os resultados do Quadro 25 nota-se que tanto a Q_{90} quanto a Q_{95} seguem a mesma tendência observada para a $Q_{7,10}$, com valores percentuais de erro relativo bastante semelhantes na determinação das três vazões mínimas de referência pela metodologia estudada.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe apresentou índices de 0,73 e 0,68 para a Q_{90} e Q_{95} , respectivamente, portanto considerados baixos, o que comprovam também a baixa eficiência da metodologia para avaliação dessas vazões.

4.7.Comparação das metodologias de regionalização de vazões utilizadas

4.7.1. Vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$)

No Quadro 26 estão apresentados os valores das vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos estimados pelas seguintes metodologias: utilização de equações de regressão regionais ($Q_{7,10}$ Est 1), interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas ($Q_{7,10}$ Est 2) e vazão específica ($Q_{7,10}$ Est 3), assim como os valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries de Q_7 observadas nas estações fluviométricas usadas na regionalização da bacia em estudo ($Q_{7,10}$ Prob).

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 26 verifica-se que a metodologia de regionalização de vazões mínimas baseada no princípio da utilização de equações de regressões aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas, proposta pela ELETROBRÁS (1985), foi a que apresentou o menor erro relativo médio (16,11%), associado ao maior valor de coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (0,97), para as condições da bacia estudada. Isto comprova que mesmo com a baixa densidade de postos hidrométricos verificada na bacia estudada, o que impossibilitou dividi-la em um número maior de regiões homogêneas, resultando em apenas duas regiões com áreas relativamente grandes, o que na prática representaria uma baixa homogeneidade das mesmas, ainda assim pôde verificar-se que a metodologia em questão foi mais eficiente na predição das vazões mínimas regionalizadas para a sub-bacia do rio Paranã.

A metodologia baseada no princípio de interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas apresentou o maior erro relativo médio (65,28%), associado ao menor valor de coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (0,59), o que comprova que essa metodologia foi a menos eficiente para as vazões

estudadas na sub-bacia do rio Paranã. Estes resultados foram diferentes daqueles encontrados por CHAVES et al. (2002) que aplicaram essa metodologia alternativa à bacia do rio Itapicuru, no Estado da Bahia, com área de 36.440 km² e uma rede de postos fluviométricos de 11 estações, onde os resultados indicaram uma melhor eficiência em relação à metodologia proposta pela ELETROBÁS (1985), com base em dois índices: erro relativo de 45% no método alternativo contra 289,7% para o método ELETROBRÁS (1985), e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, que foi de 0,88 no método alternativo e de 0,73 no ELETROBRÁS (1985).

Os resultados encontrados demonstram que apesar da metodologia não apresentar como limitação o número de graus de liberdade baixo para a análise de regressão associada a regiões homogêneas com número reduzido de postos fluviométricos, os erros relativos são expressivos quando as áreas de drenagens associadas a uma interpolação ou extrapolação de vazões são de valores proporcionalmente muito diferentes, mesmo quando a regionalização é feita dentro de uma mesma região homogênea. Conclui-se, portanto, que a metodologia alternativa é mais sensível a grandes diferenças de áreas das sub-bacias envolvidas nos processos de interpolação ou extrapolação do que às distâncias ao longo do canal que as separam.

A metodologia da vazão específica apresentou o segundo melhor resultado levando-se em conta os valores do erro relativo médio (60%) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (0,65). Nesta metodologia, os menores valores de erro relativo foram obtidos para as situações da bacia em que as seções onde se deseja estimar a vazão estão localizadas entre dois postos de vazões conhecidas. Já para a estimativa de vazões em seções da bacia a montante ou a jusante de postos com vazões conhecidas, o erro relativo tende a ser maior.

Quadro 26 – Valores de vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno 10 anos, estimados pelas três metodologias testadas no estudo de regionalização ($Q_{7,10}$ Est, $m^3 s^{-1}$), e valores de $Q_{7,10}$ obtidos por análise probabilística das séries observadas de Q_7 nas estações fluviométricas usadas na regionalização ($Q_{7,10}$ Prob, $m^3 s^{-1}$)

Código da Estação	Área (km²)	Caso*	$Q_{7,10}$ Prob	$Q_{7,10}$ Est 1	Erro relat. (%)	$Q_{7,10}$ Est 2	Erro relat. (%)	$Q_{7,10}$ Est 3	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	1	4,41	4,54	2,95	14,10	219,73	14,10	219,73
21300000	4.145,11	4	24,10	11,86	50,79	3,95	83,61	7,10	70,54
21500000	23.090,13	2	44,20	40,65	8,03	36,86	16,61	49,37	11,70
21510000	1.141,85	4	5,74	8,51	48,28	2,01	64,98	2,07	63,94
21560000	3.445,51	4	22,16	27,00	21,84	7,08	68,05	10,70	51,71
21580000	396,26	4	6,17	5,70	7,62	2,15	65,15	2,20	64,34
21600000	30.811,32	2	71,45	64,19	10,16	59,24	17,09	59,50	16,72
21650000	41.305,87	2	80,29	92,41	15,10	140,44	74,92	119,13	48,37
21750000	1.369,10	1	25,22	23,74	5,87	12,09	52,06	12,09	52,06
21850000	13.597,32	2	120,12	117,53	2,16	155,37	29,35	85,56	28,77
21890000	18.585,14	3	110,23	120,38	9,21	164,18	48,94	164,18	48,94
21900000	59.955,13	3	203,85	180,62	11,40	116,54	42,83	116,54	42,83
Erro Méd.					16,11		65,28		60,00
Coef. N-S.**					0,97		0,59		0,65

*Caso = Enquadramento das estações em cada situação preconizada na metodologia (CHAVES et al. 2002)

**Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

4.7.2. Vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 90 e 95% (Q₉₀ e Q₉₅)

Os Quadros 27 e 28 apresentam os valores das vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 90 e 95% estimados com base na utilização das seguintes metodologias: utilização de equações de regressão regionais (Q₉₀ Est 1 e Q₉₅ Est 1), interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas (Q₉₀ Est 2 e Q₉₅ Est 2) e vazão específica ponderada (Q₉₀ Est 3 e Q₉₅ Est 3), para a sub-bacia em estudo, assim como os valores observados de Q₉₀ e Q₉₅ para cada estação fluviométrica utilizada na regionalização (Q₉₀ Obs e Q₉₅ Obs).

Observa-se nos resultados apresentados nos Quadros 27 e 28, que os valores de erros relativos médios e dos coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe para as vazões correspondentes aos níveis de permanência de 90 e 95%, estimados com base nas três metodologias utilizadas na regionalização seguem a mesma tendência apresentada para a Q_{7,10}. Os melhores índices foram obtidos com aplicação da metodologia que utiliza equações de regressões regionais, seguida da vazão específica e, por último, da interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas.

Quadro 27 – Vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 90%, estimadas com a utilização das três metodologias testadas no estudo de regionalização (Q_{90} Est, $m^3 s^{-1}$), e valores observados de Q_{90} (Q_{90} Obs, $m^3 s^{-1}$)

Código da Estação	Área (km^2)	Caso*	Q_{90} Obs	Q_{90} Est 1	Erro relat. (%)	Q_{90} Est 2	Erro relat. (%)	Q_{90} Est 3	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	1	7,93	7,99	0,76	17,96	126,48	17,96	126,48
21300000	4.145,11	4	30,03	20,36	32,20	5,96	80,15	9,15	69,53
21500000	23.090,13	2	55,70	66,18	18,82	50,70	8,98	64,73	16,21
21510000	1.141,85	4	7,10	8,86	24,76	2,57	63,80	2,64	62,82
21560000	3.445,51	4	24,08	30,37	26,12	9,03	62,50	13,86	42,44
21580000	396,26	4	6,98	6,29	9,89	2,31	66,91	2,45	64,90
21600000	30.811,32	2	92,62	88,59	4,35	75,42	18,57	76,47	17,44
21650000	41.305,87	2	104,69	108,08	3,24	163,35	56,03	145,06	38,56
21750000	1.369,10	1	26,68	25,52	4,35	13,45	49,59	13,45	49,59
21850000	13.597,32	2	133,61	129,52	3,06	168,02	25,75	96,86	27,51
21890000	18.585,14	3	125,55	134,90	7,45	182,62	45,46	182,62	45,46
21900000	59.955,13	3	238,26	210,91	11,48	151,95	36,23	151,95	36,23
Erro Méd.					12,21	53,37		50,00	
Coef. N-S.**					0,97	0,69		0,73	

* Caso = Enquadramento das estações em cada situação preconizada na metodologia (CHAVES et al. 2002)

**Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

Quadro 28– Vazões mínimas correspondentes aos níveis de permanência de 95%, estimadas com a utilização das três metodologias testadas no estudo de regionalização (Q_{95} Est, $m^3 s^{-1}$), e valores observados de Q_{95} (Q_{95} Obs, $m^3 s^{-1}$)

Código da Estação	Área (km ²)	Caso*	Q_{95} Obs	Q_{95} Est 1	Erro relat. (%)	Q_{95} Est 2	Erro relat. (%)	Q_{95} Est 3	Erro relat. (%)
21220000	7.365,86	1	5,89	5,95	1,02	16,14	174,02	16,14	174,02
21300000	4.145,11	4	28,63	18,90	33,99	4,93	82,78	8,20	71,36
21500000	23.090,13	2	50,61	59,46	17,49	44,53	12,01	58,69	15,97
21510000	1.141,85	4	6,68	8,49	27,10	2,31	65,42	2,40	64,07
21560000	3.445,51	4	23,50	28,93	23,11	8,22	65,02	12,70	45,96
21580000	396,26	4	6,64	6,04	9,04	2,27	65,81	2,40	63,86
21600000	30.811,32	2	84,61	80,35	5,03	67,86	19,80	68,19	19,41
21650000	41.305,87	2	92,08	97,43	5,81	151,43	64,86	133,90	45,42
21750000	1.369,10	1	25,80	24,78	3,95	13,00	49,61	13,00	49,61
21850000	13.597,32	2	129,15	124,47	3,62	161,52	25,06	92,00	28,77
21890000	18.585,14	3	119,06	128,72	8,11	176,53	48,27	176,53	48,27
21900000	59.955,13	3	221,50	197,75	10,72	133,65	39,66	133,65	39,66
Erro Méd.					12,42	60,00		55,53	
Coef. N-S.**					0,98	0,64		0,68	

* Caso = Enquadramento das estações em cada situação preconizada na metodologia (CHAVES et al. 2002)

**Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970)

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu as seguintes conclusões:

- o modelo digital de elevação mostrou-se hidrológicamente consistente, o que possibilitou a automatização na determinação das características físicas da bacia, permitindo a aplicação dos resultados da regionalização de forma mais fácil e rápida pelos interessados.

- os modelos probabilísticos Log-Normal a dois parâmetros e Log-Normal a três parâmetros foram os que melhor se ajustaram aos dados de vazão mínima com sete dias de duração (Q_7) para as regiões homogêneas I e II, respectivamente.

- a área de drenagem e a precipitação total anual foram as características que melhor explicaram o comportamento das vazões mínimas de referência, regionalizadas pelo método Eletrobrás, para as duas regiões homogêneas estudadas.

- a metodologia de interpolação e extrapolação em sistemas de informações geográficas apresentou baixa eficiência na estimativa de vazões para as situações em que as sub-bacias envolvidas na extrapolação ou interpolação apresentam grandes diferenças de áreas.

- para a sub-bacia estudada, a metodologia da vazão específica foi mais eficiente na estimativa de vazões em situações onde a seção em que se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazões conhecidas.

- a melhor metodologia de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã foi a baseada na utilização de equações de regressão regionais, com erro relativo médio de 13,58% e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe médio de 0,97.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB´SABER, A. **Domínios morfoclimáticos e fitogeográficos sul-americanos**. Rio de Janeiro, IBGE, 1997.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA. **Região hidrográfica do Tocantins**. 2003. HidroWeb-Sistema de Informações Hidrográficas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2004.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas (Coord.). **Inventário de estações fluviométricas**. Brasília, 2001a.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas (Coord.). **Inventário de estações pluviométricas**. Brasília, 2001b.

BAENA, L. G. N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente**. 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CARONI, E. et al. **Valutazione delle piene**. Milano: Consiglio Nazionale Delle Ricerche, PF Conservazione Del Suolo, 1982. (Publicazione, 165).

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7(3): 43-51, 2002.

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia Amazônica**. 2002. 111 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985. 2 v.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985. p.46-48.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ARC/INFO v. 7.1.1. **Help on Line**. Redlands, Califórnia: ESRI, 1997.

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização de vazão máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia do Alto e Médio São Francisco. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 2002 p. 1-142. (Boletim Técnico, n. 6).

EUCLYDES, H. P. et al. Estudo de vazão máxima, mínima e média de longo período para as sub-bacias dos rios Verde Grande, Pardo e Jequitaiá. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 1994a p. 03-61. (Boletim Técnico, n. 1).

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização de vazão máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia do Rio Jequitinhonha. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas para o Estado de Minas Gerais**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 1994b p. 3-79. (Boletim Técnico, n. 2).

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização de vazão máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia do Rio Doce. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas para o Estado de Minas Gerais**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 1996 p. 1-96. (Boletim Técnico, n. 3).

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização de vazão máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia do Rio Paracatu. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas para o Estado de Minas Gerais**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 1997, p. 1-80. (Boletim Técnico, n. 4).

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização de vazão máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia do Rio São Francisco. In: **Tecnologia para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas**. Viçosa: UFV/RURALMINAS, 2001b p. 1-124. (Boletim Técnico, n. 5).

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2. p. 81-105, 2001a.

EUCLYDES, H. P. et al. **RH3.0 Regionalização hidrológica**: Manual do programa. Viçosa: UFV, DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS. 1999. 149 p.

FILL, H. H. Informações hidrológicas. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987. (Coleção ABRH de Recursos hídricos).

FURTADO, A. M. **Metodologia para extração de informações hidrológicas a partir de um modelo digital de elevação utilizando sistemas de informações geográficas**. 1998. 42 p. Monografia apresentada no I Curso de Especialização em Geoprocessamento, IGC/UFMG/CETEC, Belo Horizonte, 1998.

GARRIDO, R. J. S. Subprojeto 4.2B – Avaliação dos mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável da bacia do rio São Francisco. In: _____. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco**. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003. 335 p. (Relatório Final).

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Digital elevation model issues in water resources modeling. In: **Annual Esri Users Conference**, 1999, California. Proceedings... California: ESRI, 1999. Disponível em: <www.esri.com>. Acesso em: 12 mar. 2004.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1988.

GEORGIOU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D.R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw Hill, Inc., 1992, cap.18, p.18.1-18.66.

HAAN, C. T. **Statistical methods in hidrology**. 2. ed. Ames, Iowa: The Iowa State University, Press/Ames, 1977. 378 p.

HIDROSSISTEMAS. **Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1993. 264 p.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1997. 224 p.

IBIAPINA, A. V. et al. Evolução da hidrometria no Brasil. In: FREITAS, M.A.V. (Org). **O estado das águas no Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, SIH; MMA, SRH; MME, 1999.

NAGHETTINI, M., POTTER, K. W.; ILLANGASEKARE, T. Estimating the uppertail of flood-peak frequency distributions using hydrometeorological information. **Water Resources Research**, v.32, n.6, p.1729-1740, 1994.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, vol. 10, p.282-290, 1970.

PAREDES, E. A. **Sistema de informações geográficas – geoprocessamento, princípio e aplicação**. São Paulo: Érica, 1994. 675p.

PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte – **RMBH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 3, n. 4, p. 73-87, 1998.

ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. In: **Revista do Departamento de Geografia**. n.4. São Paulo, USP, 1995.

SANTOS, A. R. **Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Turvo Sujo, micro-região de Viçosa**. 2001. 125 p., Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SENE, E.; MOREIRA, J. C. **Geografia geral e do Brasil: espaço geográfico e globalização**. São Paulo: Scipione. 1998.

SILVA, D. D. et al. **Regionalização de vazões para a Sub-Bacia 51**. Brasília: ANEEL; Viçosa: UFV, 2002a. 207p.

SILVA, D. D. et al. **Regionalização de vazões para a Sub-Bacia 52**. Brasília: ANEEL; Viçosa: UFV, 2002b. 138p.

SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. **Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos**. MMA-SRH-ABEAS-UFV. Brasília-DF. 2001.89p.

SILVA, J. T. N.; NOVO, V. L. T. Contribuição para o conhecimento das vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Capivari. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, Florianópolis, 1988. **Anais...** s.l., ABID. p. 1069-1084, 1988.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hidrology**. New York: MacGraw Hill, Inc., 1992, cap. 18, p. 18. 1-18.66.

TUCCI, C. E. M. et al. Estudo regional de vazões máximas e médias do Alto Paraguai. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 5, Florianópolis, **Anais...**, s. l., 1983. p. 17-42, 1983.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed da Universidade/ ABRH/EDUSP, 1997, cap.15, p. 573-619.

TUCCI, C .E. M. **Regionalização de vazões**. Ed. Universidade/UFRGS, 2002, 256 p.

VERDIN, K. L.; JENSON, S. K. **Development of continental scale digital elevation models and extraction of hydrographic features**. INTERNATIONAL CONFERENCE, 3, Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fé, NM: NCGIA, 1996. (CD-ROM).

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw Hill, 1975. 250 p.

WILKEN, P.S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 1978. 478p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A - Dados originais e preenchidos de vazões mínimas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Ano	21220000	21300000	21500000	21510000	21560000	21580000	21600000	21650000	21750000	21850000	21890000	21900000
1975		28,23	48,24	7,33		6,17	74,07		27,73	129,31	138,17	202,57
1976	4,25	28,23	43,03	3,34	22,92	6,50	68,50	83,44*	26,56	120,39	120,89	198,57
1977	4,59	20,62	41,37		24,06	6,50	68,31	85,23*	27,22	120,84	127,68	212,89*
1978	9,66	30,66	60,09	7,56	23,57	6,50	73,95	103,50	28,34	139,97	130,31	232,14
1979	13,59	33,16	69,11		24,03	6,50		125,51		141,44	137,66	254,46
1980	11,75	33,16	71,83*	7,64	22,85	8,16		128,79		141,11	139,87	263,49
1981	9,04	27,92	66,09	7,82	22,71	7,21	83,24	122,06	32,22	143,74	132,30	250,37
1982	13,65		81,51	7,70	23,43	9,15	65,45	141,06	26,72	143,58	148,35	281,89
1983	12,97	15,97	71,27	7,82		7,83		120,47	27,88	138,99	146,77	255,09
1984	7,88	37,20	66,95	8,01	24,87	7,83	90,90	104,14	26,16	117,70	140,39	233,71
1985	9,14	37,83	61,91*	7,82	23,96	7,83	86,39	109,86	25,71	130,06	140,73	237,49
1986	7,98	33,04	61,80	8,38	22,85	8,44	80,20	119,12	26,91	125,56	146,95	245,66
1987	4,55	29,16	51,81	7,02	22,51	7,16	89,44	88,51	25,57	120,44	128,17	233,71
1988	7,93	34,00	59,45	7,51	22,71	7,16	94,31	105,60	27,83	126,33	116,47	230,57
1989	4,42	32,08	51,18	6,90	22,50	6,83	77,54	92,97	26,51	122,65	114,28	211,89*
1990		31,25							27,78	137,86		
1991	8,70*	30,78	60,79*	7,23			93,03	107,72	26,87	124,64	116,94	218,94
1992	11,91*	31,49	71,57*					128,30	27,02		121,21	
1993	9,82	33,64	63,08	7,33	21,80		97,69	109,86	27,73	129,28	122,01	237,17
1994	8,23	31,49	58,17	6,60	21,96		92,53	95,17	27,52	128,96	120,74	229,00
1995	6,34	29,85	53,29	5,90	23,82	6,50	89,22	97,75	26,21	135,60	116,94	223,19*
1996	5,20	26,99	46,36	5,90	24,03	7,64	72,87	87,17	25,47	128,96	110,12	209,43
1997	9,25	27,44	52,67	6,77	24,46		88,36	105,82	25,86	141,11	118,83	240,63
1998	5,02	25,87	42,41	6,40	26,26	7,16	88,80	77,06	24,98		107,84	200,00
1999	4,06	25,87	42,41	6,58	26,23	6,17	86,87	74,69	24,34	125,10	99,81	209,77*
2000	3,45	28,23	45,32	6,85	22,98	6,31	77,86	85,46	24,69	120,61	126,17	215,00
2001	4,00	28,63	50,03	6,75	25,92	6,53	92,31	72,11	26,96	130,45	124,27	209,29

*Dados Preenchidos

Quadro 2A - Vazões (m^3s^{-1}) correspondentes aos diferentes níveis de permanência

Estação fluviométrica	Nível de Permanência (%)									
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
21220000	28,19	23,48	20,11	17,24	14,91	12,89	11,15	9,54	7,93	5,89
21300000	41,93	40,34	38,88	37,46	36,23	35,00	33,16	31,53	30,03	28,63
21500000	105,80	96,45	87,29	80,31	73,81	69,85	64,14	59,55	55,70	50,61
21510000	10,65	9,87	9,29	8,82	8,47	8,20	7,92	7,50	7,10	6,68
21560000	30,69	29,34	28,42	27,52	26,63	25,92	25,29	24,67	24,08	23,50
21580000	9,06	8,76	8,52	8,18	7,83	7,68	7,53	7,33	6,98	6,64
21600000	189,50	170,10	153,20	138,20	126,90	117,10	108,10	100,20	92,62	84,61
21650000	214,50	190,40	170,60	157,70	145,20	133,60	124,30	115,20	104,70	92,08
21750000	30,79	30,03	29,27	28,89	28,53	28,16	27,80	27,44	26,68	25,80
21850000	171,80	165,00	159,40	154,50	150,20	146,00	142,00	138,00	133,60	129,20
21890000	176,70	167,40	160,00	154,30	148,90	143,30	137,50	131,00	125,60	119,10
21900000	428,30	390,70	347,90	318,70	297,00	279,10	263,60	251,60	238,30	221,50

APÊNDICE B

Quadro 1B - Dados originais e preenchidos de precipitações totais anuais (mm)

Ano	1145013	1146000	1147001	1147003	1245014	1245015	1246000	1246001	1247002	1247005	1248001	1346000	1346001	1346002	1346003
1975		1428,1	1514,5				1286,5	1160,5	1359,6		1211,8	1390,6	1039,0	973,2	1788,6
1976		1512,2	1424,8	1615,3			1653,1	1449,2	1497,2		1104,1	1428,5	1132,3*	1320,8*	1627,4
1977		1698,5	1742,8	1373,4				1311,0	1154,9		1436,1	1048,0	1473,1	1085,7	
1978	1664,8	1793,9	1962,3	1798,7			1848,2	1815,3	1798,0		1394,1	1432,1	1595,0	1752,5	1494,9
1979	1777,5	2022,1	1754,4	1735,8			2208,2	1897,1	1608,0		1328,0	1560,2	1355,5	1478,4	1772,5
1980	1518,7	1905,2	2361,8	1942,5			2261,5	2074,4	1677,0		1863,7	1985,4	1540,3	1386,2*	1724,2
1981	1127,1	1590,5	1743,7	1652,4			1709,2	1658,8	1534,7		1551,0	1874,8	1420,7	1345,6	1367,4
1982	803,9	1224,8	1343,5	1201,8			1599,6	1278,2	1287,5		1441,8	1058,8	1127,7	1005,5	1221,2
1983	984,0	1569,1	1359,4	1484,8			2076,7	1839,5	1511,0		1595,8	1340,8	1668,4	1632,1	1627,5
1984	893,3	1048,6	1397,9	1263,2			1652,1	1363,9			1276,0	1007,9	822,3	1091,1	1052,2
1985	1902,3	1984,9	1868,3	1832,8	1709,1	1545,2	2445,4	1850,1	1625,0	1682,9	1597,0	1553,3	1347,4	1641,8	1867,3
1986	880,3	1310,3	1674,0	1602,1	988,1	890,5	1522,1	1224,5	958,0	1199,4	1164,2	1259,8	931,8	1095,8	1123,5
1987	1410,9		1626,3	1875,0	1312,3	1395,4	2604,5	2169,6	1341,0	852,0	1075,1	1545,7	1392,4	1365,9	1333,1
1988	1423,4		1874,8	1556,8	1478,1	1514,4	2908,1	2867,9			1493,6	1375,4	1140,9	1520,5*	
1989	1722,1		1857,3	1587,0	1355,8	1172,3	2356,5	1738,0	2081,6		1941,4	1244,9	1170,5	1301,9*	
1990	817,6		1495,0	1140,0	1045,4	823,9	1138,4	1022,0	751,2		1162,5	864,2	841,6	740,6	
1991	1042,7		1634,2	1574,7	1233,1	1420,8	2102,1				1489,3		1033,7		
1992	1313,2	2024,7	1767,0	2077,4	1451,8	1556,1	2688,6	2858,1	1990,0	1453,5	1554,6	1576,6	1532,2*	1282,1	
1993	817,3	942,1	1180,8	1135,0	924,7	1115,7	1585,1	1644,7	972,7	1059,9	1219,0	863,6	931,4	785,2	
1994	878,4	1612,6	1676,1	1440,4	1268,7	1545,8	2132,3	1916,1	1435,0	1207,3	1171,1	925,9	1038,1	1188,2	
1995	1130,4	1756,8	1857,1	1723,4	1343,9	1628,8	3188,2	2159,4	1478,1	1291,4	1438,9	1459,0	1077,1	1335,3	
1996	1021,9	1496,6		1352,6	1077,0	1404,4	1802,4	1541,9	1032,5	775,7	1323,0	978,7	770,7	737,0	
1997	1197,9	1422,8		1505,1	1327,3	1383,8		1833,5	1440,5	1356,7	1578,8	1420,6	1157,0	1108,6	
1998	1253,6	1434,7	1510,7	1310,0	1154,3	826,6	1899,3	1216,8			1072,0	1098,5	1045,7	905,0	
1999	1530,6	1514,1	1530,9	1720,3	1356,9	1275,2	2025,1	1207,4	1224,0	1042,3	1348,4	1468,6	1318,9	1185,9	
2000	1462,0		1852,2	1871,9	1482,2	1254,3				1070,8	2007,7		1023,3	1075,1*	
2001	793,6	1262,1	1559,8	1423,4	1100,3	889,8	2278,4	1411,9	1184,9	930,0	1253,3	1101,5	1011,4*	1026,6	

*Dados preenchidos

Continua...

Quadro 1 B - Continuação.

Ano	1346004	1346005	1346006	1347000	1347001	1348003	1446001	1446004	1447000	1447001	1447002	1546001	1546005	1547001	1547002
1975	1344,6	1225,0		1341,8	1048,9	1436,2	938,9		1491,9	1079,5	1586,1	999,5	1230,4	1518,7	1163,5
1976	1144,6	793,2		1689,3	1225,1	1704,1	1066,4		1313,7	1245,7	1489,8	989,7	1121,4	1341,2	1472,8
1977	1524,4	969,4		2178,8	1309,6	1878,1			1870,7	1232,1	1437,6	951,3	1105,5	1578,8	1487,3
1978	1835,8	1125,8		2394,0	1597,8	1870,5	1416,1		2323,4	1456,5	1669,5	1800,5	1782,0	1653,0	1275,4
1979	1903,0	1256,6		1915,7	1523,0	1850,6	1587,5		1745,5	1417,3	1404,3	1518,0	1791,5	2049,0	1631,9
1980	1821,4	1542,7		2290,3		2072,3	1539,5		1855,7	1304,7	1483,0	1607,8	1812,9	1783,6	1258,5
1981	1668,6	1053,1		1942,2		1393,7	1326,3		1209,9	1226,9	1544,0	1517,4	1584,1	1920,5	1475,4
1982	1532,6	1040,8	1202,0	1557,6	1101,4	1520,7	1166,9		1268,6	986,8	1548,5	992,8	1292,8	1497,1	1568,1
1983	1839,2	1259,3	1448,0	2230,4	1553,8	1761,6	1638,1		1422,5	1481,0	1699,3	1719,7	1790,5	1826,5	1705,3
1984	1083,6	714,2	833,4	1156,9	941,4	839,9	1126,6		984,2	964,0	1268,2	939,0	1066,6	1003,7	1027,2
1985	2183,8	1363,0	1345,6	2294,8	1824,0	2053,5	1292,1	1395,7	1607,9	1417,7	1712,1	1398,1	1485,1	1845,0	1386,0
1986	1237,0	1129,1	914,8	1221,5	955,5	1211,6	1052,0	985,6	1097,8	1084,3	1016,3	1103,9	1068,3	1406,3	977,0
1987	1531,4	1645,4	1399,5	1733,3		1385,6	1424,8	1452,5	1306,6	962,8	1203,3	1368,9	1616,3	1456,9	1260,2
1988	1377,8	1642,7	1372,0	1948,8	1330,2	1489,7	1373,1	1403,0	1345,9	1425,7	1731,2	1141,7	1309,2	1700,1	1332,1
1989	1465,2	1040,2	1332,8	2068,5	1831,5	2071,6	1568,4	1366,8	1753,4	1228,7	1755,4	1717,6	1799,2	1804,4	1548,4
1990	773,0		817,6	1436,9		1301,1		865,2	1351,9	798,6	1011,3	823,1	860,2	1521,9	1001,6
1991			1455,7	1672,5		2007,7		940,4	1370,8		1599,1		1493,4	1741,6	1533,5
1992		1512,2	1798,8	2397,4		2193,0		1255,7		1380,7	1580,7	1490,3	1663,6		1681,0
1993			971,2	1121,8	1154,8	1097,5		692,2	1241,8	823,3	885,7		992,5	1094,0	1174,7
1994	1278,3	951,9	1407,7	1601,8	1252,3	1364,3		964,5	1472,7	1170,8	1196,9		1492,1	1558,3	1025,5
1995	1001,4	1104,1	1314,4	1614,9	1195,3				1509,1	1052,1	1449,2*		1386,1	1549,8	
1996	991,2	714,4	1224,5	1368,7	1119,7		1170,6	1366,7	786,1	1131,4*				1076,2	
1997	1429,9	1820,2	1499,1	1926,4	1426,3		1323,8	1705,7	1100,4	1429,4*			1518,3	1947,0	
1998	1092,3	1205,4	1224,4	1594,2	1185,2		1528,5	1218,9	806,3	1223,5*			1414,1	1422,4	
1999	1128,3	1409,6	1480,7	1852,0	1174,2		1245,9	1344,3	1063,1	1464,7*			1144,2	1714,2	
2000			1249,0	2001,5	1201,3	2125,8		1253,2	1059,7	1024,2	1045,8		1600,6	1581,7	
2001	1178,7	912,9	996,5	1474,5	757,2	1399,7		1368,0	1308,1	1188,0	1248,2	821,8	831,1	1270,3	

*Dados preenchidos

Quadro 2B - Dados originais e preenchidos de precipitações do semestre mais seco (mm)

Ano	1145013	1146000	1147001	1147003	1245014	1245015	1246000	1246001	1247002	1247005	1248001	1346000	1346001	1346002	1346003
1975		130,6	83,2				154,1	146,2	147,6		80,8	144,0	116,5	126,0	240,0
1976		301,1	256,9	230,6			323,1	237,6	288,0		240,1	183,1	173,8	156,8	270,2
1977		218,8	253,2	182,6				161,1	205,6		218,7	208,3	234,6	175,9	180,5
1978	182,1	268,4	267,0	317,5			250,3	266,2	368,0		215,4	176,1	159,4	266,1	128,4
1979	149,1	200,0	240,7	209,5			195,8	161,8	178,0		150,8	151,6	171,8	129,4	224,0
1980	90,4	70,6	77,1	170,0			81,1	76,2	58,0		73,4	132,6	69,9		37,8
1981	177,1	150,6	189,9	144,6			171,8	170,0	124,8		84,7	179,2	117,2	114,9	173,0
1982	78,4	117,2	104,5	93,8			136,1	143,0	124,0		159,6	88,8	118,2	33,6	110,7
1983	20,3	56,4	48,9	72,8			24,8	56,0	38,0		96,6	81,9	63,0	102,7	12,0
1984		159,2	165,3	234,4			195,6	164,8	174,0	59,2	187,2	155,3	201,0	184,3	157,9
1985	141,8	294,3	244,1	254,8	110,6	182,1	216,6	236,4	123,0	128,3	181,2	188,3	137,5	157,4	132,2
1986	106,5	182,2	292,1	241,0	52,9	114,9	153,3	143,0	79,0	42,3	74,7	247,0	181,4	180,9	122,6
1987	107,8	70,2	137,8	119,0	89,6	88,8	108,1	61,1	71,0	16,1	90,8	108,9	165,8	111,3	94,2
1988	91,2		151,0	81,4	116,8	102,6	154,2	173,5	126,2	72,0	209,0	56,7	93,8		134,8*
1989	203,6	158,2	159,9	145,5	170,2	70,9	153,1	115,0	104,4		157,8	135,1	82,0	36,1	79,5*
1990	119,6		176,3		80,1	176,9	166,4	184,8	127,2			169,5	174,7	208,4	158,9*
1991	45,2	128,4	105,4	138,9	38,0	67,3	171,6	103,5	65,7	108,5	102,3	101,0	73,0	83,3	158,7*
1992	82,7	120,9	169,5	144,6	108,2	83,5	109,4	243,7	55,6	91,0		171,1		67,9	124,6*
1993	124,5	164,0	223,1	252,0	114,9	205,1	138,7	146,0	145,6	145,5	99,7	105,7	170,9	164,7	166,2*
1994	26,9	94,5	84,4	43,0	82,6	109,4	55,6	80,5	76,7	59,4	33,7	111,8	100,6	124,2	158,1*
1995	118,4	211,4	249,8	219,2	104,4	214,1	405,9	292,0	124,6	112,3	149,0	219,0	133,1	323,1	
1996	193,8	170,4		121,8	92,7	115,3	177,2	293,2	30,2	51,6	84,2	106,8	63,8	59,3	129,6*
1997	147,4	210,6		147,2	125,8	127,0	210,5	159,2	143,9	117,9	124,6	189,3	194,7	204,6	108,6*
1998	57,3	129,9	79,8	48,5	54,7	8,4	69,1	47,7			47,4	53,1	74,3	78,2	103,8*
1999	55,5	142,8	116,2	205,8	76,2	40,0	125,8	69,2	139,3	68,0	77,0	89,2	46,6	80,2	143,4*
2000	139,3	82,2	184,3	157,7	85,9	89,7	163,1	91,6	70,2	126,1	245,1	97,1	100,4	78,3	143,7*
2001	42,3	239,6	157,3	195,1	67,3	74,9	211,3	129,0	78,7	136,3	109,4	141,4	25,7	96,9	121,7*

*Dados preenchidos

Continua...

Quadro 2B - Continuação.

Ano	1346004	1346005	1346006	1347000	1347001	1348003	1446001	1446004	1447000	1447001	1447002	1546001	1546005	1547001	1547002
1975	181,0	130,2		304,6	128,8	136,7	195,9	216,5*	296,0	207,5	202,1	113,4	166,0	310,0	129,6
1976	183,4	144,3		208,1	124,8	252,3	260,9	265,2*	350,0	347,4	220,0		120,0	388,7	213,1
1977	247,9	196,9		236,7	151,3	261,4	243,9	214,3*	545,5	404,5	220,8	86,0	143,3	414,8	309,6
1978	136,8	164,4		291,3	243,0	241,8	318,2	229,60*	622,1	332,5	213,8	248,4	285,0	400,7	187,2
1979	172,0	112,8		78,9	135,9	151,5	334,2	282,7*	406,3	396,4	127,8	79,3	102,0	703,0	93,1
1980	74,0	124,9		110,3	31,0	176,7	425,6	244,5*	614,6	431,0	115,8	154,6	152,0	570,3	30,3
1981	158,4	69,8		270,5	53,5	129,9	324,0	253,5*	282,0	262,0	149,1	176,5	190,0	575,4	140,7
1982	105,4	95,8	165,9	107,0	40,9	211,2	522,0	330,0*	368,9	425,0	162,8	111,3	128,8	806,6	245,5
1983	69,0	30,0	89,7	124,0	54,6	157,2	379,0	207,6*	396,4	316,9	134,0	141,7	86,8	395,0	202,2
1984	188,8	139,0	153,0	192,6	127,0	140,7	193,1	223,0	199,8	229,0	232,5	121,2	124,4	212,1	190,0
1985	218,6	64,4	95,2	157,3	127,5	161,1	304,5	373,2	469,2	419,0	107,9	133,1	111,0	600,2	75,7
1986	109,4	121,0	113,4	144,0	136,9	251,6	201,4	283,8	229,1	255,8	76,9	161,6	135,2	338,1	115,8
1987	115,6	103,2	107,3	161,7		147,6	421,8	462,0	282,1	307,3	215,4	89,1	107,1	451,5	154,8
1988	107,6	40,6	49,3	168,8	74,6	117,7	322,0	298,7	280,1	371,2	150,2	91,6	99,9	379,0	126,8
1989	127,0	61,5	72,6	153,7	165,0	182,3	619,4	550,2	403,1	480,0	145,5	122,3	216,5	826,5	124,1
1990	167,0	98,8	160,8	312,2		236,2	160,7*	189,1	276,0	178,8	269,1	176,7	228,0	317,3	339,8
1991	149,2	41,0	257,2	128,5	35,3	133,7	222,0	190,0	258,8	237,6	45,3		83,2	430,5	149,0
1992	136,6	127,0	126,8	188,0		115,7	332,1*	345,4	483,9	315,0	166,8	162,0	157,5	405,9	201,5
1993	161,8	118,0	124,9	150,0	177,9		124,2*	155,8	276,9	206,1	103,5	123,3	142,6	322,2	177,7
1994	152,4	45,5	106,9	121,0	77,5		165,0*	193,0	326,7	285,2	130,2		88,4	464,5	102,9
1995	162,9	155,5	146,0	162,4	139,7				344,1	221,4			69,2	410,0	
1996	88,7	53,9	203,9	153,3	91,8		307,1*	322,6	341,5	197,3				245,5	
1997	114,6		191,4	308,4	145,2		411,7*	418,0	485,7	416,4			218,3	521,2	
1998	34,6	31,3	24,9	117,3	57,8		435,5*	439,7	238,4	218,7			79,1	394,9	
1999	18,8	91,0	80,0	109,9	63,7		237,9*	259,5	311,0	254,1		43,4	74,7	434,3	
2000	84,8	34,9	70,5	114,7	68,7	109,9	236,8*	258,5	240,6	247,3	102,2	157,0	181,4	361,9	
2001	54,9	42,5	61,5	65,3	34,6	115,1	346,1*	358,2	271,5	294,0	98,8	42,4	53,2	363,6	

*Dados preenchidos

Quadro 3B - Dados originais e preenchidos de precipitações do trimestre mais seco (mm)

Ano	1145013	1146000	1147001	1147003	1245014	1245015	1246000	1246001	1247002	1247005	1248001	1346000	1346001	1346002	1346003
1975		5,6	8,2				9,0	20,2	3,0		3,0	326,0	3,0	11,0	32,0
1976		87,1	4,0	30,5			92,9	113,8	91,0		103,6	110,3	5,0	96,8	192,6
1977		2,7	2,8	10,0				17,8	11,0		15,0	11,6	30,4	8,9	30,0
1978	7,3	50,0	53,9	53,2			75,6	47,2	21,0		28,9	28,6	11,0	49,6	10,0
1979	4,1	24,4	47,9	8,0			7,9	5,4	19,0		15,2	3,0	10,4	2,9	18,6
1980	18,8	44,0	30,2	14,6			52,7	50,0	24,0		23,6	3,2	1,2	42,0	21,3
1981	6,0	0,5	0,8	7,8			21,2	8,6	5,0		224,4	8,0	13,0	1,4	18,8
1982	19,4	7,2	1,0	17,4			8,6	2,4	46,0		57,4	1,8	49,0	15,9	8,4
1983	0,1	30,2	4,7	19,8			17,0	19,0	15,0		6,6	20,3	4,0	6,3	104,3
1984		14,4	12,0	6,6			15,4	8,4	3,0	0,8	22,5	18,2	10,0	2,7	18,8
1985	6,4	5,2	15,9	47,6	23,3	69,0	11,4	2,4	35,0	11,1	31,4	32,3	29,6	18,8	33,1
1986	0,4	9,8	6,6	8,0	5,2	12,5	2,8	159,6	25,0	6,4	217,4	6,7	24,6	18,7	5,0
1987	17,7	7,2	5,8	11,4	6,7	32,4	8,0	4,1	4,0	14,3	12,1	9,4	6,0	39,3	29,5
1988	196,1	88,1	114,8	81,4	32,1	3,1	28,4	9,2	158,7	151,4	1,9	1,0	81,1		324,4*
1989	70,6	50,2	13,6	31,0	37,2	33,2	24,1	5,0	32,9		41,8	5,5	10,6	0,1	22,6*
1990	29,2		15,8		15,8	34,1	49,4	18,9	49,0		41,0	21,9	25,8	13,6	94,3*
1991	17,0	46,4	62,7	56,6	25,0	55,3	75,5	42,3	50,4	50,2	102,3	83,3	45,1	59,5	59,7*
1992	20,4	2,8	5,0	12,8	10,4	5,8	18,6	15,3	2,0	23,0		0,8		72,0	18,8*
1993	1,0	1,6	10,9	13,0	0,1	31,0	51,2	19,0	10,8	42,0	5,3	48,4	4,2	68,1	11,4*
1994	26,9	2,5	22,2	12,0	39,6	95,6	4,2	80,5	15,0	42,2	2,9	19,6	0,7	103,1	96,8*
1995	64,7	138,0	5,0	115,2	2,3	171,9	37,6	70,9	68,1	8,8	6,9	144,7	79,3	142,2	11,4*
1996	155,9	113,0		2,4	4,5	283,0	128,4	173,0	0,1	82,4	5,0	7,9	3,0	5,7	36,6*
1997	1,7	70,6		41,3	1,9	5,8	7,2	12,0	0,9	48,1	15,3	5,7	6,4	11,5	28,9*
1998	156,9	2,8	6,1	1,0	8,3	38,7	30,6	55,9		20,1	11,0	28,8	1,5	17,0	212,5*
1999	24,5	70,0	11,1	94,6	29,5	5,6	47,1	15,2	43,7	13,2	35,6	1,6	33,4	26,3	56,0*
2000	1,9	23,1	36,1	0,9	0,7	58,8	5,2	0,6	0,2	58,1	166,1	0,7	0,3	6,7	16,7*
2001	20,5	10,1	28,0	2,6	1,4	12,3	30,3	6,5	17,2	0,3	16,5	2,6	0,2	1,7	43,8*

*Dados preenchidos

Continua...

Quadro 3B – Continuação.

Ano	1346004	1346005	1346006	1347000	1347001	1348003	1446001	1446004	1447000	1447001	1447002	1546001	1546005	1547001	1547002
1975	209,8	9,4		18,8	170,7	21,0	3,6		24,7	1,0	1,3	21,0	6,0	32,2	9,4
1976	99,4	68,2		136,3	141,4	6,4	13,0		5,0	136,9	4,4	6,8	12,0	47,7	10,3
1977	19,0	10,0		23,7	14,6	19,9	7,1		78,1	7,0	47,6	26,4	13,0	14,7	35,1
1978	14,0	4,2		46,3	11,1	59,2	39,4		10,4	14,3	12,9	7,5	11,0	1,4	17,4
1979	3,0	2,4		11,0	2,6	27,9	6,3		14,0	5,7	25,3	12,0	35,0	28,9	0,3
1980	0,8	3,2		3,0	6,2	102,3	1,4		8,2	4,0	2,5	23,2	1,5	51,4	1,2
1981	13,4	6,4	148,0	10,0	6,8	3,2	20,9		2,1	9,2	2,7	19,6	35,6	44,0	11,2
1982	6,8	57,4	29,7	13,0	2,0	30,0	11,5		2,9	18,6	31,3	9,8	12,4	5,2	29,7
1983	23,0	76,6	7,3	22,0	0,1	24,0	1,0		18,3	8,2	1,2	145,7	137,0	13,2	18,4
1984	11,2	2,4	10,7	4,2	4,3	3,0	10,0	12,1	12,0	1,5	7,3		1,4	3,1	8,2
1985	1,0	3,0	2,6	7,0	0,1	37,2	64,4	1,0	0,6	1,2	37,9	1,5	15,0	32,9	16,4
1986	25,0	11,0		1,0	18,0	18,2	10,4	14,7	21,0	25,5	15,5	44,5	45,2	34,5	11,2
1987	6,6	4,0	29,4	32,0	3,2	53,4	56,2	50,9	3,9	3,5	75,9	23,3	6,0	72,1	6,7
1988	110,4	60,0	1,7	255,0	72,2	10,3	158,4	4,3	2,5	132,2	4,2	0,3	1,1	95,0	0,6
1989	30,2	14,5	10,6	11,0	42,1	23,7	20,8	20,0	19,1	27,5	8,3	23,0	34,4	25,3	33,2
1990	15,0	45,0	18,2	69,0	14,8*	35,3		52,6	51,5	60,9	89,2		58,5	38,8	80,5
1991	61,8	40,0	137,0	41,0	24,2	75,0	31,5	50,4	71,5	25,4	6,0		27,7	36,1	60,3
1992	6,0	127,0	7,0	8,0	9,8*	53,1	28,0*	5,1	6,0	34,4	7,3	37,2	7,1	22,9	7,3
1993	2,6	50,0	0,2	2,0	8,0		47,2	53,4	2,0	14,2	3,1	11,7	16,1	16,2	55,3
1994	0,5	45,5	0,2	71,0	3,0*	82,0	84,0	1,2	3,0	109,5	121,1		100,4	38,2	54,7
1995	1,4	143,0	135,4	2,0	6,8		23,7*		2,0	97,9			172,5	80,4	
1996	4,6	32,6	2,5	22,3	22,0		40,3*	19,4	2,1	4,1				22,3	
1997	6,4	171,3	9,6	16,1	8,5		43,5*	23,1	28,8	13,2			9,4	8,4	
1998	27,5	63,9	68,0	164,5	8,6		93,7*	81,8	126,9	69,4			87,0	108,1	
1999	14,1	29,5	43,0	38,0	57,2		46,9*	27,1	35,5	3,2		17,8	29,4	38,3	
2000	0,8	1,0	13,0	6,3	4,2	17,7	105,2*	95,2	5,4	9,8	19,4	19,5	19,3	3,3	
2001	7,6	1,2	6,0	28,2	1,6	55,5	23,9*	0,3	18,0	17,6	14,7	4,3	13,9	10,1	

*Dados preenchidos