

## Calibração de um Modelo Chuva-Vazão em Bacias sem Monitoramento Fluviométrico a partir de Curvas de Permanência Sintéticas

Viviane Borda Pinheiro, Mauro Naghettini

Universidade Federal de Minas Gerais

vivicicarelli@gmail.com; naghet@netuno.lcc.ufmg.br

Recebido: 06/10/09 - revisado: 23/03/10 - aceito: 06/05/10

---

### RESUMO

O conhecimento de variáveis e funções hidrológicas em uma dada seção fluvial, bem como de suas séries temporais de vazões médias diárias, viabiliza o planejamento, o projeto e a operação de estruturas de aproveitamento de recursos hídricos, em bacias hidrográficas monitoradas. Nas bacias desprovidas de registros sistemáticos de cota e descarga, no entanto, faz-se necessário desenvolver metodologias que possibilitem a transferência das informações hidrológicas existentes em outras bacias. O presente estudo propõe e avalia um método para calibração automática de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento hidrométrico, utilizando como paradigma do processo hidrológico a curva de permanência sintética de longo período, obtida a partir de um modelo estatístico regional. Neste contexto, as curvas de permanência de longo período constituem funções características próprias do regime hidrológico da bacia hidrográfica em estudo e são aqui usadas como instrumento para calibração dos parâmetros de um modelo conceitual chuva-vazão. Uma vez obtidos os parâmetros que comandam a síntese hidrológica do modelo em questão, a simulação contínua de descargas, ao longo de um dado período de tempo, viabiliza avaliações hidrológicas diversas, tais como a análise de frequência de eventos raros, o balanço hídrico de reservatórios, os estudos de amortecimento de cheias e de disponibilidades hídricas. A metodologia aqui apresentada compõe-se basicamente de duas partes. Na primeira delas, é proposto um método para regionalização de curvas de permanência de longo período, permitindo a transferência dessa função hidrológica a locais não-monitorados, desde que esses se localizem na mesma região homogênea das bacias com dados. Na segunda etapa, é realizada a calibração do modelo chuva-vazão RIO GRANDE tendo como objetivo simular as curvas de permanência sintetizadas a partir do modelo regional. Em ambas as fases, são calculados alguns índices de desempenho, cujo objetivo é avaliar a confiabilidade proporcionada pelos procedimentos envolvidos.

**Palavras-chave:** Regionalização de curvas de permanência, calibração de modelos hidrológicos.

---

### INTRODUÇÃO

Atualmente, tem-se discutido amplamente sobre a necessidade e as diferentes possibilidades de inferir informações hidrológicas em bacias hidrográficas com escassez ou ausência de dados fluviométricos. Diversos esforços de profissionais ligados à hidrologia têm sido feitos nessa direção, inclusive através de iniciativas de âmbito internacional, como é o caso do projeto intitulado "Predição em Bacias Não-Monitoradas" (do inglês "*Prediction in Ungauged Basins*"), iniciado pela Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS), conforme descrição em <http://pub.iwmi.org/UI/Content/Default.aspx?PGID=0>.

O conhecimento de variáveis, funções e séries temporais que definem o comportamento hidrológico de um rio, em dada seção fluvial, viabiliza uma série de projetos relacionados aos recursos hídricos, dentre os quais podem ser citados os estudos de disponibilidades hídricas, de aproveitamentos hidroenergéticos, e de obras hidráulicas de condução, desvio e de controle de cheias. Para avaliar essas informações em bacias não-monitoradas, é necessário proceder a técnicas de regionalização, seja para variáveis, indicadores e funções (como o são as curvas de permanência), seja para os parâmetros de um modelo chuva-vazão.

Nesse contexto, no presente artigo propõe-se primeiramente um método para regionalizar curvas de permanência, com o objetivo de sintetizar

o regime hidrológico típico de uma dada bacia desprovida de dados fluviométricos. Em seguida, faz-se a verificação da viabilidade de uso dessas funções hidrológicas para calibrar os parâmetros de um modelo hidrológico conceitual contínuo de transformação de chuva em vazão em intervalo diário, considerando-as como objeto paradigma da simulação, alternativamente aos hidrogramas observados, inexistentes em bacias hidrográficas sem monitoramento hidrométrico sistemático. As curvas de permanência, em sua interpretação de longo período, constituem uma ferramenta gráfica de análise que reproduz o regime hidrológico de determinada bacia até a seção fluvial de referência. Ao utilizá-las como objetivo de calibração, a idéia implícita é a de encontrar um conjunto de parâmetros que permita sintetizar as vazões ordenadas ao longo de determinada amplitude, aparentemente sem o compromisso formal de reproduzir sua estrutura serial subjacente. Enfatiza-se, entretanto, que durante o processo de calibração dos parâmetros que determinam a síntese hidrológica dada pelo modelo, a estrutura serial das vazões médias diárias é resgatada de modo indireto, uma vez que o modelo chuva-vazão as simula continuamente na seqüência cronológica estabelecida pelas séries de alturas diárias de precipitação e evapotranspiração potencial, ao longo de determinado período. Definidos os parâmetros do modelo chuva-vazão, pode-se obter séries de vazões diárias simuladas sob cenários diversos de chuva e evapotranspiração potencial, subsidiando estudos e análises hidrológicas preliminares que concernem ao desenvolvimento e à gestão dos recursos hídricos locais. Apesar dessa concepção geral já ter sido primeiramente explorada no trabalho de Yu e Yang (2000), neste artigo são introduzidas importantes inovações por meio do emprego de métodos de maior consistência teórica nas fases de regionalização, calibração e avaliação.

Com efeito, para os objetivos deste artigo, faz-se aqui uma adaptação de um eficiente método de regionalização de curvas de permanência, introduzido por Castellarin *et al.* (2007), cujo produto serve de objeto para a calibração dos 13 parâmetros do modelo chuva-vazão RIO GRANDE, conceitual, determinístico, concentrado e contínuo, conforme descrição geral de Queiroga *et al.* (2005), com estrutura de balanço hídrico idêntica à do conhecido modelo Xinanjiang (Zhao e Liu, 1995). Depois de abordar o conjunto de etapas metodológicas, este artigo descreve sua aplicação às bacias dos rios mineiros Pará e Paraopeba, afluentes do Alto rio São Francisco pela margem direita e avalia os resultados obtidos.

## MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS CHUVA-VAZÃO EM BACIAS NÃO-MONITORADAS

Os modelos hidrológicos chuva-vazão descrevem a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão (Tucci, 1998), integrando diferentes algoritmos descritores dos diversos processos hidrológicos envolvidos nessa transformação da chuva em vazão: infiltração, percolação e fluxo subterrâneo, perdas por interceptação, evaporação, evapotranspiração, e armazenamento em depressões, escoamentos subsuperficial e superficial.

Quanto à sua estrutura, os modelos hidrológicos podem ser empíricos ("caixa-preta"), fisicamente fundamentados, ou conceituais. Os primeiros são aqueles nos quais os valores simulados são ajustados aos dados observados, por meio de funções que não guardam nenhuma relação com os processos físicos envolvidos (Tucci, 1998). Tais modelos comumente usam séries temporais disponíveis para identificar tanto a estrutura do modelo quanto os parâmetros correspondentes, sem que seja necessário nenhum conhecimento *a priori* a respeito do comportamento das bacias hidrográficas, advindo daí o nome de "caixa-preta" dado a tais modelos (Wagener *et al.*, 2004). Os modelos fisicamente fundamentados são os que se baseiam nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, sendo os parâmetros aqueles que mais se aproximam das grandezas que governam a física do sistema. Finalmente, os modelos ditos conceituais, na visão de Tucci (1998, p. 23) são aqueles que "re-lacionam características do processo, embora mantenham razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas".

Devido aos princípios que norteiam a montagem de cada um dos três tipos de modelo, a extração de parâmetros de bacias monitoradas para locais sem monitoramento fluviométrico tem apresentado maiores possibilidades no caso dos modelos conceituais, com o relato de apenas alguns poucos exemplos para os modelos fisicamente fundamentados, e diversas restrições em se tratando de modelos "caixa-preta" (Wagener *et al.*, 2004). Essa foi uma das razões para a escolha de um modelo chuva-vazão conceitual para aplicação da metodologia proposta neste artigo.

As técnicas de identificação de parâmetros de modelos chuva-vazão em locais desprovidos de dados fluviométricos podem ser classificadas em três

categorias: (1) métodos baseados na relação física, (2) regionalização ou generalização de parâmetros, e (3) procedimentos de interpolação espacial.

Os métodos que se baseiam na relação física englobam aqueles que identificam os parâmetros diretamente ou por meio de equações empíricas, a partir de características físicas das bacias hidrográficas, geralmente representadas nesses casos por propriedades mensuráveis do solo e da cobertura vegetal. Entretanto, tais técnicas apresentam ainda diversos impasses e necessitam de melhorias (Duan *et al.*, 2006), uma vez que as informações disponíveis sobre os solos e sobre a vegetação se relacionam apenas indireta e parcialmente aos parâmetros dos modelos.

Uma alternativa para a estimação de parâmetros de modelos chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico é aquela composta pelas diversas técnicas de interpolação espacial, que levam em conta a distribuição espacial das amostras da variável em questão. Há os métodos convencionais (ou determinísticos) de interpolação espacial, e os abarcados pela geostatística. Esses são mais vantajosos do que aqueles, pois consideram a correlação espacial entre os dados.

Algumas pesquisas têm-se dedicado à utilização de métodos de interpolação espacial para estimação de parâmetros de modelos em bacias sem dados (Vandewiele e Elias, 1995; Skøien e Blöschl, 2007). No entanto, uma das restrições que se impõe à aplicação dessas técnicas à estimação de parâmetros de modelos conceituais chuva-vazão refere-se à necessidade de redes de monitoramento fluviométrico de alta densidade.

Há, finalmente, a regionalização ou espacialização de parâmetros de modelos chuva-vazão, aplicada principalmente aos do tipo conceitual e concentrado ou semi-distribuído (Wagener *et al.*, 2004). A idéia básica na regionalização consiste em se calibrar um modelo específico (estrutura local) para quantas bacias hidrográficas for possível, para em seguida estimar relações estatísticas regionais entre os parâmetros do modelo e as características físicas das bacias (estrutura regional). Dá-se preferência às características físicas mais facilmente obtidas para as bacias sem monitoramento, geralmente por meio de mapas temáticos. Tal é o caso da área de drenagem, dos coeficientes de forma e compactidade, e do comprimento e da declividade média do talvegue principal. As relações estatísticas anteriormente mencionadas podem ser então aplicadas em bacias sem monitoramento, desde que estas tenham comportamento hidrológico semelhante ao das envolvidas na estimação das equações regionais.

Embora a regionalização seja tradicionalmente realizada de acordo com o exposto, há métodos alternativos, baseados em mudanças da estrutura regional, e voltados a resolver alguns impasses observados na espacialização de parâmetros, como a falta de identificabilidade dos mesmos, e a dificuldade de estabelecer os modelos regionais. Dentre esses procedimentos, destaca-se o utilizado neste trabalho, que se propõe a obter os parâmetros de um modelo chuva-vazão de relativa complexidade e razoável realismo físico, tendo como meta de calibração reproduzir aproximadamente a curva de permanência sintética de uma bacia não-monitorada, a partir das vazões simuladas. A curva sintética é, portanto, o objeto de regionalização, ao invés dos parâmetros que comandam a transformação da chuva em descarga.

## MÉTODOS DE REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA

A curva de permanência de vazões indica, ao longo de um período de observação, a porcentagem do tempo em que dada descarga foi igualada ou superada durante o histórico registrado em dada seção fluvial, pois mostra graficamente a relação entre a magnitude e a frequência da variável em questão (Vogel e Fennessey, 1994). Sua discretização geralmente é feita em intervalos diários, embora outras discretizações temporais possam ser adotadas. Esta curva pode ser interpretada também como o complemento da função acumulada de probabilidade das vazões em certo ponto em um curso de água, caso estas sejam consideradas como variáveis aleatórias (Castellarin *et al.*, 2007).

As curvas de permanência podem ser construídas com base em todo o período histórico disponível, recebendo o nome de curvas de permanência de longo termo, cuja sigla em inglês é FDC – *flow-duration curves*. Já as curvas de permanência anuais, ou AFDCs (*annual flow-duration curves*), são montadas para cada ano hidrológico. A escolha por um dos tipos de curvas depende do objetivo do estudo em questão. No presente estudo, foram adotadas as FDCs, já que o objetivo foi a calibração de um modelo chuva-vazão, tendo em vista o comportamento hidrológico médio de longo termo da bacia em foco. Não há relatos na literatura sobre o uso de AFDCs para esse fim.

Segundo Castellarin *et al.* (2004b), há dois grandes grupos de procedimentos para regionaliza-

ção de curvas de permanência: o dos modelos estatísticos de FDCs, que as considera como complemento da função acumulada de probabilidade – FAP, e o das abordagens gráfica e paramétrica, que não fazem conexão alguma entre essas curvas e a teoria de probabilidades.

No primeiro caso, é escolhida uma distribuição de probabilidades teórica adequada para representar a FAP de certa região homogênea, para em seguida seus parâmetros serem quantificados para cada bacia hidrográfica com monitoramento fluviométrico. Finalmente, elabora-se um modelo regional que relaciona estes parâmetros a índices físicos, climáticos, geológicos e geomorfológicos das áreas de contribuição. Por sua vez, o segundo conjunto de métodos abrange aqueles que reproduzem as FDCs por relações analíticas, sendo que os parâmetros destas compõem os modelos regionais, e os que usam uma FDC média adimensionalizada de validade regional, representada graficamente, e cuja variável-índice, a ser obtida por regressão com atributos das bacias, é geralmente a vazão média de longo termo.

Castellarin *et al.* (2004b) realizaram amplo estudo de comparação entre os três tipos de métodos supracitados, aplicando-os a diferentes bacias italianas. Os autores concluíram que as confiabilidades correspondentes aos diferentes métodos eram semelhantes, após comparação de índices calculados sobre os resíduos. Dessa forma, Castellarin *et al.* (2007) propuseram um modelo estocástico de reprodução e regionalização de FDCs e AFDCs, cujos resultados foram superiores àqueles avaliados no trabalho de 2004. Uma adaptação desse novo método foi utilizada no estudo relatado no presente artigo.

## METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO A PARTIR DE CURVAS DE PERMANÊNCIA SINTÉTICAS

A metodologia deste trabalho dividiu-se em duas partes principais:

- Definição de regiões homogêneas quanto às curvas de permanência de longo termo (FDCs) e elaboração de um modelo regional que permita a síntese dessas funções hidrológicas em bacias não-monitoradas, desde que essas atendam aos critérios de homogeneidade.

- Calibração dos parâmetros do modelo RIO GRANDE em locais sem dados fluviométricos, a partir das FDCs sintéticas obtidas pelo modelo regional proposto acima.

Inicialmente, procedeu-se à seleção e à análise dos dados fluviométricos, pluviométricos e evapotranspirimétricos que subsidiaram os estudos. Os primeiros foram usados para as duas etapas metodológicas, enquanto os outros dois tipos de informações serviram como entrada ao modelo chuva-vazão, sendo usados apenas na segunda parte, portanto.

Definidas as estações fluviométricas a serem usadas, passou-se à delimitação de regiões homogêneas quanto às curvas de permanência de longo termo. Para tanto, foi utilizada a medida de heterogeneidade  $H$ , proposta por Hosking e Wallis (1997). Resumidamente, essa medida baseia-se na comparação da variabilidade grupal de certas características estatísticas dos postos de monitoramento, no caso, fluviométrico, com a variabilidade esperada dessas mesmas características em uma região supostamente homogênea (Naghetini e Pinto, 2007). As estatísticas são calculadas com base na teoria de momentos-L. A medida de heterogeneidade  $H$  foi calculada em separado para três conjuntos de amostras distintas: (1) descargas médias anuais, (2) vazões médias diárias máximas anuais e (3) vazões médias diárias mínimas anuais. Sendo assim, admitiu-se que as descargas assim selecionadas foram suficientes para caracterizar os ramos superior e inferior e a porção mais central da curva de permanência, e, portanto, o regime hidrológico de dada bacia hidrográfica até a seção fluvial de monitoramento.

Em seguida à delimitação de regiões homogêneas, realizou-se a homogeneização do período de dados escolhido para elaboração do modelo regional de FDCs, a fim de eliminar o efeito da variabilidade temporal sobre as descargas. Dessa forma, algumas estações fluviométricas foram eliminadas por demandarem longos períodos de preenchimento.

Nos postos remanescentes, foram obtidas as curvas de permanência de longo termo empíricas, sendo a permanência, ou duração, definida pela fórmula de Weibull, ou seja,  $m/(n+1)$ , onde  $m$  denota a ordem de classificação decrescente de cada uma das  $n$  vazões sob análise.

O método usado para reprodução e regionalização de FDCs baseou-se no modelo estocástico da vazão-índice para curvas de permanência, proposto por Castellarin *et al.* (2004a). Em sua concepção, as vazões médias diárias  $X$  podem ser represen-

tadas pelo produto de duas variáveis aleatórias independentes, quais sejam: (1) a vazão média anual, doravante denotada por AF, e (2) a vazão média diária adimensionalizada pela AF do ano correspondente, nomeada por  $X'$ . Assim, como as FDCs podem ser interpretadas como o complemento da função acumulada de probabilidades (FAP) das vazões médias diárias, tem-se que essa é dada por:

$$F_X(x) = P\{AF \cdot X' \leq x\} = \int_{\Omega_{X'}} \int_{af_1}^{x/z} f_{AF, X'}(v, z) dv dz \quad (1)$$

sendo  $\Omega_{X'}$  o domínio da variável aleatória  $X'$ ,  $af_1$  o limite inferior do domínio da variável AF,  $f_{AF, X'}$  a função densidade de probabilidades conjuntas de AF e  $X'$ , e  $v$  e  $z$  são argumentos de integração das variáveis AF e  $X'$ , respectivamente.

Caso se assuma que  $X'$  e AF sejam independentes, então  $f_{AF, X'}$  torna-se igual ao produto das duas funções densidades marginais dessas variáveis, e a equação 1 pode ser escrita sob a seguinte forma:

$$F_X(x) = \int_{\Omega_{X'}} f_{X'}(z) \int_{af_1}^{x/z} f_{AF}(v) dv dz = \int_{\Omega_{X'}} f_{X'}(z) \cdot F_{AF}(x/z) dz \quad (2)$$

sendo  $f_{X'}$  a função densidade de probabilidades (FDP) de  $X'$ , e  $F_{AF}$  a função acumulada de probabilidades (FAP) de AF.

A escolha por esse método deve-se à sua formulação matemática, a qual dispensa a suposição de hipóteses relativas à sazonalidade e à correlação serial das vazões médias diárias, e aos resultados promissores revelados por sua aplicação às bacias italianas.

Definido o tipo de modelo para a regionalização de FDCs, passou-se ao estudo estatístico das séries de AF e  $X'$  nas estações fluviométricas selecionadas para elaboração do modelo regional, de modo que fosse possível escolher as distribuições de probabilidades adequadas para explicar essas variáveis. A seleção deu-se através do cálculo de indicadores da qualidade do ajuste das FDCs sintéticas em relação às FDCs empíricas. Para cálculo da integral disposta na equação 2, e da sua função inversa de quantis, foi preparado um programa computacional, de forma a viabilizar o cálculo de diversas combinações entre as distribuições de probabilidades mais utilizadas na descrição de variáveis hidrológicas: log-normal de 2 parâmetros, gama e Pearson-III para explicar a variável AF, e log-normal de 3 parâmetros, Generalizada de Pareto (GPA), e Log-Pearson III para a variável  $X'$ . Ressalta-se aqui que a prescrição

desses modelos probabilísticos é uma adaptação da metodologia original, na qual Castellarin *et al.* (2007) fizeram uso da distribuição Kapa de 4 parâmetros.

Após a seleção das duas distribuições que haviam proporcionado o melhor ajuste em âmbito regional, os seus parâmetros, estimados pelo método dos momentos-L (Hosking e Wallis, 1997) foram relacionados às características físicas, morfológicas e climáticas das bacias hidrográficas, por meio de equações de regressão múltipla, utilizando as informações disponíveis em todos os postos que tiveram suas séries homogeneizadas.

Em seguida, foi realizado o procedimento de validação cruzada de *jack-knife*, a fim de avaliar a confiabilidade e a robustez das equações que compuseram o modelo regional de FDCs. Essa técnica consiste em se retirar uma estação fluviométrica da análise e recalculas as relações regionais novamente, e obter por meio delas os parâmetros das duas distribuições selecionadas, a fim de estimar a FDC sintética na estação retirada. A partir daí, são calculados os índices de desempenho, cuja base é dada pelas diferenças entre os valores observados e os estimados. Esse processo é feito sucessivamente, até que todas as estações tenham sido contempladas. Ressalta-se que os atributos usados em cada equação de regressão foram os mesmos definidos nas relações obtidas quando todas as estações foram consideradas de uma só vez, anteriormente à validação cruzada.

Uma vez calculadas as FDCs sintéticas nas bacias envolvidas, obtidas no procedimento de *jack-knife*, pôde-se calibrar o modelo RIO GRANDE tendo-as como paradigma do processo de calibração. Para tanto, foi preparado um programa computacional em linguagem de programação *Visual Basic*. Os dados de entrada constituíram-se basicamente por: (1) alturas diárias de chuva, em mm, e de evaporação obtida em tanques evaporimétricos, também em mm, (2) área de drenagem, em km<sup>2</sup>, e especificação da forma dominante da bacia hidrográfica, (3) parâmetros das duas distribuições de probabilidades escolhidas, estimados pelas equações regionais de *jack-knife*, (4) limites inferior e superior e valores iniciais dos parâmetros do modelo RIO GRANDE, (5) função-objetivo, número de avaliações da mesma, e número de permanências a serem usadas no seu cálculo.

O algoritmo de otimização de parâmetros acoplado ao programa foi o DDS (da sigla em inglês "*Dynamically Dimensioned Search*"), desenvolvido por Tolson (2005), que o descreve resumidamente como um método estocástico e heurístico de pesquisa

de soluções otimizadas e satisfatórias em um hiper-espaço paramétrico, cujas dimensões vão decrescendo ao longo do processo de busca.

## DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO NAS BACIAS DOS RIOS PARÁ E PARAÓPEBA

A escolha pelas bacias contribuintes aos rios Pará e Paraopeba esteve condicionada à disponibilidade de dados pluviométricos, fluviométricos e evapotranspirimétricos em quantidade suficiente para permitir a aplicação e verificação do método proposto para a regionalização de curvas de permanência de longo termo e da calibração do modelo chuva-vazão RIO GRANDE a partir de FDCs sintéticas em bacias sem monitoramento hidrométrico sistemático. Outro fator determinante foi a existência de inúmeros estudos de caracterização e de regionalização de variáveis hidrológicas e climáticas, e de descrição dos aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos e fisiográficos da região que engloba as duas grandes bacias eleitas.

De acordo com descrição de Lima (2004, p. 148), "a bacia do rio Pará está inserida no quadrilátero formado pelas coordenadas geográficas aproximadas de 19°10' e 20°45' de latitude sul e 44°15' e 45°20' de longitude oeste, no estado de Minas Gerais", constituindo um dos principais afluentes da porção alta do rio São Francisco, juntamente com o rio Paraopeba. Sua área total é de aproximadamente 12.250 km<sup>2</sup>. Os principais afluentes do rio principal são os rios São João e do Peixe, pela margem direita, e os rios Itapeçerica, Lambari e do Picão, pela outra margem.

Por sua vez, a bacia do rio Paraopeba, cuja área de drenagem é 13.640 km<sup>2</sup>, localiza-se na amplitude de coordenadas geográficas aproximadas de 20°51' e 18°35' de latitude Sul e de 45°11' e 43°38' de longitude oeste. Seus principais afluentes são os rios Maranhão e Betim e o ribeirão São João, pela margem direita, e os rios Camapuã, Manso e Pardo e os ribeirões Serra Azul e Florestal, pelo lado esquerdo.

### Seleção e Tratamento dos Dados Fluviométricos e Definição de Regiões Homogêneas

Foram selecionados 34 postos fluviométricos localizados no interior das bacias dos rios Pará e Paraopeba, entre aqueles pertencentes às redes da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Companhia

Energética de Minas Gerais (CEMIG). Para os postos da rede hidrométrica da ANA, os históricos de cota e vazão foram obtidos junto à Superintendência Regional da CPRM (Serviço Geológico do Brasil), enquanto para a rede da CEMIG, os dados foram gentilmente cedidos pelo Departamento de Planejamento Energético daquela empresa. Os dados foram submetidos a uma análise de consistência, sendo que muitos resultados dos estudos de regionalização de variáveis e funções hidrológicas de CPRM (2001) foram aproveitados nessa avaliação.

Para o preparo das amostras que subsidiaram o cálculo da medida H, foram usados os postos fluviométricos que contivessem mais de 5 anos de dados. Ao final do procedimento de definição das regiões homogêneas, que é iterativo e feito a partir da adaptação de rotinas de cálculo elaboradas por Hosking e Wallis (1997), chegou-se a apenas uma região, composta por bacias correspondentes a 17 estações fluviométricas, as quais se encontram ilustradas na Figura 1.

Em seguida, foram compilados os seguintes atributos físicos das bacias hidrográficas correspondentes: área de drenagem (km<sup>2</sup>), comprimento (km) e declividade média (m/km) do curso de água principal, o desnível total observado em seu talvegue (m), as altitudes máxima (m) e mínima (m) da bacia, a densidade de drenagem (junções/km<sup>2</sup>), os coeficientes de forma e de compactidade, a precipitação média anual (mm) espacializada na bacia, e o coeficiente de escoamento (para este, consultar Tucci, 2002, p. 86). Todos os valores dessas características foram extraídos dos trabalhos de CPRM (2001). A chuva média anual foi espacializada nas bacias pelo método dos polígonos de Thiessen, com base em parte dos 157 postos pluviométricos analisados em um estudo anterior de consistência de dados, realizado pela CPRM para a bacia do rio São Francisco.

### Regionalização de Curvas de Permanência de Longo Termo

A regionalização de curvas de permanência de longo termo (FDCs) foi realizada a partir de uma adaptação do método proposto por Castellarin *et al.* (2004a), aplicada a algumas estações fluviométricas integrantes da região homogênea delimitada. O tema central da referida metodologia, também válido para o presente caso, consiste na definição de distribuições de probabilidades para as duas variáveis aleatórias cujo produto representa as vazões médias diárias. Na seqüência, devem ser preparadas equações regionais que relacionem os parâmetros

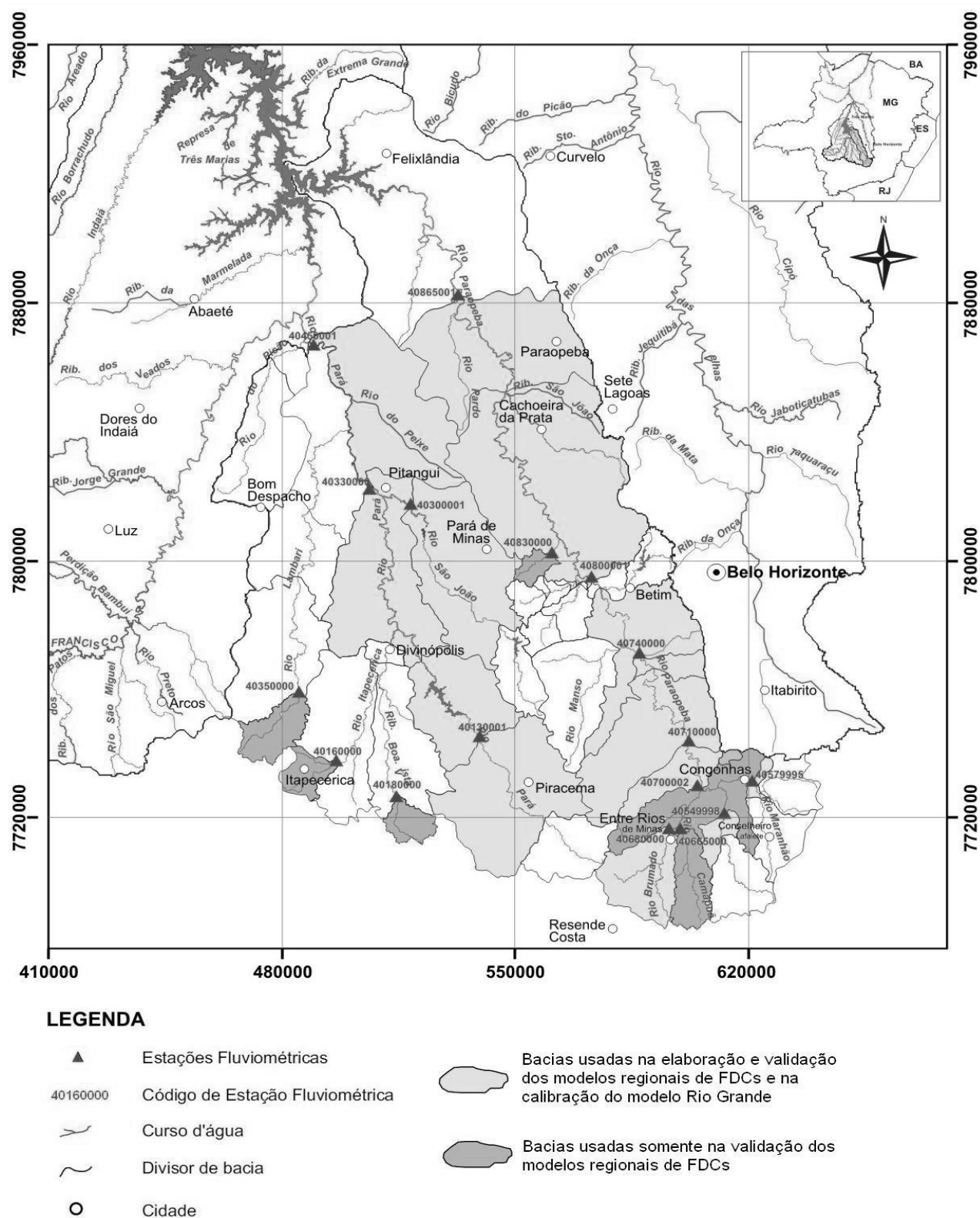


Figura 1 – Bacias Hidrográficas Componentes da Região Homogênea.

dessas distribuições às características físicas, morfológicas e climáticas das bacias hidrográficas envolvidas, a fim de que se possa obtê-los em locais sem monitoramento fluviométrico.

O ponto de partida da regionalização de FDCs foi a homogeneização das séries temporais de vazão média diária das estações fluviométricas componentes da região homogênea. O maior período comum encontrado foi de outubro de 1977 a setembro de 2006, escolhido por apresentar ciclos úmidos e secos do regime hidrológico regional, e por possibilitar o uso de 11 (onze) bacias na elaboração dos modelos regionais.

A homogeneização das séries nas 11 estações fluviométricas de referência para a regionalização de FDCs foi realizada a partir das recomendações de Tucci (2002) para o preenchimento de séries hidrológicas por regressão linear. Para cada estação fluviométrica, escolheu-se outra como referência, a fim de aplicar a regressão para as vazões em nível mensal. Em seguida, os dados diários foram obtidos a partir da multiplicação das vazões médias diárias do mesmo mês no posto de referência pela relação entre as descargas médias mensais dos dois postos relacionados, os quais deveriam situar-se preferencialmente no mesmo curso de água e ter uma razão entre as áreas de drenagem maior do que 0,20.

Em seguida, foram obtidas as amostras de AF e X' nas 11 estações fluviométricas, e estimados os parâmetros de diversas distribuições de probabilidades aplicáveis a essas séries, com base no método dos momentos-L (Hosking e Wallis, 1997).

Devido ao grande número de permanências existentes ao se estudar um período de 29 anos hidrológicos, foram selecionadas algumas durações notáveis para dar continuidade aos estudos, de modo que essas seriam usadas no cálculo de índices de desempenho. Ao todo, foram escolhidos 121 valores, pertencentes ao intervalo de permanências [0,025; 99,975]%. Essas permanências serviram como dado de entrada ao programa computacional de cálculo da função inversa de quantis da integral que representa a função acumulada de probabilidade conjunta das variáveis AF e X' (equação 2), possibilitando a obtenção das vazões médias diárias correspondentes a essas durações.

De posse das descargas fornecidas pelos diversos pares de distribuições de probabilidades, em cada estação fluviométrica, foi calculado o seguinte índice que permitiu avaliar o ajuste proporcionado:

$$S^2 = \sum_{j=1}^n \left( \frac{Q_{\text{sim},j} - Q_{\text{obs},j}}{Q_{\text{obs},j}} \right)^2 \quad (3)$$

sendo  $j$  o indexador de permanências avaliadas,  $n$  seu número total (121, no caso),  $Q_{\text{sim},j}$  e  $Q_{\text{obs},j}$  as vazões simulada e observada para a duração  $j$ , respectivamente.

A partir da avaliação do índice  $S^2$  em cada posto, e para cada combinação de distribuições, chegou-se à distribuição log-normal de 2 parâmetros e à de 3 parâmetros (LN-2p e LN-3p) para explicar as variáveis AF e X', respectivamente.

Dessa forma, foram elaboradas 5 equações regionais, para cada um dos 5 parâmetros dessas distribuições, relacionando-os às características físicas das 11 bacias. As equações foram definidas com base em critérios comumente utilizados em regressão múltipla, e com auxílio do *software* Statistica, cuja descrição detalhada pode ser encontrada em <http://www.statsoft.com>.

Em seguida, deu-se início ao procedimento de validação cruzada de *jack-knife*, a partir da elaboração de novas equações, devendo conter os mesmos atributos selecionados na etapa anteriormente descrita. Os parâmetros das distribuições LN-2p e LN-3p, estimados pelas regressões assim elaboradas, serviram para obtenção das FDCs sintéticas das bacias correspondentes, tendo como base as 121 permanências notáveis consideradas.

A partir de uma dada FDC sintética, em comparação à FDC empírica, foram calculados dois índices para análise de desempenho do modelo regional de curvas de permanência de longo termo. O erro relativo médio para a estação fluviométrica  $s$  é dado por:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \left( \frac{Q_{\text{sim},j} - Q_{\text{obs},j}}{Q_{\text{obs},j}} \right) \quad (4)$$

na qual a notação usada é a mesma da equação (3). O coeficiente de Nash-Sutcliffe, por sua vez, é dado por:

$$E_s = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{sim},j} - Q_{\text{obs},j})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{obs},j} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (5)$$

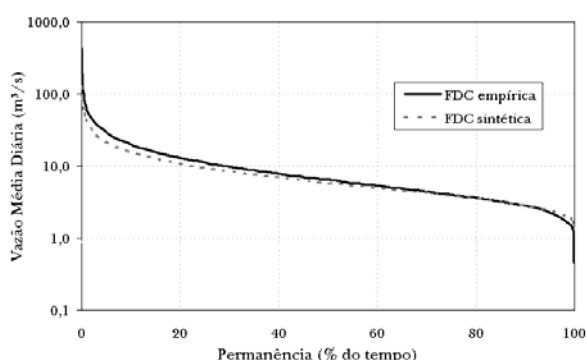
sendo  $\overline{Q_{\text{obs}}}$  igual à média das 121 vazões observadas, e o restante da simbologia é igual ao da equação (3).



Um valor muito próximo à unidade indica ajuste quase perfeito.

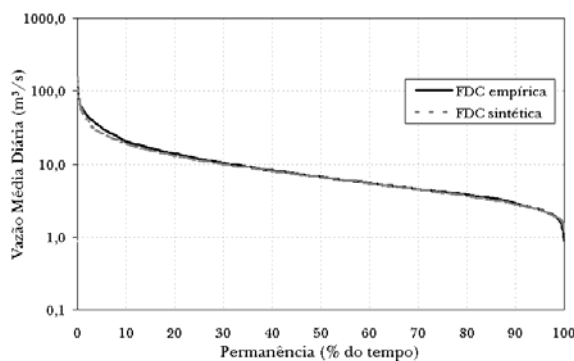
O índice  $\varepsilon_s$  permite avaliar a tendência do modelo regional para cada bacia hidrográfica. Pelos resultados obtidos, notou-se que prevalece uma ligeira superestimação das vazões pelas FDCs sintética, em relação às observadas. Por sua vez, o critério de Nash-Sutcliffe apontou bom desempenho geral da metodologia de regionalização. Foram encontrados 9 valores acima de 0,90, um valor entre 0,80 e 0,90, e um valor próximo a 0,55.

As Figuras 2 e 3 mostram o melhor e o pior ajuste proporcionado pelo modelo regional, respectivamente, tendo como base os valores calculados de  $E_s$ .

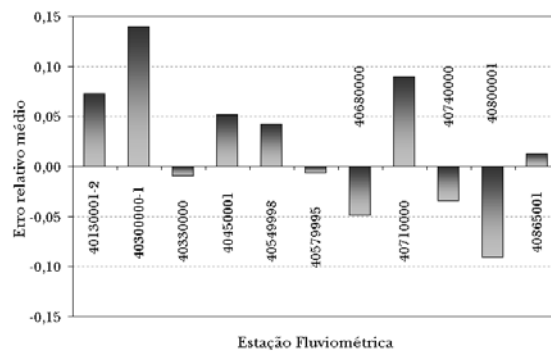


**Figura 2 – Comparação entre a FDC sintética e a FDC empírica no rio Brumado em Entre Rios de Minas (40680000). Coeficiente de Nash = 0,568.**

A Figura 4, por sua vez, mostra como se deu a variação do índice  $\varepsilon_s$  nas 11 bacias hidrográficas estudadas; verifica-se nessa figura que esse indicador apresenta valores positivos em um maior número de bacias.



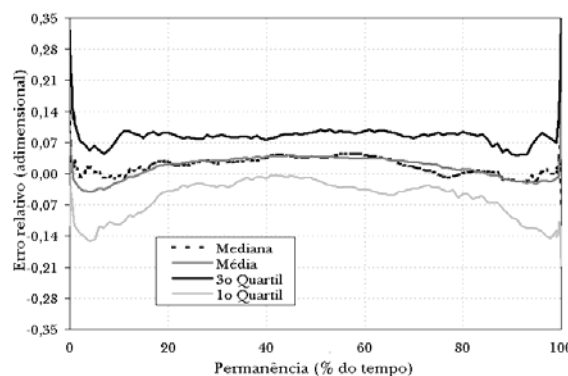
**Figura 3 – Comparação entre a FDC sintética e a FDC empírica no rio Maranhão em Congonhas Linígrafo (40579995). Coeficiente de Nash = 0,990.**



**Figura 4 – Erro relativo médio nas 11 bacias hidrográficas que se prestaram à elaboração e à validação do modelo regional de FDCs.**

Finalmente, foram calculados: a média, a mediana, e o primeiro e o terceiro quartis dos erros relativos por permanência notável, avaliados nas 11 estações fluviométricas. As curvas resultantes encontram-se sintetizadas na Figura 5, cujo exame permite que sejam avaliadas as incertezas associadas às curvas de permanência sintéticas elaboradas pelos modelos regionais.

Da Figura 5 pode-se concluir que os modelos regionais preparados para a região homogênea em questão tendem, em geral, a superestimar em até 5% as vazões médias diárias no ramo médio das curvas de permanência de longo termo, entre 20% e 70%. Já nos ramos extremos, ou seja, abaixo de 10% e acima de 75%, observa-se uma tendência em subestimar as vazões correspondentes. Nesse caso, os erros são pequenos, em torno de 0,1%, quando se analisam as permanências não menores do que 0,5% e não maiores do que 99,5%, pontos a partir dos quais os erros relativos crescem até atingir os 25%. Não foram analisadas as durações fora do intervalo [0,025;99,975] %.



**Figura 5 – Curvas média, mediana, e do primeiro e do terceiro quartis, associadas às 121 permanências de FDCs.**

Situações semelhantes à descrita para essas curvas são comuns em outros trabalhos de regionalização de FDCs (Castellarin *et al.*, 2004b; Krasovskaia *et al.*, 2006; Castellarin *et al.*, 2007). Observam-se pequenos resíduos no trecho médio e erros cada vez maiores à medida que se aproxima dos extremos das FDCs.

### Calibração do Modelo RIO GRANDE a partir das Curvas de Permanência de Longo Período Sintéticas

De posse das FDCs sintéticas nas 11 bacias hidrográficas estudadas, foi possível calibrar os parâmetros do modelo chuva-vazão RIO GRANDE.

As alturas de chuva diárias foram obtidas por meio da média ponderada da precipitação diária de postos localizados no interior e no entorno de cada bacia. Os pesos foram obtidos por meio do método dos polígonos de Thiessen.

A evapotranspiração potencial da bacia hidrográfica foi estimada a partir da correção dos dados de alturas diárias de evaporação observadas em tanque evaporimétrico Classe A. O fator de correção, compreendido entre 0,6 e 0,9, é um dos parâmetros calibráveis do modelo Rio Grande e é suposto constante ao longo do ano, para aquela bacia. As alturas diárias de evaporação foram obtidas dos registros de tanque evaporimétrico classe A da estação Porto Pará, operada pela CEMIG. Foi usado somente esse posto devido à baixa densidade da rede de monitoramento dessa variável na região.

Para realização da calibração, foi selecionado um período de 6 anos hidrológicos, correspondente a outubro de 1992 até setembro de 1998, definido a partir de critérios de proximidade de seus valores médios em relação à média do período de cálculo das FDCs empíricas e para minimização do preenchimento de dados evaporimétricos e pluviométricos.

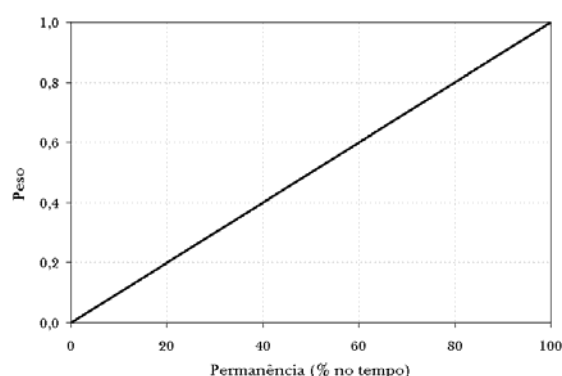
Inicialmente, estabeleceu-se uma estação fluviométrica de referência para que se pudesse fixar alguns dados de entrada ao programa computacional de calibração via FDCs: (1) número de iterações do algoritmo DDS, e (2) número de permanências usadas no cálculo da função-objetivo, priorizando-se as durações notáveis anteriormente estabelecidas, e (3) o tipo de função-objetivo. Foram realizados diversos testes, dos quais se depreendeu que:

- O número de iterações do algoritmo DDS, que funciona como seu critério de parada, deve ser de 6400. Após esse valor, não se observaram melhorias nos índices de desempenho avaliados.

- O número de permanências avaliadas deve ser igual a 99, igualmente espaçadas no intervalo [1;99] %.
- A função-objetivo que produz os melhores resultados deve ser da forma:

$$F.O = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \frac{|Q_{cal,j} - Q_{sint,j}|^2}{Q_{sint,j}} \quad (6)$$

na qual  $j$  é o indexador de permanências,  $n$  é igual a 99,  $Q_{cal,j}$  e  $Q_{sint,j}$  denotam as vazões calibrada e sintética correspondentes à duração  $j$ , respectivamente. O peso  $w_j$  é definido segundo uma função que segue a tendência mostrada na Figura 6.



**Figura 6 – Distribuição de pesos usados na função-objetivo definida para calibração do modelo RIO GRANDE.**

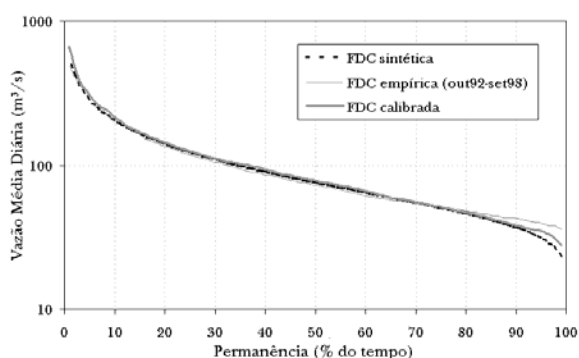
A escolha por essa função-objetivo é justificada não só pelo fato de essa ter fornecido valores mais apropriados para os indicadores de desempenho em 8 dentre as 11 estações fluviométricas estudadas, e índices médios regionais mais favoráveis, quando comparados aos obtidos por outros tipos de função, mas também por dar maior peso às vazões de estiagem, não-priorizadas por funções-objetivo que elevam ao quadrado as diferenças entre as descargas sintéticas (equivalentes às observadas, em se tratando do paradigma de calibração utilizado) e as calibradas.

O acesso à qualidade da calibração por meio da metodologia proposta foi feito em duas fases distintas, ambas envolvendo o cálculo de indicadores de desempenho:

- Comparação entre as FDCs sintéticas, paradigmas do processo de calibração automática, e as FDCs montadas a partir dos hidro-

gramas obtidos na calibração: cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe, dessa vez em porcentagem, da raiz quadrada da média dos erros quadráticos (RMSE), e da média dos valores absolutos dos erros relativos (AAPE).

- Comparação entre os hidrogramas observados e os calculados na calibração: obtenção dos mesmos índices supracitados, e do resíduo médio e da relação entre os volumes, retirando-se sempre da análise o primeiro ano, relativo ao aquecimento do modelo.



**Figura 7 – Ajuste da FDC calibrada em relação à FDC sintética usada na calibração e à FDC empírica, no rio Pará em Velho da Taipa (40330000).**

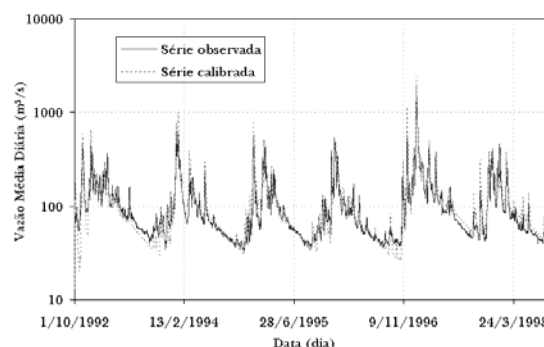
Os coeficientes de Nash obtidos, quando se comparam as FDCs sintéticas às calibradas, situam-se todos entre 90% de 100%, apontando qualidade satisfatória para a calibração tendo tais curvas como paradigma. Tais resultados são até mesmo superiores aos encontrados quando se utilizam hidrogramas observados no processo de calibração (Queiroga, 2003; Lima, 2004), ressaltando-se que, nesse caso, são eles próprios objeto de comparação. A Figura 7 exemplifica o ajuste entre as referidas FDCs no caso de uma estação fluviométrica. Também foi colocada a FDC empírica do período de outubro de 1992 a setembro de 1998, a título de comparação.

No caso dos hidrogramas, observou-se que em média para a região homogênea definida, o modelo RIO GRANDE é capaz de explicar quase 60% da variância natural observada nas séries de vazões médias diárias naturais, atingindo até mesmo 84% no rio Paraopeba em Porto do Mesquita (40865001). Os valores individuais do critério de Nash são comparáveis aos obtidos em estudos ante-

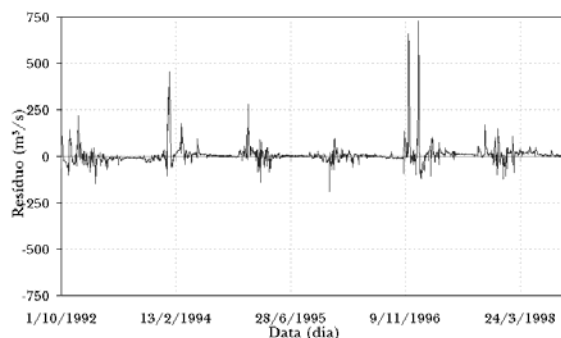
riores que calibraram o modelo RIO GRANDE por meio de hidrogramas observados (Queiroga, 2003; Lima, 2004). No entanto, o mesmo não pode ser dito das médias dos resíduos, maiores do que os encontrados nesses trabalhos. A relação entre os volumes, por sua vez, mostra que há boa reprodução dos volumes de escoamento gerado nas bacias envolvidas. Já o valor médio regional de AAPE (média dos valores absolutos dos erros relativos) aponta que o modelo chuva-vazão em questão superestima ou subestima as vazões médias diárias em 26%, variando entre 19,5% (rio São João em Jaguaruna e Jaguaruna Jusante) e 38,4% (rio Paraopeba em São Brás do Suaçuí Montante).

A Figura 8 apresenta os hidrogramas calibrados e observados na mesma estação fluviométrica de Velho da Taipa, também objeto de ilustração da Figura 7.

Os resíduos ( $Q_{cal} - Q_{obs}$ ) também foram analisados, por meio da montagem de gráficos de sua evolução temporal, nos quais se notou, na maioria dos casos, a flutuação dos erros em torno de zero, indicando a ausência de viés causado pelos parâmetros calibrados. Em algumas estações, verificou-se a tendência de superestimar as vazões de estiagem, sobretudo no ano 1996-1997, como ocorreu no rio Pará em Ponte do Vilela (40130001-2) e no rio Paraopeba em Porto do Mesquita (40865001). Também foram observados erros maiores no período chuvoso, comportamento esperado tendo em vista a variabilidade intra-anual típica da região estudada. A Figura 9 mostra esse comportamento na mesma estação fluviométrica mostrada nas duas figuras anteriores.

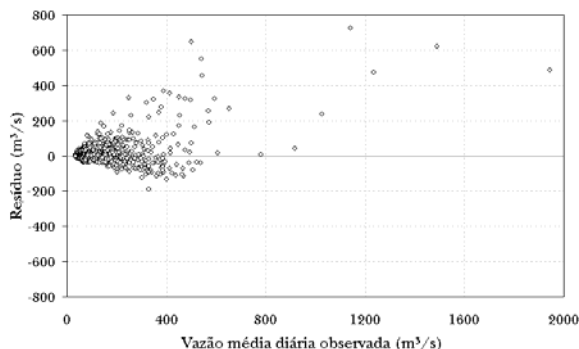


**Figura 8 – Hidrogramas observados e calibrados no rio Pará em Velho da Taipa (40330000).**



**Figura 9 – Evolução temporal dos resíduos da calibração no rio Pará em Velho da Taipa (40330000).**

Ainda para os resíduos, foram elaborados gráficos com a sua dispersão em relação às vazões observadas, nos quais se constatou a tendência de apresentarem variância crescente ao longo do eixo das descargas. Ressalva-se que o ano de 1992-1993 foi retirado do preparo dessas figuras. Comportamento semelhante foi encontrado nas demais estações fluviométricas. O mesmo aspecto confirma-se em trabalhos anteriores que estudaram a calibração do modelo Rio Grande (Queiroga *et al.*, 2005; Queiroga, 2003; Lima, 2004). A Figura 10 representa essa situação, na estação de Velho da Taipa (40330000).



**Figura 10 – Dispersão dos resíduos da calibração em relação às vazões observadas no rio Pará em Velho da Taipa (40330000).**

Os resultados da calibração mostraram grande variação entre as bacias hidrográficas estudadas, e dificuldade de reprodução das vazões de estiagem em alguns postos fluviométricos. Cogita-se a hipótese de que o problema de reprodução das vazões menores esteja associado à não-representatividade da chuva em algumas bacias, como ocorreu em 40130001-2 (rio Pará em Ponte do Vilela e Ponte do Vilela Jusante), 40549998 (rio

Paraopeba em São Brás do Suaçui Montante), 40680000 (rio Brumado em Entre Rios de Minas), 40740000 (rio Paraopeba em Alberto Flores), e 40865001 (rio Paraopeba em Porto do Mesquita). Entretanto, antes que se confirme isso, sugere-se a realização de calibrações na forma convencional, isto é, por meio de hidrogramas observados, a fim de se averiguar se pode haver algum impasse imposto pela calibração por FDCs sintéticas. Emergem também as questões relativas à representatividade dos dados de vazão média diária e de evaporação medida em tanques evaporimétricos e à extrapolação do ramo inferior das curvas-chave em alguns postos.

De qualquer modo, foram obtidos resultados satisfatórios e comparáveis a outros estudos que usaram o modelo RIO GRANDE, principalmente na bacia do rio Pará. Além disso, o ajuste encontrado na comparação entre FDCs sintéticas e calibradas foi muito bom na maioria dos casos, tal como se comprovou pelos indicadores correspondentes a essa análise.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente artigo descreve a proposta de calibração de um modelo chuva-vazão a partir da utilização de curvas de permanência de longo período sintéticas em bacias não-monitoradas. O trabalho constituiu-se de duas partes. Na primeira, foi elaborado e avaliado um modelo regional de curvas de permanência, permitindo sua inferência em seções fluviais sem monitoramento hidrométrico, desde que essas pertençam a uma mesma região homogênea. A segunda fase referiu-se à calibração propriamente, tendo como objetivo do processo a reprodução aproximada das referidas curvas a partir das vazões simuladas. Na validação das duas etapas metodológicas, foi usado o procedimento de validação cruzada de *jack-knife*, especialmente aplicável quando se dispõe de poucas estações fluviométricas em estudos de regionalização.

Os resultados da primeira fase mostraram robustez do modelo regional, e aplicabilidade da metodologia estocástica adaptada de Castellarin *et al.* (2007) ao caso das bacias estudadas nos rios Pará e Paraopeba.

No que concerne à calibração, foram encontrados, em alguns casos, resultados comparáveis a outros estudos envolvendo a calibração do modelo RIO GRANDE em bacias mineiras. Os melhores índices de desempenho concentraram-se nas bacias

do rio Pará e do seu afluente rio São João. Nas áreas contribuintes ao rio Paraopeba, os índices apontaram desempenho variável.

Em alguns postos, observou-se maior dificuldade do modelo em reproduzir as vazões de estiagem, em relação às descargas de maior magnitude.

Embora a pesquisa aqui descrita revele resultados promissores para a predição de vazões em bacias com pouco ou nenhum monitoramento fluviométrico, recomenda-se que a metodologia seja testada em um conjunto mais amplo e complexo de bacias, de maior amplitude de escalas e de características climáticas e geomorfológicas, na busca de respostas a questões importantes para a generalização do método, tais como a aqui reportada sobre a dificuldade de simular estiagens severas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, e à CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, pelo fornecimento dos dados aqui usados, à CAPES, pela bolsa de mestrado de V. B. Pinheiro, e à FAPEMIG (PPM-00158-09) e ao CNPq (301133/2009-3) pelos auxílios concedidos. Finalmente, os autores agradecem aos dois revisores anônimos, pelos seus pertinentes comentários e valiosas sugestões.

## REFERÊNCIAS

- CASTELLARIN, A.; VOGEL, R. M.; BRATH, A. A stochastic index flow model of flow duration curves. *Water Resources Research*, 40, W03104, p. 1-10, 2004. DOI:10.1029/2003WR002524.
- CASTELLARIN, A.; GALEATI, G.; BRANDIMARTE, L.; MONTANARI, A.; BRATH, A. Regional flow-duration curves: reliability for ungauged sites. *Advances in Water Resources*, 27, p. 953-965, 2004.
- CASTELLARIN, A.; CAMORANI, G.; BRATH, A. Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30, p. 937-953, 2007.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – Superintendência Regional de Belo Horizonte. Regionalização de vazões sub-bacias 40 e 41, Convênio 015/2000 ANEEL – 013/CPRM/2000, Relatório Final. Belo Horizonte, 776 p., 2001.
- DUAN, Q.; SCHAAKE, J.; ANDREASSIAN, V. Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, vol. 320, p. 3-17, 2006.
- KRASOVSKAIA, I.; GOTTSCHALK, L.; LEBLOIS, E.; PACHECO, A. Regionalization of Flow Duration Curves. In: *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts. Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference*, Havana, Cuba. IAHS Publication, v. 308, p. 105-110, 2006.
- HOSKING, J. R. M. e WALLIS, J. R. *Regional Frequency Analysis - An Approach Based on L-Moments*, Cambridge University Press, Cambridge, 228 p., 1997.
- LIMA, A. A. Metodologia Integrada para Determinação da Enchente de Projeto de Estruturas Hidráulicas por meio de Séries Sintéticas de Precipitação e Modelos Chuva-Vazão. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG, Belo Horizonte, 316 p., 2004.
- QUEIROGA, Y. G. A. Estudo e Modelagem dos Erros de Simulação Hidrológica e sua Assimilação na Previsão de Vazões de Curto Prazo – O Caso da Bacia do Rio Grande na UHE Camargos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UFMG, Belo Horizonte, 348 p., 2003.
- QUEIROGA, Y. G. A.; NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O. Avaliação de um método de assimilação de erros nas previsões de vazões de curto prazo afluentes ao reservatório da UHE Camargos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 3, p. 63-74, 2005.
- NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Editora CPRM – Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Belo Horizonte, 561 p., 2007.
- SKØIEN, J. O.; BLÖSCHL, G. Spatiotemporal topological kriging of runoff time series, *Water Resources Research*, 43, W09419, p. 1-21, 2007. DOI:10.1029/2006WR005760.
- TOLSON, B. A. Automatic Calibration, Management and Uncertainty Analysis: Phosphorus Transport in the Cannersville Watershed. Tese de Doutorado, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, 227 p., 2005.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*, 1ª ed., Editora da Universidade UFRGS, Porto Alegre, 652 p., 1998.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Editora da Universidade UFRGS, Porto Alegre, 256 p., 2002.
- VANDEWIELE, G.L.; ELIAS, A. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology*, v. 170, p. 277-291, 1995.

- VOGEL, R.M.; FENNESSEY, N.M. Flow-duration curves I: new interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120 (4), p. 485-504, 1994.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments. Imperial College Press, Londres, 306 p., 2004.
- YU, P.-S.; YANG, T.-C. Using synthetic flow duration curves for rainfall-runoff model calibration at ungauged sites. *Hydrological Processes*, 14 (1), p. 117-133, 2000.
- ZHAO, R. J.; LIU, X. R. The Xinanjiang Model, In: Singh, V. P. *Computer Models of Watershed Hydrology*, WRP, Highlands Ranch, p. 215-232, 1995.

### **Calibration Of A Rainfall-Runoff Model In Ungauged Basins Using Long-term Flow Duration Curves**

#### **ABSTRACT**

*The determination of some characteristic values of hydrologic variables and related functions at a given river cross-section, along with the correct assessment of how the associated streamflow records fluctuate over time, are key elements for planning, designing and operating water resources systems in gauged catchments. However, in catchments with scarce (or even no) at-site streamflow records, resorting to methods that allow transferring hydrological information from gauged to ungauged locations is necessary and absolutely crucial for developing and managing local water resources. This paper proposes and evaluates a novel approach for the automatic calibration of the parameters of a rainfall-runoff model at an ungauged catchment, using the long-term synthetic flow duration curve, estimated based on a statistical regional model as a paradigm of local hydrology. In this context, the estimated long-term flow duration curve is regarded as a useful synthesis of the local hydrological regime which may be reasonably approximated from the discharges simulated by an appropriate conceptual rainfall-runoff model with an adequate set of calibrated parameters. Once the set of calibrated parameters is obtained for a given ungauged catchment, the hydrologic model can be used to transform existing daily rainfall series into simulated daily discharges, thus enabling one to perform standard hydrologic studies such as the frequency analysis of floods and droughts, reservoir water balance, flow routing and the assessment of the local water resources, among others.*

*The approach proposed herein consists basically of two phases. The first relates to the construction of a regional statistical model for estimating the long-term flow duration curve at an ungauged catchment, by spatially transferring*

*hydrological information from existing gauged sites within a hydrologically homogenous region. The second phase refers to the calibration of the parameters of the RIO GRANDE simulation model, a conceptual model largely based on the well known Xinanjiang water balance structure, having the estimated flow duration curve as the paradigmatic object to be mimicked. The proposed approach has been applied and verified for the Pará and Paraopeba river basins, both located in the state of Minas Gerais, in southeastern Brazil. In both phases, a 'jackknife' experiment has been devised in order to calculate the associated performance indexes and finally assess the overall reliability attained by the proposed approach.*

**Key-words:** Regionalization of long-term flow duration curves, calibration of rainfall-runoff models.