

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELOS REGIONAIS DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES E SUA UTILIZAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Veber Costa¹; Wilson Fernandes²; Mauro Naghettini³

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pela Engenharia Hidrológica é a estimação de variáveis necessárias à gestão de recursos hídricos em bacias desprovidas de monitoramento sistemático. Com intuito de contornar este problema, técnicas de transposição de informações, tais como a regionalização hidrológica, têm sido empregadas. No presente trabalho, é proposta uma metodologia para regionalização de curvas de permanência de vazões de rios perenes, intermitentes e efêmeros, com emprego da distribuição de probabilidades Burr XII estendida. Esta distribuição apresenta grande flexibilidade e aderência a dados empíricos, o que possibilitou a representação acurada dos extremos das curvas de permanência. A análise de desempenho mostrou que, de modo geral, os modelos propostos são adequados à síntese de curvas de permanência em locais desprovidos de monitoramento, com certas ressalvas pertinentes às aplicações em rios intermitentes e efêmeros. Em adição aos modelos regionais, as curvas modeladas com a distribuição Burr XII estendida foram utilizadas em uma série de análises relacionadas à calibração indireta do modelo Rio Grande de simulação hidrológica.

ABSTRACT

One of the main challenges to hydrological engineers refers to the estimation of variables, needed to water resources planning and management, in ungauged river basins. In order to face this challenge, techniques for transposing information, such as the hydrologic regional analyses, are widely employed. This paper presents a method for regionalizing flow duration curves in perennial, intermittent and ephemeral rivers, based on the extended Burr XII probability distribution. Such distribution shows great flexibility to fit data, with accurate reproduction of flow extremes. The performance analysis showed that, in general, the regional models are able to synthesize flow duration curves in ungauged basins, with some reservations to the use of the methodology in intermittent and ephemeral rivers. In addition to the regional models, synthetic FDC's were used to perform several analysis related to Rio Grande rainfall-runoff model indirect calibration.

PALAVRAS CHAVE: regionalização, curva de permanência, distribuição de probabilidades Burr XII estendida

¹ Aluno de doutorado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, veberc@gmail.com

² Professor adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, wilson@ehr.com.br

³ Professor associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, naghet@netuno.lcc.ufmg.br

1- INTRODUÇÃO

As curvas de permanência expressam a relação entre a magnitude e a frequência das vazões em um curso d'água, associando a cada valor de descarga o percentual do tempo em que a mesma foi igualada ou excedida em um período de observação de dados. De maneira alternativa, pode-se entender a curva de permanência como o complemento da função acumulada de probabilidade das vazões, o que introduz uma abordagem estatística formal ao problema.

As curvas de permanência constituem uma representação simples do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Sua forma e declividade expressam a variabilidade das vazões e são determinadas por características físicas, climáticas, morfológicas da e de cobertura vegetal na bacia em questão. A área sob a curva de permanência representa o volume total de escoamento ao longo do período de observação.

Diversas aplicações são associadas às curvas de permanência, dentre as quais pode-se destacar: estudos de disponibilidade hídrica, avaliações de aproveitamento hidrelétrico e operação de reservatórios, projetos de irrigação, estudos de qualidade das águas e calibração indireta de modelos de transformação chuva-vazão (Pinheiro e Naghettini, 2010).

As curvas de permanência podem ser construídas segundo duas abordagens distintas. Na primeira delas, todos os dados de período de observação são utilizados, e a curva obtida é denominada curva de permanência de longo termo, sendo comumente denotada por FDC (do inglês, "*flow duration curve*"). A interpretação probabilística das curvas de longo termo é restrita ao período de observação de dados utilizado em sua construção e sua utilização somente é recomendada quando este período é longo o suficiente para caracterizar a distribuição limite das vazões. Apesar destas limitações, as FDC's podem ser empregadas para preenchimento de falhas e também na geração de séries sintéticas de vazões em bacias desprovidas de monitoramento, através do uso de um modelo regional (Hughes e Smakthin, 1996).

Na segunda abordagem, a construção é efetuada para cada ano civil ou hidrológico, e as curvas obtidas são denominadas curvas de permanência anuais, ou AFDC (do inglês, "*annual flow duration curve*"). O uso das curvas anuais vem ganhando destaque uma vez que a elas pode ser conferido um tratamento estatístico convencional: a variabilidade interanual pode ser avaliada e tempos de recorrência podem ser atribuídos às mesmas. Além disso, pode-se construir uma curva anual mediana, característica de um ano hidrológico típico e, dessa forma, não afetada por eventos hidrológicos extremos.

Independente da abordagem utilizada, a construção das curvas de permanência consiste na ordenação crescente das vazões e posterior atribuição de probabilidades de superação às mesmas. Diversos estimadores podem ser empregados para este fim (Vogel e Fennessey, 1994), sendo o mais

comum deles baseado na posição de plotagem de Weibull, que expressa as referidas probabilidades da seguinte maneira:

$$p = \frac{i}{n+1} \quad (1)$$

na qual i denota o número de ordem das vazões e n o número total de dados utilizados.

No presente trabalho foi proposta uma metodologia para construção de modelos regionais de curvas de permanência, concebidos com generalidade suficiente para representar regimes hidrológicos de rios perenes, intermitentes e efêmeros. Os modelos têm por base a distribuição de probabilidades Burr XII estendida, a qual é caracterizada pela grande flexibilidade e capacidade de aderência a dados empíricos. Os modelos regionais foram aplicados a bacias hidrográficas em Minas Gerais e no Ceará, contemplando assim rios perenes, intermitentes e efêmeros. Em adição aos modelos regionais, as curvas de permanência foram utilizadas como paradigma de calibração indireta do modelo Rio Grande de transformação chuva-vazão, o que possibilitou uma série de análises relacionadas à simulação hidrológica nas duas regiões de estudo.

2- MODELAGEM DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE RIOS INTERMITENTES E EFÊMEROS COM EMPREGO DO TEOREMA DA PROBABILIDADE TOTAL

O emprego das técnicas convencionais de construção de curvas de permanência é inadequado para rios intermitentes e efêmeros em função das descontinuidades associadas às vazões nulas. Para contornar este inconveniente, Haan (1977) propôs a utilização do teorema da probabilidade total, que estabelece que a probabilidade de ocorrência de um evento A , pertencente ao espaço amostral S constituído pela união de k eventos B_i mútua e coletivamente excludentes, é dada por:

$$P(A) = \sum_{i=1}^k P(B_i)P(A|B_i) \quad (2)$$

No caso das descargas em um curso d'água, o espaço amostral é constituído por vazões nulas e vazões não nulas. Aplicando-se o teorema da probabilidade total a esta situação, tem-se:

$$P(Q > q) = P(Q > q|Q = 0)P(Q = 0) + P(Q > q|Q > 0)P(Q > 0) \quad (3)$$

Entretanto, uma vez que $P(Q > q|Q = 0) = 0$, tem-se:

$$P(Q > q) = P(Q > q|Q > 0)P(Q > 0) \quad (4)$$

Considerando-se as permanências como o complemento da função acumulada de probabilidades, pode-se expressar a equação 4 da seguinte maneira:

$$p(i) = p^*(i)P(Q > 0) \quad (5)$$

na qual $p^*(i)$ corresponde às permanências das vazões não nulas enquanto $p(i)$ corresponde às permanências de todas as vazões. A equação 5 mostra que o termo $P(Q>0)$ atua como uma correção das permanências associadas ao conjunto de vazões não nulas.

3- A UTILIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES BURR XII ESTENDIDA NA MODELAGEM DE CURVAS DE PERMANÊNCIA

A versão estendida da distribuição foi introduzida por Shao *et al.* (2004), como uma opção de ajuste mais flexível que a forma original proposta por Burr (1942). A opção por esta distribuição no presente trabalho foi baseada nas seguintes considerações: (1) a distribuição pode exibir uma ampla variedade de valores de assimetria e curtose, o que lhe confere grande flexibilidade de forma; (2) os modelos de curvas de permanência para rios perenes, intermitentes e efêmeros podem ser acomodados na mesma formulação matemática; e (3) os parâmetros da distribuição possuem relação com certas características físicas, climáticas e morfológicas das bacias hidrográficas em estudo, o que é de grande interesse em trabalhos de regionalização.

Os modelos de curva de permanência ajustados pela distribuição Burr XII estendida podem ser expressos por:

$$Q_p = \lambda \left[\left(1 - (p/\tau)^\beta \right) / \beta \right]^\alpha, \text{ para } \beta \neq 0 \quad (6)$$

$$Q_p = \lambda \left[-\ln(p/\tau) \right]^\alpha, \text{ para } \beta = 0$$

na qual:

Q_p - vazão associada à permanência p ;

λ - parâmetro de escala;

α e β - parâmetros de forma;

τ - parâmetro associado ao percentual do tempo em que ocorre vazão no rio. Este parâmetro foi denominado “*cease-to-flow*” (Shao *et al.*, 2009). No caso de rios perenes, $\tau=1$.

4- MODELOS REGIONAIS DE CURVAS DE PERMANÊNCIA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A construção dos modelos regionais seguiu uma abordagem estatística, na qual os parâmetros da distribuição Burr XII estendida, estimados em cada estação fluviométrica, são relacionados a características físicas, climáticas e morfológicas das bacias por meio de regressão linear múltipla. Os modelos assim obtidos foram denominados modelos regionais completos (MRC).

Após a construção dos modelos regionais completos, foi realizada a avaliação de desempenho, confiabilidade e robustez dos mesmos. No presente trabalho, foi utilizada a técnica de

validação cruzada “*jack-knife*”, sugerida por Castellarin *et al.* (2004). De maneira resumida, o procedimento consiste nas seguintes etapas:

1. Um modelo regional é construído a partir do conjunto e N estações disponíveis na região em estudo;
2. Uma dada estação, denotada por s , é retirada da análise;
3. Um novo modelo regional é então construído para o conjunto de $N-1$ estações restantes, empregando-se as mesmas variáveis explicativas definidas na etapa 1;
4. O modelo regional construído na etapa 3 é utilizado para estimar a curva de permanência sintética na estação s ;
5. As etapas 2 a 4 são repetidas até que todas as estações tenham sido retiradas da análise;
6. Por fim, cada uma das N curvas de permanência sintéticas obtidas através da validação cruzada são comparadas com as curvas empíricas, construídas a partir dos dados locais, por meio dos índices de desempenho descritos a seguir.

Em uma dada estação s , o erro relativo $\varepsilon_{s,j}$, correspondente à j -ésima permanência é dado por:

$$\varepsilon_{s,j} = \frac{\hat{q}_{s,j} - q_{s,j}}{q_{s,j}} \quad (7)$$

na qual $\hat{q}_{s,j}$ denota a vazão correspondente à permanência j obtida dos modelos regionais e $q_{s,j}$ se refere à vazão correspondente à permanência j da curva empírica.

O erro relativo médio por estação é dado por:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{N_D} \sum_{j=1}^{N_D} \varepsilon_{s,j} \quad (8)$$

na qual N_D é o número de permanências utilizada no cálculo dos erros relativos.

O desvio padrão dos erros relativos é dado por:

$$\sigma_{\varepsilon_s} = \sqrt{\frac{1}{N_D - 1} \sum_{j=1}^{N_D} \left(\varepsilon_{s,j} - \bar{\varepsilon}_s \right)^2} \quad (9)$$

Por fim, o coeficiente de Nash-Sutcliffe é dado por:

$$E_s = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_D} \left(\hat{q}_{s,j} - q_{s,j} \right)^2}{\sum_{j=1}^{N_D} \left(q_{s,j} - \bar{q}_s \right)^2} \quad (10)$$

na qual \bar{q}_s denota a vazão média na estação em estudo.

Além dos índices apresentados, foram avaliados também os indicadores P, que expressam o percentual de casos, em relação às N estações, para os quais $E_s > 0,75$ (P_1 , ajuste de regular a bom), $0,50 < E_s < 0,75$ (P_2 , ajuste de ruim a regular) e $E_s < 0,50$ (P_3 , ajuste ruim).

5- O MODELO RIO GRANDE DE TRANSFORMÇÃO CHUVA-VAZÃO

5.1- Considerações gerais

O Rio Grande é um modelo de transformação chuva-vazão conceitual, determinístico, contínuo e semi-distribuído, sendo composto por 3 módulos principais: produção, concentração e propagação em cursos d'água.

O módulo de produção realiza o balanço de umidade no solo ao longo do tempo. Este módulo é inteiramente baseado na conceitualização do modelo Xinanjiang, originalmente descrito por Zhao (1980, *apud* Naghettini *et al.*, 2006). A estrutura do referido modelo é adequada a regiões úmidas e semi-úmidas.

O módulo de concentração gera um conjunto de pulsos discretos de lâminas de escoamento total sobre uma área unitária da bacia, em N intervalos de tempo Δt . A consideração de que lâminas de escoamento proveniente de diferentes áreas da bacia se concentram na seção exutória em diferentes intervalos de tempo é introduzida na estrutura do modelo Rio Grande por meio de uma função de transferência baseada no hidrograma unitário sintético de Clark.

Por fim, o módulo de propagação realiza a propagação das lâminas de escoamento pelo curso d'água com o uso do método de Muskingum-Cunge.

5.2- Calibração indireta do modelo Rio Grande a partir de curvas de permanência sintéticas

Em estudos usuais de regionalização, os parâmetros de modelos chuva-vazão são relacionados a características físicas, climáticas e hidrológicas das bacias hidrográficas. Os inconvenientes apresentados por esta metodologia são o grande número de parâmetros a serem regionalizados, a correlação existente entre eles, a dificuldade de relacioná-los a atributos da bacia e a existência de múltiplos conjuntos paramétricos que fornecem resultados satisfatórios (Vogel, 2006).

Yu e Yang (2000) propuseram uma metodologia para calibração de modelos hidrológicos a partir de curvas de permanência sintéticas. A idéia principal é se encontrar um conjunto de parâmetros capaz de sintetizar as vazões ordenadas, sem o compromisso de reproduzir sua estrutura serial (Pinheiro e Naghettini, 2010). Esta estrutura é resgatada de maneira indireta, por meio da evolução das alturas de chuva e evaporação ao longo do período de simulação. A vantagem deste método é que somente os parâmetros da distribuição que modela a curva de permanência são regionalizados.

Neste trabalho, a metodologia de calibração indireta foi utilizada para uma série de análises com o modelo Rio Grande. No caso de rios perenes, foi realizada uma avaliação comparativa da qualidade de calibração entre as calibrações com curvas de permanência de longo termo e curvas anuais medianas, tendo-se em vista que as primeiras são afetadas por extremos hidrológicos enquanto as últimas não o são. Para os rios intermitentes e efêmeros, foi realizada somente a calibração com curvas de longo termo. O objetivo foi aferir a capacidade do modelo de reproduzir a condição de intermitência, uma vez que sua estrutura não é adequada para este fim. A avaliação da qualidade calibração foi realizada com os índices descritos a seguir.

O primeiro índice avaliado foi o coeficiente de Nash-Sucliffe, expresso da seguinte maneira:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (11)$$

onde:

i – indexador temporal, em dias;

N – número de dias de calibração, excetuando-se o período de aquecimento da modelo Rio Grande;

$Q_{obs,i}$ – vazão observada no dia i ;

$Q_{sim,i}$ – vazão simulada no dia i ;

\bar{Q}_{obs} - vazão média observada.

Outro índice avaliado foi a raiz quadrada da média dos erros quadráticos (RMSE, na sigla em inglês), dada por:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Foi avaliada também a média dos valores absolutos dos erros relativos (AAPE, na sigla em inglês), expressa por:

$$AAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{sim,i} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,i}} \right| \quad (13)$$

Por fim, foram avaliados o indicador k , que expressa a relação entre os volumes sob os hidrogramas calibrado e observado, e o coeficiente de determinação R^2 entre as vazões simuladas e observadas. Este coeficiente expressa a concordância entre os valores de vazão simulados e observados e a coerência temporal entre eles.

6- APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A BACIAS HIDROGRÁFICAS EM MINAS GERAIS

6.1- Construção dos modelos regionais de curva de permanência

A região de estudo selecionada em Minas Gerais, mostrada na Figura 1, é constituída pelas bacias dos rios Pará e Paraopeba, afluentes do rio São Francisco pela margem direita. Foram selecionadas 10 estações fluviométricas na construção dos modelos regionais, com período comum de 29 anos. Os postos fluviométricos e os principais atributos das respectivas sub-bacias são apresentados na Tabela 1.

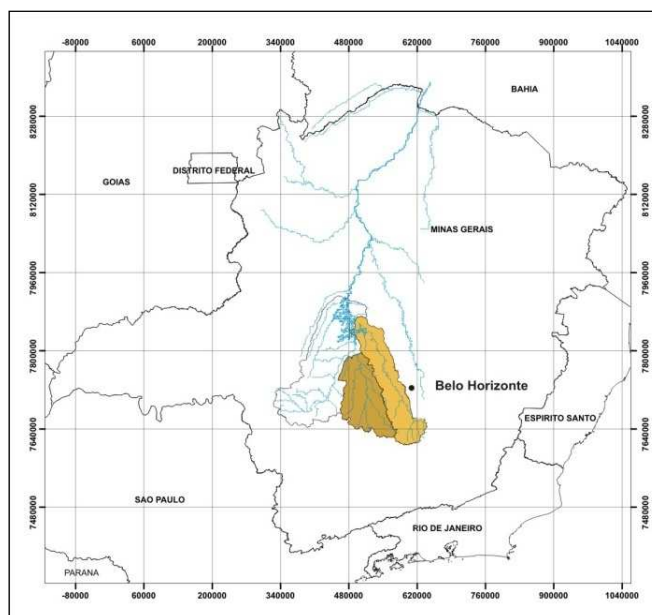


Figura 1- Bacias dos Rios Pará e Paraopeba. Fonte: Pinheiro e Naghettini (2010)

Tabela 1 – Estações fluviométricas e características físicas, climáticas e morfológicas das bacias em Minas Gerais

Estação Fluviométrica	Código	A_d (km ²)	L (km)	S_{eq} (m/km)	DH_{tot} (m)	H_{min} (m)	H_{max} (m)	DD (junções/km ²)	K_f	K_c	P (mm)	C_{esc}
Ponte do Vilela e Ponte do Vilela Jusante	40130001 e 40130002	1620	75,8	1,92	401	759	1160	0,114	0,30	1,47	1533	0,33
Jaguaruna Jusante	40300001	1558	119,1	1,82	444	656	1100	0,099	0,11	1,7	1432	0,31
Velho da Taípa	40330000	7378	219,4	0,75	551	609	1160	0,036	0,15	1,66	1456	0,30
Porto Pará	40450001	11302	293,1	0,46	571	589	1160	0,054	0,13	1,71	1431	0,29
São Brás do Suaçuí Montante	40549998	461	52,0	2,69	263	877	1140	0,098	0,17	1,52	1400	0,38
Entre Rios de Mainas	40680000	486	47,3	1,25	237	863	1100	0,136	0,22	1,34	1369	0,44
Belo Vale	40710000	2760	118,9	1,59	346	794	1140	0,137	0,20	1,28	1408	0,40
Alberto flores	40740000	3939	187,4	1,21	404	736	1140	0,134	0,11	1,49	1422	0,35
Ponte Nova do Paraopeba	40800001	5680	236,3	1,00	437	703	1140	0,141	0,10	1,64	1449	0,33
Porto do Mesquita	40865001	10192	419,8	0,60	507	633	1140	0,133	0,06	1,87	1414	0,33

Os parâmetros da distribuição Burr XII estendida foram estimados pelo método dos momentos-L (MML). Tais parâmetros foram então relacionados a características das bacias por meio de regressão linear múltipla. As equações de regressão para cada parâmetro da distribuição são apresentadas na tabela 2, que apresenta também os valores do coeficiente de determinação, coeficiente de determinação ajustado, erro padrão de estimativa e valor do teste de significância F_{total} . O leitor deve se reportar ao Apêndice 1 para a lista de notações.

Tabela 2 – Equações de regressão para os 3 parâmetros da distribuição Burr XII estendida

Equação Regional	R ²	R ² ajustado	Erro Padrão	F _{total}
$\lambda=0,02003A^{0,97077}k_c^{-1,01951}$	0,99792	0,99733	0,05482	1680,68
$\alpha=-3,23919+0,0008H_{\max}+0,4406k_c+0,00075P+2,40647C_{\text{esc}}$	0,87538	0,77569	0,02363	8,78
$\beta=-78,2421+11,4094x\ln(H_{\max})+0,4341x\ln(k_f)+5,5583x\ln(k_c)+5,3273x\ln(C_{\text{esc}})$	0,90697	0,83254	0,14135	12,19

6.2- Análise de desempenho dos modelos regionais de curva de permanência

Conforme menção anterior, a análise de desempenho foi realizada por meio da validação cruzada sugerido por Castellarin *et al.* (2004). Na Figura 2 são mostrados gráficos de dispersão dos parâmetros dos modelos regionais completos (MRC) e dos modelos regionais “*jack-knife*” (MJK) em relação às estimativas MML. É possível perceber que a dispersão não é acentuada, o que indica que a perda de informação decorrente da retirada de uma estação não afeta significativamente o desempenho dos modelos “*jack-knife*”. Este fato também é um indicador da robustez da metodologia proposta.

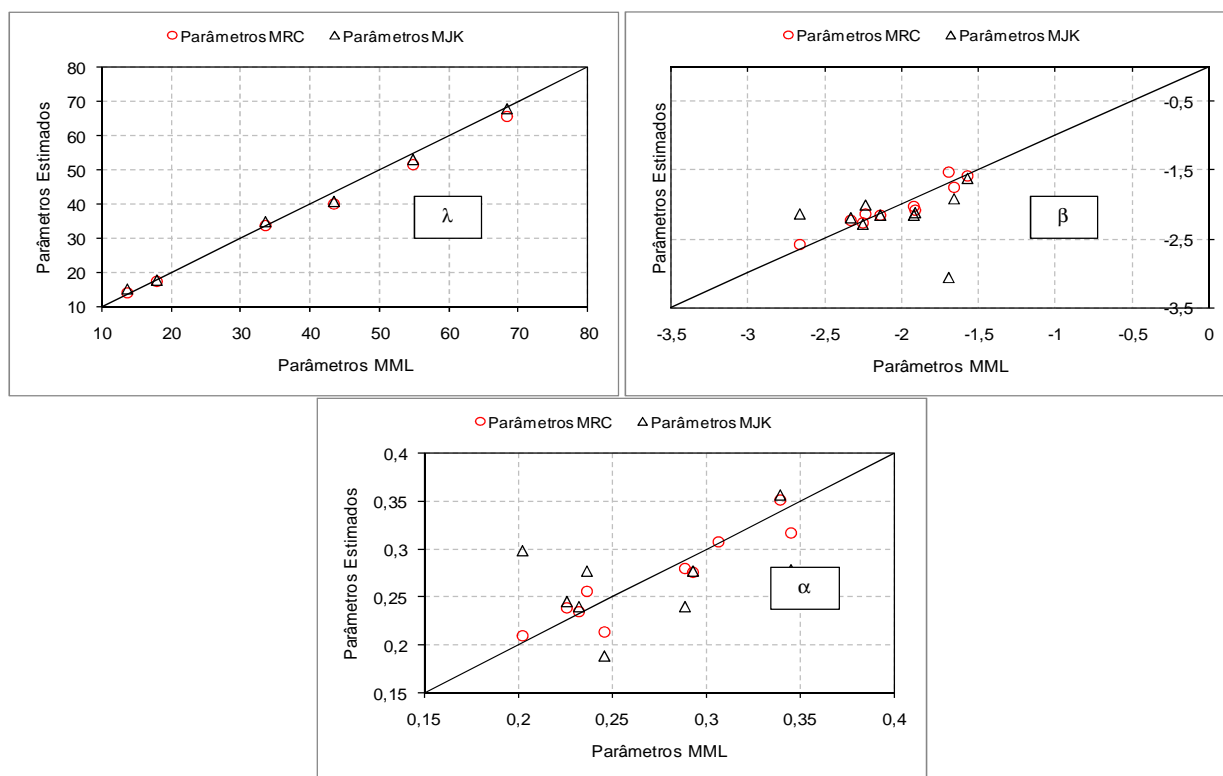


Figura 2 – Dispersão dos parâmetros dos modelos MRC e MJK em relação às estimativas MML

A partir dos parâmetros estimados com os modelos MJK, foram calculados os índices de desempenho para o conjunto de 99 permanências no intervalo (1-99)%. Foi possível observar que em todas as estações o índice E_s foi superior a 0,75 ($P_1=100\%$). Além do cálculo dos índices de desempenho, foi avaliada também a dispersão dos resíduos com a área de drenagem das bacias. Nenhuma tendência de variação dos erros com a área foi verificada, evidenciando a confiabilidade dos modelos regionais obtidos.

Por fim, na Figura 3, demonstra-se a boa qualidade dos resultados aqui obtidos, ressaltando-se a aderência visual entre as curvas de permanência sintética e observada na estação de Jaguaruna, a qual apresentou o pior desempenho no conjunto das 10 estações.

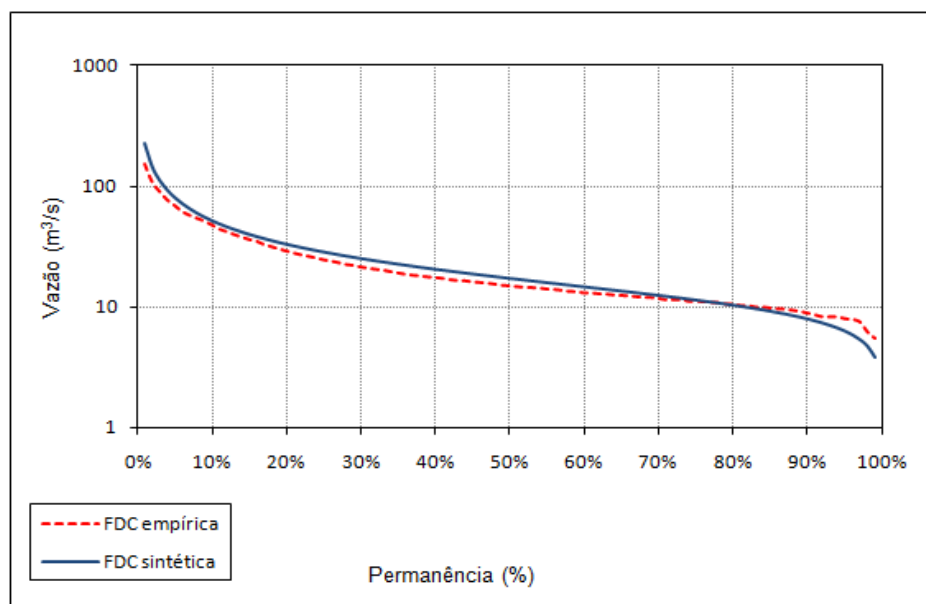


Figura 3 – Comparação entre as curvas de permanência sintética e observada na estação de Jaguaruna (40300001)

A título ilustrativo, os indicadores de desempenho foram calculados para os modelos regionais completos e também para as estimativas por momentos-L e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Índices de desempenho para o 3 modelos de estimação de parâmetros

Estação	Modelos MML			Modelos Regionais Completos			Modelos "jack-knife"		
	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s
40130001-2	0,00065	0,059	0,973	-0,0264	0,059	0,950	-0,0039	0,085	0,979
40300001	-0,01411	0,080	0,985	0,0072	0,077	0,962	0,0822	0,129	0,823
40330000	-0,02464	0,090	0,955	-0,0613	0,084	0,946	-0,0228	0,083	0,963
40450001	-0,00143	0,080	0,957	0,0148	0,127	0,944	0,0712	0,193	0,884
40549998	0,00147	0,053	0,985	-0,0812	0,051	0,964	-0,0878	0,059	0,947
40680000	-0,00284	0,050	0,990	-0,0072	0,065	0,989	0,0390	0,108	0,981
40710000	-0,00921	0,076	0,990	-0,0108	0,069	0,978	0,0214	0,077	0,958
40740000	-0,01175	0,068	0,986	-0,0782	0,050	0,976	-0,0514	0,057	0,974
40800001	0,00038	0,061	0,978	-0,0345	0,062	0,938	0,0053	0,069	0,891
40865001	-0,00985	0,080	0,979	-0,1036	0,074	0,945	-0,0870	0,081	0,931
Descritores P	P1		100,00	P1		100,00	P1		100,00
	P2		0,00	P2		0,00	P2		0,00
	P3		0,00	P3		0,00	P3		0,00

A análise da Tabela 3 mostra a qualidade de ajuste proporcionada pela distribuição Burr XII estendida, tendo-se em vista os valores reduzidos dos erros relativos médios e os valores elevados dos coeficientes de Nash-Sutcliffe. Além disso, é possível observar que o desempenho dos modelos MJK não é significativamente inferior ao dos modelos MRC, o que evidencia a robustez e confiabilidade da metodologia proposta.

6.3- Calibração do modelo Rio Grande a partir das curvas de permanência sintéticas modeladas com a distribuição Burr XII estendida

A calibração do modelo Rio Grande nas bacias de Minas Gerais tem por objetivo realizar uma avaliação comparativa de desempenho entre calibrações com curvas de permanência de longo termo e com curvas anuais medianas. Os principais dados de entrada do modelo são: parâmetros da distribuição Burr XII, estimados pelo método dos momentos-L, para as curvas de longo termo e anuais medianas, área e forma predominante das bacias hidrográficas, alturas diárias de precipitação e evaporação e atributos característicos da função objetivo, tais como permanências a serem avaliadas e número de iterações.

As calibrações foram realizadas para o período entre outubro de 1992 e setembro de 1998. No cálculo dos índices de desempenho foi retirado o primeiro ano, correspondente ao período de aquecimento do modelo Rio Grande. Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os índices de desempenho dos hidrogramas para as calibrações com curvas de longo termo e curvas anuais medianas, respectivamente.

Tabela 4 – Índices de desempenho para avaliação dos hidrogramas obtidos a partir da calibração do modelo Rio Grande com curvas de permanência de longo termo

CALIBRAÇÃO COM CURVAS DE PERMANÊNCIA DE LONGO TERMO					
Posto Fluviométrico	RMSE	AAPE	Nash	K	R ²
40130001-2	23,896	0,326	0,441	1,222	0,877
40300001	14,258	0,181	0,650	1,061	0,766
40330000	52,319	0,179	0,787	1,016	0,878
40450001	78,951	0,160	0,701	1,082	0,881
40549998	6,920	0,349	0,337	1,119	0,717
40680000	11,811	0,356	0,753	0,911	0,765
40710000	45,627	0,330	0,304	1,186	0,736
40740000	49,596	0,306	0,424	1,075	0,812
40800001	67,859	0,211	0,422	1,059	0,785
40865001	82,750	0,236	0,708	1,103	0,880
Média	43,399	0,263	0,553	1,083	0,810

Tabela 5 – Índices de desempenho para avaliação dos hidrogramas obtidos a partir da calibração do modelo Rio Grande com curvas de permanência anuais medianas

CALIBRAÇÃO COM CURVAS DE PERMANÊNCIA ANUAIS MEDIANAS					
Posto Fluviométrico	RMSE	AAPE	Nash	K	R ²
40130001-2	14,324	0,314	0,799	1,093	0,805
40300001	13,646	0,191	0,679	1,034	0,759
40330000	50,271	0,171	0,803	1,089	0,890
40450001	66,028	0,201	0,791	1,157	0,897
40549998	6,384	0,293	0,436	1,046	0,694
40680000	11,628	0,331	0,761	0,852	0,775
40710000	41,155	0,324	0,434	1,117	0,727
40740000	46,826	0,225	0,642	1,076	0,803
40800001	61,514	0,221	0,525	1,053	0,781
40865001	79,406	0,259	0,741	1,082	0,852
Média	39,118	0,253	0,661	1,060	0,798

A análise das tabelas 4 e 5 mostra que o desempenho das calibrações com curvas anuais medianas foi superior aos calibrações com curvas de longo termo. No primeiro caso, o modelo Rio Grande foi capaz de explicar cerca de 66% da variância natural das vazões, enquanto no segundo

caso, este valor é de aproximadamente 55%. Além disso, na calibração com curvas anuais medianas os valores do indicador k foram mais próximos da unidade, evidenciando melhor reprodução dos volumes de escoamento nesta situação. Os valores dos índices AAPE e R^2 foram próximos nas duas situações.

Na Figura 4 é mostrada a comparação entre os hidrogramas obtidos das calibrações com curvas de longo termo e anuais medianas e o hidrograma observado para o ano hidrológico 94/95, na estação de Porto Pará (40450001). É possível observar que a calibração com curvas de longo termo reproduz melhor a recessão, enquanto que a calibração com curvas anuais medianas reproduz mais adequadamente os picos. Esta situação foi observada em todas as estações utilizadas no estudo.

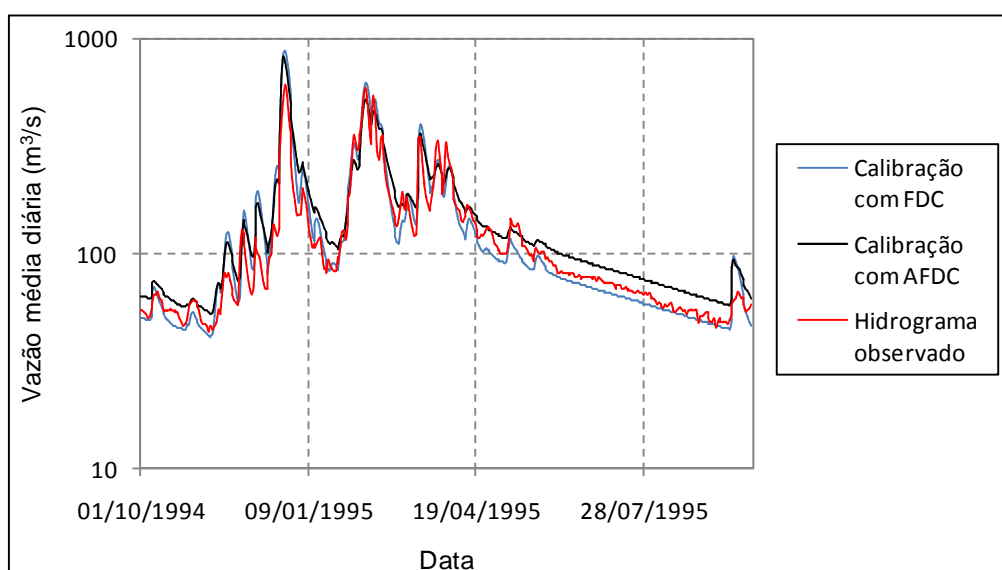


Figura 4 – Comparação entre os hidrogramas obtidos nas calibrações com curvas de longo termo e curvas anuais medianas e o hidrograma observado na estação de Porto Pará entre 01/10/1994 e 30/09/1995

7- APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A BACIAS HIDROGRÁFICAS NO CEARÁ

7.1- Construção dos modelos regionais de curva de permanência

As bacias selecionadas nesta região de estudo se dispersam por grande parte do estado do Ceará. Foram utilizadas estações pertencentes às bacias dos rios Poti, Banabuiú, Jaguaribe, Acaraú e Salgado. Nas bacias cearenses, foram adotados períodos de observação de dados variando entre 13 e 62 anos, com média de 28 anos. Foram utilizados 8 postos na construção dos modelos regionais. Os postos fluviométricos e os principais atributos das respectivas sub-bacias são apresentados na Tabela 6.

De maneira similar à adotada nas bacias mineiras, os parâmetros de escala e forma da distribuição Burr XII estendida foram estimados pelo método dos momentos-L. O parâmetro τ foi associado ao percentual do tempo em que ocorreu vazão nos cursos d'água. Os 4 parâmetros foram então relacionados a características das bacias por meio de regressão linear múltipla. As equações de regressão são apresentadas na tabela 7.

Tabela 6 – Estações fluviométricas e características físicas, climáticas e morfológicas das bacias no Ceará

Estação Fluviométrica	Código	A _d (km ²)	L (km)	CTD (km)	DEC (m/km)	DD (junções/km ²)	K _f	K _c	P (mm)	C _{esc}	CNM	Cris (%)
Fazenda Boa Esperança	34750000	18339,5	255	12525,5	2,4	0,715	0,28	1,60	945,4	0,066	75,4	85,1
Fazenda Cajazeiras	35210000	1642,6	120	1623,7	6,57	0,989	0,11	1,71	779,5	0,189	77,8	100,0
Sítio Poço Dantas	36125000	3746,1	139	2353,2	3,15	0,628	0,19	1,49	738,4	0,053	76,2	67,2
Sítio Lapinha	36210000	1755,9	121	1155,9	4,52	0,658	0,12	1,36	1041,2	0,070	76,8	18,5
Podimirim	36250000	4372,0	157	3104,6	3,38	0,710	0,18	1,65	887,3	0,032	72,0	24,4
Icó	36290000	12680,4	176	11202,8	4,21	0,883	0,41	1,42	927,6	0,080	78,0	59,0
Senador Pompeu	36470000	4838,3	142	4102,2	2,12	0,848	0,24	1,40	764,4	0,109	75,0	100,0
Groairas	35260000	2817,8	155	2652,5	3,88	0,941	0,12	1,64	719,6	0,16	81,1	99,6
Sítio Conceição	36110000	2094,0	106,0	1250,6	5,68	0,600	0,19	1,68	923,6	0,09	79	64,0

Tabela 7 – Equações de regressão para os 4 parâmetros da distribuição Burr XII estendida

Equação Regional	R ²	R ² _{ajustado}	Erro Padrão	F _{total}
$\lambda=0,18167CTD^{0,54533}C_{esc}^{0,6463}$	0,93277	0,90588	0,57587	34,69
$\alpha=1,49157-0,00538CT+0,01298Cris$	0,91657	0,88319	0,2085	27,46
$\beta=-0,68494-0,000041CTD+0,004255Cris$	0,89178	0,8485	0,0956	20,6
$\tau=1,36013-0,01036P^{0,5}+0,00503CTD^{0,5}-0,08628Cris^{0,5}$	0,87323	0,77816	1,16302	9,18

7.2- Análise de desempenho dos modelos regionais de curva de permanência

Na Figura 5 são mostrados gráficos de dispersão dos parâmetros dos modelos regionais completos (MRC) e dos modelos regionais “*jack-knife*” (MJK) em relação às estimativas MML. Percebe-se que a dispersão não é acentuada para os parâmetros α , β e λ . Para o parâmetro τ , no entanto, a dispersão é significativa. Esse fato se explica pelo valor do coeficiente R² na equação de regressão do modelo regional completo, que explicou somente 87% da variância total.

Em função das estimativas ruins encontradas para o parâmetro τ , o desempenho da metodologia não foi tão satisfatório quanto o apresentado nas bacias de Minas Gerais. Em 3 das estações utilizadas foram verificados valores inferiores a 0,50 para o índice E_s. Além disso, os erros relativos apresentaram valores extremamente elevados no ramo inferior das curvas de permanência, região esta em que a influência do parâmetro τ é mais percebida.

Dada a sensibilidade das estimativas de vazão em relação ao parâmetro τ , fez-se o cálculo dos índices de desempenho também para o valor observado do mesmo, mantendo-se as estimativas dos modelos “*jack-knife*” para os demais parâmetros. Foi possível observar uma redução sensível nos valores dos erros relativos. Além disso, apenas uma estação apresentou indicador E_s na faixa intermediária, o que mostra, por um lado, a robustez dos modelos regionais para esta situação, e, por outro, a necessidade de melhores estimativas para τ .

A Figura 6 mostra a comparação entre as curvas sintética e empírica para os valores modelados e observados de τ na estação de Sítio Lapinha.

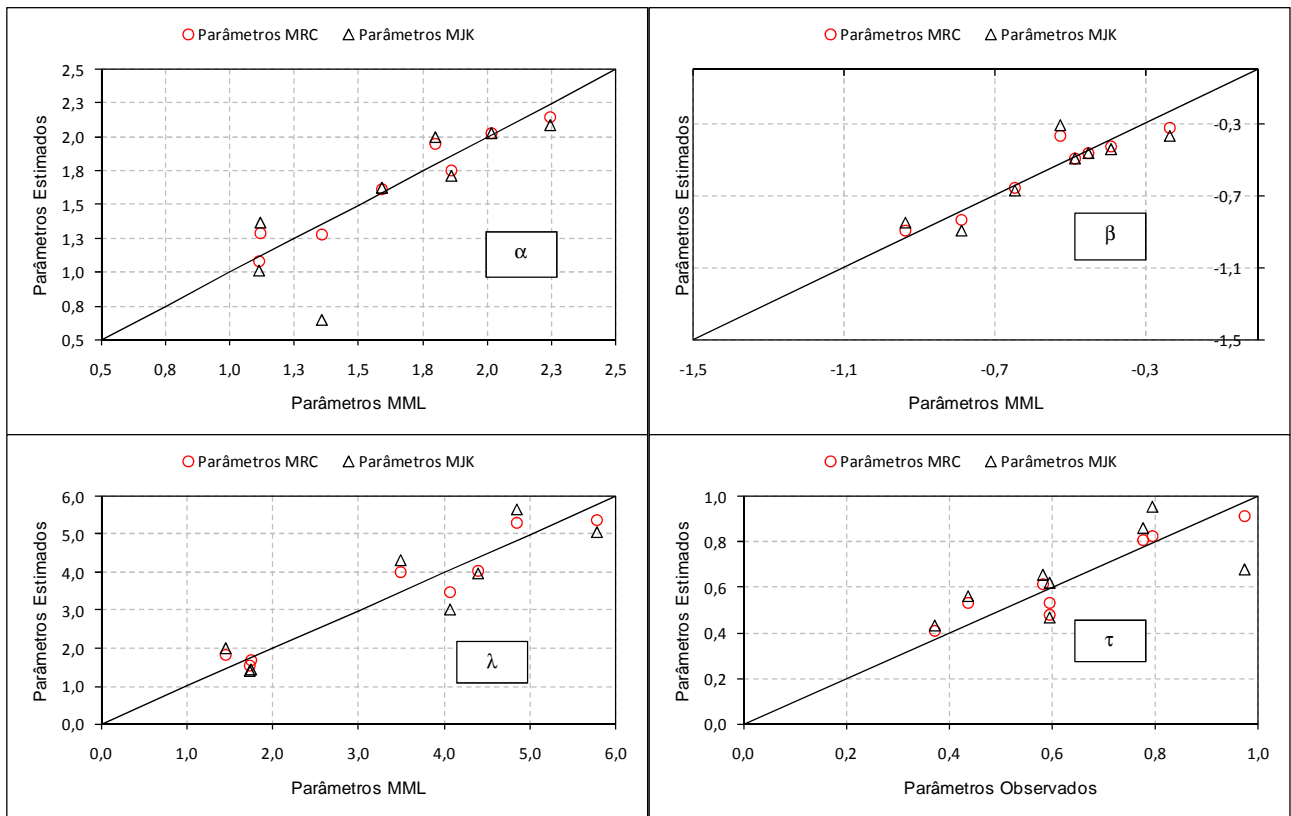


Figura 5 - Dispersão dos parâmetros dos modelos MRC e MJK em relação às estimativas MML

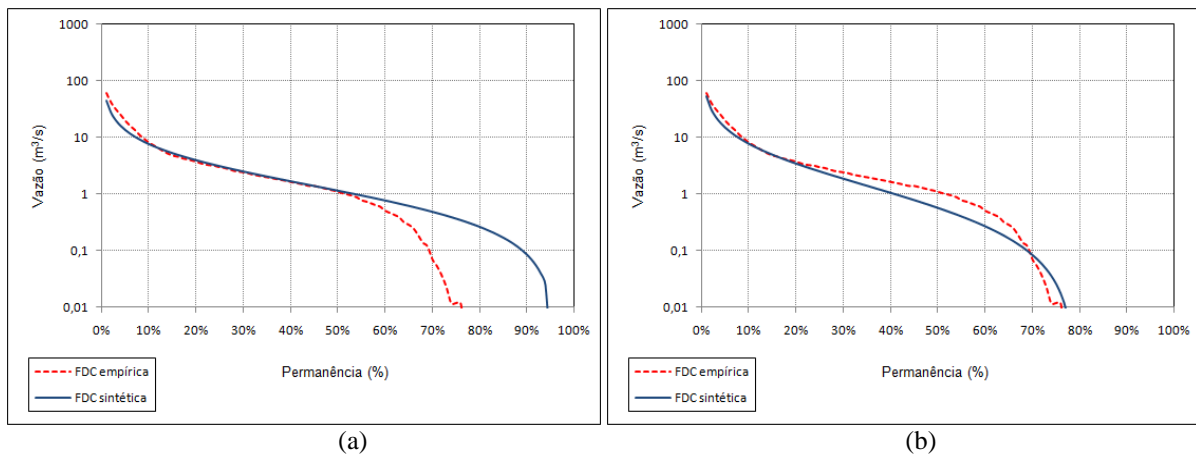


Figura 6 - Comparação entre as curvas de permanência sintética e observada na estação de Sítio Lapinha para τ estimado (a) e τ observado (b)

Foi avaliada também a dispersão dos resíduos em relação à área de drenagem das bacias. Não se constatou tendências de variação, mas observou-se que os erros relacionados aos modelos com τ estimado são sensivelmente maiores.

A título ilustrativo, os indicadores de desempenho foram calculados para os modelos regionais completos e também para as estimativas por momentos-L, considerando-se sempre as avaliações com valores estimados e observados de τ . Os indicadores de desempenho para os 5 modelos são apresentados na Tabela 8.

A análise da tabela 8 mostra que os erros relativos médios observados nas bacias cearenses são maiores do que aqueles das bacias mineiras. Atribui-se esse fato à dificuldade de se modelar o ramo inferior das curvas de permanência de cursos d'água intermitentes e/ou efêmeros. Fica clara

também a influência do parâmetro τ no desempenho dos modelos regionais completos e “*jack-knife*”. Conclui-se assim que a robustez da metodologia é diretamente relacionada a boas estimativas do parâmetro τ . Os resultados obtidos para valores observados do referido parâmetro foram satisfatórios, demonstrando a confiabilidade e robustez da metodologia sob tal cenário.

Tabela 8 - Índices de desempenho dos modelos de curva de permanência no Ceará

Estação	Parâmetros Burr XII estendida			MRC- t_{obs}			MRC- t_{est}			MJK - t_{obs}			MJK - t_{est}		
	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s	e_s	$s_{e,s}$	E_s
34750000	0,08111	0,266	0,955	0,0636	0,302	0,821	0,5136	1,880	0,070	1,4262	6,231	0,845	3,9916	20,110	0,085
35210000	-0,09165	0,297	0,980	-0,1127	0,270	0,949	1,0383	3,502	0,961	-0,1852	0,238	0,886	2,1533	8,274	0,877
35260000	-0,07534	0,224	0,953	-0,1258	0,229	0,947	-0,6122	0,288	0,888	-0,1287	0,240	0,981	0,1012	0,202	0,971
36110000	-0,08934	0,289	0,967	0,1777	0,350	0,917	-0,2483	0,378	0,987	0,3034	0,387	0,939	-0,4813	0,357	0,967
36125000	0,17937	0,512	0,984	0,1890	0,721	0,933	1,2992	3,544	0,953	0,0511	0,414	0,946	2,4140	6,770	0,893
36210000	0,38941	1,274	0,981	0,2566	1,277	0,986	1,0529	3,550	0,978	-0,1563	0,459	0,908	4,2521	11,993	0,983
36290000	0,04519	0,362	0,919	0,1494	0,487	0,820	0,5081	0,403	0,587	0,1936	0,528	0,866	-0,5486	0,418	0,464
36470000	-0,09428	0,249	0,991	-0,1345	0,241	0,941	2,6483	4,340	0,912	-0,1382	0,244	0,684	3,8420	6,548	0,452
Descritores P	P1	100,00		P1	100,00		P1	75,00		P1	87,50		P1	62,50	
	P2	0,00		P2	0,00		P2	0,00		P2	12,50		P2	0,00	
	P3	0,00		P3	0,00		P3	25,00		P3	0,00		P3	37,50	

7.3- Calibração do modelo Rio Grande a partir das curvas de permanência sintéticas modeladas com a distribuição Burr XII estendida

A calibração do modelo Rio Grande nas bacias do Ceará tem por objetivo aferir sua capacidade de reproduzir a condição de intermitência que caracteriza os cursos d’água da região. Para tanto, os reservatórios de retenção capilar presentes no módulo de produção do Rio Grande são ampliados, visando-se reduzir a água disponível para os escoamentos sub-superficial e subterrâneo. Os dados de entrada do modelo são aqueles utilizados nas bacias mineiras.

As calibrações foram realizadas para períodos distintos em cada estação fluviométrica, em função dos diferentes períodos utilizados na construção das curvas de permanência. Na Tabela 9 são apresentados os índices de desempenho dos hidrogramas para as calibrações com curvas de longo termo, excluindo-se o primeiro ano da simulação.

Tabela 9 – Índices de desempenho para avaliação dos hidrogramas obtidos a partir da calibração do modelo Rio Grande com curvas de permanência de longo termo

CALIBRAÇÃO COM CURVAS DE PERMANENCIA DE LONGO TERMO					
Posto Fluviométrico	RMSE	AAPE	Nash	K	R ²
34750000	113,093	5,861	0,717	0,590	0,756
35210000	33,863	13,322	0,603	0,556	0,611
35260000	31,672	4,495	0,633	0,938	0,602
36110000	14,975	6,902	0,566	0,750	0,612
36125000	8,880	4,325	0,825	0,783	0,651
36210000	5,649	1,444	0,516	0,891	0,583
36290000	131,1378287	14,684	0,407	0,598	0,481
36470000	60,438	15,373	0,632	0,695	0,531
Média	49,963	8,301	0,612	0,725	0,603

É possível perceber pelo valor do coeficiente R^2 que a concordância entre as vazões simuladas e observadas é menor que aquela observada nas bacias mineiras. No entanto, a análise visual de grande parte dos hidrogramas mostrou que a concordância temporal é respeitada.

O problema verificado foi a dificuldade encontrada pelo modelo Rio Grande em reproduzir de maneira adequada os picos de vazão. Esta característica foi observada em todas as estações e

explica os valores observados para o indicador k , sempre inferiores à unidade. Atribui-se esta dificuldade de reprodução dos picos de vazão à estrutura do modelo Rio Grande. A necessidade de se adaptar a referida estrutura a rios intermitentes e/ou efêmeros pode ter causado uma perda considerável da água que comporia o escoamento superficial.

Por fim, uma análise mais aprofundada a partir dos coeficientes Nash-Sucliffe observados é prejudicada pelas grandes diferenças entre as vazões de pico simuladas e observadas, tendo-se em vista que este índice confere maior peso a estas vazões. Dessa forma, ainda que os valores do referido indicador apontem para boa qualidade de calibração, a análise visual mostra que os resultados não foram tão satisfatórios. A Figura 7 apresenta os hidrogramas simulado e observado na estação Fazenda Boa Esperança (34750000), nos quais é possível verificar as tendências descritas.

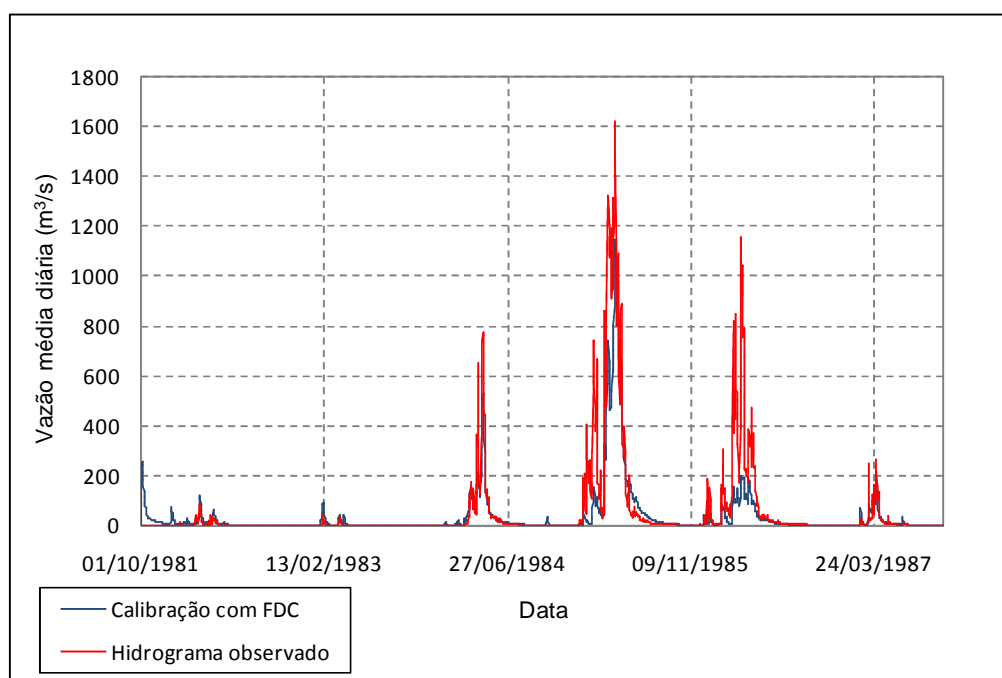


Figura 7 - Comparação entre o hidrograma obtido na calibração com curvas de longo e o hidrograma observado na estação de Fazenda Boa Esperança entre 01/10/1981 e 30/09/1987

8- DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O principal objetivo do presente artigo foi o desenvolvimento de uma metodologia de regionalização de curvas de permanência aplicável indistintamente a cursos d'água perenes, intermitentes e efêmeros. A metodologia preconizou o uso da distribuição Burr XII estendida na modelagem das curvas de permanência. Essa distribuição mostrou-se bastante flexível, conseguindo reproduzir adequadamente os extremos das FDC's, ainda que tenha sido verificada uma tendência de subestimação de vazões, em especial no ramo inferior das curvas.

Os modelos regionais desenvolvidos para as bacias mineiras mostraram resultados bastante satisfatórios. Mesmo com a perda de informação decorrente da retirada de uma estação no

procedimento de validação cruzada, os modelos “*jack-knife*” conseguiram reproduzir com razoável precisão a curva empírica da estação em questão.

Nas bacias cearenses, entretanto, os resultados não foram tão bons. A influência do parâmetro τ nas estimativas de vazão é muito acentuada, o que acarreta um grande aumento dos erros na região compreendida entre os valores modelados e observados do referido parâmetro.

A validação cruzada mostrou que a metodologia não apresenta robustez e confiabilidade quando se utilizam as estimativas de τ no cálculo dos índices de desempenho. Em função disso, tais índices foram novamente calculados, considerando-se os valores observados do parâmetro. Essa nova avaliação mostrou uma redução sensível dos erros, bem como um desempenho geral mais próximo daquele observado nas bacias de Minas Gerais. Este fato evidencia a necessidade de se melhorar as estimativas de τ . Para tanto, sugere-se a inclusão de outras variáveis hidrogeológicas, mais representativas ou mais associadas à variação do parâmetro τ , nas equações de regressão, de forma a explicar de modo mais preciso o regime de vazões nestas bacias.

Em adição aos modelos regionais, as curvas de modeladas pela distribuição Burr XII estendida foram utilizadas na calibração indireta do modelo Rio Grande de transformação chuva-vazão.

Nas bacias de Minas Gerais, foi realizada uma avaliação comparativa do desempenho das calibrações com curvas de permanência de longo termo e curvas anuais medianas. De maneira geral, a calibração com curvas anuais medianas apresentou desempenho superior. Verificou-se ainda que os hidrogramas obtidos na calibração com curvas de longo termo reproduzem melhor os períodos de recessão, ao passo que aqueles obtidos na calibração com curvas anuais representam mais adequadamente os picos.

Nas bacias cearenses, foi realizada uma adaptação da estrutura do modelo Rio Grande com intuito de simular a condição de intermitência. Essa adaptação, baseada na retirada de água dos escoamentos sub-superficial e subterrâneo, permitiu a observação de valores muito reduzidos de vazão, mostrando que o modelo Rio Grande é capaz de representar a intermitência. No entanto, as vazões de pico não foram reproduzidas adequadamente e os volumes simulados foram sempre inferiores àqueles observados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, pela bolsa de mestrado de Veber Costa e pelo apoio PPM-00158-09, assim como ao CNPq pelo auxílio concedido no âmbito do projeto de pesquisa 301133/2009-3.

APÊNDICE 1 – LISTA DE NOTAÇÕES

A – área de drenagem da bacia

AFDC – “*annual flow duration curve*” ou curva de permanência anual

C_{esc} – coeficiente de escoamento da bacia, dado pela relação entre o volume escoado e o volume precipitado

CNM – índice CN médio

Cris – percentual da bacia localizado na região do embasamento cristalino

CT, L – comprimento do curso d’água principal

CTD – comprimento total de drenagem

DD – densidade de drenagem

DEC – declividade total da bacia

DH_{tot} – desnível total da bacia

FDC – “*flow duration curve*” ou curva de permanência de longo termo

$H_{máx}$ – cota máxima da bacia

H_{min} – cota mínima da bacia

k_c – coeficiente de compacidade da bacia

k_f – coeficiente de forma da bacia

P – chuva média anual

S_{eq} – Declividade equivalente da bacia

BIBLIOGRAFIA

BURR, I.W. (1942) “*Cumulative frequency functions*” in III Meeting of Institute of Mathematical Statistics, pp. 215-232.

CASTELLARIN, A.; GALEATI, G.; BRANDIMARTE, L.; MONTANARI, A.; BRATH, A. (2004). “*Regional flow-duration curves: reliability for ungauged sites*”. *Advances in Water Resources* 27, pp. 953 - 965.

HAAN, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hidrology*. 2a ed. Ames, Iowa: The Iowa State University, Press/Ames. 378 p.

HUGHES, D. A.; SMAKHTIN, V. Y. (1996). “*Daily flow data time series patching or extension: a spatial interpolation based on flow duration curves*”. *Hydrological Sciences Journal*, 41 (6), pp. 851-871.

NAGHETTINI, M.; NASCIMENTO, N. O.; FERNANDES, W. S. (2006). *Relatório técnico 1: a estrutura funcional do Sistema Rio Grande – um sistema integrado para simulação hidrológica e*

previsão de vazões afluentes a reservatório de aproveitamento hidrelétrico. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. Belo Horizonte-MG, 73 p.

PINHEIRO, V.B.; NAGHETTINI, M. (2010). “*Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 15 (2), pp. 143-156.

SHAO, Q.; WONG, H.; XIA, J.; WAI-CHEUNG, I. (2004). “*Models for extremes using the extended three-parameter Burr XII system with application to flood frequency analysis*”. Hydrological Sciences Journal 49, pp. 685-700.

SHAO, Q.; ZHANG, L.; CHEN, Y.D.; Singh, V.P. (2009). “*A new method for modelling flow duration curves and predicting streamflow regimes under altered land-use conditions*”. Journal des Sciences Hydrologiques 54, pp. 606-622.

VOGEL, R. M. (2006). “*Regional calibration of watershed models*” org. por SINGH, V. P. e FREVERT, D. K. Watershed models, 1a ed. Boca Raton: CRC Press, pp. 47-74.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. (1994). “*Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals*”. Journal of Water Resources Planning and Management, 120 (4), pp. 485-504.

YU, P. S.; YANG, T. C. (2000). “*Using synthetic flow duration curves for rainfall-runoff model calibration at ungauged sites*”. Hydrological Process 14(1), pp. 117-133