

Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões da Região da Calha Norte no Estado do Pará

Francisco C. L. Pessoa, Claudio J. C. Blanco, Jacques R. Martins

Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFPA

fclpessoa@ufpa.br; blanco@ufpa.br; jacques.martins@hotmail.com.br

Recebido: 25/01/10 - revisado: 22/12/10 - aceito: 30/03/11

RESUMO

A carência de dados fluviométricos torna necessária a utilização de métodos para a estimativa de vazões em locais onde eles inexistem ou são insuficientes. Nesse contexto, o presente artigo estabeleceu um modelo de regionalização de curvas de permanência de vazões para os rios da região hidrográfica da Calha Norte no Estado do Pará. O modelo teve como base de dados as características de 9 estações fluviométricas instaladas e em funcionamento na região. As curvas de permanência foram calibradas em função de 5 modelos matemáticos de regressão (potência, exponencial, logarítmico, quadrático e cúbico). O modelo cúbico foi o que se ajustou melhor às curvas de permanência de vazões das estações usadas na calibração. Usando a técnica de regressão múltipla, a variação espacial de cada parâmetro do modelo supracitado, foi explicada em termos de área de drenagem, precipitação média anual, comprimento e desnível do rio, resultando em modelos de regionalização. Visando efetuar a validação do modelo, o mesmo foi aplicado para simular as curvas de permanência de vazões de duas bacias-alvo da região, obtendo resultados satisfatórios pelos ajustes gráficos das vazões simuladas e observadas. Matematicamente, o bom ajuste foi representado pelos erros quadráticos relativos médios percentuais calculados para o modelo cúbico, os quais foram iguais a 5,27% (alvo 1) e 9,55% (alvo 2). O bom desempenho do modelo calibrado e verificado demonstra o potencial deste na estimativa das vazões de permanência da região em estudo, mais precisamente para projetos hidrelétricos e também para outros de gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Regionalização, curva de permanência, modelo cúbico, regressão múltipla, Amazônia.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das vazões de permanência de um curso d'água é de relevante importância para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, como geração de energia elétrica, sistema de irrigação, sistemas de reserva e suprimento de água para abastecimento público; que, em geral, utilizam a vazão como variável condicionante. A vazão, assim como todas as outras variáveis utilizadas para a caracterização de processos hidrológicos, possui comportamento aleatório, exigindo, para sua adequada avaliação, séries históricas representativas e confiáveis.

As séries históricas de vazão são obtidas nos postos fluviométricos instalados em bacias hidrográficas, no entanto, em um país com dimensões continentais e extensa malha hidrográfica como o Brasil, nem todas as bacias são medidas, e nesse caso, adensar a rede hidrométrica não é tarefa das mais simples. Segundo Tucci (1993), uma rede hidrométrica raramente possui uma densidade de estações que

permita cobrir todos os locais de interesse de um plano de gerenciamento de recursos hídricos.

A região da Calha Norte é isolada geograficamente e eletricamente do restante da região amazônica. No entanto, a região é possuidora de um grande potencial hidroenergético, o qual tem sido estudado ao longo dos anos para projetos de implantação de Centrais Hidrelétricas que pudessem suprir a demanda energética da região. Tais estudos são motivados pela pequena rede de estações fluviométricas existente na região, aproximadamente 33 estações, das quais, boa parte, não está mais em operação ou possui séries históricas não muito longas. Adicionalmente, não estão uniformemente distribuídas na região.

Visando suprir esta lacuna, a regionalização de vazões é uma técnica importante, e que consiste em explorar ao máximo as informações existentes, permitindo a estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes. Geralmente, os modelos de regionalização são baseados nas características físicas e climáticas da região de interesse (Tucci et al., 1995; Ouarda et al., 2001).

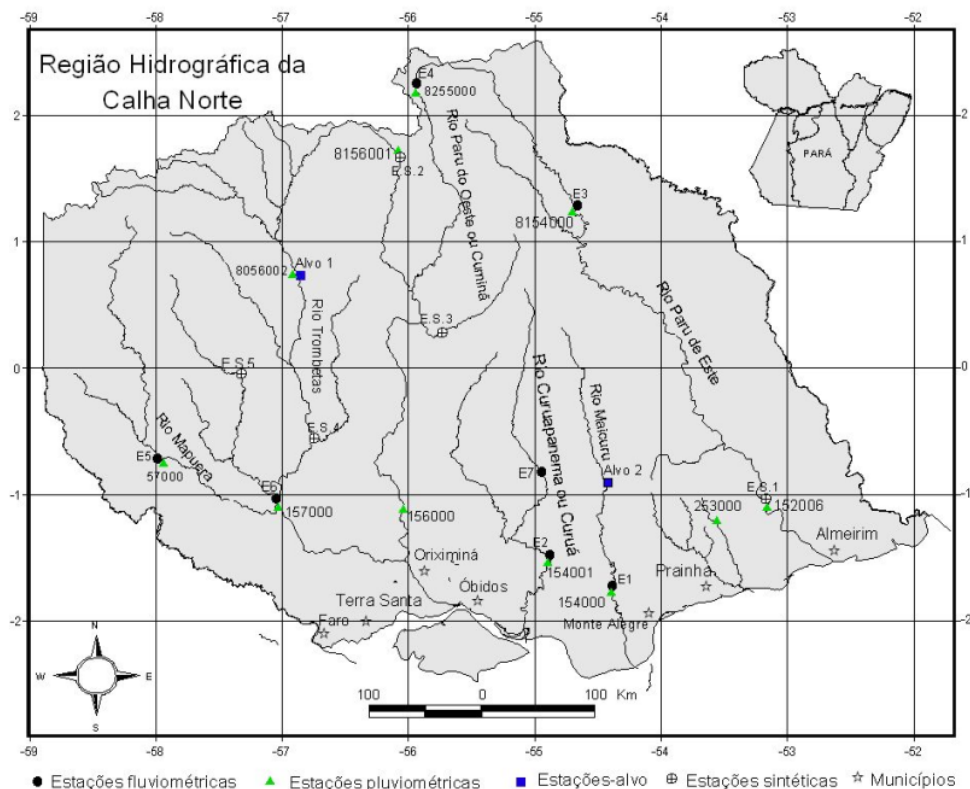


Figura 1 – Calha Norte no Estado do Pará.

Fonte: adaptada de <http://hidroweb.ana.gov.br>

Tabela 1 – Estações fluviométricas e características morfoclimáticas.

Código	Rio	Estações (E1-E7), alvos e sintéticas	P (mm) Precipitação média anual	A (Km ²) Área de Drenagem	L (km) Comprimento do rio	H (m) Desnível	Extensão da Série (anos)
18200000	Maicuru	Arapari	1704	17072	298,96	450	36
17090000	Curuá	Boca do Inferno	2050	20803	309,2	439	31
18280000	Paru de Este	Apalai	1965	5902	223,17	175	28
16700000	Cuminã	Tirios	2081	945	41,36	65	27
16480000	Mapuera	Aldeia Wai-Wai	2241	21400	395,61	417,41	17
16430000	Trombetas	Garganta	2768	37910	506,07	335	16
17070000	Curuá	Sete Varas	2050	7249	153,89	180	3
16370000	Trombetas	Perimetral Norte	2805	19490	326,15	194,9	5
18150000	Maicuru	Lajeiro	1918	8022	188	220	3
Sintética	Paru de Este	E.S.01	1716	35730	—	360	28
Sintética	Cuminã	E.S.02	2081	856	—	106	27
Sintética	Urucuriana	E.S.03	2490	4722	—	100	27
Sintética	Caxipacoro	E.S.04	2786	4998	—	265	5
Sintética	Cachorro	E.S.05	2605	6988	—	220	16

Assim, o presente trabalho analisou e aplicou um modelo de regionalização de curvas de permanência de vazões na região hidrográfica da Calha Norte. A curva de permanência permite, por exemplo, conhecer a parcela de tempo em que é possível, a fio d'água, abastecer cidades, indústrias ou empreendimentos agropecuários, estabelecer a rentabilidade econômica de uma pequena central hidrelétrica sem regularização e a sua potência ótima de dimensionamento (Pinto, 1976).

ÁREA DE ESTUDO E DADOS

Área de Estudo

Como área de estudo, foi escolhida a região hidrográfica da Calha Norte, localizada no noroeste do Estado do Pará, que está dividida em três sub-regiões: Nhamundá – Trombetas, Cuminapanema – Maicuru e Paru – Jari, ocupando uma área de 21,5% do Estado.

A região é marcada por uma baixa densidade demográfica, sendo uma das regiões mais conservadas do Estado. A precipitação pluviométrica total anual média é em torno de 2 000 mm, com distribuição irregular durante o ano. A estação de maior pluviosidade vai de Dezembro a Junho, tendo Março como o mês mais chuvoso, enquanto que a de menor vai de Julho a Novembro, sendo Outubro o mês mais seco, apresentando total mensal abaixo de 60 mm.

Dados Utilizados na Regionalização

Foram analisados os dados consistidos de 9 estações fluviométricas (Tabela 1) e 12 estações pluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). As três estações pluviométricas com dados consistidos a mais, foram utilizadas em conjunto com 3 estações fluviométricas (Tabela 1 e Figura 1) com dados estimados por meio do método da correlação direta de áreas de drenagem (Eletrobrás, 2000). Além desses 12 pares de estações, foram utilizados mais dois, nos quais os dados de vazão também foram estimados pelo método supracitado e os dados de precipitação foram estimados por médias aritméticas das estações mais próximas (Figura 1) listadas a seguir: Estações pluviométricas Cachoeira da Porteira conjunto 1 (código ANA: 157000), Perimetral Norte (código ANA: 8056001) e Aldeia Wai-Wai

(código ANA: 57000), totalizando 14 pares de estações hidrológicas.

Além dos dados de vazões diárias e precipitações anuais médias, também foram usadas características fisiográficas, tais como: área de drenagem, comprimento e desnível do rio (Tabela 1). A área de drenagem foi obtida na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (<http://hidro.web.ana.gov.br>) da Agência Nacional de Águas (ANA). Para obter informações do comprimento e desnível dos rios, foram utilizados softwares do tipo SIG. A distribuição espacial das estações pluviométricas, fluviométricas e sintéticas consideradas no estudo é apresentada na Figura 1.

METODOLOGIA

Introdução

Alguns modelos matemáticos para as curvas de permanência de vazões são analisados aqui, tais como em Singh (1971), Quimpo et al. (1983), Mimikou e Kaemaki (1985), Rojanamon et al (2007), Vogel e Fennessey (1990), Claps e Fiorentino (1997), Yu (2002), Mazvimavi et al. (2003), Hashim et al. (2009) e Li et al. (2010).

Singh (1971) modelou as curvas de permanência de vazões para o Meio Oeste dos Estados Unidos, considerando que as vazões de permanência podiam ser funções do tipo potência da área de drenagem.

Quimpo et al (1983) analisaram a regionalização de curvas de duração/permanência de vazões em diversas bacias hidrográficas nas Filipinas. Os modelos propostos pelos autores para a construção/modelagem das curvas de duração de vazões são dados abaixo:

$$Q = a \exp.(-b.D) \quad (1)$$

$$Q = a.D^b \quad (2)$$

Onde Q é a vazão (por unidade de área da bacia), D é o percentual de tempo igualado ou excedido e a e b são constantes positivas dos modelos, as quais foram determinadas pelo método dos mínimos quadrados.

Mimikou e Kaemaki (1985) desenvolveram um estudo de regionalização nas regiões oeste e noroeste da Grécia. Nesse caso, foram usados, além dos modelos exponencial e de potência mostrados nas Equações (1) e (2), outros 3 modelos para a

calibração das curvas de permanência de vazões. Esses modelos são os seguintes:

$$Q = a - b \cdot \ln \cdot D \quad (3)$$

$$Q = a - b \cdot D + c \cdot D^2 \quad (4)$$

$$Q = a - b \cdot D + c \cdot D^2 - d \cdot D^3 \quad (5)$$

A vazão Q foi tratada em suas unidades originais, ou seja, sem reduzir a vazão por unidade de área da bacia. D é a probabilidade de tempo excedido. Os parâmetros a , b , c e d são constantes positivas, que foram determinadas pelo método dos mínimos quadrados. As curvas de permanência foram regionalizadas usando as características morfoclimáticas das bacias. As autoras concluíram que a técnica de regionalização desenvolvida pode ser facilmente usada para simular curvas de permanência em bacias sem registros de vazão nas regiões oeste e noroeste da Grécia.

Vogel e Fennessey (1990) utilizaram, em um estudo regional em Massachusetts, curvas de permanência no intervalo $0,50 \leq p \leq 0,99$ em que p é a probabilidade de excedência. Foi utilizada a distribuição log-normal de dois parâmetros, a qual forneceu uma aproximação satisfatória para o ramo inferior da curva.

Rojanamon et al (2007) desenvolveu um modelo simples para estimar curvas de permanência, em uma base mensal, na bacia hidrográfica do rio Salawin na Tailândia, que tem um grande potencial hidrelétrico. O autor seguiu a mesma metodologia apresentada por Mimikou e Kaemaki (1985), determinando que os modelos logarítmico e exponencial são os melhores para a região estudada.

Claps e Fiorentino (1997) propuseram o ajuste de curvas de permanência anuais a uma equação log normal de dois parâmetros.

Yu (2002) ajustou dois modelos para dezoito bacias em Taiwan. O primeiro modelo ajustado foi uma equação polinomial. Por não ser uma distribuição de probabilidades, essa função não é adequada para a estimação de quantis. Entretanto, uma vazão pode ser estimada pela equação polinomial, desde que a probabilidade p seja usada como uma variável independente.

Mazvimavi et al. (2003) fizeram um estudo de análise regional em cinquenta e três bacias do Zimbábue para a estimativa de curvas de permanência, usando uma equação exponencial e redes neurais.

Hashim et al. (2009) agruparam curvas semelhantes de baixa frequência de vazões na região

da Malásia Peninsular e obtiveram mapas e equações regionais por meio da técnica de regressão multivariada, em função da bacia hidrográfica, precipitação média anual e média anual de evaporação.

Li et al. (2010) propuseram um novo método de regionalização, chamado modelo de índice. Os modelos especificam relações entre as variáveis hidrológicas utilizadas na previsão de vazões, melhorando a própria previsão das vazões. Aplicou-se o modelo para prever curvas de permanência de vazões em 227 microbacias no sudeste da Austrália.

Pode-se observar que o método da regressão múltipla, utilizado por Mimikou e Kaemaki (1985), continua sendo bem utilizado nos estudos de regionalização. No presente trabalho, é seguida a obra de Mimikou e Kaemaki (1985).

Calibração das curvas de permanência

Foram testados 5 modelos matemáticos, ou seja, exponencial, potência, logarítmico, quadrático e cúbico (Equações (1-5)) para calibração das curvas de permanência de vazões das 7 primeiras estações fluviométricas da Tabela 1. No processo de calibração foi usada uma planilha eletrônica capaz de ajustar aos dados observados funções correspondentes aos cinco modelos supracitados. Os parâmetros a , b , c e d foram calculados por intermédio do método dos mínimos quadrados, mas determinados, automaticamente, por planilha eletrônica. Nesse caso, as vazões observadas Q são as variáveis dependentes e as permanências D são as variáveis independentes.

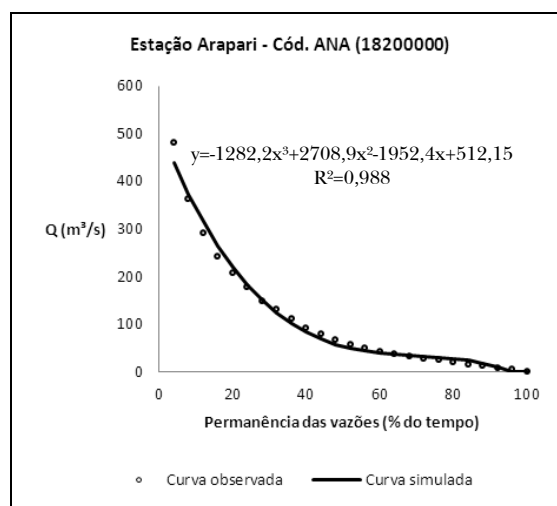


Figura 2 – Calibração da curva de permanência de vazões da estação Arapari.

Para uma melhor visualização gráfica do ajuste dos modelos, foram selecionados pares – Q (m^3/s) x D (permanência %) – para cada uma das estações. Esses 25 pares foram divididos em intervalos de 4% até alcançar os 100%, ou seja, 4%, 8%, 12% ... 100%.

As Figuras 2–8 apresentam o modelo cúbico (Equação (5)), o qual se ajustou melhor às curvas de permanência de vazão observadas.

Critério de Desempenho

Visando analisar o desempenho do modelo, tanto na calibração, quanto na validação, foram considerados o erro quadrático relativo médio percentual, ϵ % (Equação (6)), e o R^2 ajustado (Equação (7)).

$$\epsilon = N^{-1} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde Q_i é a vazão observada (m^3/s), \hat{Q}_i é a vazão estimada pelo modelo de regionalização (m^3/s), e N corresponde ao número total de vazões observadas.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} \cdot (1-R^2) \quad (7)$$

onde n é o número de valores observados, p é o número de variáveis independentes e R^2 é o coeficiente de determinação.

A Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes de determinação ajustados e os erros (%) do modelo cúbico encontrados para as 7 estações fluviométricas utilizadas na calibração.

Tabela 2 – Coeficiente de determinação ajustado e erros percentuais do modelo cúbico na calibração.

Estação	Modelo cúbico $Q = a \cdot b \cdot D + c \cdot D^2 + d \cdot D^3$	
	$R^2_{ajustado}$	Erro (%)
18200000	0,98	7,49
17090000	0,98	15,12
18280000	0,98	4,61
16700000	0,98	5,47
16480000	0,97	4,04
16430000	0,98	3,37
17070000	0,91	28,56

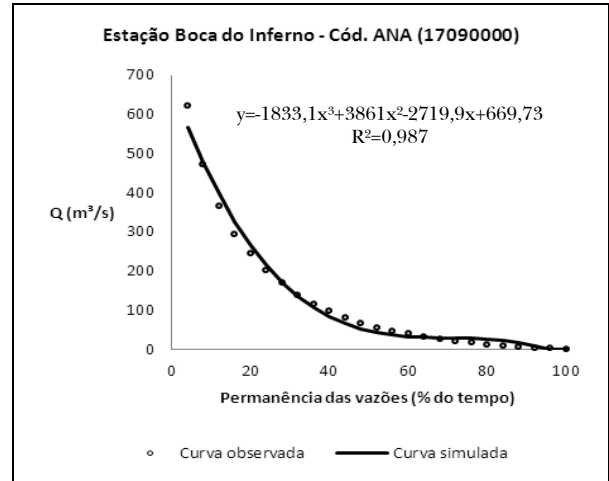


Figura 3 – Calibração da curva de permanência de vazões da estação Boca do Inferno.

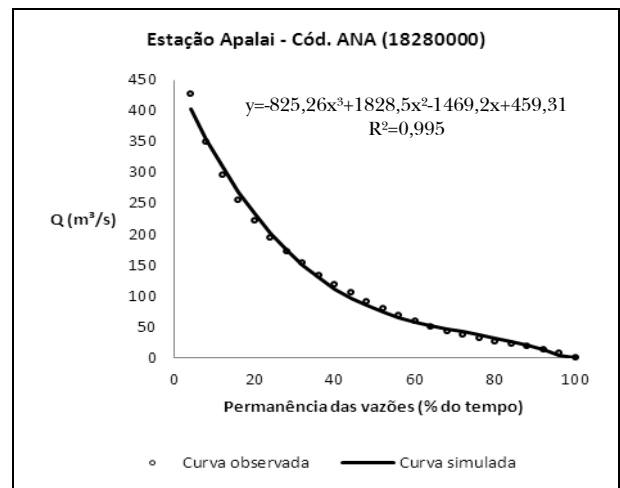


Figura 4 – Calibração da curva de permanência de vazões da estação Apalai.

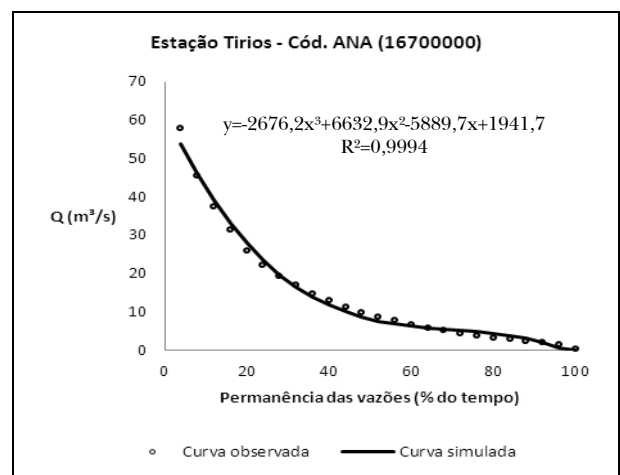


Figura 5 – Calibração da curva de permanência de vazões da estação Tirios.

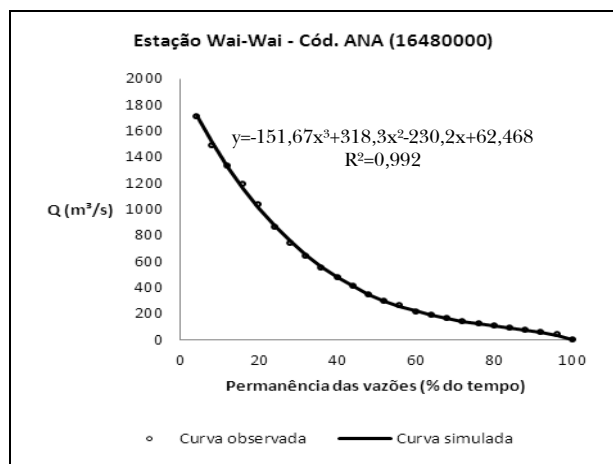


Figura 6 –Calibração da curva de permanência de vazões da estação Wai-Wai.

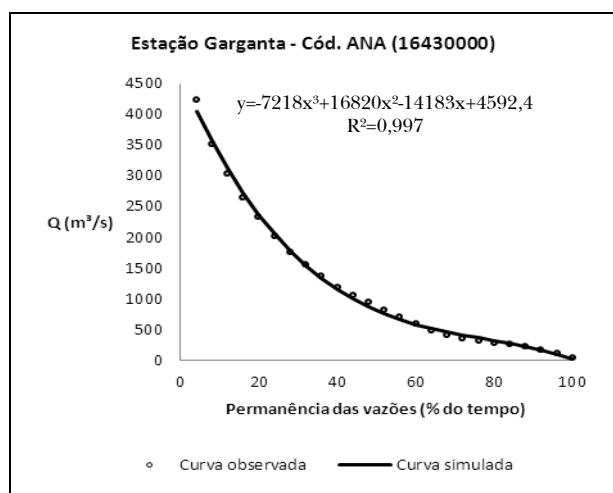


Figura 7 –Calibração da curva de permanência de vazões estação Garganta.

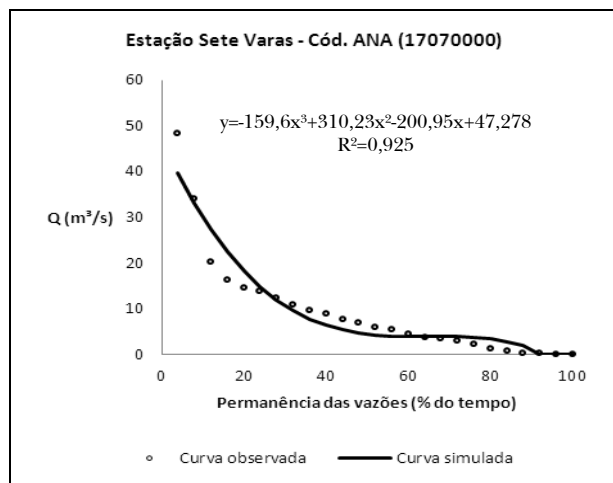


Figura 8 –Calibração da curva de permanência de vazões estação Sete Varas.

Modelos de Regressão Utilizados na Regionalização

Por meio da calibração, pode-se entender que para a simulação da curva de permanência de uma bacia hidrográfica sem dados de vazão e na mesma região analisada, devem ser determinados os parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico mostrados na Equação (5). Já que as permanências *D* são conhecidas, os parâmetros *a*, *b*, *c* e *d*, só podem representar as informações climáticas e fisiográficas, ou seja, a transferência das informações das bacias que serviram para calibrar o modelo supracitado, para as bacias sem dados de vazão, é feita pela regionalização daqueles parâmetros. Assim, a regionalização é efetuada por meio da regressão de *a*, *b*, *c* e *d* em relação às características morfoclimáticas das bacias calibradas. Foram consideradas como características morfoclimáticas: a área de drenagem, o comprimento e o desnível do rio; e a precipitação média anual; simbolizadas respectivamente por *A* (Km^2), *L* (Km), *H* (m) e *P* (mm).

A Tabela 3 resume os valores dos parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico para as 7 bacias analisadas na calibração.

Tabela 3 –Parâmetros das equações de regressões (modelo cúbico).

Estação	Parâmetros			
	a	b	c	d
Arapari	512	1952	2709	1282
Boca do inferno	670	2720	3861	1833
Apalai	459	1470	1829	825,3
Tirios	62,5	230,2	318,3	151,7
Aldeia Wai-Wai	1942	5890	6633	2676
Garganta	4592	14183	16820	7219
Sete Varas	47,3	201	310,2	159,6

De posse dos valores dos parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico (Tabela 3) e das características morfoclimáticas (Tabela 1) das bacias analisadas, foi aplicada a regressão múltipla, entre os parâmetros e as variáveis independentes, por meio das seguintes equações de regressão:

$$V = b_0 + b_1.P + b_2.A + b_3.L + b_4.H \tag{8}$$

$$V = b_0.P^{b_1}.A^{b_2}.L^{b_3}.H^{b_4} \tag{9}$$

$$V = b_0.P^{b_1}.(A/L)^{b_2}.H^{b_3} \tag{10}$$

$$V=b_0.P^{b_1}.A^{b_2}.(H/L)^{b_3} \tag{11}$$

Onde *V* é a variável dependente que representa os parâmetros das curvas de permanência de vazão *a*, *b*, *c* e *d*; e *b0*, *b1*, *b2*, *b3* e *b4* são as constantes da regressão. A análise de regressão múltipla foi executada de acordo com os textos estatísticos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Naghetini e Pinto, 2007). Os valores de *b0*, *b1*, *b2*, *b3* e *b4* foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, por intermédio de planilha eletrônica.

Segundo Naghetini e Pinto (2007), para se evitar a multi-colinearidade, elimina-se uma entre cada conjunto de duas variáveis independentes que apresentarem coeficiente de correlação superior a 0,85. Portanto, observando-se a Tabela 4, as variáveis *A* e *L* são multi-colineares.

Tabela 4 –Matriz de correlação entre as variáveis independentes.

	P (mm)	A (Km ²)	L (Km)	H (m)
Precipitação (mm)	1			
Área (Km ²)	0,69	1		
Comprimento (Km)	0,59	0,95	1	
Desnível (m)	0,01	0,70	0,75	1

Nesse caso, a eliminação de uma delas foi efetuada seguindo-se o teste de *F* parcial (Montgomery e Peck, 1992).

Por meio desse teste, foi eliminada a variável comprimento do rio, pois a manutenção da mesma na regressão múltipla, em detrimento à área de drenagem, não apresentou ganho de qualidade ao modelo. E por outro lado, tal variável apresenta maior dificuldade para ser obtida, já que, nesse caso, é necessário lançar mão de outras ferramentas computacionais, como, por exemplo, *softwares* do tipo SIG. Já para os valores de área de drenagem das bacias gerenciadas pela ANA, estes podem ser obtidos em <http://hidroweb.ana.gov.br>.

Após a análise de multi-colinearidade, os modelos de regressão (Equações (8-11)) foram testados para definir o melhor modelo de regionalização. Assim, constatou-se que o modelo de regressão representado pela Equação (12) obteve um melhor desempenho na determinação dos parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico (Equação (5)), pois apresentou maiores valores de coeficiente de determinação

ajustado (Equação (7)), e menores erros (Equação (6)).

$$V = b_0 + b_1.P + b_2.A + b_3.H \tag{12}$$

São mostradas, a seguir, as equações de regressão recomendadas para estimar os coeficientes *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico (Equação (5)), e os coeficientes de determinação ajustados.

Modelo de regionalização:

$$a=-1915,58+1,001.P+0,13.A-3,79.H \tag{13}$$

$R^2_{ajustado}=0,91$

$$b=-4215,43+2,25.P+0,42.A-11,92.H \tag{14}$$

$R^2_{ajustado}=0,93$

$$c=-1514,12+1,02.P+0,55.A-16,21.H \tag{15}$$

$R^2_{ajustado}=0,95$

$$d=872,95-0,27.P+0,26.A-8,10.H \tag{16}$$

$R^2_{ajustado}=0,96$

VALIDAÇÃO

Nesta etapa, aplicou-se, aos dados das bacias-alvo, o modelo de regionalização (Equações (13–16)) para cálculo dos parâmetros *a*, *b*, *c* e *d*. As características morfoclimáticas das bacias-alvo foram definidas na Tabela 1. De posse dos valores dos parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* do modelo cúbico (Equação (5)), foi possível simular as curvas de permanência de vazões como mostrado nas Figuras 9 e 10.

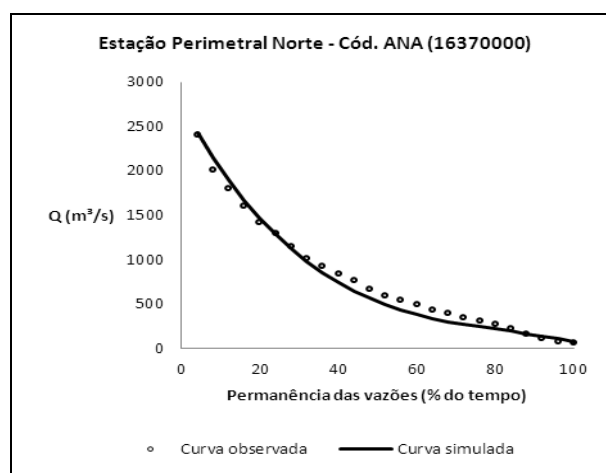


Figura 9 –Curva de permanência de vazões simulada para a estação Perimetral Norte (alvo 1).

Considerando-se o erro quadrático relativo médio percentual e $R^2_{ajustado}$, o modelo de regionalização, na forma cúbica, apresentou desempenho satisfatório com erro igual a 3,73% e $R^2_{ajustado}$ superior a 0,90 para a estação Perimetral Norte (alvo 1). Para a estação Lajeiro (alvo 2), verificou-se que o modelo de regionalização apresentou erro elevado na aplicação, superior a 100%. Em função disso, foram inseridas 5 outras estações fluviométricas com dados estimados, chamadas de sintéticas (Tabela 1), objetivando, assim, melhorar o ajuste da curva de permanência de vazões da bacia-alvo 2. Três dessas estações (E.S.01, E.S.02 e E.S.03 – Figura 1) foram localizadas o mais próximo possível das estações pluviométricas (Fazenda Bela Vista-código ANA: 152006, Kuxare-código ANA: 8156001 e Vista Alegre-código ANA: 156000) já existentes na região. A precipitação para E.S.04 (Figura 1) foi estimada por média aritmética das estações pluviométricas Cachoeira da Porteira conjunto 1-código ANA: 157000 e Perimetral Norte-código ANA: 8056001. No caso da E.S.05, a precipitação foi estimada pela média das duas estações supracitadas anteriormente mais a estação pluviométrica Aldeia Wai-Wai-código ANA: 57000.

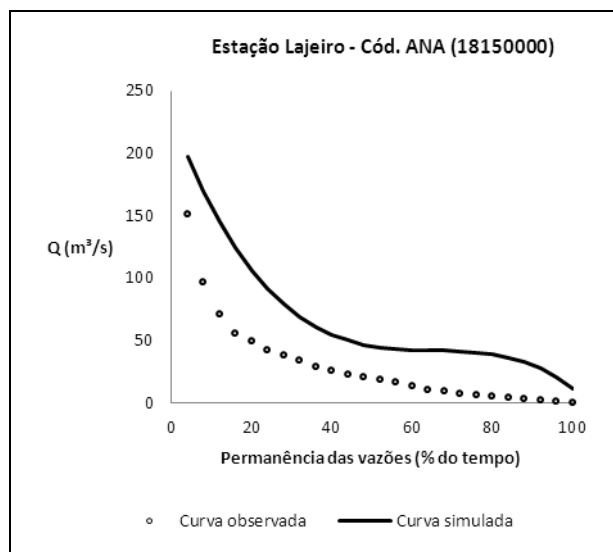


Figura 10 –Curva de permanência de vazões simulada para a estação Lajeiro (alvo 2).

Assim, repetiu-se a metodologia considerando os novos 5 pares de estações pluviométricas e fluviométricas com suas características morfoclimáticas, resultando em novas equações de regressão para os parâmetros a , b , c e d do modelo cúbico.

Essas equações são apresentadas a seguir, juntamente com os valores de $R^2_{ajustado}$:

$$a = -2274,59 + 1,11.P + 0,12.A - 2,95.H \quad (17)$$

$$R^2_{ajustado} = 0,93$$

$$b = -6343,24 + 3,11.P + 0,38.A - 8,65.H \quad (18)$$

$$R^2_{ajustado} = 0,95$$

$$c = -6708,09 + 3,35.P + 0,45.A - 10,12.H \quad (19)$$

$$R^2_{ajustado} = 0,96$$

$$d = -2581,02 + 1,32.P + 0,195.A - 4,43.H \quad (20)$$

$$R^2_{ajustado} = 0,97$$

As Figuras 11 e 12 apresentam os novos resultados da simulação das curvas de permanência de vazão para as bacias-alvo 1 e 2. Por intermédio dessas figuras, observou-se uma melhora significativa no ajuste das curvas da bacia-alvo 2 e no erro quadrático relativo médio percentual, que foi igual a 9,55%.

CONCLUSÕES

Este trabalho estabeleceu uma metodologia de regionalização de curvas de permanência de vazões para a região da Calha Norte no Estado do Pará. A proposta de regionalização envolveu as características físico-climáticas de 9 estações fluviométricas instaladas e em funcionamento na região e de 5 estações que tiveram seus dados estimados.

As curvas de permanência de vazões foram calibradas em função de 5 modelos matemáticos de regressão (exponencial, logarítmico, potência, quadrático e cúbico). Os melhores resultados foram obtidos pelo modelo cúbico, pois o mesmo apresentou maiores $R^2_{ajustados}$, menores erros quadráticos médios percentuais e melhores ajustes das curvas.

A regionalização foi efetuada por meio da técnica da regressão múltipla dos parâmetros a , b , c e d do modelo cúbico, em função das características morfoclimáticas das bacias analisadas. Fisicamente, tais coeficientes explicam a variação espacial das vazões por meio das características morfoclimáticas, que são: a área de drenagem, a precipitação média anual, o comprimento e o desnível do rio. Por intermédio de uma análise de multi-colinearidade, a variável comprimento do rio foi retirada da regressão múltipla, para evitar erros associados à estimação dos coeficientes de regressão.

Assim, as curvas de permanência das bacias-alvo 1 e 2 foram simuladas, mostrando um desempenho satisfatório do modelo cúbico por meio do ajuste entre as vazões observadas e simuladas, R^2 ajustados superiores a 0,90 e do erro quadrático relativo médio percentual, o qual foi inferior a 10%.

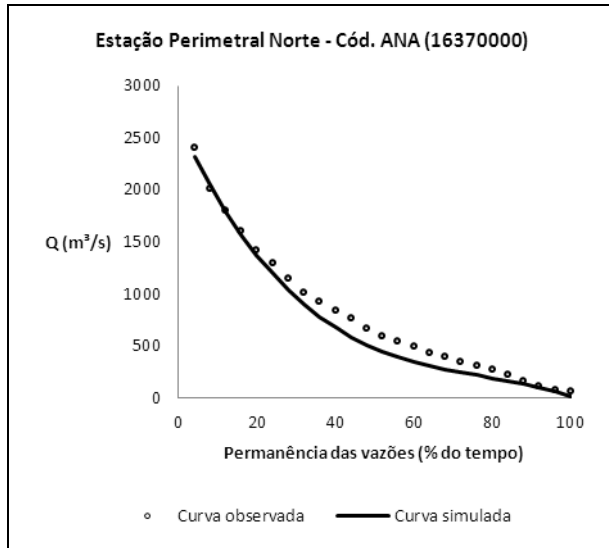


Figura 11 –Curva de permanência de vazões simulada para a estação Perimetral Norte (alvo 1).

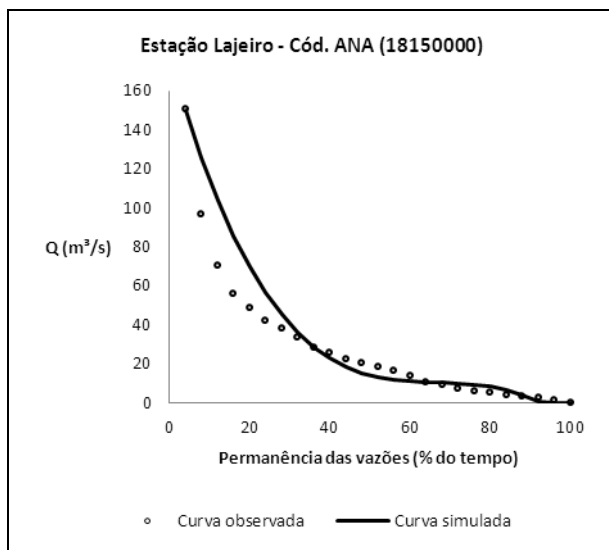


Figura 12 –Curva de permanência de vazões simulada para a estação Lajeiro (alvo 2).

Analisando-se os dados medidos das 9 estações fluviométricas, foi observado que as séries de vazões possuem sempre valores iguais a zero ou mui-

to próximos de zero (Estação Perimetral Norte – Alvo 1), demonstrando que existe pouca contribuição subterrânea, quando termina o período chuvoso na região. Tal fato apóia-se nos tipos de solos da região, i.e, latossolos e podzólicos, os quais são argilosos dificultando a infiltração da chuva. Analisando-se as vazões simuladas, foi observado que o modelo representou bem este comportamento das bacias analisadas.

Nesse contexto, o modelo de regionalização desenvolvido é uma ferramenta promissora para auxiliar na solução da escassez de dados de vazão na região amazônica, podendo dar suporte ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos da região.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à CAPES e ao CNPq o suporte financeiro desta pesquisa por meio de uma bolsa de mestrado e uma bolsa PIBIC/UFPA.

REFERÊNCIAS

- CLAPS, P., e FIORENTINO, M. 1997 Probabilistic Flow Duration Curves for use in Environmental Planning and Management. In: HARMANCIOLU et al. (eds.). Integrated Approach to Environmental Data Management Systems. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, NATO-ASI, series 2, n. 31, p. 255-266.
- ELETOBRÁS 2000. Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas, Rio de Janeiro.
- HASHIM, A., e DAOUD, J. I. 2009. Regionalisation of low flow frequency curves for the Peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*, v. 381 n. 1-2, p. 174-180.
- LI, M., SHAO, Q., ZHANG, L., CHIEW, F. H. S. A. 2010. New regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, v. 389 n. 1-2, p. 137-145.
- MAZVIMAVI, D. 2003. *Estimation of flow characteristics of ungauged catchments: Case study in Zimbabwe*. Tese de doutorado, Wageningen University, Netherlands. 188 p. Disponível em <<http://library.wur.nl/wda/dissertations/dis3514.pdf>>. Acesso em novembro de 2010.
- MIMIKOU, M., e KAEMAKI, S. 1985. Regionalization of flow duration characteristics. *Journal of Hydrology*, v. 82, p. 77-91.

- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. 1992. Introduction to linear Regression Analysis. 2.ed. EUA: John Wiley & Sons, 527p.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. 2007. Correlação e regressão. Hidrologia e Estatística. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM.
- OUARDA, T. B. M. J., GIRARD, C., CAVADIAS, G. S., e BOBÉE, B. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, v. 254, n. 1-2, p. 157-173.
- PINTO, N. L. de S. et al. 1976. Hidrologia básica. São Paulo: Edgard Blücher.
- QUIMPO, R. G., ALEJANDRINO, A. A., e McNALLY, T. A. 1983. Regionalized flow duration for Philippines. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 4, p. 320-330.
- ROJANAMON, P.; CHAISOMPHOB, T., RATTANAPITIKON, W. 2007. Regional flow duration model for the Salawin river basin of Thailand. Science Asia.
- SINGH, K. P. (1971) "Model flow duration and stream flow variability" *Water Resources Research*, vol. 7, n. 4, p. 1031-1036.
- TUCCI, C. E. M. 1993. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (ed.). Hidrologia: Ciência e Aplicação: Editora da Universidade – UFRGS, 943 p.
- TUCCI, C., SILVEIRA, A., SANCHEZ, J. 1995. Flow regionalization in the upper Paraguay basin, Brasil. *Hydrological Sciences –Journal –des Sciences Hydrologiques*, vol. 40, n. 4, p. 485-497.
- YU, P. S., YANG, T. C., WANG, Y. C. 2002. Uncertainty analysis of regional flow duration curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 128, n. 6, p. 424-430.
- VOGEL, R. M., e FENNESSEY, N. M. 1990. Regional flow duration curve for ungauged sites in Massachusetts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 116, n. 4, p. 530-549.

of the following regression models: power, exponential, logarithmic, quadratic, and cubic parametric forms. The cubic model was found to be the best-fit function to represent flow duration curves. By using the multiple regression technique, the space domain of each parameter was studied in order to explain its corresponding variation in terms of independent variables, such as the drainage area, mean annual precipitation depth, river length and river elevation range, thus resulting in regional models. In order to verify the adequacy of the regional cubic model it was used to estimate flow duration curves at two target watersheds in the region, with good results in terms of the graphical adherence of simulated and observed flows. In mathematical terms, the percent mean square error was used as a performance measure, with results of 5.27% and 9.55%, as calculated for the two target watersheds. The good performance of the model, both in the calibration and validation steps, points to its potential use for estimating flow duration curves at ungauged sites, especially for hydropower plants and for other water-resources planning and management projects.

Key-words: Regionalization; flow duration curve; Model cubic; multiple regression; Amazon.

Regionalization of Flow Duration Curves of the Region to the North of the Amazon River in the State of Pará - Brazil

ABSTRACT

The lack of streamgauging data makes requires the use of methods for estimating flows at ungauged sites or at sites with very short samples. This paper describes a model to regionalize flow duration curves for rivers located in the so-called 'Calha Norte' hydrologic region, in the Brazilian state of Pará. Data used to fit the model were recorded at 9 streamgauging stations located in the region. The observed flow duration curves were used to calibrate the parameters