

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES COM BASE EM SÉRIES ESTENDIDAS: BACIAS AFLUENTES À LAGOA MIRIM, RS

Esaul Obregon, Carlos E. M. Tucci e Joel A. Goldenfum

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS
Caixa Postal 15029 - CEP 91501-970 Porto Alegre, RS*

RESUMO

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para transferir informações espacialmente, buscando explorar ao máximo os dados disponíveis numa determinada área geográfica. Os estudos de regionalização que têm sido desenvolvidos geralmente utilizam as vazões existentes. Quando estas informações são representativas, os resultados são bons; no entanto, quando os dados são deficientes, a regionalização fica comprometida.

Geralmente existem séries de precipitações mais longas que as de vazão. Desta forma, em regiões com dados deficientes é possível estender as séries de vazões através de modelos hidrológicos precipitação-vazão e obter séries de vazões mais representativas para a regionalização.

Neste estudo foi utilizado um modelo mensal de transformação de precipitação em vazão e foi realizada a regionalização da curva de regularização e de permanência das vazões mensais. Essa metodologia foi aplicada nas bacias afluentes à Lagoa Mirim.

Os resultados obtidos mostraram que as funções regionais apresentam melhor correlação utilizando séries estendidas e que, apesar das limitações inerentes às extensões, é possível introduzir na regionalização de vazões, informações incluídas na precipitação.

INTRODUÇÃO

A regionalização de vazões é um procedimento que tem sido utilizado para permitir a obtenção da estimativa de funções hidrológicas, tais como curva de probabilidade de vazões máximas, curva de permanência e curva de regularização em locais com dados deficientes (Tucci, 1993).

Estas funções são fundamentais para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos, a avaliação da rede hidrométrica e para diferentes estudos hidrológicos de uma bacia hidrográfica.

Na literatura podem ser encontrados vários estudos quanto à regionalização de vazões em diferentes locais do mundo (NERC, 1975; Tucci et al., 1991). Estes estudos se baseiam somente em séries observadas de vazões, que geralmente são menores que as séries de precipitação. Se uma região dispõe de séries curtas ou de pequena representatividade espacial das vazões, os resultados apresentam muitas incertezas, inviabilizando a regionalização e, conseqüentemente a estimativa de vazões.

A extensão das séries pode ser realizada por correlação entre os postos de vazão, mas IPH-Eletronbras (1985) e Tucci (1993) demonstraram que a extensão de séries com base em postos, também utilizados na regionalização, não agregavam maior informação, apenas permitiam filtrar a curva média regional.

A utilização da precipitação em períodos onde não existem vazões pode contribuir para introduzir informações para as vazões e na própria regionalização. Este procedimento pode ser realizado através da transformação de precipitação em vazão.

A utilização de modelos hidrológicos determinísticos para extensão de séries hidrológicas é um problema clássico em hidrologia (Tucci, 1998). A geração de séries de vazões com base na precipitação pode produzir incertezas adicionais devido a: (i) as incertezas nas séries de precipitação e evapotranspiração; (ii) ajuste e verificação dos parâmetros e; (iii) ineficiência da estrutura do modelo (Troutman, 1985). Além disso, o modelo determinístico não considera a variabilidade aleatória dos resíduos e tende a reduzir a variância da série gerada.

Apesar dessas limitações, os modelos hidrológicos têm sido utilizados na prática em diferentes estudos para extensão das séries de vazões, segundo critérios como os apresentados por Klemes (1986).

Neste estudo é explorado o uso de um modelo hidrológico para a extensão de séries de vazões a partir da precipitação, aumentando o tamanho da amostra para a regionalização de vazões numa região carente de dados adequados, que é a parte brasileira das bacias afluentes à Lagoa Mirim.

METODOLOGIA

A metodologia para regionalização de vazões em regiões com dados escassos de vazão é realizada nas seguintes etapas:

- i. extensão das séries de vazões com base num modelo hidrológico mensal: IPHMEN;
- ii. regionalização das vazões com base nas séries históricas e geradas.

MODELO IPHMEN

O modelo IPHMEN (Tucci, 1998) é baseado em intervalo de tempo mensal de cálculo e composto dos seguintes algoritmos:

- i. distribuição de volumes;
- ii. escoamento superficial e subterrâneo; e
- iii. otimização dos parâmetros.

A simulação com o intervalo mensal apresenta simplificações metodológicas sobre a distribuição temporal dos processos que ocorrem na bacia. Portanto os balanços utilizados são fortes abstrações da realidade.

Distribuição dos volumes

O modelo utiliza a equação da continuidade para estabelecer o balanço de volumes da camada superior do solo (Figura 1). A equação é a seguinte:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - T(t) - E(t) \quad (1)$$

onde S é o armazenamento na camada superior do solo; $I(t)$ é a infiltração no tempo t ; $T(t)$ é a percolação no tempo t ; $E(t)$ a evaporação no tempo t .

Tucci (1998) relaciona a infiltração e a percolação através das seguintes expressões:

$$I = a + b S \quad (2)$$

$$T = c S \quad (3)$$

onde a , b e c são determinados com base nos parâmetros da equação de Horton (1939) da forma seguinte:

$$\begin{aligned} a &= \frac{-(I_0)^2}{\ln h(I_0 - I_b)} \\ b &= \frac{I_0}{\ln h(I_0 - I_b)} \\ c &= \frac{-I_0}{\ln h.I_b} \end{aligned} \quad (4)$$

I_0 e I_b representam, respectivamente, a capacidade máxima e mínima de infiltração [$\text{mm}/\Delta t$] e $h = e^{-k}$, onde k [1/tempo] é um parâmetro que caracteriza o decaimento da curva de infiltração. O modelo com intervalo de 1 mês distorce a definição dos parâmetros da equação de infiltração, já que esse processo ocorre num período muito curto (minutos ou, no máximo, horas). Conforme Tucci (1998), neste modelo, estes parâmetros dificilmente guardam relação específica com os experimentos de Horton, mas permitem estabelecer um balanço dos macroprocessos no tempo.

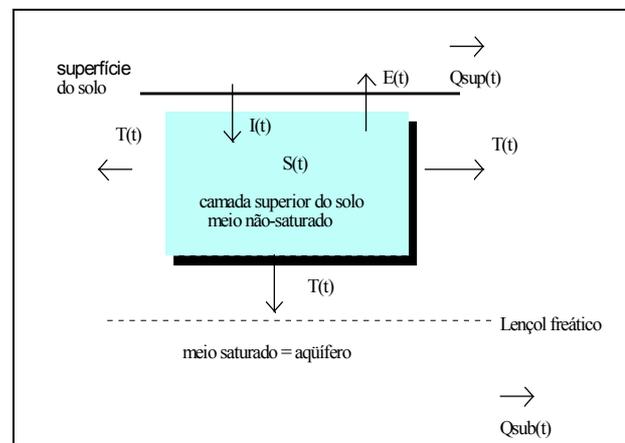


Figura 1. Caracterização dos fluxos do modelo IPHMEN.

A capacidade máxima de armazenamento do solo ocorre quando $I = T$, ou seja o solo está com a sua menor capacidade de infiltração e máxima percolação. Sendo assim, utilizando as Equações (1) e (2), resulta:

$$S_{max} = \frac{a}{c - b} \quad (5)$$

A evaporação real é estimada como uma relação da capacidade de umidade do solo. Considerando que a precipitação que chega à superfície foi registrada, a evaporação deverá retirar

essa precipitação do solo ou do que fica acumulada na superfície. A equação que relaciona a evaporação e capacidade de umidade do solo é:

$$E = E_p \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot \frac{S}{S_{max}})] \quad (6)$$

onde E é a evaporação real, E_p é a evaporação potencial e α é um parâmetro.

Pode-se notar que a relação E/E_p depende do parâmetro α e da relação S/S_{max}. Quanto maior for o valor de α, maior será a evaporação. No modelo, α pode assumir valores no intervalo de 1 a 10.

A Equação (1) pode ser analisada para duas condições específicas:

1. quando P > I, ou seja, a precipitação (P) é maior que a capacidade de infiltração (I), esta última é satisfeita em cada instante e pode ser representada pela Equação 2;
2. quando P < I a infiltração real é menor do que a capacidade de infiltração e toda a precipitação se infiltra. Nesse caso, devido à distribuição espacial ao longo do mês, poderá existir escoamento superficial que não seria retratado já que toda a precipitação se infiltra. Portanto, introduziu-se aqui um parâmetro que determina uma parcela de escoamento superficial que é gerado pela bacia em função da relação P/I.

A parcela de precipitação que infiltra (P_i) e a que gera escoamento superficial direto (V_s) são:

$$P_i = P \cdot \left[1 - \frac{(P/I)^2}{P/I + Cr} \right] \quad (7)$$

$$V_s = P \cdot \frac{(P/I)^2}{P/I + Cr}$$

onde Cr é um parâmetro do modelo.

Estas funções dependem de Cr e P/I. Quanto maior o valor de Cr, menor é o coeficiente que gera escoamento superficial. Deve-se ressaltar que esta função somente é utilizada quando P < I.

Substituindo na Equação (1) os termos conhecidos, observa-se que o termo de evaporação introduz não-linearidade na equação. Para linearizar essa equação utiliza-se o seguinte:

$$F(S) \approx F(S_t) + \frac{dF}{dt} (S - S_t) \quad (8)$$

$$F(S) = \exp(-\alpha \frac{S_t}{S_{max}}) [1 - \frac{\alpha}{S_{max}} (S - S_t)]$$

A equação diferencial resultante é linear e do seguinte tipo:

$$\frac{dS}{dt} + w \cdot S = m \quad (9)$$

onde w e m são parâmetros do modelo que variam de acordo com as alternativas mencionadas acima para a infiltração. A solução dessa equação para o intervalo t, t+1 é:

$$S(t+1) = \frac{m}{w} (1 - e^{-w\Delta t}) + S(t)e^{-w\Delta t} \quad (10)$$

De acordo com as alternativas de infiltração os termos ficam:

1. P > I

$$w = \frac{\alpha E_p}{S_{max}} \exp(-\alpha S_t/S_{max}) + c - b \quad (11)$$

$$m = a - E_p + E_p \cdot \exp(-\alpha S_t/S_{max}) (1 + \frac{\alpha S_t}{S_{max}})$$

2. P < I

$$w = \frac{\alpha E_p}{S_{max}} \exp(-\alpha S_t/S_{max}) + c \quad (12)$$

$$m = P_i - E_p + E_p \cdot \exp(-\alpha S_t/S_{max}) (1 + \frac{\alpha S_t}{S_{max}})$$

Volume superficial

O volume superficial é estimado também de acordo com as duas condições anteriores.

1. Para P > I

Conhecido I(t), onde I(t+1) é obtido da Equação (2), já que S(t+1) foi estimado pela Equação (10), é possível estimar o volume V_s por:

$$V_s = \left\{ P - \frac{[I(t) + I(t+1)]}{2} \right\} \Delta t \quad (13)$$

2. Para $P < 1$

A precipitação que gera escoamento superficial é estimada por uma das Equações (7).

Volume percolado

O volume percolado é estimado com base no balanço, ou seja:

$$S(t+1) = S(t) + V_i - V_p \quad (14)$$

onde V_i é o volume infiltrado e V_p o volume percolado. Sendo:

$$V_i = [I(t) + I(t+1)] \Delta t / 2 \quad (15)$$

resulta para o volume percolado:

$$V_p = S(t) - S(t+1) + V_i \quad (16)$$

Escoamento superficial e subterrâneo

Tanto o escoamento superficial como o subterrâneo são simulados pelo modelo de reservatório linear simples. As equações para a propagação superficial (Q_s), subterrânea (Q_b) e total (Q) são expressas a seguir:

$$\begin{aligned} Q_s(t+1) &= Q_s(t) \exp(-\Delta t/K_s) + V_s(1 - \exp(-\Delta t/K_s)) \\ Q_b(t+1) &= Q_b(t) \exp(-\Delta t/K_b) + V_p(1 - \exp(-\Delta t/K_b)) \quad (17) \\ Q(t+1) &= Q_s(t+1) + Q_b(t+1) \end{aligned}$$

K_s é o coeficiente de propagação superficial e representa o tempo de esvaziamento do reservatório superficial. Para as bacias com tempo de traslado menor que 5 dias esse valor é muito pequeno. Esse valor deve ser em unidade de mês. O parâmetro K_b é o tempo de esvaziamento do reservatório subterrâneo e pode ser facilmente estimado com base em dados da bacia ou utilizando dados de bacias com características semelhantes. Basta relacionar em escala logarítmica as vazões com intervalo mensal do período seco. Desprezando o segundo termo da equação acima, pode-se observar que essa se assemelha à equação de depleção, com $K_b = 1/\text{coeficiente de depleção}$. Portanto, a inclinação da reta obtida do referido gráfico permite estimar K_b .

Otimização dos parâmetros

Um dos procedimentos para a obtenção desses parâmetros é a otimização de uma função objetivo. A otimização procura o valor de uma ou n variáveis (nesse caso parâmetros), que proporcionam melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, dentro de um objetivo e obedecendo as restrições. Portanto, o problema de otimização é minimizar ou maximizar a função objetivo: $y = F(x_i)$, para $i = 1, 2, 3, \dots, n$; x_i são as variáveis independentes e n o número de variáveis independentes. Para o modelo hidrológico x_i são os parâmetros e y é a variável dependente a ser otimizada.

O método adotado para otimização dos parâmetros é o apresentado por Rosebrock (1960). Para o modelo, é necessário especificar a função objetivo desejada e os parâmetros de otimização.

As duas funções contidas no modelo IIPHMEN são:

$$\text{Função Quadrática: } F1 = \sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2 \quad (18)$$

$$\text{Função Relativa: } F2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{o_i} - Q_{c_i}}{Q_{o_i}} \right)^2 \quad (19)$$

onde $Q_o(i)$ e $Q_c(i)$ são as vazões observadas e calculadas respectivamente no período i , nas N observações no período de ajuste.

Na Função $F1$ o peso maior é dado aos valores de maior magnitude, enquanto que na Função $F2$ os pesos são relativos.

O modelo possui sete parâmetros que são: a , b e c das equações de infiltração; α que relaciona a evaporação e a capacidade de umidade do solo; C_r da parcela de precipitação que infiltra quando a $P < 1$; finalmente, os parâmetros K_s e K_b da propagação do escoamento superficial e subterrâneo, respectivamente. Deste conjunto de parâmetros, os de maior sensibilidade são os parâmetros a , b e c (Tucci, 1998). Também são estes que dificilmente podem ser medidos ou estimados para a bacia hidrográfica. Com o método de otimização automática consegue-se uma estimativa razoável de cada um deles. Podem-se incluir os outros parâmetros na otimização. Obviamente, o resultado do cálculo dos parâmetros dependerá das condições iniciais fornecidas e do espaçamento. Depois dos resultados obtidos na otimização, é necessário um refinamento manual e observação do produto da simulação.

REGIONALIZAÇÃO

Algumas das principais funções hidrológicas utilizadas nos estudos em recursos hídricos são a curva de permanência e a curva de regularização.

Curva de permanência

A curva que relaciona a vazão ou nível de um rio com a porcentagem de tempo em que ocorrem vazões, ou níveis maiores ou iguais a uma vazão, ou nível qualquer, denomina-se curva de permanência.

Conforme Tucci et al. (1991), a vazão Q_{50} (vazão com permanência de 50% do tempo) e a vazão Q_{95} (vazão com permanência de 95% do tempo) podem ser representadas por uma função exponencial do tipo:

$$Q = \text{Exp. } [p.r+n] \quad (20)$$

sendo Q a vazão em m^3/s com permanência p , $r = -[\ln(Q_{50}/Q_{95})]/0.45$, $n = \ln Q_{50} - 0.50 * m$. Tucci et al. (1991) indicam que a curva de permanência obtida pela Equação (20) pode ser estimada satisfatoriamente com base nos valores de Q_{50} e Q_{95} . Estes valores podem ser regionalizados com base numa equação como a seguinte:

$$Q = uA^vP^x \quad (21)$$

onde Q é a vazão em m^3/s , correspondentes a Q_{50} ou Q_{95} ; A é a área de drenagem da bacia; P é a precipitação média anual na bacia; u , v e x são os parâmetros da equação estimados por regressão

Curva de regularização

A curva que relaciona a vazão regularizada com o volume necessário para regularizar esta vazão com uma probabilidade denomina-se *Curva de Regularização*.

As curvas de regularização podem ser determinadas através de uma equação da continuidade que não considera a evaporação.

Para obter o volume de regularização de uma determinada demanda calcula-se o volume acumulado em cada tempo, de acordo com a seguinte equação:

$$S_{t+1} = S_t + (Q_t - q_r) \Delta t \quad (22)$$

onde: S_t e S_{t+1} são os volumes armazenados nos tempos t e $t+1$; Q_t é a vazão afluente no tempo t ; q_r é a demanda a ser regularizada; Δt é o intervalo de tempo (para vazões mensais será igual a um mês).

A cada ponto de mínimo da função de armazenamento, calcula-se o volume necessário para regularizar a demanda naquele período (V_{aux}), que é igual à diferença entre o armazenamento mínimo (V_{min}) e o armazenamento máximo (S_{max}) imediatamente anterior.

$$V_{aux} (i) = S_{max} (i) - V_{min}(i) \quad (23)$$

O volume de regularização (V_r) para a demanda q_r é o valor máximo dos volumes necessários a regularizar esta demanda, para cada período de estiagem (i):

$$V_r = \text{Máx } [V_{aux} (i)] \quad (24)$$

O procedimento pode ser aplicado à várias vazões, obtendo seus respectivos volumes necessários para regularização de cada demanda, encontrando a relação entre a demanda q_r e o volume de regularização V_r .

Domokos e Gilyén-Hofer (1990) apresentaram regionalização das curvas de regularização adimensionais, calculadas a partir da mostra completa visando garantir a demanda com as vazões mínimas, utilizando séries históricas da Hungria. Tucci et al. (1991) utilizaram as curvas de regularização adimensionais na regionalização para a região do Rio Grande do Sul. Para o cálculo do volume de regularização de uma demanda, foi utilizado o método do período crítico.

Pode-se obter a relação volume e vazão regularizada q_r do tipo:

$$V_r = f (q_r) \quad (25)$$

A Equação (25) pode ser transformada na seguinte equação adimensional:

$$V_{ad} = f_1 (\beta) \quad (26)$$

onde β é a vazão adimensional definida por $\beta = 100. q_r/Q_{med}$; V_{ad} é a capacidade do reservatório adimensional, com:

$$V_{ad} = 100. Vol / (Q_{med} * \text{Ano} * 31,536) \quad (27)$$

sendo Vol a capacidade útil do reservatório de regularização, em $10^6 m^3$; Q_{med} a vazão média de longo período e; 31,536 a constante de transformação de unidades.

Com base nos valores obtidos da simulação pode-se ajustar a uma função do tipo:

$$Vad = \gamma\beta^\phi \quad (28)$$

onde γ , ϕ são constantes da equação que podem ser estimados por mínimos quadrados.

Para a obtenção de uma ou várias regiões homogêneas de regularização, uma das alternativas é a análise do comportamento das curvas individuais, agrupando segundo as tendências das curvas e dos critérios físicos da região, dando como resultado curvas regionais de regularização.

Essas curvas médias regionais são calculadas tanto para séries históricas como para as séries estendidas através de:

- i. encontrar uma curva média para os postos com tendência semelhante entre elas e definir o período de validade da curva média;
- ii. para o uso da curva média, define-se a função da vazão média de longo período (Qmed) com as características físicas da bacia. Para Qmed em função da área:

$$Qmed = \delta A^\theta \quad (29)$$

onde A é a área da bacia, δ e θ são parâmetros estimados por mínimos quadrados.

Combinando as Equações (27), (28) e (29), pode-se obter o volume do reservatório como:

$$Vol = \gamma (100qr/Qmed)^\phi 0,31536 \delta A^\theta \quad (30)$$

BACIA AFLUENTE À LAGOA MIRIM

Descrição da área de estudo

A parte brasileira da lagoa Mirim está localizada na zona sul do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). Esta bacia é tributária da bacia da lagoa dos Patos através do canal São Gonçalo. A outra parte da bacia encontra-se no território da República do Uruguai.

A vegetação da região é constituída principalmente de pastagens naturais com poucas matas (zonas de pequenos arbustos) ou florestas e da cultura de arroz irrigado ao redor da Lagoa Mirim. Nas zonas baixas alagadiças, durante o inverno, a vegetação palustre surge bastante variada. Na zona de planuras de limpas pastagens há um potencial de uso rico e promissor para produção de alimentos com irrigação.

Climatologia e pluviometria

Os postos pluviométricos apresentam-se bem distribuídos espacialmente com séries longas. Foram escolhidos 27 postos pluviométricos, apresentados na Tabela 1. Os dados climáticos são mais escassos, mas existem várias séries mensais de evaporação medidas em tanque e/ou evaporímetros de Piché (Tabela 2). Alguns destes postos estão localizados na parte baixa da bacia e recebem influência dos lagos e do oceano, não refletindo o comportamento da parte superior da bacia. Utilizando a série do posto de Usina Candiota, regressões com os postos de Bagé e de IPEAS, foi possível estimar uma série de evaporação de 1951 a 1995.

Tabela 1. Dados pluviométricos da parte brasileira da bacia afluyente à lagoa Mirim.

| Nº | Estação | Período disponível |
|----|----------------------|--------------------|
| 1 | Canguçu | 12/50 – 11/95 |
| 2 | Cascata-IPEAS | 01/67 - 04/81 |
| 3 | Vila Freire | 10/76 - 11/95 |
| 4 | Gr. São Pedro | 02/66 – 11/95 |
| 5 | Marmeleiro | 09/66 – 05/81 |
| 6 | Morro Redondo | 11/66 - 03/81 |
| 7 | Passo do Ricardo | 11/64 – 12/80 |
| 8 | Pelotas | 06/43 – 12/70 |
| 9 | P. C. de Farias | 09/64 – 11/95 |
| 10 | Ferraria | 10/76 – 11/95 |
| 11 | Pedras Altas | 02/66 – 11/95 |
| 12 | Pinheiro Machado | 09/65 – 11/95 |
| 13 | Piratini | 09/35 – 12/70 |
| 14 | Usina Candiota | 01/49 – 12/94 |
| 15 | Colina Nova | 09/66 – 05/81 |
| 16 | Granja Pedro Osório | 02/66 – 11/95 |
| 17 | Granja Cerrito | 08/64 – 11/95 |
| 18 | Granja Quatro Irmãos | 08/66 - 03/81 |
| 19 | Santa Maria | 09/65 - 12/95 |
| 20 | Arroio Grande | 01/67 – 11/95 |
| 21 | Granja Osorio | 02/66 – 11/95 |
| 22 | Erval | 11/68 – 11/95 |
| 23 | Jaguarão | 01/34 – 06/63 |
| 24 | Faz. S. Francisco | 10/66 – 10/79 |
| 25 | Telho | 08/66 – 05/81 |
| 26 | Paraíso | 04/58 – 12 /94 |
| 27 | Torrinhas | 09/76 – 11/95 |

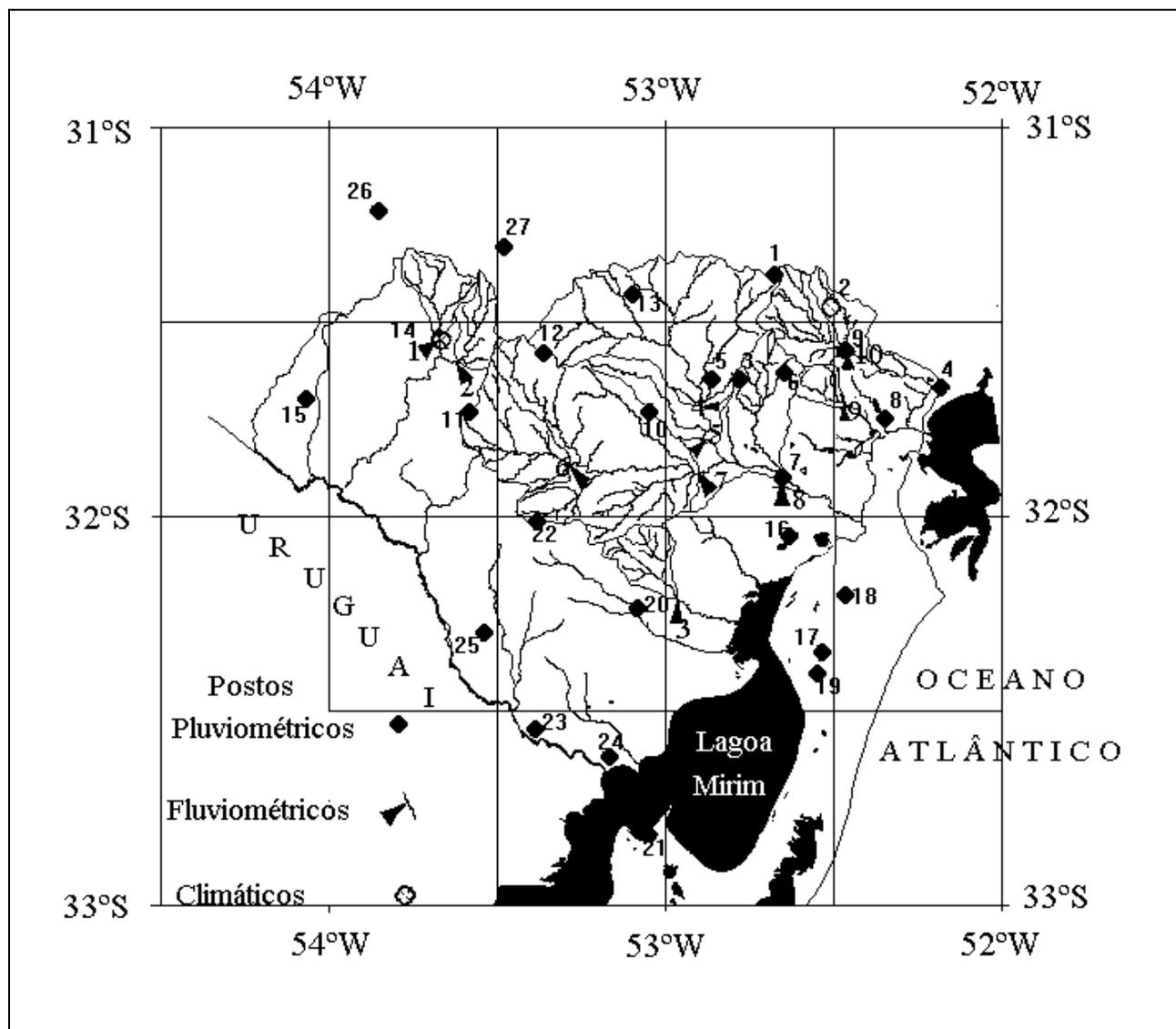


Figura 2. Localização dos postos na região em estudo.

Tabela 2. Estações climatológicas e períodos disponíveis de dados de evaporação.

| Estação | Período |
|-----------------------|---------|
| Bagé | 68 – 95 |
| Santa Maria | 88 – 95 |
| IPEAS | 51 – 84 |
| D. do Petrolino | 56 – 81 |
| St. Vitória do Palmar | 59 - 95 |
| Usina Candiota | 56 –74 |

Dados fluviométricos

A região conta com mais de 18 postos fluviométricos gerenciados por alguns órgãos, porém muitos deles foram extintos por diferentes motivos ou não tem dados disponíveis. Deste conjunto de postos só foi possível obter dados de dez estações fluviométricas, escolhidas para o estudo.

Os postos fluviométricos localizam-se principalmente no curso do rio Piratini e de um de seus afluentes, arroio Basílio. Esses postos determinam áreas de sub-bacias que variam desde 131 km² na sub-bacia do arroio Fragata em Passo dos Carros, até 5.386 km² no rio Piratini em Passo do Ricardo. Os dados coletados abrangem períodos entre 3 a 31 anos. (Tabela 3).

Tabela 3. Estações fluviométricas e os períodos disponíveis.

| Nº Estação | Rio | Área da bacia km ² | Dados observados | Ajuste | Verificação | Total com extensão |
|--------------------|--------------|----------------------------------|---------------------|--------|-------------|-----------------------|
| 1 D. Lassance | Candiota | 313 | 01/49-12/57 | 52-55 | 56-57 | 49-95 |
| 2 Candioteinha | Candioteinha | 226 | 05/72-12/92 | 76-78 | 81-83 | 67-95 |
| 3 Santa Marta | Chasqueiro | 280 | 01/69-12/71 | 69-70 | 71 | 67-95 |
| 4 P. Império | Piratini | 1860 | 10/76-07/89 | 79-86 | 88-89 | 67-95 |
| 5 Picada Nova | Piratini | 2220 | 01/66-12/77 | 67-75 | 76-77 | 66-95 |
| 6 Cerro Chato | Basílio | 1060 | 08/76-12/95 | 82-88 | 89-90 | 67-95 |
| 7 Contrato | Basílio | 2396 | 01/67-12/77 | 68-73 | 76-77 | 67-95 |
| 8 P. Ricardo | Piratini | 5386 | 01/62-12/82 | 69-78 | 79-80 | 62-95 |
| 9 P. dos Carros | Fragata | 131 | 10/64-12/95 | 74-78 | 79-80 | 65-95 |
| 10 P. C. de Farias | Pelotas | 370 | 09/64-12/95 | 73-78 | 84-85 | 65-95 |

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Ajuste dos parâmetros do modelo

Os períodos utilizados para cada uma das bacias no ajuste e verificação são apresentados na Tabela 3. Os parâmetros a , b e c foram estimados por otimização automática, partindo de alguns critérios sobre os pontos de partida e finalmente os resultados foram refinados por tentativa e erro juntamente com os outros parâmetros, fazendo com que os mesmos guardem alguma relação com as características físicas e geomorfológicas da bacia modelada (Tabelas 4 e 5).

O parâmetro Kb foi calculado para cada uma das séries por meio da plotagem na escala logarítmica com uma análise de regressão do período mais seco da série e utilizando a Equação (17), fazendo com que o termo de escoamento superficial seja não significativo. O parâmetro Ks que controla o tempo de esvaziamento superficial foi estimado segundo os hidrogramas que apresentavam em cada série; este parâmetro manteve-se na proporção de 1/5 a 1/3 do tempo de esvaziamento subterrâneo. Os valores de α (alpha) e Cr foram ajustados de tal forma que os hidrogramas simulados acompanham os valores extremos dos hidrogramas observados, estimando com maior exatidão o valor da média, tanto para um ano seco como úmido. Os resultados finais destes parâmetros estimados, para cada sub-bacia, são apresentados na Tabela 4.

O coeficiente de determinação para a função objetivo relativa foi calculado por:

$$R^2 = 1 - SF/ST \quad (31)$$

onde:

$$SF = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qo(i) - Qc(i)}{Qo(i)} \right)^2$$

$$ST = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qo(i) - Qm}{Qo(i)} \right)^2$$

$Qo(i)$ e $Qc(i)$ são as vazões observadas e calculadas respectivamente no período i , Qm a vazão média nas N observações no período de ajuste.

O parâmetro c é um parâmetro bastante sensível, embora na simulação feita na maioria das sub-bacias tenha resultado em $c = 0.03$ (1/mês); outro parâmetro que se manteve na região foi Cr , oscilando entre 10 e 12, apresentando apenas na bacia do Arroio Chasqueiro um valor mais baixo, possivelmente pela influência de estar mais próximo às grandes massas de água. O parâmetro α foi pouco sensível durante o ajuste, mas a grande variação de seu valor nas diferentes sub-bacias deve-se a um ajuste manual e à carência de dados evaporimétricos nas próprias bacias. É por isso que esse parâmetro serviu de ponderador da série de evaporação utilizada para a simulação, procurando sempre minorar.

Na Figura 3 são apresentados os hidrogramas calculados e observados das vazões mensais, com os correspondentes hietogramas para algumas das bacias, observando-se um bom ajuste gráfico. Nos postos de D. Lassance e Candioteinha, as diferenças são maiores. No posto de Dario Lassance essas diferenças são devidas ao fato de que foram utilizadas só as precipitações da Usina Candioteinha, sendo que nos meses sem dados a chuva foi estimada com base em outros postos mais afastados. Outra fonte de erro são as evaporações utilizadas, como foi mencionado acima. No posto da Candioteinha as maiores fontes de erros são as próprias vazões observadas, seja pelos

Tabela 4. Parâmetros do Modelo IPHMEN, estimados para cada sub-bacia.

| Nº | Bacia-Posto | a | b | c | Ks | Kb | Cr | Alfa | R2 (%) |
|----|----------------------------------|--------|-------|------|------|-----|------|------|--------|
| 1 | Arr. Candiota - Candiota | 218,00 | -0,75 | 0,08 | 0,25 | 1,0 | 11,0 | 7,0 | 94 |
| 2 | Arr. Candioteinha - Candioteinha | 92,50 | -0,50 | 0,03 | 0,50 | 2,0 | 10,0 | 5,8 | 94 |
| 3 | Arr. Chasqueiro - Santa Marta | 171,10 | -1,50 | 0,06 | 0,40 | 2,0 | 6,0 | 2,5 | 93 |
| 4 | Rio Piratini - P. do Imperio | 124,00 | -0,30 | 0,03 | 0,70 | 3,1 | 12,0 | 5,1 | 96 |
| 5 | Rio Piratini Picada Nova | 172,80 | -0,90 | 0,05 | 0,80 | 3,1 | 10,0 | 2,2 | 91 |
| 6 | Arr. Basilio - Cerro Chato | 103,00 | -0,50 | 0,03 | 0,80 | 2,3 | 12,0 | 2,3 | 95 |
| 7 | Arr. Basilio - Contrato | 119,00 | -0,50 | 0,03 | 1,00 | 4,5 | 12,0 | 6,5 | 96 |
| 8 | Rio Piratini - P. do Ricardo | 107,30 | -0,50 | 0,03 | 0,80 | 3,5 | 12,0 | 3,2 | 92 |
| 9 | Arr. Fragata - P. dos Carros | 89,00 | -0,40 | 0,03 | 0,50 | 2,5 | 12,0 | 2,5 | 88 |
| 10 | Arr. Pelotas - P. C. Farias | 103,00 | -0,50 | 0,03 | 0,60 | 3,0 | 10,0 | 2,0 | 85 |

Tabela 5. Resultados dos parâmetros de infiltração, estimados na simulação.

| Nº | Bacia | lo (mm/mês) | lb (mm/mês) | k (mês) | Descrição |
|----|-------------------|----------------|----------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Arr. Candiota | 291 | 263 | 13,8 | rochas sedimentares: areníticos; vegetação é capão e mata para pastagem; |
| 2 | Arr. Candioteinha | 185 | 175 | 35,3 | granitos metamórficos e 32% de arenitos sedimentares; com bastante capão e mata para pastagem; |
| 3 | Arr. Chasqueiro | 114 | 110 | 17,3 | principalmente granitos metamórficos; campo natural para pastagem e vegetação arbustiva; |
| 4 | Rio Piratini | 413 | 376 | 36,7 | principalmente granitos metamórficos; com mais de 60% cultivado e o resto vegetação para pastagem; |
| 5 | Rio Piratini | 192 | 182 | 21,1 | principalmente granito metamórficos; com mais de 51% cultivado e o resto de campo para pastagem; |
| 6 | Arr. Basilio | 206 | 194 | 35,3 | presença de arenitos sedimentares (8%) e granitos metamórficos; pequenas áreas de cultivo e grandes de pastagem; |
| 7 | Arr. Basilio | 238 | 225 | 35,3 | presença de arenitos sedimentares (7%) e granitos com grandes áreas para pastagem; |
| 8 | Rio Piratini | 215 | 202 | 35,3 | com mais de 93% formado por granitos metamórficos; com grandes áreas para pastagem e 27% para culturas; |
| 9 | Arr. Fragata | 223 | 207 | 35,8 | principalmente granitos metamórficos e presença de argilas (7%); áreas com cultivo, principalmente de arroz (85%); |
| 10 | Arr. Pelotas | 206 | 194 | 35,3 | composto de granitos metamórficos; com áreas para cultivos de pequena e grande propriedade. |

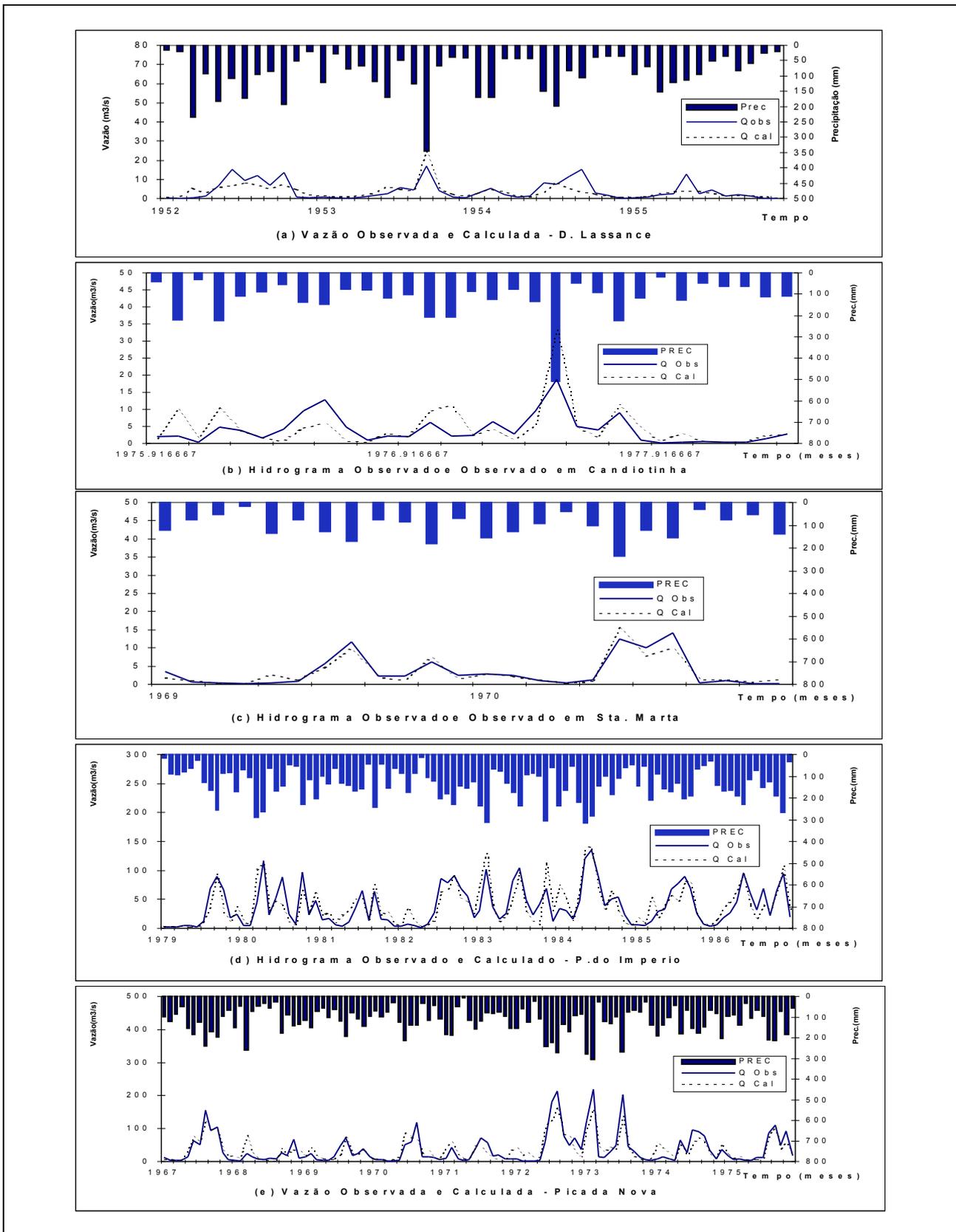


Figura 3. Hietogramas e hidrogramas observados e calculados no período de ajuste.

problemas na medição ou pelas influências de algumas enchentes isoladas, distorcendo os valores médios do mês. Na Figura 4 é apresentada a dispersão dos valores das vazões observadas e calculadas de alguns postos. Nestas figuras observa-se uma dispersão homogênea ao redor da reta de igual vazão, mas para maiores escoamentos os valores calculados são subestimados em todos os postos, com exceção dos postos de D. Lassance e Candiotinha.

Verificação do modelo hidrológico

Na Figura 5 são apresentados os hidrogramas observados e calculados com os correspondentes hietogramas para este período de verificação. Os hidrogramas são bons para a maioria dos postos. O hidrograma nos postos de D. Lassance e Candiotinha apresentam maiores diferenças pelos mesmos motivos apresentados no ajuste. Em Santa Marta, no ano de 1971 observa-se uma defasagem entre os hidrogramas que pode ser devido ao seguinte: (i) como é uma bacia pequena, a influência de alguns eventos muito isolados produz resultados mensais variáveis ou; (ii) as chuvas e descargas no fim de mês e início de outro e a pouca informação fluviométrica existente produzem efeitos nos valores. Apesar disso, os valores médios do período apresentam, em geral, o mesmo comportamento para todas as séries analisadas. Na Figura 6 é apresentada a dispersão dos valores das vazões observadas e calculadas para cada posto. Nestas figuras observa-se uma dispersão homogênea ao redor da reta de igual vazão, com características semelhantes ao período de ajuste quanto à dispersão dos valores maiores de vazões.

Extensão das séries fluviométricas

Nesta terceira fase do processo de simulação, o modelo com os parâmetros ajustados é utilizado para preencher e estender as séries de vazões médias mensais.

Com as séries pluviométricas e de evaporação disponíveis foi possível obter dados de entrada para quase todas as sub-bacias pelo menos no período de janeiro de 1967 até dezembro de 1995, e o modelo ajustado foi utilizado para gerar as descargas médias mensais em cada uma das 10 sub-bacias.

Nas sub-bacias dos arroios Fragata em P. dos Carros e Pelotas em P. C. de Farias não havia

necessidade de extensão de séries, uma vez que os dados existentes cobrem um período relativamente longo. A metodologia adotada foi aplicada a estes postos para permitir uma avaliação de sua aplicabilidade, através da comparação dos resultados gerados com os reais.

Com base nos modelos ajustados, para os dois postos, P. dos Carros e P. C. Farias, respectivamente, foram calculadas as vazões para o período de janeiro de 1981 até dezembro de 1995. Encontram-se no posto de P. dos Carros maiores desvios padrões das séries calculadas nos meses de março e dezembro, mas suas médias são muito próximas em todos os meses. No caso do posto P. C. Farias somente o mês de março apresentou desvio padrão das séries calculadas levemente maior do que das observadas. A Figura 7 apresenta a comparação entre a média mensal da série gerada e da observada, enquanto que na Figura 8 é apresentada a mesma comparação para o desvio padrão dos valores mensais.

Utilizando o período de 81-95, que corresponde à série estendida pelo modelo, na Tabela 6 são apresentados os valores de Q_{50} e Q_{95} dos postos P. dos Carros e P. C. de Farias. A série gerada apresentou valores menores que os observados para os dois valores. Os resultados das curvas adimensionais de regularização mostraram que para os dois os pontos a curva é praticamente a mesma com pequenas diferenças no desvio padrão.

Tabela 6. Vazões para série histórica e estendida no período de 1981 a 1995 (período de extensão por parte do modelo) (m³/s).

| Local/cenário | Q_{50} | Q_{95} |
|------------------|----------|----------|
| P. dos Carros | | |
| Histórico | 1,86 | 0,19 |
| Estendido | 1,72 | 0,14 |
| P. C. dos Farias | | |
| Histórico | 8,89 | 0,93 |
| Estendido | 8,84 | 0,78 |

Com base na precipitação dos postos, todas as séries de vazões foram estendidas, utilizando-se o período observado em conjunto com as vazões geradas. O período total resultante para regionalização é o apresentado na última coluna da Tabela 1.

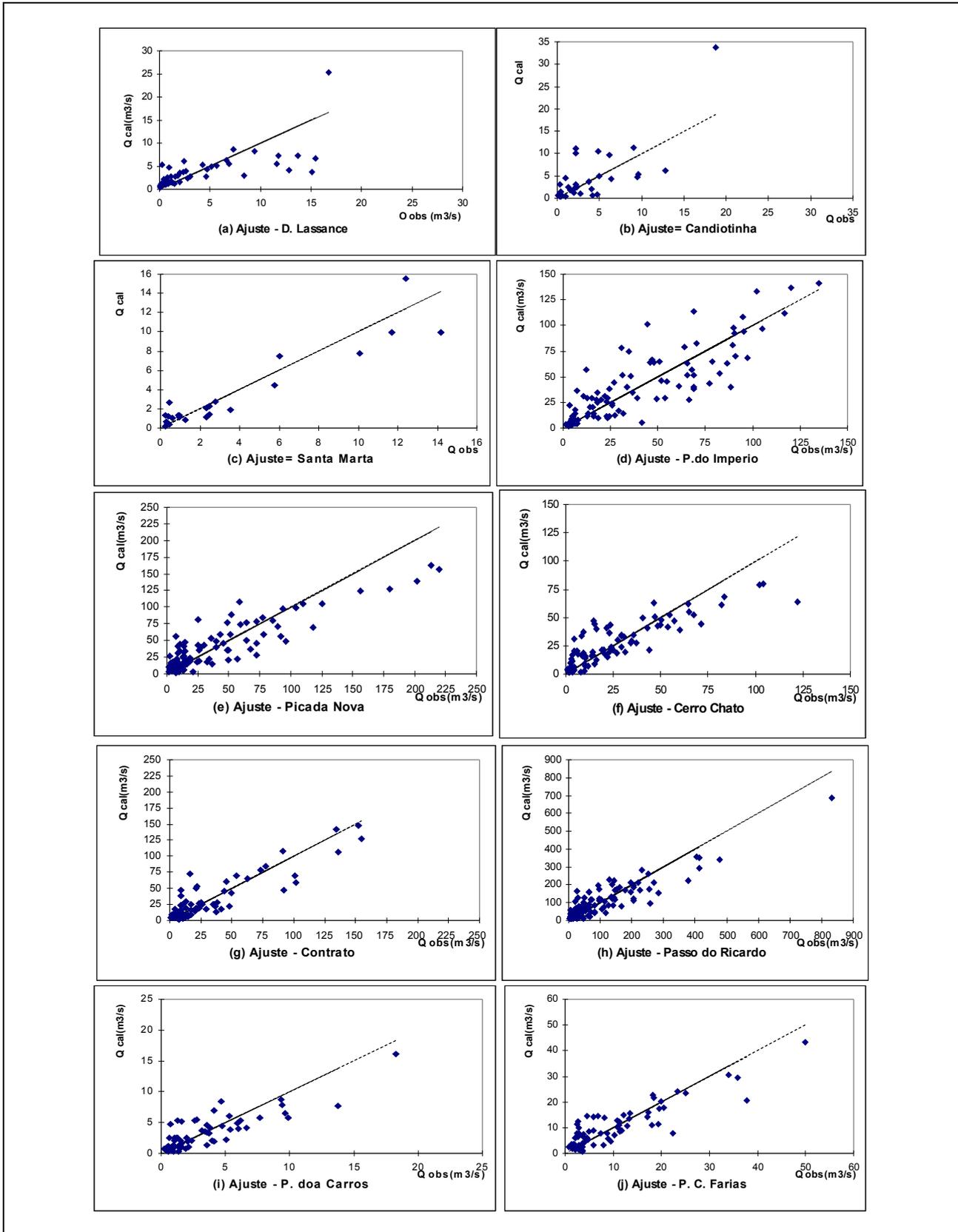


Figura 4. Dispersão dos resultados do ajuste de alguns postos.

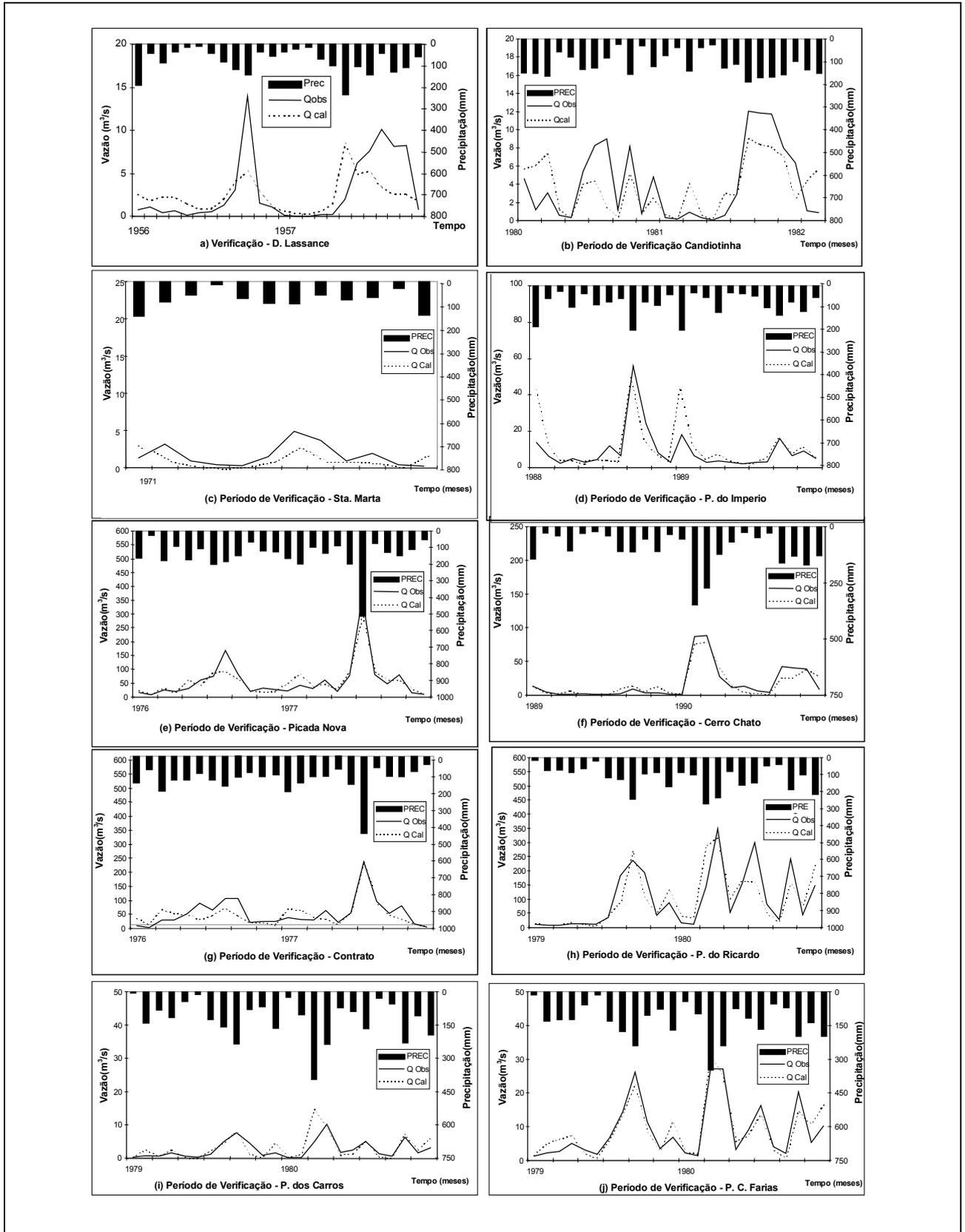


Figura 5. Hidrogramas calculados e observados para o período de verificação.

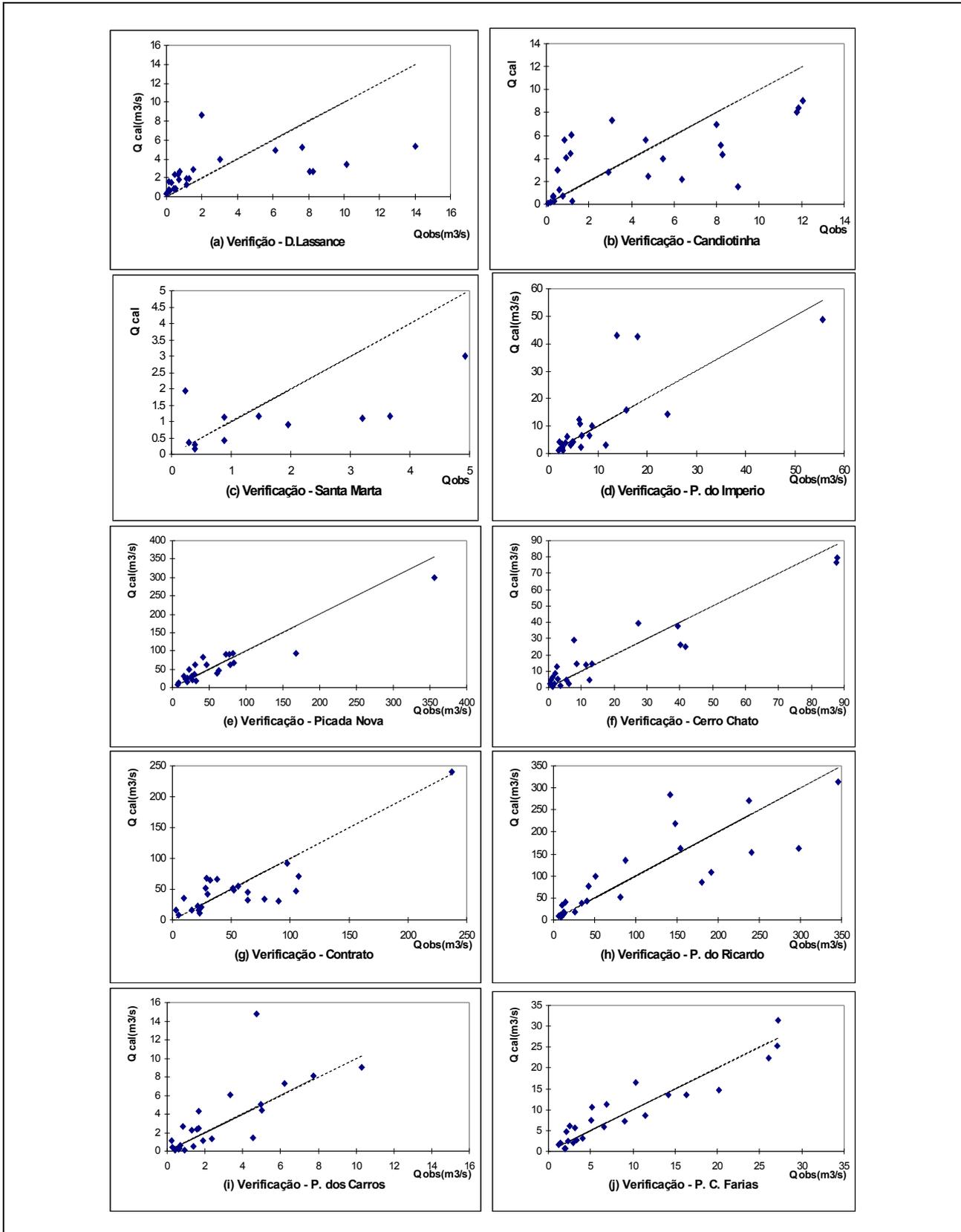


Figura 6. Dispersão das vazões observadas e calculadas no período de verificação.

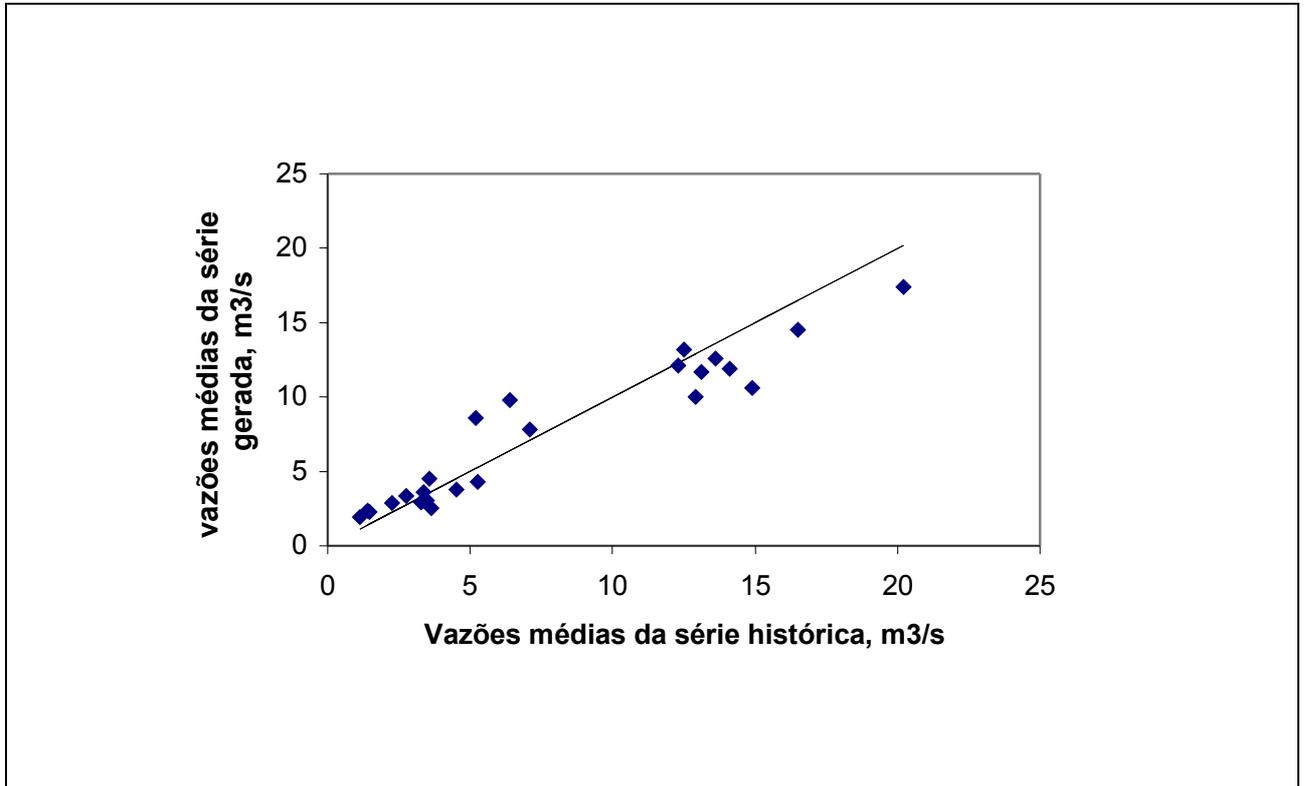


Figura 7. Relação entre as vazões médias mensais históricas e geradas para o período de 1981 e 1995 nos postos P. dos Carros e P. C. de Farias.

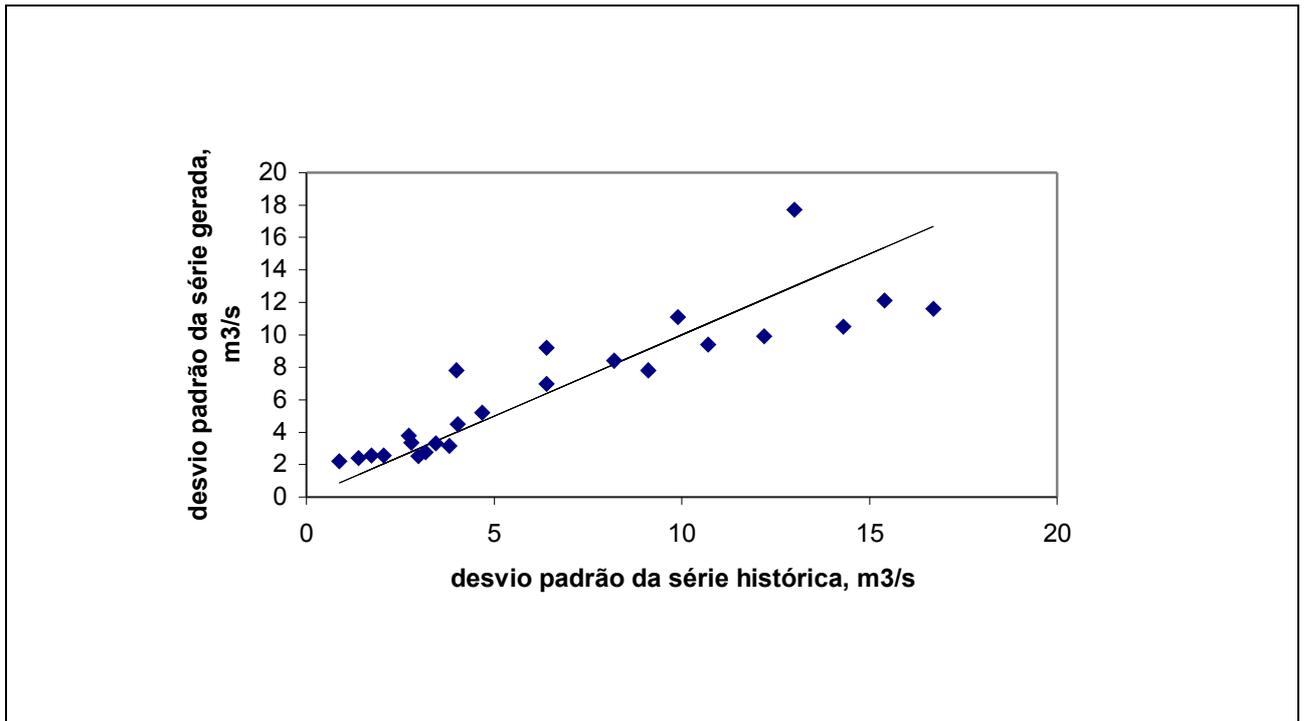


Figura 8. Relação entre os desvios padrão mensais das séries histórica e gerada entre 1981 e 1995 dos postos P. dos Carros e P. C. de Farias.

RESULTADOS DA REGIONALIZAÇÃO

Curva de permanência

A curva de permanência foi calculada para cada uma das séries de vazões médias mensais. Em cada uma das séries foram testados diferentes intervalos de classe considerando:

- i. que exista uma boa distribuição de vazões em todos os intervalos de classe, evitando haver intervalos sem dados ou intervalos muito apertados;
- ii. que abranjam os valores extremos, tanto na faixa inferior como na faixa superior;
- iii. que os intervalos de classe sejam, sempre que possível, inteiros percentuais;
- iv. que haja o mesmo número de intervalos de classe para toda a área de estudo.

Foram obtidos 40 intervalos de classe. Com este número de intervalos foram calculadas as curvas individuais de permanência.

A regionalização das vazões Q_{50} e Q_{95} foi estabelecida em função da área de drenagem da bacia. Outras variáveis como a precipitação, não apresentaram ganho maior na regressão devido à pequena variação da mesma na região.

No cálculo das regressões procurou-se analisar os resíduos obtidos entre as possíveis combinações dos postos, para encontrar regiões homogêneas. Porém, pelo número de postos, pequeno número de graus de liberdade e as poucas diferenças que apresentavam, definiu-se uma única região.

A regionalização foi realizada para o conjunto de dados históricos de vazão (HIST) e para o conjunto de dados com série de vazões estendidas com base no modelo hidrológico (GER). Foi utilizada a Equação (21), sem o termo de precipitação. Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes e as estatísticas obtidas.

Pode-se observar destes resultados que as estatísticas melhoram para a regionalização com as séries estendidas. A relação entre a Q_{50} das duas regionalizações (GER por HIST) varia entre 1,16 e 1,21 (10.000 a 100 km², respectivamente). Desta forma a estimativa desta vazão com as séries históricas produz subestimativas entre 16 e 21% se comparado com a regionalização obtida com base numa série mais extensa a partir da precipitação.

Para a vazão Q_{95} a influência da área da bacia é maior na definição da diferença e os valores variam entre 5,6% e 25,8% para o mesmo

intervalo acima, ou seja, quanto maior a bacia menor a diferença.

Tabela 7. Equações regionais para a curva de permanência e estatísticas (Equação 21).

| | Q_{50} | Q_{95} |
|------------------|----------|----------|
| Histórico | | |
| u | 0,00823 | 0,00066 |
| v | 1,0241 | 1,09946 |
| R ² | 0,89 | 0,85 |
| s | 1,14 | 1,18 |
| Estendido | | |
| u | 0,00915 | 0,00099 |
| b | 1,03397 | 1,06132 |
| R ² | 0,95 | 0,90 |
| s | 1,08 | 1,13 |

$s = 10^{-z}$; z é o desvio padrão dos logaritmos; vazão em m³/s; área em km².

Curva de regularização

As curvas de regularização obtidas pela série histórica e estendidas pelo modelo hidrológico foram calculadas para cada posto fluviométrico e transformadas para vazões e volumes adimensionalizados.

Na maioria dos postos que possuem séries históricas mais longas, as curvas adimensionais estão bem definidas e são semelhantes às séries com extensão. No entanto, o posto 3 de Santa Marta, que possui só três anos de dados, apresenta resultados muito diferentes dos obtidos na série com extensão, enquanto que as séries de Cerro Chato e Passo do Ricardo apresentam quase as mesmas curvas entre a observada e estendida, já que o período estendido é pequeno.

Essas curvas mostram que existe a tendência dos postos com série pequena de subestimar os volumes de regularização.

As curvas adimensionais individuais obtidas possuem tendência semelhante, o que permitiu seu agrupamento em uma região. A dispersão das curvas obtidas somente com as séries históricas foi muito grande (Figura 9), enquanto que a obtida com as séries estendidas foi bem menor (Figura 10).

As duas curvas adimensionais médias obtidas e suas estatísticas estão na Tabela 8, juntamente com os parâmetros da equação da vazão média de longo período em função da área da bacia.

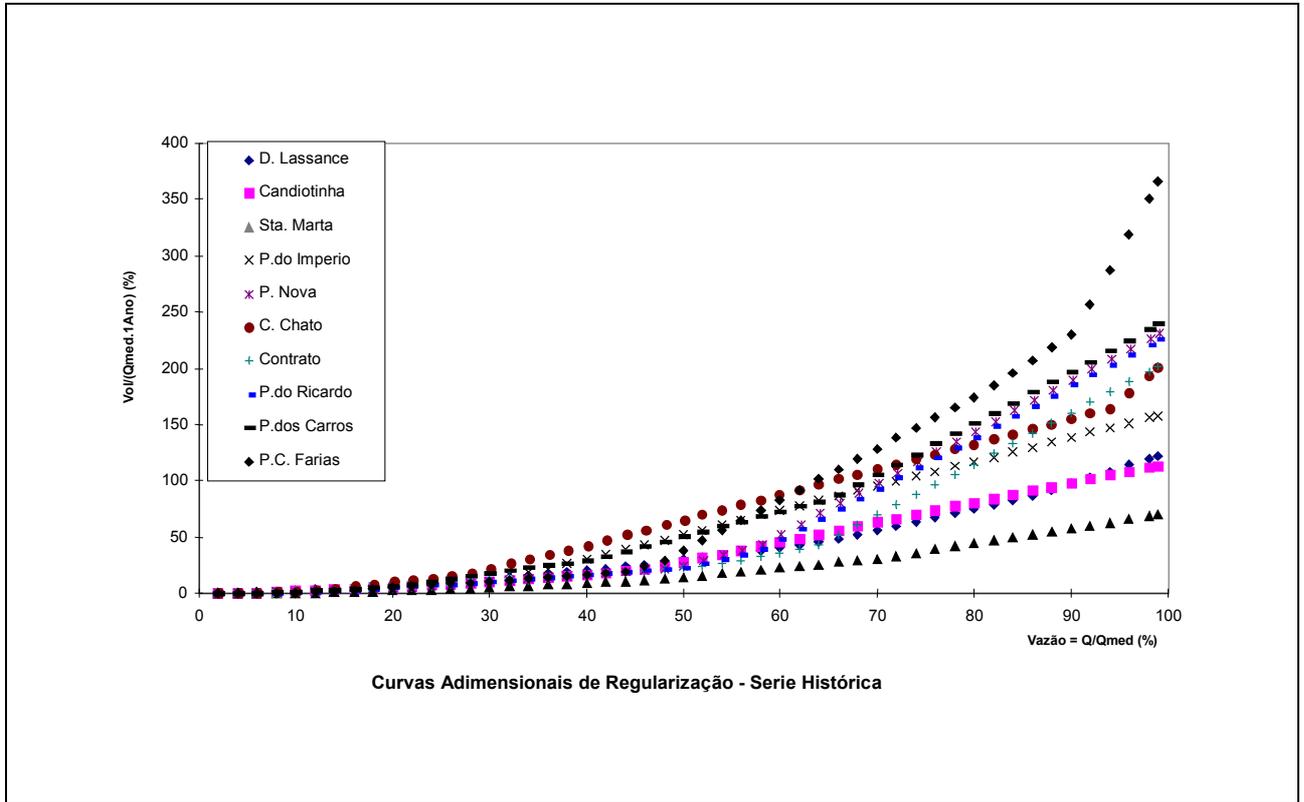


Figura 9. Curvas adimensionais de regularização a partir das séries históricas.

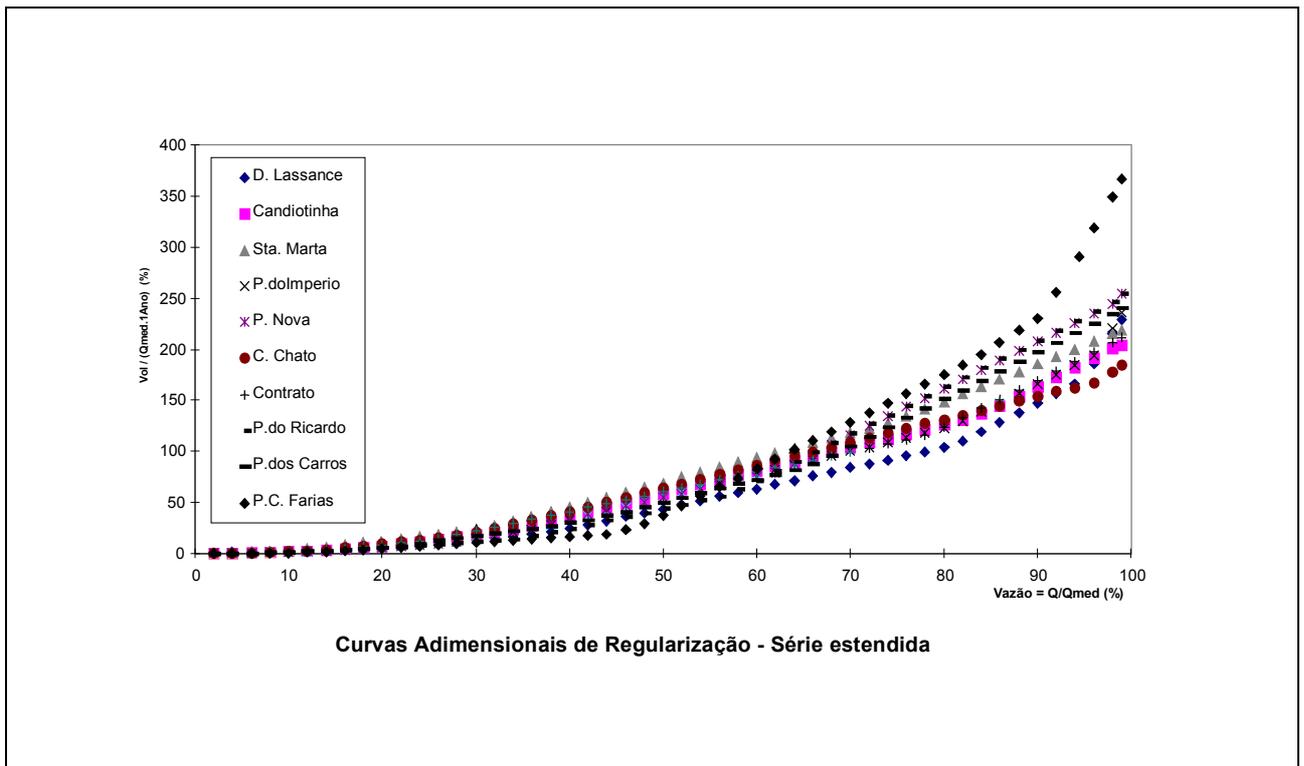


Figura 10. Curvas adimensionais de regularização a partir das séries com extensão.

Tabela 8. Curvas regionais adimensionais de regularização (Equação 27) e regressão da vazão média (m³/s) com a área (km²) (Equação 29).

| | Histórica | Estendida |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| Curva Adimensional | | |
| γ | 0,00705 | 0,00811 |
| ϕ | 2,1894 | 2,2453 |
| R ² | 0,998 | 0,998 |
| desvio padrão | 1,02 | 1,02 |
| Regressão da vazão média com a área | | |
| δ | 0,01512 | 0,01754 |
| θ | 1,02308 | 1,0112 |
| R ² | 0,943 | 0,965 |
| desvio padrão | 1,09 | 1,07 |

Aplicando a Equação (30), obtém-se as equações resultantes para estimativa do volume nos dois cenários de regionalização (HIST e GER):

Série histórica:

$$\text{Vol} = 0,804 A^{1,0231} (\text{qr}/\text{Qmed})^{2,1894}$$

Série estendida:

$$\text{Vol} = 1,388 A^{1,0112} (\text{qr}/\text{Qmed})^{2,2453}$$

Desses resultados pode-se obter a relação VGER/VHIST, que indica a diferença relativa entre a estimativa obtida pela regionalização com base na série estendida por modelo hidrológica e a com base na série histórica reduzida. Para um intervalo de área entre 100 e 10.000 km² e de vazão adimensional de 0,2 a 0,6 o volume necessário a partir da regionalização com série estendida é maior que a série reduzida entre 41 e 58%.

CONCLUSÕES

A regionalização de vazões é um procedimento muito valioso para a avaliação dos recursos hídricos de uma bacia com carência de dados hidrológicos. O método usual é o de utilizar todos os dados de vazão das diferentes bacias e obter uma função regional que permita estimar as vazões características das funções hidrológicas em locais com séries pequenas ou inexistentes. Uma limitação do método ocorre quando não há, na região, disponibilidade de dados de vazão que permita a regionalização. Além disso, mesmo que existam dados de vazão, as séries nem sempre são tempo-

ralmente representativas para um estudo desta natureza.

Neste estudo foi apresentado um procedimento para regionalizar vazões utilizando as informações disponíveis de precipitação. Buscou-se aumentar a quantidade e representatividade temporal dos dados de vazão utilizando um modelo Precipitação-Vazão. Esse tipo de modelo, utilizado para estender séries de vazões a partir da precipitação, pode introduzir erros devido a incertezas da precipitação, do ajuste dos parâmetros e do próprio modelo.

A extensão foi avaliada utilizando dois postos com séries longas e verificou-se que a média mensal dos valores estendidos e dos observados estavam dentro de uma faixa de erro aceitável. Da mesma forma, observou-se que a influência do erro do modelo hidrológico não foi significativa.

Os resultados comparativos entre as curvas regionais, tanto para curva de permanência como para curva de regularização, foram de que os valores históricos tendem a superestimar as vazões se comparados com os obtidos com as séries estendidas. As conseqüências da falta de dados poderiam ser: reservatórios de regularização subdimensionados; conflitos na outorga da água; agravamento da qualidade da água de rios; inviabilidade econômica de pequenas centrais hidrelétricas, entre outros.

Estes resultados mostraram que a extensão de séries de modelos hidrológicos para regionalização de vazões é um procedimento promissor, mas exige muitos cuidados na avaliação dos resultados do modelo.

REFERÊNCIAS

- DOMOKOS, M., GILYÉN - HOFER, A. (1990). Regionalized estimation of Reservoir capacity-yield curves in Hungary. In: *LJUBLJANA SYMPOSIUM*, 1990. Regionalization in Hydrology. Wallingford: IAHS. p239-251. (IAHS Publication, n.191).
- HORTON, R. E. (1939). Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity. *Trans. Am. Geoph. Union*, p693.
- KLEMES, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation model. *Hydrol. Sci. J.*, 31:13-24.
- IPH - ELETROBRAS. (1985). *Metodologia para Regionalização de Vazões*. Rio de Janeiro. p212.
- NERC. (1975) *Flood Studies Report*. London v5.
- ROSEMBROCK, H. H. (1960). An Automatic Method for Finding the Greatest or Best Value of a Function. *Computer Journal* 3 p175.

- TROUTMAN, B. (1985). Errors and Parameter Estimation in Precipitation-Runoff Modeling 1. Theory. *Water Resources Research*, v21 n.8 p1195-1213.
- TUCCI, C. E. (coord.); GOLDENFUM, J. A.; BERTONI, J. C.; LOVATEL, R.; TROVISCAL, A. P.; ALVES, C. A.; KREBS, C. M.; SOUZA, P. C.; FROES, F. (1991). *Regionalização de vazões do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. v1.
- TUCCI, C. E. M. (1993). *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Edusp Editora da Universidade ABRH p952.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade – ABRH p670.

Flow Regionalisation Based on Extended Series: Drainage Basins of the Lagoa Mirim, RS

ABSTRACT

The use of flow regionalisation is a technique used to spatially transfer information, trying to get the maximum knowledge from the available data in a geographic area. The regionalisation studies are generally limited to the available flow data. Good quality data provide good results; however, when there is lack of data, the regional functions are not reliable.

Usually the rainfall time-series are longer than the flow time-series. Consequently, it is possible to extend the flow time-series using rainfall data and hidrological models, obtaining flow time-series that can be used to produce reliable regional functions.

In this study, a monthly-based rainfall-runoff model was used to extend flow time-series. The extended time-series were used to obtain flow regionalisation, applied to the drainage basins of the Lagoa Mirim.

The results showed that regional functions were improved by the use of extended series, and that it is possible to include rainfall information into flow regionalisation.

The results showed that regional functions were improved by the use of extended series, and that it is possible to include rainfall information into flow regional functions.