

# SISTEMA DE AJUSTE E EXTRAPOLAÇÃO DE CURVA DE DESCARGA - STEVENS

Dalton Pereira Filho<sup>1</sup>; Irani dos Santos<sup>1</sup> & Heinz Dieter Fill<sup>2</sup>

**Resumo** – A curva de descarga representa a relação entre vazão e nível do rio e permite estimar as vazões a partir de observações de nível. Sua determinação é possível a partir de medições diretas de vazão que são realizadas em caráter eventual. Geralmente a faixa de vazões medidas é inferior a amplitude dos níveis atingidos pelo rio, exigindo a extrapolação da curva de descarga na faixa sem medições. Para tanto podem ser utilizados diversos métodos dos quais vários levam em consideração as características geométricas e hidráulicas do canal, como o método de Stevens que serviu de base ao presente trabalho. Com o objetivo de facilitar a manipulação da grande quantidade de dados envolvidos neste processo foi desenvolvido em Delphi o *software* STEVENS. Este sistema utiliza como dados de entrada as medições de vazão e o levantamento topobatimétrico da seção transversal do rio. São ajustadas doze diferentes curvas, as quais são obtidas a partir da geometria da seção e de doze funções relacionando fator de declividade  $k$  com a cota  $h$ . O sistema permite a saída de dados no formato tabular da curva de descarga e das grandezas geométricas da seção permitindo também a interface com CAD (Microstation®).

**Abstract** – Many hydrologic studies require a detailed knowledge of river streamflows. The rating curve or stage-discharge relationship allows to determine streamflows from water level observations. The generally obtained from a limited discharge measurements. Because these measurements usually cover only a limited range of streamflows, extrapolation of the rating curve is necessary. Several methods of extrapolation are available, and many use the geometric and hydraulic characteristics of the channel. One of these is the well know Steven's method which is the basic framework of the method proposed in this paper. The proposed method has been transformed in a computer code written in Delphi language. The code uses data from direct discharge measurements together with the geometric characteristics of the river section. Twelve diferent

---

<sup>1</sup> Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR, Convênio UFPR/COPEL/LACTEC, Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba, PR, Brasil. Fone: (041) 361-6307, Fax: (041) 266-2935 e-mail: dalton.pereira@lactec.org.br; irani@lactec.org.br

<sup>2</sup> Departamento de Hidráulica e Saneamento/UFPR, Cx. Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba, Paraná, e-mail: heinzfill@yahoo.com

extrapolation criteria are used generating 12 rating curves. The code allows a direct interface with Microstation® CAD code.

**Palavras-chave** - Curva-chave; curva de descarga; hidrometria.

## **INTRODUÇÃO**

Séries de vazões constituem o dado de entrada principal em muitos estudos de hidrologia aplicada. Via de regra essas vazões são obtidas transformando cotas do nível de água observadas em vazão mediante o uso da curva-chave.

Desta forma a correta determinação da curva-chave constitui-se em pré-requisito essencial para a qualidade dos resultados do estudo. Muitas inconsistências tem sido observado nas saídas de modelos hidrológicos devido a incorreções na definição da curva-chave.

O presente trabalho procura contribuir neste particular, apresentando um método eficiente e preciso para extrapolar a curva-chave quando o número de medições diretas é aparentemente insuficiente. O software desenvolvido e descrito neste artigo permite a análise e extrapolação da curva de descarga de forma rápida e semi automática proporcionando uma grande economia de tempo e recursos em relação aos métodos manuais geralmente usados na análise das curvas de descarga.

Entretanto não dispensa o conhecimento e a experiência pessoal do hidrólogo, já que o sistema apresenta um conjunto de doze curvas-chave usando diferentes critérios para modelar a variação das características hidráulicas do canal e entre as quais uma deve ser selecionada.

Também deve ser mencionado que como o método é baseado na clássica fórmula de Chezy os resultados valem essencialmente para estações fluviométricas com controle de canal estabelecido regime permanente e sem anomalias no controle hidráulico.

## **METODOLOGIAS DE AJUSTE E EXTRAPOLAÇÃO DE CURVAS DE DESCARGA**

A relação entre cota linimétrica ( $h$ ) e vazão ( $Q$ ) deve ser definida em todo o intervalo de variação das cotas de uma série linimétrica homogênea. Este intervalo, limitado pelas cotas mínima e máxima observadas é designado por intervalo de definição da calibragem. No caso de estações com relação cota-descarga unívoca este problema apresenta dois aspectos: definir uma curva contínua e monotonamente crescente que se ajuste melhor ao conjunto de pontos medidos e extrapolar essa curva nos extremos inferior e superior.

Em geral o número de medições é insuficiente ou a sua distribuição no intervalo de calibragem é ruim resultando uma curva de calibragem incompleta. Neste caso, ela deve ser extrapolada em suas extremidades. Essas extrapolações, embora muitas vezes calcadas nas leis de hidráulica são sempre de caráter duvidoso, devendo-se realizar medições de vazão fora do intervalo já medido a fim de confirmar ou retificar as extrapolações.

As curvas de descarga devem ser analisadas através das diversas informações disponíveis, pesquisando-se informações nos históricos e relatórios de inspeção, assim como alterações da posição das réguas e das seções transversais, e possíveis mudanças das condições de escoamento nas proximidades das estações.

As curvas devem ser extrapoladas até a cota máxima observada, por meio de vários métodos de extrapolação com eficiência reconhecida pela bibliografia existente. Para cada estação, opta-se pela extrapolação com resultados mais coerentes, tendo em vista as medições no trecho superior e características da seção transversal.

Existe um grande número de métodos para extrapolar as curvas de descarga, sendo que os principais são listados a seguir.

### **Extrapolação Logarítmica**

Este método provavelmente é o mais utilizado no Brasil para extrapolar a parte alta das curvas de descarga, não servindo para a extrapolação inferior.

O princípio deste método é aplicar na parte superior da curva uma expressão matemática exponencial:

$$Q = a (h-h_0)^n$$

Para extrapolar uma curva de descarga por este método, desenha-se o trecho definido da curva em papel bilogarítmico e soma-se ou subtrai-se, nas ordenadas do trecho mais alto da curva, uma constante escolhida por tentativas, de tal forma que esse trecho torne-se uma reta no gráfico bilogarítmico. Extrapola-se essa reta e retorna-se a uma curva pelo processo inverso.

Este método é aplicável com as seguintes restrições:

- a) Relação  $h/Q$  caracterizada por um bom alinhamento das medições de águas médias e altas sobre o papel bilogarítmico;
- b) Medições existentes até uma cota suficientemente elevada para que a direção da reta seja bem definida;
- c) Perfil transversal sem descontinuidade de forma nas cotas extrapoladas;
- d) Controle de jusante permanente entre cotas médias e altas.

Sempre que o controle hidráulico da estação permanecer estável e com as suas características geométricas constantes, esse processo de extrapolação costuma dar bons resultados. Entretanto, quando mudam as condições de controle, os erros podem ser muito grandes. Por essa razão, o método não é adequado para extrapolação inferior da curva, porque nas vazões baixas as características geométricas do controle alteram-se mais acentuadamente.

### Método de Stevens

Este método consiste em aceitar como válidas, na própria seção de medição, as fórmulas de Chézy ou de Manning para o escoamento uniforme em canais. O Método de Stevens é a forma mais clássica dessa maneira de extrapolar uma curva de descarga e baseia-se na fórmula de Chézy:

$$Q = C.S\sqrt{Ri}$$

onde:  $Q$  – vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$S$  – área da seção transversal ( $\text{m}^2$ );

$R$  – raio hidráulico (m);

$i$  – declividade superficial (m/m);

$C$  – coeficiente dimensional ( $\text{m}^{1/2} \text{s}^{-1/2}$ ).

Supondo-se constante o produto  $C\sqrt{i} = k$ , resulta:

$$Q = k.S\sqrt{R}$$

Onde  $S\sqrt{R}$  é função apenas das características geométricas da seção e pode ser obtida a partir do seu levantamento topobatimétrico.

A quantidade  $S\sqrt{R}$  representa um fator geométrico e a quantidade  $C\sqrt{i}$ , um fator de declividade que supõe-se variar muito pouco nos limites da aplicação. Isto significa que a função  $Q = f(S\sqrt{R})$  é representada por uma reta que passa pela origem. É possível, a partir da curva  $S\sqrt{R} = f(h)$  inteiramente definida pelas características geométricas da seção, avaliar  $Q$ , extrapolando a reta.

Além do fato que o escoamento deve ser quase uniforme, o método de Stevens só é aplicado se o perfil é estável ou se o número de medições alinhadas é suficiente. O sucesso desse tipo de extrapolação depende da constância do produto  $C\sqrt{i}$ , o que nem sempre acontece, mas que deve ser verificado com base nas medições de descarga disponíveis.

## **Extrapolação por Superfície Molhada e Velocidade Média**

Neste método a extrapolação da curva de descarga é feita considerando-se separadamente as duas componentes da vazão, a área e a velocidade.

Este método, ao contrário dos dois precedentes é aplicável às seções irregulares. As condições de escoamento são freqüentemente heterogêneas em uma seção transversal complexa. Uma parte da descarga escoava com grande velocidade no leito médio e o restante passa no leito maior, encoberto pela vegetação, por exemplo. Para tais perfis, é absolutamente necessário decompor a seção transversal em sub-seções, homogêneas quanto às seções de escoamento. Para cada uma delas, são traçadas uma curva  $S(h)$  e uma curva  $U(h)$ .

A área molhada  $S(h)$  pode ser extrapolada com precisão até a cota máxima através do levantamento topo-batimétrico da seção de medição. Resta então, extrapolar a curva das velocidades  $U(h)$  o que se faz geralmente através da aplicação da fórmula de Manning-Strickler, considerando rugosidades distintas em várias partes da seção e estimando um valor da declividade superficial, extrapolando valores obtidos a partir das medições.

O método não tem restrição de aplicação, salvo no caso de grande instabilidade no comportamento da declividade e/ou rugosidade. Sempre que possível as medições devem ser efetuadas sempre numa seção bem definida, sem mudanças de local.

A extrapolação da calibragem para cotas baixas tem por objetivo completar a curva até a cota mínima observada. No caso de rios não perenes, a cota para qual a descarga torna-se nula constitui um ponto de referência para o traçado da curva. No caso de rios perenes, a extrapolação inferior pode ser efetuada pelo método área/velocidade porém cabe ressaltar que é justamente na região das vazões baixas onde ocorre com mais freqüência a mudança de controle hidráulico. Por essa razão é importante a realização de um maior número de medições diretas na faixa de vazões baixas.

## **SISTEMA STEVENS DE AJUSTE E EXTRAPOLAÇÃO DE CURVAS DE DESCARGA**

O *software* STEVENS (Sistema de Ajuste e Extrapolação de Curva de Descarga) foi programado em Delphi e desenvolvido com o objetivo de facilitar a manipulação da grande quantidade de dados envolvidos no processo de ajuste e extrapolação de curvas de descarga.

O sistema é baseado no método de Stevens, portanto apropriado para seções com escoamento com controle de canal.

Os dados necessários são o resumo das medições de vazão (cota e vazão) e o levantamento topobatimétrico (distância e profundidade) da seção transversal do rio até a cota máxima que se deseja na extrapolação. Estes dados devem estar dispostos em arquivos distintos e seguir a

formatação apresentada na tabela Tabela 1. O cálculo da curva de descarga é feito com base na equação de Chezy:

$$Q = k.S\sqrt{R}$$

onde:  $Q$  - vazão (m<sup>3</sup>/s)

$k$  - fator de energia (m<sup>1/2</sup>/s);

$S$  - área molhada (m<sup>2</sup>);

$R$  - raio hidráulico (m).

O cálculo da curva de descarga é feito pelos seguintes procedimentos:

1) Determinação da curva  $S\sqrt{R} = f(h)$  dada pelas características geométricas da seção obtidas pelo levantamento topobatimétrico.

2) Determinação dos fatores geométrico  $S\sqrt{R}$  e de energia  $k$  para cada medição de vazão disponível.

3) Determinação das equações (ajustadas pelo método dos mínimos quadrados) relacionando a cota com o fator de energia, havendo opção para o ajuste de doze tipos de curvas:

$$k = f(h) \quad \log k = f(h) \quad k = f(\log h) \quad \log k = f(\log h)$$

sendo  $f(h)$  um polinômio do 1º, 2º ou 3º grau.

Como resultado destes procedimentos são apresentadas pelo sistema doze curvas de descarga, as quais são obtidas a partir da geometria da seção (área molhada e raio hidráulico) e das doze funções relacionando  $k$  (fator de energia) e  $h$  (cota). O fator geométrico pode ser calculado a partir de pontos levantados na seção transversal na opção “Batimetria”, neste caso a função  $S\sqrt{R} = \phi(h)$  pode apresentar descontinuidades na curva nos locais de alargamento da seção transversal. Para eliminar essas descontinuidades o fator geométrico pode ser suavizado por uma equação do 2º grau, ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

Após o cálculo as curvas podem ser visualmente analisadas em escala aritmética e bilogarítmica para eleger os melhores ajustes. O programa permite selecionar e desprezar medições que apresentem grande afastamento da curva, permitindo melhorar o ajuste.

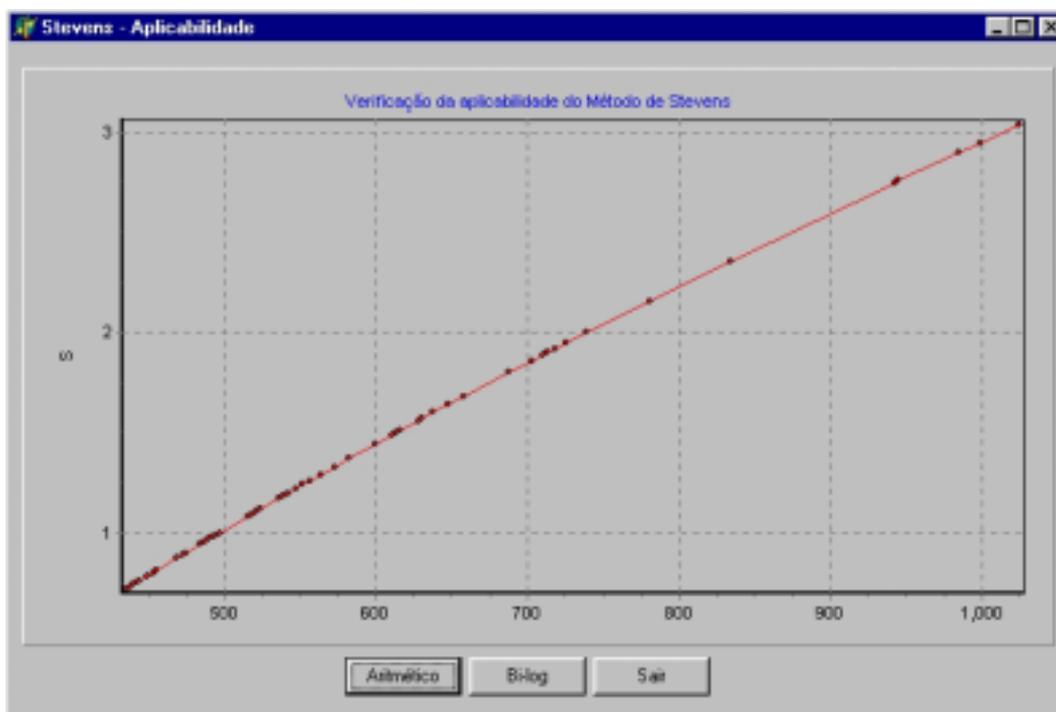
A validade do método pode ser verificada visualizando um gráfico com as grandezas vazão e fator geométrico (Figura 1). A extrapolação do ramo superior da curva de descarga pelo método de Stevens é válida quando as medições altas tendem a um alinhamento segundo uma reta para estas grandezas.

A Figuras 2 e 3 apresentam a janela principal do *software* com visualização das curvas em escalas aritmética e bilogarítmica, respectivamente. A Figura 4 mostra a tela para seleção das medições a serem desprezadas do ajuste.

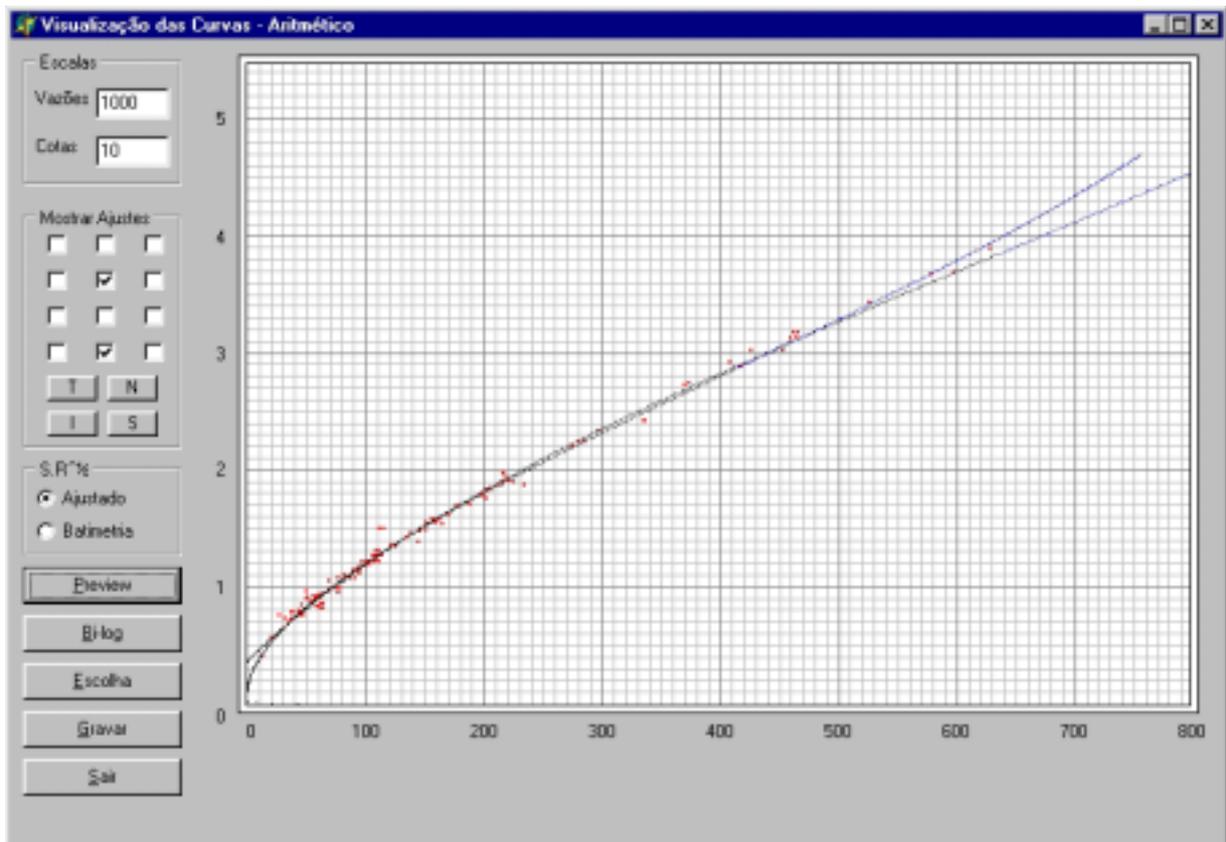
O sistema permite a saída de dados no formato tabular da curva de descarga e das grandezas geométricas da seção, possibilitando também a interface com CAD (Microstation®).

**Tabela 1** – Formato dos dados de entrada (resumo de medições de vazão).

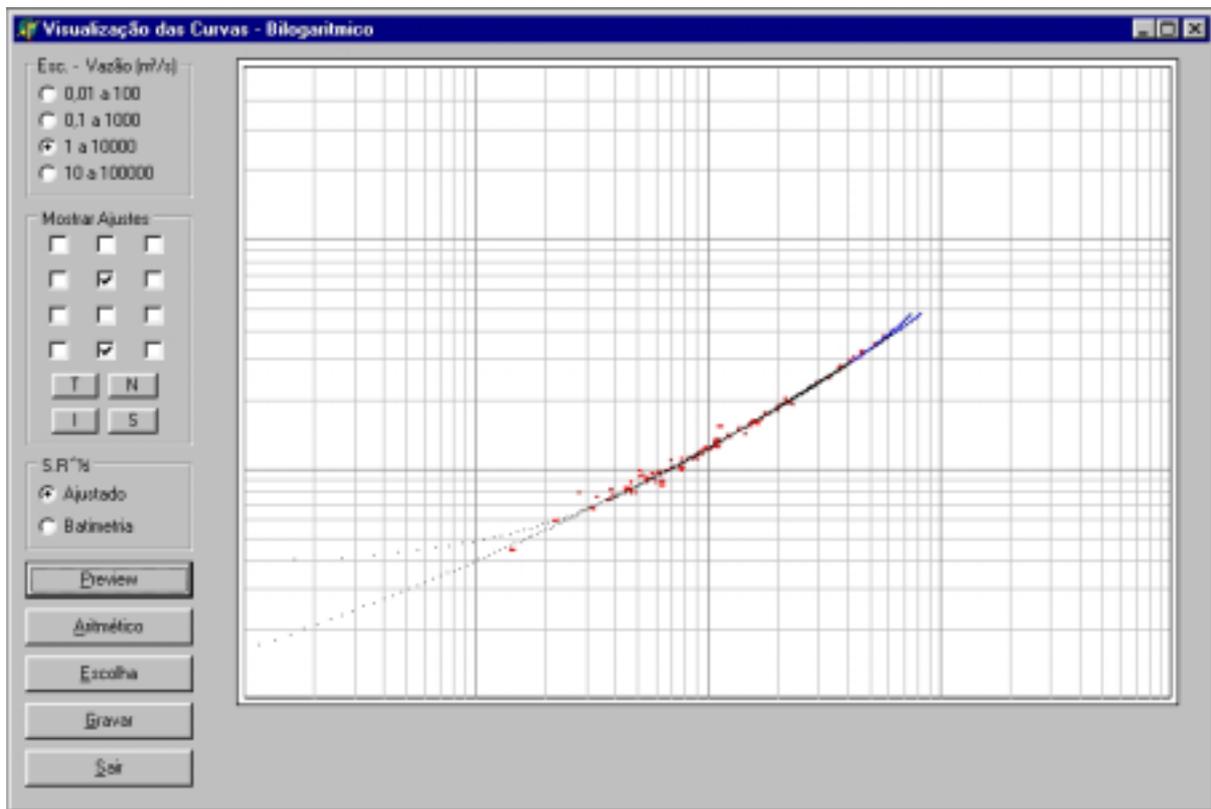
SEQ	CODIGO	DATA	HORA INICIAL	HORA FINAL	AREA DA SECAO (M2)	LARGURA (M)	COTA MEDIA (M)	VELOCIDADE MEDIA (M/S)	PROFUND MEDIA (M)	VAZAO CALC (M3/S)
183	64444000	8/ 3/99	10:15	12: 0	160.51	68.00	2.345	0.640	2.36	102.767
184	64444000	8/ 4/99	11:20	13:10	92.58	66.00	1.200	0.523	1.40	48.391
185	64444000	28/ 4/99	15: 0	16:15	98.56	65.20	1.370	0.543	1.51	53.483
186	64444000	31/ 5/99	16:15	17:35	79.66	62.50	1.080	0.532	1.27	42.375
187	64444000	1/ 7/99	9:15	11: 0	297.72	82.60	4.055	0.715	3.60	213.012
188	64444000	30/ 7/99	8:40	10:10	125.91	64.00	1.850	0.633	1.97	79.642
189	64444000	26/ 8/99	17: 0	18:10	67.60	60.20	0.910	0.507	1.12	34.239
190	64444000	30/ 9/99	14: 0	16: 0	61.08	61.20	0.780	0.479	1.00	29.264
191	64444000	3/11/99	16:15	17:50	59.38	61.00	0.700	0.478	0.97	28.380
192	64444000	24/11/99	8:40	10: 0	54.08	60.00	0.640	0.442	0.90	23.913
193	64444000	6/12/99	16: 0	17:15	50.10	59.50	0.540	0.419	0.84	20.994
194	64447500	17/ 2/90	15:15	16:16	336.05	91.30	1.800	0.602	3.68	202.339
195	64447500	17/ 2/90	16:20	17:22	338.51	91.30	1.800	0.590	3.71	199.563



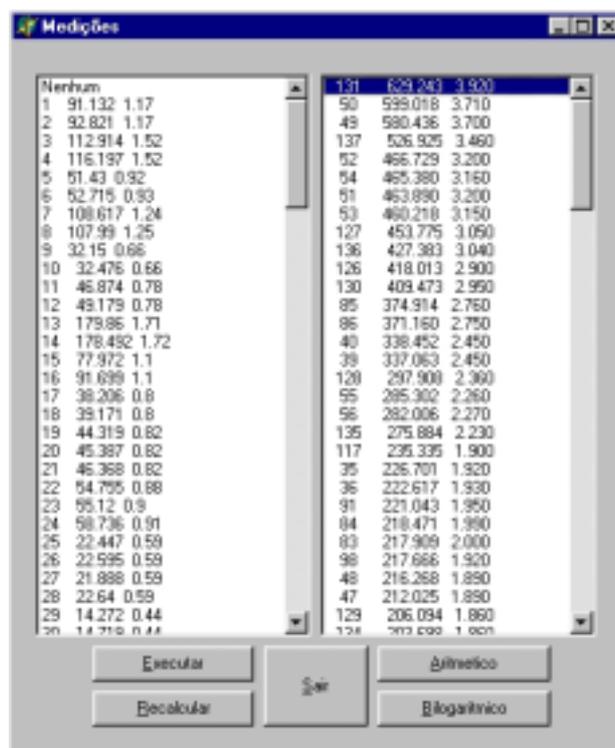
**Figura 1** – Gráfico para verificação da aplicabilidade do método de Stevens.



**Figura 2** - Janela principal do *software* com visualização em escala aritmética.



**Figura 3** - Janela principal do *software* com visualização em escala bilogarítmica.



**Figura 4** - Tela para seleção das medições a serem excluídas do ajuste.

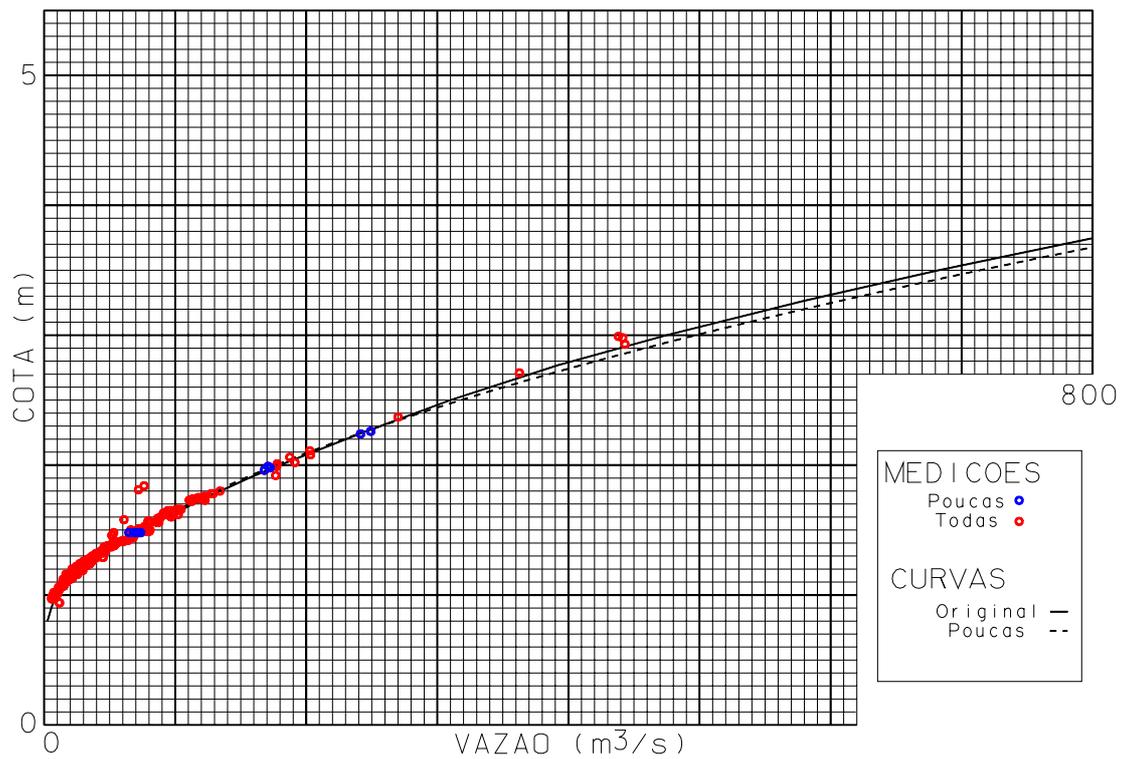
## RESULTADOS

Para avaliação da eficiência do *software* foram realizados testes em três estações: Balsa do Pitangui (64447500), Porto Monteiro (64652000) e Madeireira Gavazzoni (65764000), todas no estado do Paraná.

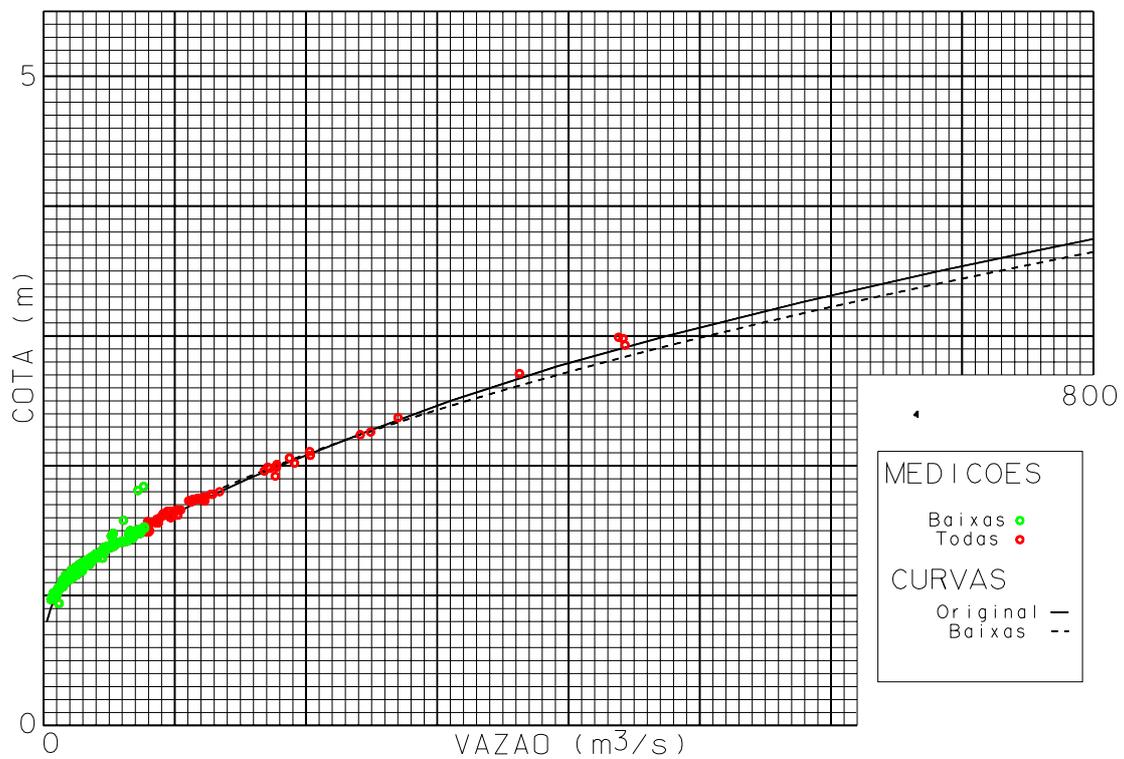
Adotaram-se três critérios para os testes: (1) simula uma estação em início de operação e contando com apenas nove medições; (2) simula uma estação com muitas medições, porém todas com vazões baixas ou médias; (3) ajusta a curva com base em todas as medições disponíveis. Os resultados foram comparados com as curvas de descarga já existentes.

Dentre as doze curvas calculadas pelo sistema, muitas são desprezadas pela simples análise do formato que assumem, restando aquelas que se aproximam do formato real. No entanto, a decisão sobre a melhor curva é subjetiva e depende do conhecimento e experiência do usuário.

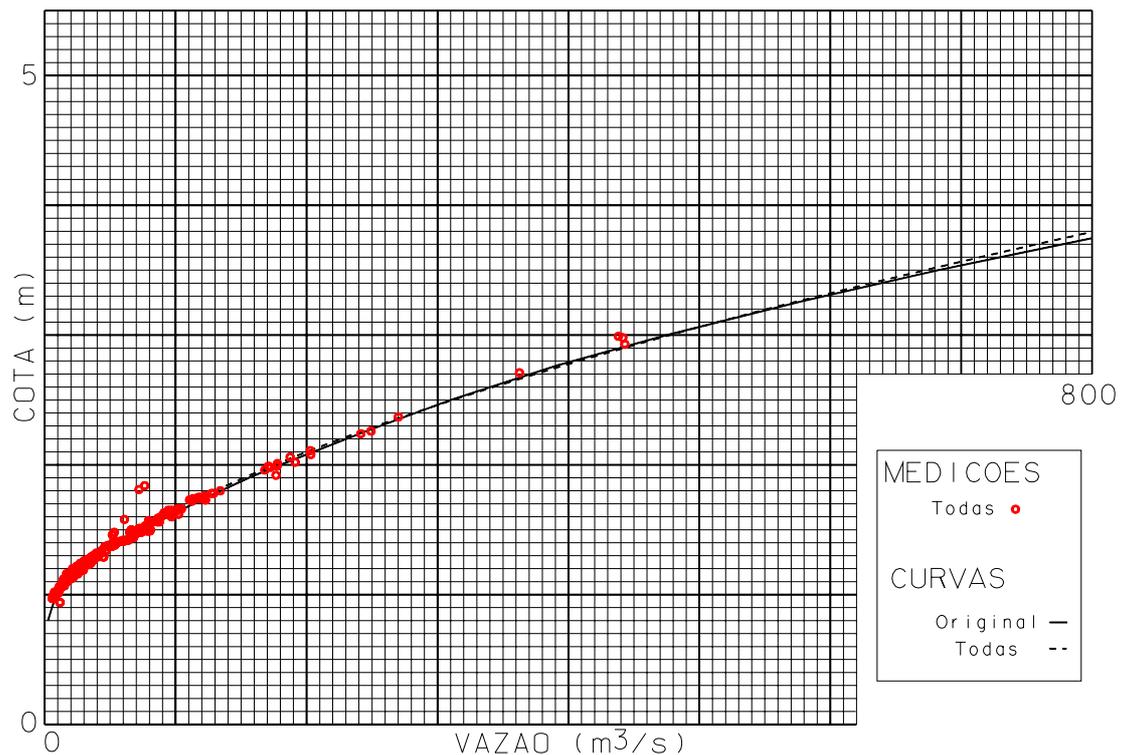
Os resultados apresentaram-se satisfatórios com desvios pequenos em relação às curvas obtidas tradicionalmente para todos os critérios testados. As Figuras 5, 6 e 7 mostram o resultado do teste para a estação Madeireira Gavazzoni.



**Figura 5** – Ajuste da curva usando as primeiras 9 medições realizadas na Estação Madeireira Gavazzoni (65764000).



**Figura 6** – Ajuste da curva usando apenas as medições em cotas baixas (Madeireira Gavazzoni - 65764000).



**Figura 7** – Ajuste da curva usando todas as medições disponíveis  
(Madeira Gavazzoni - 65764000).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O software é de fácil utilização, permitindo a visualização das medições e dos ajustes possibilitando a seleção e exclusão das medições indesejáveis, além da escolha do melhor ajuste.

Os testes preliminares demonstram que o traçado e a extrapolação das curvas de descarga através do “software” STEVENS apresentam bom resultado mesmo com disponibilidade de poucas medições. Entretanto, o resultado do ajuste melhora proporcionalmente ao aumento do número de medições realizadas e ao aumento do intervalo de cotas representado por elas. Portanto, não é eliminada a necessidade da realização periódica de medições, pois as mesmas além de permitir a melhoria do ajuste possibilitam detectar alterações na relação cota x vazão ao longo do tempo.

Destaca-se que a aplicação deste método está limitada às seções com escoamento com controle de canal, sendo que deve-se atentar para as restrições de aplicação dos métodos de extrapolação, conforme anteriormente.

## BIBLIOGRAFIA

- JACCON, G.; CUDO, K. J. *Curva-chave: análise e traçado*. Brasília: DNAEE, 1989.
- LENCASTRE, A. C. *Manual de hidráulica geral*. São Paulo: E. Blücher, 1972.
- PINTO, N. L. S. et al. *Hidrologia básica*. São Paulo: E. Blücher, 1976.

SANTOS. I. et al. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Lactec, 2001.

TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: EDUSP, 1993.