



## Comparação de métodos de extrapolação da curva-chave para estação fluviométrica de Restinga Seca - RS.

**Alencar Simão Rizzardi<sup>1</sup>, Fábio Berling<sup>1</sup>, Vinicius Dulac<sup>1</sup>, João Batista Dias de Paiva<sup>1</sup>, Rutinéia Tassi<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup>Depto Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.(eng.rizzardi@gmail.com; fabioalexberling@hotmail.com; vfdulac@hotmail.com; jbdpaiva@gmail.com; rutineia@gmail.com)

### Resumo

A crescente utilização dos recursos hídricos faz-se necessário o conhecimento e gerenciamento dos regimes fluviais em uma bacia hidrográfica. A determinação da vazão em uma seção fluvial por métodos diretos é um processo trabalhoso e envolve elevados custos. Estimar a vazão indiretamente mediante ao uso da curva-chave torna-se necessária e viável, para isso existem diversos métodos de representação como Logaritmo e Stevens, usados para interpolar valores entre as cotas máximas e mínimas para qual foram definidas. Porém, quando é necessário extrapolar a curva-chave para cotas maiores aos máximos observados, é freqüente o surgimento de erros na estimativa destas vazões. Assim sendo, este trabalho foi desenvolvido utilizando registros da estação fluviométrica de Restinga Seca-RS, localizada na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, tendo como objetivo a minimização destes erros realizando a comparação entre os dois métodos de extrapolação. Assim foi definido o erro na cota máxima ( $E_{h_{max}}$ ) e erro médio ( $E_m$ ), de tal modo que esses valores proporcionassem a melhor comparação dos resultados obtidos pela curva calibrada. O método Logaritmo apresentou a menor média e desvio padrão para da vazão extrapolada na  $E_{h_{max}}$  em comparação com Stevens. Para o  $E_m$ , o método Logaritmo também apresentou resultados que mais se assemelham com a curva-chave. Indicando que além do menor erro na estimativa das máximas cotas, a curva do método está mais próxima da curva-chave em toda a sua extensão. Mesmo assim, é necessário efetuar análises estatísticas mais rigorosas para reduzir as incertezas entre a qualidade dos ajustes, bem como aplicar outras metodologias para extrapolação da curva-chave para este trabalho.

Palavras-Chave: Hidrologia. Curva-chave. Métodos de extrapolação.

Área Temática: Recursos Hídricos

### Abstract

*The growing utilization of water resources becomes necessary the knowledge and management of river systems in a watershed. The determination of the flow in a river section by direct methods is a laborious process and can involve high costs. Therefore the estimated flow indirectly by the use of the key-curve becomes feasible and necessary. There are several methods of representation of the key-curve, like the Logarithm and Stevens methods, used to interpolate values between the maximum and minimum quotas for which they are defined. However when it is necessary to extrapolate the key-curve for larger quotas to the maximum observed, the appearance of errors in the estimating of these flows is common. Thereby this study was conducted using records of the station fluviometric from Restinga Seca-RS, located in the watershed of the Vacacaí Mirim River, aiming to minimize these errors by the comparison between these two extrapolation key-curve methods. Thus was defined the error*



*in the maximum quota (Ehmax) and medium error (Em), so that these value would provide the best comparison of the results obtained by de calibrated curve. The logarithm method had the lowest mean and standard deviations for the flow extrapolated to Ehmax compared to Stevens. For Em, the logarithm metod also presented results that more closely resemble a key-curve. Indicating that beyond the slightest error in the estimation of maximum quotas, the curve of the method is closer to the key-curve in its entirety. Still, it is necessary to make statistical analysis more rigorous to reduce the uncertainties between the quality of settings, as well as appy other methodologies for extrapolation of the key-curve to this work.*

*Key words: Hydrology. Stage–discharge Relationship. Extrapolation Methods*

*Theme Area: Water Resources*

## **1. Introdução**

Para entender às necessidades crescentes do uso dos recursos hídricos, tona-se necessária a busca de maior precisão nos dados utilizados em hidrologia, tendo como importância fundamental no sentido de minimizar as incertezas e aumentar o grau de confiabilidade dos estudos hidrológicos. Em qualquer estudo de disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica que faça uso de dados de vazão em cursos de água, dependerá de uma curva-chave confiável e de boa qualidade (SEFIONE, 2002).

Os principais problemas na representação superior da curva-chave são explicados pela carência de medidas nos eventos extremos de vazão. Deste modo, para poder estimar as vazões nessas situações e estabelecer uma série continua de dados de vazões, a curva-chave deve ser extrapolada para os níveis extremos, gerando incertezas e erros nas estimativas das vazões nos cursos d'água (SANTOS et al., 2001).

Procurando a minimização destes erros, o presente trabalho teve como objetivo fazer uma análise comparativa entre dois métodos de extrapolação superior da curvas-chave, aplicados a estação fluviométrica de Restinga Seca-RS.

### **1.2 Referencial Teórico**

Em uma seção transversal de um curso d'água, a relação que existente entre a descarga e a altura da lâmina de água é uma função denominada de curva-chave ou curva de descarga. Esta relação é usada para transformar a cota de nível do rio em vazão do escoamento fluvial. Ela é necessária visto que a medição de vazão é um processo lento e trabalhoso onde a medição da cota de nível pode ser obtida pela leitura de uma régua ou através do uso de sensores de níveis (PAIVA, 2003).

A curva de descarga serve para a geração de uma série de vazões que podem ser diárias, mensais, anuais, conforme for o objetivo do trabalho. Com os resultados de uma curva-chave podem-se elaborar estudos de vazões extremas, máximas e mínimas.

A extrapolação da curva-chave é necessária quando há valores de cota máxima diária observada maior que a maior cota registrada nas medições de vazões, em caso da extrapolação superior. A necessidade de extrapolação é indispensável nas estações fluviométricas, principalmente na parte superior da curva, devido à dificuldade de se ter um numero suficiente de equipes a postos para efetuar medições de vazão nos momentos de cheia dos rios, ou quando isso acontecer, pode haver a impossibilidade de realizar a medição devido aos grandes riscos, em função das altas velocidades das águas (Tucci e Silveira, 1985).

Existem diversos procedimentos a serem utilizados para extrapolação da curva-chave. Métodos como Logaritmo e Stevens são os mais simples e tradicionalmente utilizados em



todo o Brasil, sendo indicados para situações onde a extrapolação não atinge as planícies de inundação, ou seja, não havendo o extravasamento da calha do rio.

Segundo Fill (1987), o método Logaritmo é o mais utilizado para a extrapolação superior. Baseia-se na hipótese de que o trecho superior da curva-chave, na faixa das cotas medidas, obedece à equação em forma de potência conforme Equação 1.

$$Q = a.(h-h_0)^b \quad (1)$$

em que: Q é a vazão líquida, h a leitura da régua correspondente a vazão Q, h<sub>0</sub> a leitura da régua correspondente à vazão Q<sub>0</sub>, a e b são as constantes determinadas para o local.

Aplicando a função logarítma dos dois lados da equação pode-se linearizá-la. Desta forma, através do método dos mínimos quadrados é possível determinar os parâmetros a e b. Com isso tem-se a equação abaixo:

$$\ln Q = \ln a + b \ln (h - h_0) \quad (2)$$

A minimização dos desvios se verifica através do coeficiente de correlação r, que deverá ser o mais próximo possível da unidade.

A curva-chave obtida por esse método pode apresentar resultados tendenciosos na extrapolação devido ao peso excessivo dado aos pontos com níveis menores. Além disso, pode apresentar tendências diferentes ao longo da curva (SEFIONE, 2002).

Outro método para obtenção da curva-chave é o método de Stevens, que utiliza a fórmula de Chezy (Equação 3) para escoamento uniforme em canais. Sendo adequado para rios largos, onde o raio hidráulico pode ser considerado igual a profundidade média (JACCON e CUDO, 1989).

$$V = C_v \sqrt{Rh} i \quad (3)$$

Em que: V é a velocidade média do escoamento na seção, C<sub>v</sub> é um coeficiente variável em função do raio hidráulico e da natureza do leito, Rh é o raio hidráulico e i é a declividade da linha de carga. Igualando a equação da continuidade a fórmula de Chezy tem-se:

$$\frac{Q}{A_m \sqrt{Rh}} = C_v \sqrt{i} \quad (4)$$

em que: A<sub>m</sub>√Rh é o fator geométrico e C<sub>v</sub>√i é o fator declividade.

Pode-se considerar que o fator geométrico é constante quando o fator geométrico sobre a vazão apresentar uma reta alinhada, pelo menos no trecho final da curva.

O valor do fator geométrico é determinado referente à cota que deseja extrapolar. Por fim prolonga-se a reta do gráfico “fator geométrico x vazão” até o valor do fator geométrico calculado, obtendo-se graficamente a vazão desejada (AMARAL, 2010).

Para a comparação dos métodos de extrapolação, foram calculadas as diferenças entre as vazões extremas estimadas pelos dois métodos propostos. Foram definidos dois tipos de erros conforme a metodologia descrita por Sefione, (2002).

- Erro na Cota Máxima (E<sub>h<sub>max</sub></sub>)

$$E_{h_{max}} = \frac{Q_{em} - Q_{cm}}{Q_{em}} \quad (5)$$

em que: Q<sub>em</sub> é a vazão extrapolada na cota máxima medida na seção e Q<sub>cm</sub> a vazão da curva-chave na cota máxima medida.

- Erro Médio (E<sub>m</sub>)

$$E_m = \frac{\sum \frac{Q_{eh} - Q_{ch}}{Q_{cm}}}{N_h} \quad (6)$$

em que Q<sub>eh</sub> é a vazão extrapolada na cota h, Q<sub>ch</sub>, a vazão da curva-chave na cota máxima medida e N<sub>h</sub> o número de vazões calculadas na faixa de extrapolação.

O erro determinado corresponde à média dos N<sub>h</sub> erros da faixa extrapolada, calculadas em intervalos 10 cm de cota. Mostrando o quanto a curva extrapolada está afastada da curva-chave em toda a sua extensão.



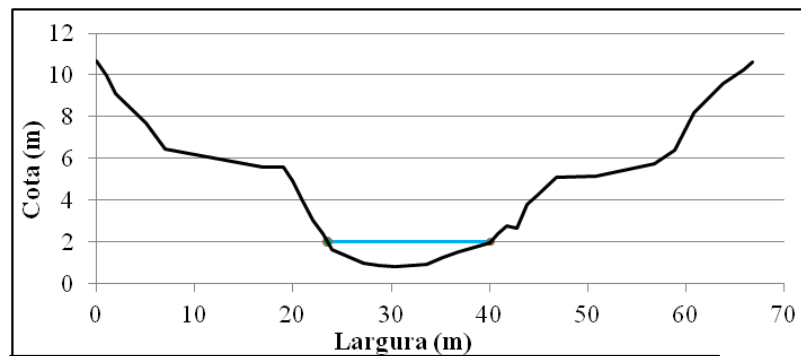
## 2. Material e Métodos

A bacia do Vacacaí Mirim está localizada no sul do Brasil, no centro do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas  $53^{\circ} 46' 30''$  e  $53^{\circ} 49' 29''$  de longitude oeste e  $29^{\circ} 36' 55''$  e  $29^{\circ} 39' 50''$  de latitude sul e possui cerca de  $1120 \text{ km}^2$ .

No presente estudo foram utilizados dados os dados não consistidos das medições esporadicamente no período de 1984 a 2006, em um total de 63 medições de vazão da estação fluviométrica de Restinga Seca (código 85438000), obtidos junto a Agência Nacional das Águas (ANA)

Haviam dois levantamentos de perfis transversais na estação fluviométrica em estudo. A necessidade de se adotar uma seção para aplicação dos métodos de extrapolação se deu em virtude do perfil mais recente, seção de 14/10/2006. A Figura 1 apresenta a seção transversal selecionada para o estudo.

Figura 1 – Seção transversal da estação fluviométrica de Restinga Seca, 14/10/2006.



Inicialmente foi calibrado e traçado a curva-chave dentro da faixa total das cotas medidas com o uso da ferramenta Microsoft Excel 2007, ajustando-se uma equação do tipo  $Q = a(h-h_0)^b$ , onde os parâmetros de ajuste foram determinados a partir dos pares de vazão e cota. Assim sendo, a expressão da curva-chave foi linearizada, determinando-se os parâmetros  $a$  e  $b$  referente à vazão local por regressão linear, e a leitura do nível inicial  $h_0$  pelo método de tentativa e erro. Obtendo-se assim a equação da reta em função da vazão para método Logaritmo. Para a aplicação do método, foi calibrado uma nova curva-chave para todas as medições de vazão.

Para o cômputo do perímetro molhado utilizou-se uma rotina programada em Visual Basic, integrado ao Microsoft Excel, consistindo na interpolação entre o nível d'água e o perfil longitudinal e na obtenção da distância entre os pontos do perfil longitudinal que estão abaixo do nível d'água através da Equação 5:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (5)$$

em que  $i$  e  $j$  são dois pontos consecutivos do perfil transversal. Sendo, ponto  $i$  ( $x_i, y_i$ ) e o ponto  $j$  ( $x_j, y_j$ ). Com isso, o  $Pm$  na seção é definida conforme a equação seguinte.

$$Pm = \sum_{k=1}^n D_k \quad (6)$$

em que  $n$  é o número de pontos abaixo do nível d'água observado.

Em suma, o procedimento pode ser descrito da seguinte forma:

- Obtenção dos pontos de interseção entre o nível d'água e o perfil longitudinal por interpolação linear.
- Obtenção da distância entre o ponto interpolado na margem esquerda e o ponto imediatamente inferior à cota no perfil longitudinal.
- Obtenção da distância entre os demais pontos do perfil longitudinal até a cota imediatamente inferior ao nível d'água na margem direita.



- Obtenção da distância entre o ponto interpolado na margem direita e o ponto imediatamente inferior à cota no perfil longitudinal.

- A soma de todas essas distâncias resulta no perímetro molhado.

Para a obtenção da área molhada ( $A_m$ ) empregou-se a seguinte fórmula aos pontos do perfil longitudinal abaixo do nível d'água:

Área molhada entre o ponto  $i$  e  $j$ :

$$Am_{ij} = |(x_j - x_i)| \cdot \frac{(C - y_j) + (C - y_i)}{2} \quad (7)$$

em que  $C$  é a cota do nível d'água.

O somatório da área molhada entre os pontos é representado pela Equação 8:

$$Am = \sum_{k=1}^n A_{m_k} \quad (8)$$

em que  $n$  é o número de pontos abaixo do nível d'água observado.

A aplicação dos métodos de extrapolação propostos na estação foi desenvolvida pelo cálculo das diferenças entre as vazões estimadas pelos dois métodos selecionados, e a vazão avaliada pela curva-chave total. Para tal, foram utilizadas as vazões calculadas de 10 em 10 cm de cota na faixa de extrapolação.

Assim, foram definidos dois tipos de erros para a comparação dos métodos de extrapolação, de tal modo que esses valores proporcionais para a melhor comparação, onde as diferenças foram divididas pela máxima vazão obtida da curva-chave total.

### 3. Resultados e Discussão

Para a calibração da curva-chave da estação fluviométrica de Restinga Seca visualizada na Figura 2, foi utilizada a curva do tipo potência. Nota-se que nas vazões superiores houve alterações na tendência dos valores, indicando uma possível mudança nas características do leito do rio ou até mesmo condições adversas para medições de vazão, como maior velocidade da água em períodos de cheia que podem propiciar erros maiores.

Como pode ser observado na Figura 3, para as vazões ajustadas pelo método Logaritmo pode ser aplicada uma equação do tipo potência ( $y = 0.0012x^{1.733}$ ), sendo os parâmetros  $a = 0,00116$  e  $b = 1,733$ . Em comparação com os dados observados totais de vazão o coeficiente de correlação  $r^2$  foi igual a 0.8460, nos mostrando uma correlação forte entre as curvas-chave calibrada e a ajustada.

Figura 2 - Calibração da Curva-chave.

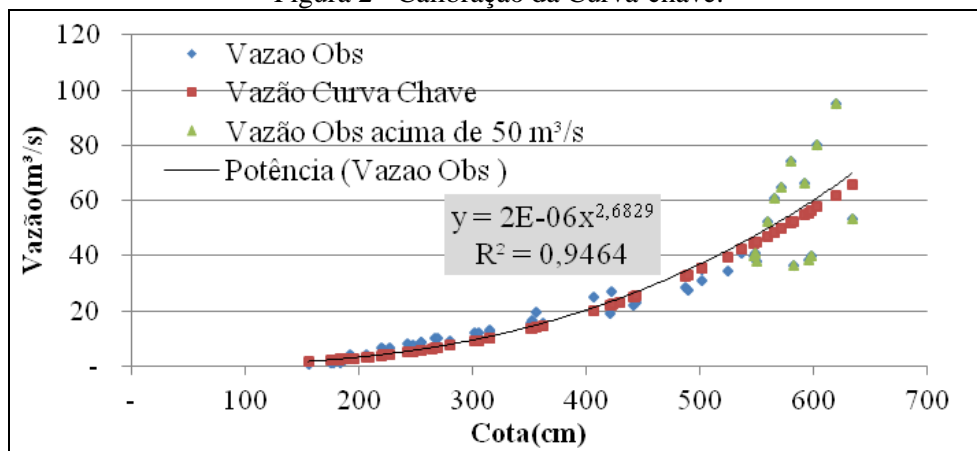
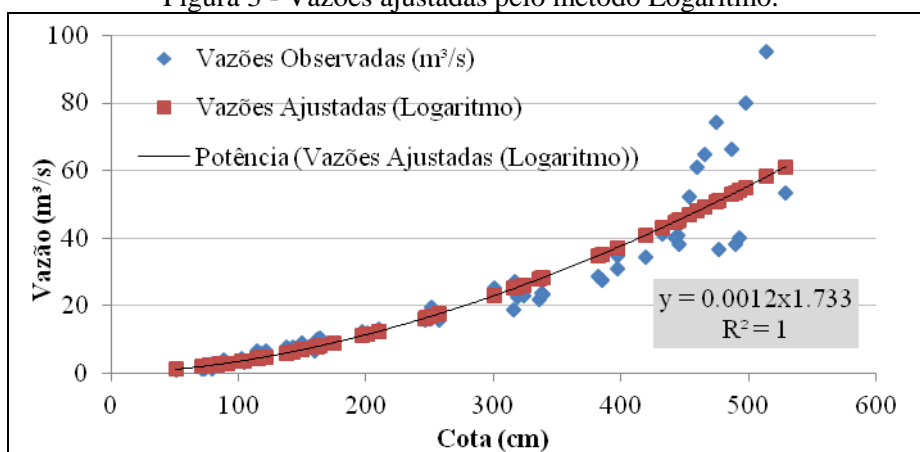




Figura 3 - Vazões ajustadas pelo método Logaritmo.



Na Figura 4 é mostrada a aplicação do método Stevens, observando-se que o valor obtido para o coeficiente K (referente a  $C\sqrt{I}$ , onde C é uma constante adimensional e I referente a declividade), sendo efetuado através de regressão linear com intersecção em 0, utilizando uma curva que relaciona as cotas e as vazões em função do fator geométrico  $Am\sqrt{Rh}$  e apresentando o valor de 0,33512. O coeficiente  $r^2$  apresentou o valor de 0.8594, similar ao obtido com a aplicação do método logaritmo.

Em seguida, foram comparadas as vazões extrapoladas pelos métodos de Stevens e Logaritmo com as vazões da curva-chave calibrada. Sendo verificada a qualidade do ajuste para vazões maiores do que as registradas (Figura 5). Calcularam-se os valores de  $Eh_{max}$  e  $Em$  para cada um dos métodos. Os Quadros 1 e 2 apresenta-se as os valores calculados para os erros, associados a esta verificação na cota máxima extrapolada e ao erro médio respectivamente. O erro médio corresponde a uma análise da representatividade da extrapolação na série como um todo, enquanto o erro na cota máxima é específico.

Figura 4 - Vazões ajustadas pelo método de Stevens.

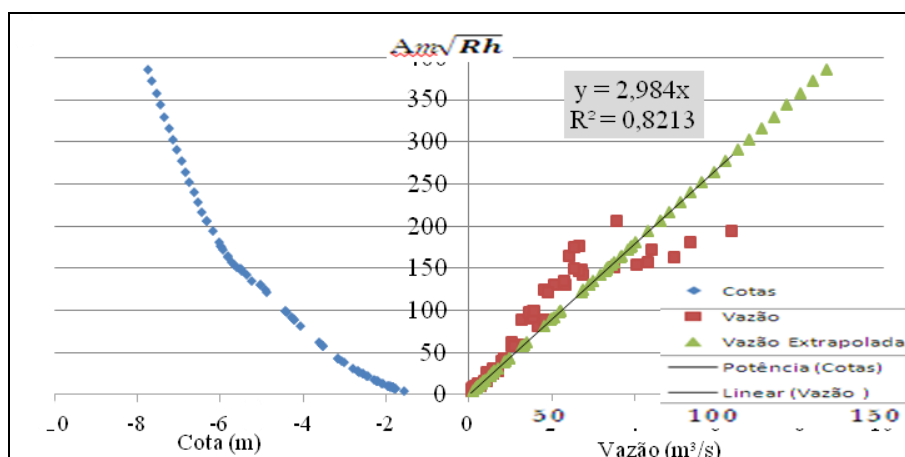
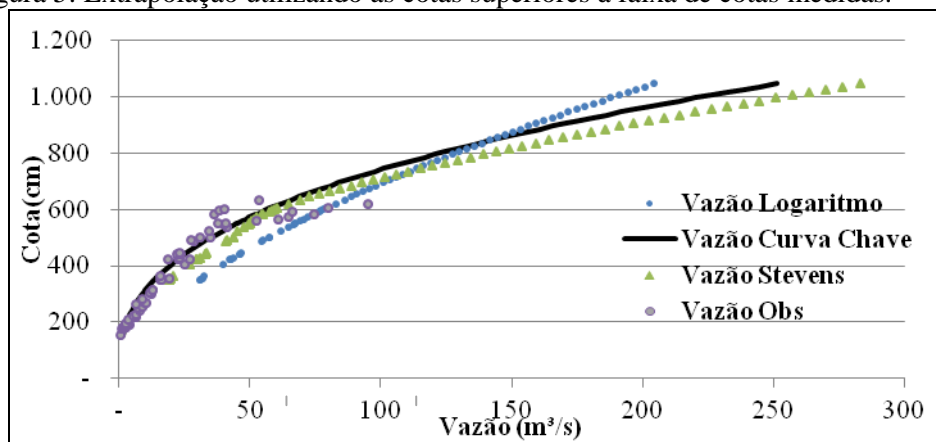




Figura 5: Extrapolação utilizando as cotas superiores à faixa de cotas medidas.



Quadro 1 - Erro na cota máxima utilizando cotas superiores à faixa de cotas medidas.

$Eh_{\max}$	Métodos de Extrapolação	
Erro	Logaritmo	Stevens
Média	1.68	2.16
Desvio	0.65	1.18

Quadro 2 - Erro médio na cota máxima utilizando cotas superiores à faixa de cotas medidas.

Erro médio	
Logaritmo	- 6.46
Stevens	26.58

O método Logaritmo apresentou menor média e desvio padrão para da vazão extrapolada na  $Eh_{\max}$  em comparação a Stevens. Ou seja, verifica-se que o calculo da cota máxima extrapolada para o método Logaritmo obteve um melhor resultado.

Para o  $Em$ , o método Logaritmo também apresentou resultados que mais se assemelham com a curva-chave. Indicando que além do menor erro na estimativa das máximas cotas, a curva do método Logaritmo está mais próxima da curva-chave em toda a sua extensão.

## 5. Conclusão

Os resultados deste trabalho permitiram concluir que dentre os dois métodos comparados o método Logaritmo obteve melhores resultados tanto para os erros máximos como para os erros médios, significando que este método apresenta melhor ajuste a curva-chave em toda a sua extensão. Verifica-se também, que o método de Stevens apresentou melhores aproximações com as vazões medidas, principalmente para as menores cotas, obtendo melhores aproximações a curva-chave em comparação ao Logaritmo.

Sendo assim, é necessário efetuar análises estatísticas mais rigorosas para reduzir as incertezas entre a qualidade dos ajustes, como também aplicar outra metodologia para extrapolação, principalmente para as cotas médias da curva-chave, onde se notou maiores dispersões das vazões medidas.

Além disso, cabe destacar que, o processo de calibração da curva-chave não acompanhou a mudança de tendência que se pode verificar nas cotas acima de 500 cm, onde



faz-se necessário estudar outros métodos de calibração da curva-chave que considerem esta mudança de tendência. Essas considerações podem reduzir as incertezas no cálculo dos erros, uma vez que a metodologia adotada para tal verificação utiliza para comparação as vazões obtidas com a curva-chave calibrada para a estação fluviométrica.

Como pode-se afirmar que não existe um padrão de comportamento para os métodos de extrapolação aplicados, e a sua aplicabilidade depende muito mais das características físicas e hidrológicas e específicas do ponto de monitoramento (FILL, 1987). Indica-se o teste de outros métodos para extrapolação da curva-chave na seção hidrográfica deste estudo, bem como considerar características físicas específicas da seção para calibração da curva-chave.

## Referências

AMARAL, J. F. **Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro**. 2010. 98 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ANA. Agência Nacional de Águas. HidroWeb – Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 15/jun/2011.

BRUSA L.C.; CLARKE R.T. **Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave**. Caso de estudo: bacia do rio Ibicui-rs. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol. 4, nº 3, 1999. p.91-102.

FILL, H. D. 1987. Informações Hidrológicas. In: **MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos**. Nobel: ABRH. cap.2,p.93-210.

JACCON, G.; CUDO, K.J. (1989). **Curva-chave: análise e traçado**, Brasília, DNAEE, 1989. 273p.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.D. (org). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**, Porto Alegre, ABRH, 2003, 628 p.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.V.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F.C. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba - Pr: Lactec, 2001. 372 p

SEFIONE, A. L. (2002). **Estudo Comparativo de Métodos de Extrapolação Superior de Curvas-Chave**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, R. L. (1985). **Análise de consistência de dados fluviométricos**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.