

## **CURVA CHAVE – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SEPULTURA, CAXIAS DO SUL – RS**

*Marcio Vicente Duarte Adami<sup>1\*</sup>; Rossano Belladonna<sup>2</sup>; Reno Borges de Oliveira<sup>3</sup>; Tiago De Vargas<sup>4</sup>; Sasha Leal dos Santos<sup>5</sup>; Marta Antenisca Zago<sup>6</sup>; Edio Elói Frizzo<sup>7</sup>*

**Resumo** – O monitoramento dos corpos d’água em pequenas bacias hidrográficas, caracterizadas pela carência de dados, é fundamental para a quantificação das variáveis hidrológicas, visando à gestão dos recursos hídricos da bacia. A curva chave representa a relação cota-descarga de uma dada seção transversal, sendo que a partir de uma determinada altura de água pode-se calcular a vazão correspondente. Para a construção da curva chave é necessária a realização de uma série de visitas à seção de monitoramento, no intuito de realizar medições de vazão, relacionando-as aos seus respectivos níveis de água medidos na régua linimétrica. Este trabalho tem como objetivo a construção da curva chave do Arroio Sepultura, localizado na bacia hidrográfica do Sepultura, situada no Município de Caxias do Sul – RS. A estação fluviométrica foi monitorada durante o período de janeiro de 2012 a janeiro de 2013, caracterizado por precipitações mensais abaixo da média e cotas linimétricas variando entre 0,196 m e 0,375 m. Portanto, este trabalho procurou apresentar a curva chave da vazão em função da altura da água, representada nas formas gráfica e matemática.

**Palavras-Chave** – Monitoramento dos recursos hídricos, curva chave, bacia hidrográfica.

## **RATING CURVE – A CASE STUDY OF THE SEPULTURA WATERSHED, CAXIAS DO SUL – RS**

**Abstract** – The surface water monitoring in small watersheds, characterized by lack of data, is essential to quantify the hydrological variables, targeting the management of its water resources. The rating curve represents the relationship between the discharge and the gage height of a given cross-section of a creek, stream or river, thus from a certain height it is possible to determine its correspondent flow rate. For the construction of the rating curve it is necessary to perform a series of visits to the monitored cross-section in order to perform flow measurements, relating them to their respective water levels. This paper aims to construct the rating curve of the Sepultura Creek, located in the Sepultura Watershed in the rural area of Caxias do Sul – RS. The fluviometric station was monitored between January 2012 and January 2013, and it was characterized by precipitations below average and gage height varying from 0.196m to 0.375m. Therefore, this study aims to present the rating curve of mentioned creek, represented in graphical and mathematics forms.

**Keywords** – Surface water monitoring, rating curve, watershed.

1 Engenheiro Agrônomo – Técnico em Hidrologia do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [mvadami@samaecaxias.com.br](mailto:mvadami@samaecaxias.com.br)

2 Engenheiro Ambiental – Gerente da Divisão dos Recursos Hídricos do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [rbelladonna@samaecaxias.com.br](mailto:rbelladonna@samaecaxias.com.br)

3 Topógrafo do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [reoliveira@samaecaxias.com.br](mailto:reoliveira@samaecaxias.com.br)

4 Geólogo do SAMAE – Mestre em Geoquímica das águas – Caxias do Sul – RS – [tvargas@samaecaxias.com.br](mailto:tvargas@samaecaxias.com.br)

5 Acadêmica em Engenharia Ambiental – Estagiária da Divisão dos Recursos Hídricos do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [slsantos@samaecaxias.com.br](mailto:slsantos@samaecaxias.com.br)

6 Arquiteta – Pós-graduada em Gestão dos Recursos Hídricos – Diretora da Divisão dos Recursos Hídricos do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [mzago@samaecaxias.com.br](mailto:mzago@samaecaxias.com.br)

7 Diretor Presidente do SAMAE – Caxias do Sul – RS – [efrizzo@samaecaxias.com.br](mailto:efrizzo@samaecaxias.com.br)

## INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos, situados em pequenas bacias, precisam ser geridos criteriosamente no intuito de resolver os diversos conflitos gerados pelo crescimento demográfico e ocupação solo. Portanto, segundo Goes *et al.* (2007), o monitoramento tem a finalidade de aprofundar o conhecimento das consequências causadas pela alteração do meio natural e auxiliar na gestão dos recursos hídricos de um município.

Nesse sentido, a partir de dezembro de 2011, iniciou-se o monitoramento hidrológico na bacia do Sepultura, com características rurais, localizada na região nordeste do município de Caxias do Sul – RS (Figura 2). O conhecimento preciso do balanço hídrico é essencial no sentido de determinar a entrada e a saída de água na bacia (Shimomechi *et al.*, 1987). Para quantificar esse processo, foi instalada uma estação fluviopluviométrica, situada a nordeste do limite da bacia do Sepultura. Na estação fluviométrica, foi instalada três lances de régua linimétrica, juntamente com um linígrafo com sensor de pressão. Os dados do linígrafo e do pluviógrafo são armazenados num data logger da marca Novus e, posteriormente, são coletados, via sinal infravermelho, para um notebook. Para quantificar os valores de vazão do arroio foram realizadas medições de vazão a vau na seção transversal, conferindo medidas de velocidade da água e área molhada em diferentes níveis fluviométricos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A curva chave relaciona a altura da lâmina d'água com sua vazão correspondente. Para Paiva, (2003) esta relação é usada para transformar a cota do nível do arroio em vazão. Santos *et al.* (2001) explicam que os pontos para a tomada da velocidade de escoamento são determinados em função da profundidade do corpo d'água. Com isso, a coleta é relacionada com o posicionamento do molinete para quantificar o número de rotações da hélice. Cada molinete possui uma equação que, em função do número de rotações, irá gerar uma determinada velocidade. Abaixo será apresentada a Tabela 1, contendo o número de pontos, a posição do molinete na vertical e a velocidade média.

Tabela 1 – Número, posição dos pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio e sua respectiva velocidade média.

Profundidade (m)	Nº de pontos	Posição dos pontos	Velocidade média na vertical
0,15 a 0,60	1	0,6 p	$v_{0,6}$
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 p	$(v_{0,2} + v_{0,8})/2$
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8 p	$(v_{0,2} + 2 \times v_{0,6} + v_{0,8})/4$
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p	$(v_{0,2} + 2 \times v_{0,4} + 2 \times v_{0,6} + v_{0,8})/6$
> 4,00	6	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; p e F	$[v_S + 2 \times (v_{0,2} + v_{0,4} + v_{0,6} + v_{0,8}) + v_F]/10$

Fonte: Santos *et al.* (2001). Sendo: S = superfície; p = profundidade (m); F = fundo; v = velocidade

Santos *et al.* (2001) chamam a atenção para a distância entre as verticais, que varia em função da largura do corpo d'água. Abaixo será apresentada a Tabela 2, contendo a distância entre as verticais, vinculada com a largura do corpo d'água.

Tabela 2 – Distância entre as verticais, de acordo com a largura do rio.

Largura do Rio (m)	Distância entre Verticais (m)
< 3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1,0
15 a 30	2,0

Fonte: Santos *et al.* (2001).

A Figura 1 ilustra, de maneira esquemática, um exemplo de medição a vau realizada na seção transversal de estudo do Arroio Sepultura. Neste exemplo, pode-se observar o posicionamento, a marcação das linhas verticais e os pontos para a quantificação das rotações do molinete, que por meio de equações, resulta numa determinada velocidade.

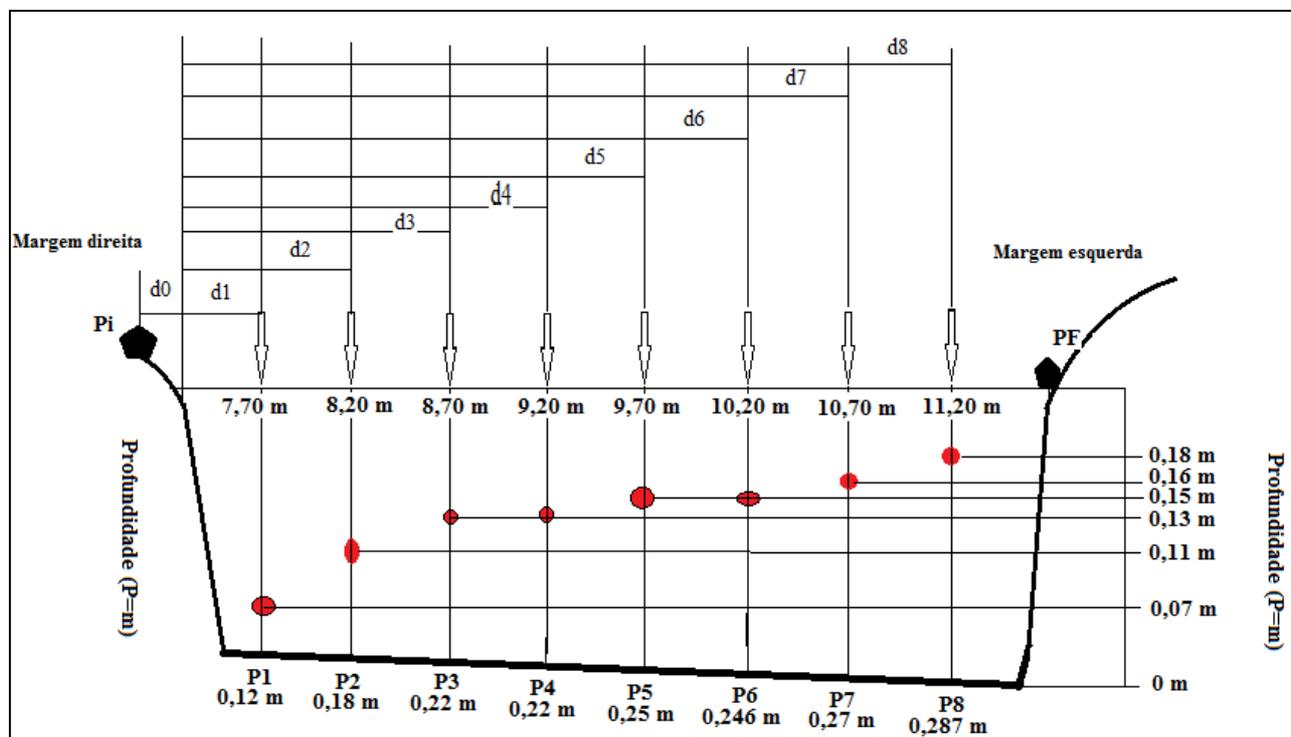


Figura 1 – Exemplo da medição de vazão em uma seção transversal do arroio Sepultura, com indicações das verticais, distâncias (d), profundidades (P) e os pontos onde são medidas as velocidades.

As velocidades da água na seção transversal decrescem da superfície para o fundo e do centro para as margens do canal (Garcez & Alvarez, 1998). De acordo com as características hidráulicas e geométricas da seção transversal, aliada às características do leito, a curva chave pode sofrer alterações com o passar do tempo (Goes *et al.* 2007).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi realizado na bacia do Sepultura, localizada no Município de Caxias do Sul, situado na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). A bacia, que possui uma área de drenagem de 4.365,8 ha, está inserida na bacia do Rio Taquari-Antas, pertencente à bacia hidrografia do Guaíba. Quanto ao uso do solo na bacia (Tabela 3), 88,21% da área é constituída por campo e 11,02 % é formada por mata.

O formato da bacia é importante, pois influencia no tempo de transformação da chuva em escoamento. A bacia do Sepultura apresenta as seguintes características físicas: declividade do talvegue igual a 0,0158 m/m, o fator de forma ( $K_f$ ) igual a 0,49 e o coeficiente de compacidade ( $K_c$ ) igual a 1,45. Portanto, a bacia do Sepultura apresenta menor tendência a enchentes, podendo ocorrer em pequeno vulto.

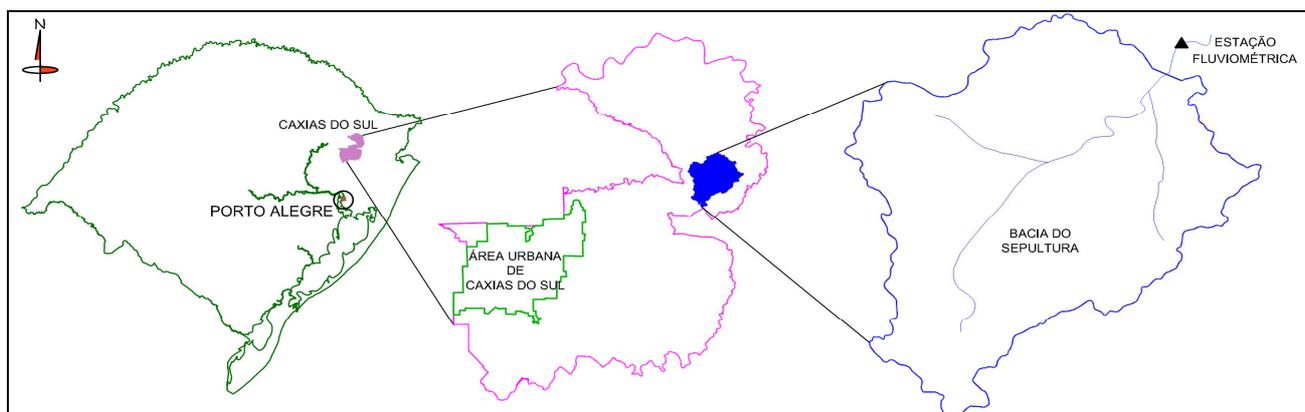


Figura 2 – Localização da Bacia do Sepultura e o posicionamento da Estação Fluviométrica.

Tabela 3 - Relação do uso do solo na bacia do Sepultura

Uso do solo	% da área da bacia
Cultivos em fileira	0,13
Solo nu (preparado)	0,64
Mata (nativa + reflorestada)	11,02
Campo (nativo)	88,21
<b>CN ponderado</b>	<b>59,00</b>

A estação fluviométrica está localizada a nordeste do limite da bacia (mE 515.694 e mN 6.793.658, datum SIRGAS2000). A seção de monitoramento apresenta mata ciliar na margem esquerda, formada por vegetação nativa; enquanto que na margem direita a vegetação campestre é predominante (Figura 3). O leito do arroio na seção de monitoramento é caracterizado por um lajeado constituído por rocha vulcânica dacítica (Figura 4).



Figura 3 – Seção transversal de monitoramento. Imagem anterior a instalação da estação fluviométrica.

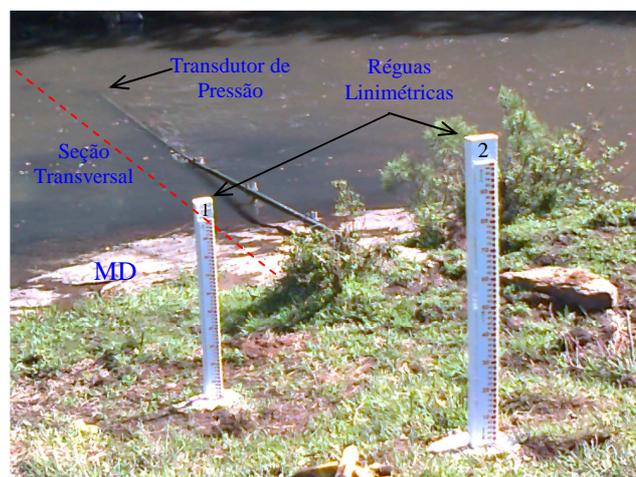


Figura 4 – Vista lateral da seção de monitoramento.

## Sistema de Medição da Vazão

A construção da curva chave do Arroio Sepultura consistiu no monitoramento da vazão no período de janeiro de 2012 a janeiro de 2013, totalizando nesse tempo dez medições de vazão a vau. Esse período foi marcado por precipitações mensais abaixo da média, onde os níveis medidos na régua linimétrica estiveram entre 0,196 m e 0,375 m.

Foi utilizado, nas medições de vazão, o conjunto da marca Hidromec composto pelo micromolinete hidrométrico de eixo horizontal, contador de pulsos, haste graduada em centímetros, hélice e pedestal para base que é apresentado na Figura 5. Além disso, para medir a largura do arroio e auxiliar na marcação das linhas verticais, foi fixada uma trena entre os pontos inicial e final da seção transversal. As profundidades foram medidas com o auxílio de uma régua de PVC graduada em centímetros e os valores medidos foram registrados na caderneta de campo da estação fluviométrica.

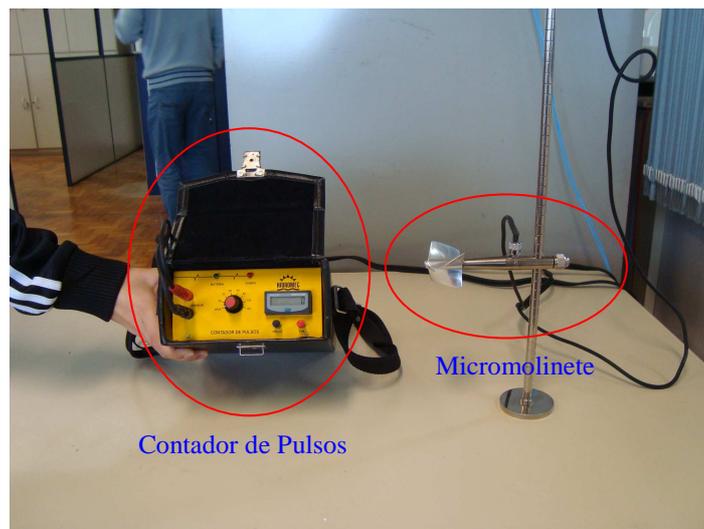


Figura 5 – Conjunto utilizado para as medições de vazão a vau.

No escritório, a vazão foi calculada pelo método da Meia Seção, indicado por Santos *et al.*(2001). O processo deste cálculo seguiu o perfil apresentado na Figura 1 e consistiu em nove passos, sendo:

- 1º. cálculo das larguras dos segmentos ( $L$ )  $\rightarrow L_n = [(d_{n+1} - d_{n-1})/2]$  para  $n \geq 1$ ;
- 2º. cálculo das áreas dos segmentos ( $A$ )  $\rightarrow A_n = (L_n \times P_n)$  para  $n \geq 1$ ;
- 3º. cálculo das velocidades médias ( $V$ )  $\rightarrow$  Em função do número de rotações, a equação do molinete gerou uma velocidade para as profundidades trabalhadas. A partir disso, calculou-se a velocidade média para cada vertical (seguindo a distribuição apresentada na Tabela 1);
- 4º. cálculo das vazões nos segmentos ( $Q$ )  $\rightarrow Q_{An} = (V_n \times A_n)$  para  $n \geq 1$ ;
- 5º. cálculo da vazão total ( $Q_t$ )  $\rightarrow Q_t = \sum Q_i$ ;
- 6º. cálculo da área total ( $A_t$ )  $\rightarrow A_t = \sum A_i$ ;
- 7º. cálculo da velocidade média ( $V_m$ )  $\rightarrow V_m = Q_t / A_t$ ;
- 8º. cálculo a largura do rio ( $D$ )  $\rightarrow D = d_n - d_0$  para  $n \neq 0$ ;
- 9º. cálculo da profundidade média do rio ( $P_m$ )  $\rightarrow P_m = A_t / D$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme observa-se na Tabela 4, foram realizadas dez medições de descarga líquida na seção de medição. A cota linimétrica mínima foi de 0,196 m com uma vazão igual a  $159 \text{ L.s}^{-1}$ , enquanto que a cota linimétrica máxima foi de 0,375 m, com uma vazão igual a  $1.256 \text{ L.s}^{-1}$ . Nesse período, as medidas foram realizadas numa amplitude de 0,179 m.

Tabela 4 – Valores de nível, vazão calculada e velocidade média medidos na estação fluviométrica.

Nível (m)	Vazão(L.s <sup>-1</sup> )	Velocidade média (m.s <sup>-1</sup> )
0,375	1.256	0,359
0,31	772	0,265
0,31	753	0,266
0,29	560	0,216
0,27	504	0,239
0,24	387	0,185
0,23	210	0,128
0,22	156	0,108
0,226	178	0,119
0,196	159	0,114

Na construção da curva chave, utilizaram-se os dados das leituras na régua linimétrica e os valores de vazão medidos na seção transversal. Durante o período de monitoramento, as cotas linimétricas foram pequenas e fortemente influenciadas pelas propriedades do escoamento de base. A Figura 6 identifica a curva chave que foi gerada a partir de regressão polinomial que apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,98. O ajuste da curva por esta regressão obteve o melhor desempenho para os valores superiores ou iguais a 0,27 m. Isto significa que a equação possui elevado grau de determinação, indicando que, ao introduzir na equação as cotas fluviométricas, 98% das variações dos valores de vazão serão esclarecidos pelo modelo empírico adotado.

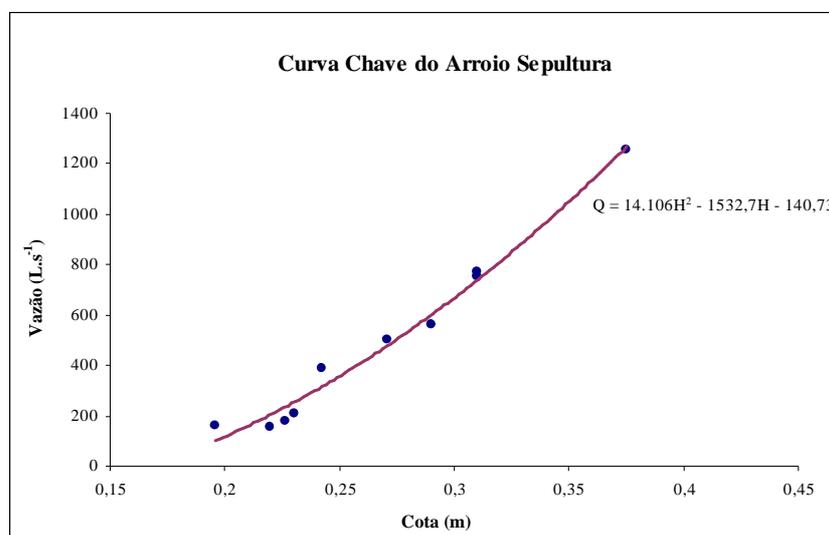


Figura 6 – Curva chave do Arroio Sepultura.

Determinou-se o coeficiente de correlação ( $r$ ) como sendo igual a 0,9899, indicando uma elevada correlação positiva entre as variáveis analisadas.

O ajuste de uma tendência para cotas abaixo de 0,24 metros apresenta resultados de vazão subestimados ou superestimados para a seção. Portanto, a equação da curva chave não apresentou o melhor ajuste para as vazões com cotas variando entre 0,24 m e 0,196 m.

A partir dos dados plotados na Figura 6, produziu-se a seguinte equação:

$$Q = 14.106 \times H^2 - 1.532 \times H - 140,73 \quad \text{para} \quad H \geq 0,27\text{m} \quad (R^2=0,98 \text{ e } r=0,9899) \quad [1]$$

Onde:  $Q$  = vazão (L.s<sup>-1</sup>) e  $H$  = cota (m)

## CONCLUSÃO

A equação polinomial [1], em função do seu coeficiente de determinação, ajustou-se melhor às cotas que variaram entre 0,27 m.e 0,375 m. Por sua característica, esta equação tem a propriedade de representar a evolução dos picos de onda de cheia, principalmente aqueles que são gerados pelas baixas intensidades de precipitação. No entanto, as funções polinomiais geram valores mais elevados para as vazões com altas frequências de permanência, constituindo-se num problema no momento da determinação da disponibilidade hídrica de uma bacia, na qual são usadas vazões com frequência de 90 ou 95% (Tucci, 2002).

Em função do pequeno número de dados coletados durante esse período, a curva chave necessita ser aperfeiçoada através de novas medidas de vazão na seção, que resultem numa maior representatividade da curva chave do Arroio Sepultura, abrangendo uma extensa série de dados, que contemple anos com precipitações normais, juntamente com outros influenciados por precipitações acima e abaixo da média histórica.

## REFERÊNCIAS

- GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. *Hidrologia*. Editora Edgar Blücher . São Paulo – SP, 1988.
- GOES, M .U .A; BERTOLDO, F.; BURIOL, G. A.; RIGHES, A. A.; SILVEIRA, G, L. Curva chave – Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica – Escola Urbana, Santa Maria – RS. In *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos Norte e Centro Oeste*, Cuiabá, MT, 2007.
- PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- SANTOS, I. *et al. Hidrometria Aplicada*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba – PR, 2001.
- SHIMOMICHI, P. Y. *et al. Correlação entre métodos de cálculo de precipitação média mensal em bacia hidrográfica experimental. Boletim Técnico do Instituto Florestal de São Paulo*, v.41, n.1, 1987,
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Ed Universidade/UFRGS/ABRH.Porto Alegre – RS, (2002).