

CURVA CHAVE – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA – ESCOLA URBANA, SANTA MARIA – RS¹

*Marcos Ugalde de Araújo Goes², Felipe Bertoldo³, Galileo Adeli Burio⁴, Afranio Almir Righes⁴,
Geraldo Lopes da Silveira⁵*

RESUMO --- O monitoramento de recursos hídricos é fundamental para encontrar soluções que visam o melhor gerenciamento da água em bacias hidrográficas urbanas. Nesse sentido o presente trabalho teve como objetivo a obtenção da curva chave do arroio da bacia escola urbana, pertencente ao Centro Universitário Franciscano / Universidade Federal de Santa Maria. O trabalho foi desenvolvido em um afluente do Arroio Cadena, localizado no Município de Santa Maria. Para a obtenção da curva-chave, do arroio, a microbacia escola-urbana da UNIFRA, foi monitorada em eventos de chuvas e de estiagens no período de agosto a novembro de 2006, determinando-se a área da seção transversal, cotas fluviométricas, respectivas velocidades médias da água e a vazão determinada em Calha Parshall de fundo plano. A estimativa da área da seção transversal em função da altura da cota fluviométrica foi obtida por duas equações que proporcionam modelos fiéis com ótimo ajuste e representatividade. Para o corpo da calha utilizou-se ($y = 0,7856x - 0,0013$) e para a seção superior ($y = 2,0236x^2 + 0,9301x - 1,017$). A curva chave do arroio até a altura de lâmina de água de 0,75 m, é descrita pela função quadrática $Q = 1,3344 X^2 + 0,1835 X + 0,0015$.

ABSTRACT --- The water resources monitoring in urban zones is one important technique to search solutions for a better management of urban basins. In this direction The work has the objective to determine the stage–discharge relationship for little stream of the urban basin-school, belong to UNIFRA/UFSM. The work was developed in a tributary of the Cadena little stream, located at the city of Santa Maria. In order to obtain the stage–discharge relationship, for little stream, the school-urban micro basin of the UNIFRA, was monitored in events of rains and dry weather in the period from August to November of 2006, determining the transversal section area, fluviometrics levels, the respective average speeds of water and the flow of water using a Parshall flumes. The estimation of cross section area as a function of fluviometric level were used two equations that show a better fit and physical meaning. For a Parshall flumes the equation is ($Y = 0,7856x - 0,0013$). The section above of the flumes, the second degree equation ($Y = 2,0236x^2 + 0,9301x - 1,017$) is used for area calculation. The stage–discharge relation for the stream of fluviometric station is express by the equation $Q = 1,3344x^2 + 0,1835x + 0,0015$, it is a polynomial relation, with higher coefficient of determination, $R^2 = 0,968$.

Palavras-chave: crescimento urbano, monitoramento dos recursos hídricos, curva chave.

1) Projeto Financiado pelo CNPq.

2) Engenheiro Ambiental Mestrando da Universidade Federal de Santa Maria, RS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração – Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. Bolsista de Apoio Técnico a Pesquisa Nível 1A – CNPq e-mail: marcosuag@gmail.com

3) Engenheiro Ambiental Mestrando da Universidade Federal de Santa Maria, RS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração – Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. e-mail:fliber@gmail.com

4) Engenheiro Agrônomo. Professor Doutor no Curso de Engenharia Ambiental do Centro Universitário Franciscano – UNIFRA.

5) Engenheiro Civil. Professor Doutor da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

1 – INTRODUÇÃO

No Brasil, com o desenvolvimento da indústria, entre meados dos anos 50 e início dos anos 60, houve um crescimento acelerado das cidades com a emigração da população rural à procura de melhores condições de vida no meio urbano. Este aumento acelerado da população nos centros urbanos brasileiros gerou inúmeros problemas na infra-estrutura das cidades, especialmente na área do saneamento básico. Problemas como o mau funcionamento dos sistemas de drenagem das águas pluviais, inexistência ou falta de manutenção das redes de esgoto e um mau gerenciamento dos resíduos sólidos, tornaram-se um desafio para as autoridades competentes. Os efeitos gerados por essa ocupação desordenada do solo estão ligados diretamente à saúde e ao bem estar da população.

O monitoramento de recursos hídricos em zonas urbanas constitui-se numa técnica importante para buscar soluções para um melhor gerenciamento de bacias hidrográficas urbanas. Faz-se necessário um bom conhecimento dos componentes do ciclo hidrológico urbano e do processo chuva – vazão para se realizar um planejamento urbano adequado. Neste sentido, no ano de 2006, iniciou-se o monitoramento em uma bacia hidrográfica com características urbanas, localizada na região central do Município de Santa Maria – RS. Foram instalados equipamentos para determinar a vazão, próximo ao exutório da bacia e uma estação hidrometeorológica localizada no Laboratório de Engenharia Ambiental do Centro Universitário Franciscano – UNIFRA. O monitoramento tem a finalidade de aprofundar o conhecimento das conseqüências causadas pela alteração do meio natural e auxiliar na gestão dos recursos hídricos deste município.

A quantificação precisa da entrada e saída de água na bacia hidrográfica é muito importante. A entrada pode ser obtida pela instalação de um número adequado de pluviômetros espacialmente distribuídos na bacia (SHIMOMECHI *et al.*, 1987). Já a saída de água da bacia é determinada em estações fluviométricas equipadas com vertedores padronizados e aferidos em laboratório, que permitem a obtenção de valores da relação cota-vazão do curso d'água. Quando isso não é possível, recomenda-se fazer a calibragem do vertedor já instalado próximo ao exutório da bacia, por intermédio de medições de velocidade da água e a área da seção molhada do vertedor para diferentes cotas fluviométricas (CICCO *et al.*, 1987).

Os pontos de determinação de velocidade de escoamento da água no arroio são definidos de acordo com a profundidade do rio. A tabela 1 apresenta o número de pontos e posição onde deve ser realizada a tomada de dados.

Tabela 1. Número e posição de pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio.

Profundidade (m)	Número de pontos	Posição dos pontos
0,15 a 0,60	1	0,6 p
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 p
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8 p
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p
>4,00	6	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 p e F

Fonte: SANTOS et al., (2001). Sendo: S = superfície; p = profundidade (m); F = fundo

De acordo com a profundidade é necessário realizar várias medidas em várias verticais e em vários pontos ao longo das verticais, para obter-se uma boa estimativa da velocidade média (Figura 1).

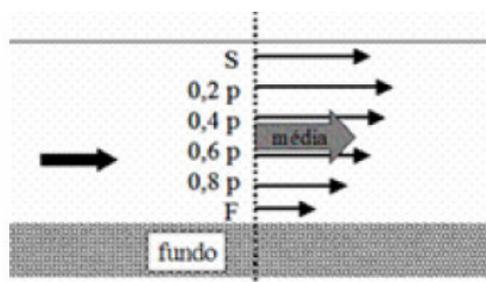


Figura 1. Perfil de velocidade típico e pontos de medição recomendados.

O método mais difundido em todo o Brasil para determinação das velocidades para cálculo de vazão é o uso do molinete fluviométrico, conforme Manual de Serviços de Hidrometria do Departamento de Águas e Energia Elétrica (BRASIL, 1977).

Deve-se ainda, segundo Santos (2001), levar em conta a distância entre as verticais, que variam de acordo com a largura do rio. Na tabela 2 apresentam-se algumas dessas distâncias.

Tabela 2. Distância indicada 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
30 a 50	3,0
50 a 80	4,0
80 a 150	6,0
150 a 250	8,0
>250	12,0

Fonte: SANTOS et al., (2001).

O procedimento para o posicionamento e marcação das linhas verticais e pontos de determinação da velocidade para traçar o perfil da área e fluxo de um canal é representado na figura 2 (SANTOS et al., 2001).

A relação cota-vazão da curva chave do vertedor deve ser gerada para todo o intervalo de definição da calibragem. Como, em alguns casos, as medições são insuficientes, a curva, muitas vezes, deve ser extrapolada, sempre na direção superior (TUCCI, 2000). Geralmente, quanto maior a altura da lâmina de água maior é a velocidade. A grande dificuldade na medição de velocidades deve-se ao fato dessa grandeza ser essencialmente variável de ponto para ponto da seção e ao longo do tempo. Segundo Garcez & Alvarez (1998), deve-se levar em conta também que as velocidades da água em uma seção transversal de canal decrescem da superfície para o fundo e do centro para as margens.

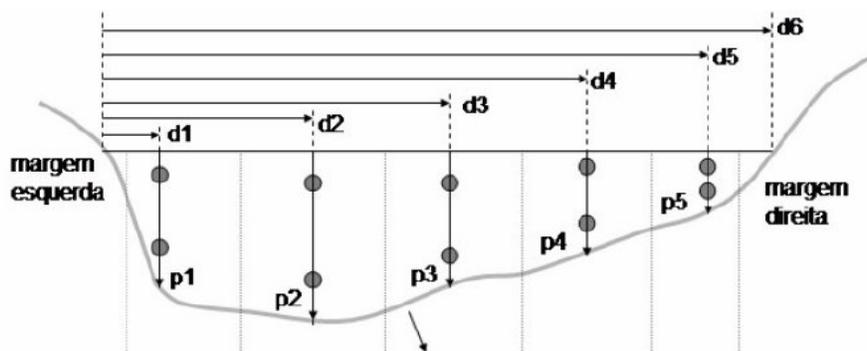


Figura 2. Exemplo da medição de vazão em uma seção de um rio, com a indicação das verticais, distâncias (d), profundidades (p) e os pontos onde são medidas as velocidades.

Deve-se considerar que a curva chave de um curso d'água pode sofrer alterações com o tempo, dependendo do material do leito, visto que a curva representa a relação entre a vazão e a cota do escoamento levando em conta a características hidráulicas e geométricas da seção transversal deste curso.

O hidrograma gerado a partir da curva chave demonstra as mudanças da vazão no tempo e permite separar o escoamento superficial e o escoamento de base. Desta forma, identifica-se a disponibilidade e as potencialidades hídricas de uma determinada bacia hidrográfica.

Para iniciar o monitoramento da vazão da água de um rio ou arroio em uma estação fluviométrica, após sua instalação, o primeiro procedimento constitui-se na determinação da curva chave. Neste sentido, no presente trabalho, visou-se a construção da curva chave do arroio da bacia hidrográfica escola urbana, pertencente ao Centro Universitário Franciscano / Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Localização da área do projeto Bacia Hidrográfica – Escola Urbana

O estudo foi realizado no Município de Santa Maria, região central do Estado do Rio Grande do Sul. A micro-bacia hidrográfica localiza-se entre a área central da cidade e o aterro da Viação Férrea, entre as coordenadas geográficas 29° 25' 51,94'' e 30° 00' 18,67'' de latitude sul e 54° 19' 32,41'' e 53° 30' 43,59'' de longitude oeste. Na figura 3 tem-se uma imagem aérea do local.



Figura 3: Vista aérea do local onde está instalada a estação de monitoramento fluviométrica.

O corpo hídrico selecionado é um afluente do arroio Cadena, conhecido por seu elevado grau de deterioração ambiental devido à urbanização.

2.2 - Sistema de medida da vazão

Para o monitoramento da vazão foi instalada próximo ao exutório desta micro-bacia hidrográfica uma Calha Parshall de Fundo Plano, seguindo as normas da construção civil e do projeto técnico, como é apresentado na figura 4.



Figura 4: Estação de monitoramento fluviométrico.

Para barrar os resíduos sólidos que são transportados pelo aumento do fluxo d'água nas épocas de cheia foi desenvolvida e instalada uma grade tipo "Harpa" em um ângulo de 45° a montante da estação fluviométrica (Figura 4).

A calha possui dimensões de 0,78 m de largura e 0,63 m de altura. A seção do canal se estende verticalmente e de forma linear até alcançar a estrutura projetada para o suporte de equipamentos que se localiza a, aproximadamente, 1,59 m acima da calha (Figura 5).



Figura 5: Perfil da estação fluviométrica.

Para a construção da curva chave do arroio, foi monitorada a vazão em eventos chuvosos e de estiagem no período de agosto a novembro de 2006, determinando-se a área da seção transversal, cotas fluviométricas, e as respectivas velocidades médias da água. Com a obtenção destes dados foram determinadas as vazões referentes a cada altura da lâmina d'água.

2.3 - Determinação da área da seção transversal da estação fluviométrica

Para determinar a área da seção da estação fluviométrica, determinou-se a distância de uma margem a outra. Dividiu-se a distância total de 9 m, em trechos de 30 cm. O espaçamento horizontal, segundo Santos et al. (2001), pode ser determinado em trechos de 1 m. Entretanto, neste trabalho utilizaram-se trechos de 30 cm devido a grande irregularidade do perfil da seção. A cada intervalo estabeleceram-se linhas verticais que se estendem da parte superior até o fundo da seção. No total foram marcadas 30 linhas verticais de uma margem a outra.

Na determinação das linhas verticais e suas respectivas distâncias para o cálculo da área da seção foram utilizados um prumo de pedreiro para a determinação exata do ponto no fundo da seção e uma trena de 5 m para a determinação das distâncias.

Os dados coletados a campo foram digitados para aplicação em *softwares* específicos.. A determinação da área da seção do arroio foi realizada com o *Software AutoCad*, sistema computacional bastante utilizado pela engenharia, geologia e arquitetura. O *software* permitiu a

digitalização do perfil da estação fluviométrica e o cálculo das subáreas em função dos incrementos da altura da lâmina d'água. Dentro do corpo da calha dividiu-se a altura em frações de 0,05 m e no restante do perfil 0,03 m. No total foram 65 subáreas que, somadas, forneceram a área total.

Até o limite do corpo da calha Parshall de Fundo Plano a altura e a área têm uma relação linear, após este ponto a relação é não linear. Para a aquisição de dados precisos, utilizaram-se as duas equações, uma linear até a altura de 0,65 m e, acima disto, utilizou-se uma equação polinomial.

2. 4 - Determinação da altura da lâmina de água

A altura da lâmina de água do arroio foi determinada por meio de uma régua, posicionada verticalmente, junto a parede da calha Parshall de Fundo Plano. As medidas foram realizadas próximas as entradas do poço tranquilizador. Neste poço encontra-se instalado um sensor transdutor de pressão, conectado a um *data logger*, para registro da altura da água na seção da calha em função do tempo.

2. 5 - Determinação da velocidade da vazão de água

Para definir os dados de velocidade do fluxo de água na calha, utilizou-se o Molinete Eletromagnético 801, marca SEBA Hydrometrie, que funciona por meio da geração de um campo magnético que foi produzido na água. Os íons presentes na água (concentração conhecida) movem-se com a mesma velocidade e alteram o campo magnético que foi gerado. Tal mudança é medida, indicando indiretamente a velocidade com que as partículas eletromagnéticas passaram pelo campo.

Determinou-se a velocidade média da água em situação de baixa, média e alta vazão. Para realizar as medidas com baixa vazão selecionaram-se períodos de estiagem, aproximadamente 15 dias sem precipitação. Já as determinações das velocidades com médias e altas vazões realizaram-se em dias com precipitações intensas.

2. 6 - Determinação da vazão em períodos de cheia

Para a determinação da vazão com média e alta altura da lâmina de água, utilizaram-se os valores da altura da lâmina de água e da velocidade, aplicando-os na equação da continuidade [1].

$$Q = A \times V \quad [1]$$

sendo:

Q = vazão em $m^3.s^{-1}$;

A = área da seção transversal molhada em m^2 ;

V = velocidade da água em m.s^{-1} .

2.7 - Determinação da vazão em períodos de estiagem

Para a determinação da vazão em períodos com baixa altura de lâmina de água (menor que 0,26 m), não foi possível o uso do molinete eletromagnético. Utilizou-se para estes períodos um vertedor triangular de parede delgada com ângulo de 90° , construído em chapa de aço, como é ilustrado na figura 6. Para obter uma boa vedação no momento da leitura, foi colocado, na parte externa do vertedor, um perfil de borracha. O vertedor foi acoplado, nos dias de leitura, a montante da seção de estrangulamento da calha. Mediu-se a altura (h) da lâmina de água que escoava pelo vertedor. Os valores obtidos foram utilizados na equação [2] para a determinação da vazão (AZEVEDO NETO; VILLELA, 1969).

$$Q = 1,42 \times h^{2,5} \quad [2]$$

sendo:

Q = vazão em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$;

h = carga hidráulica sobre o vértice do vertedor em m.

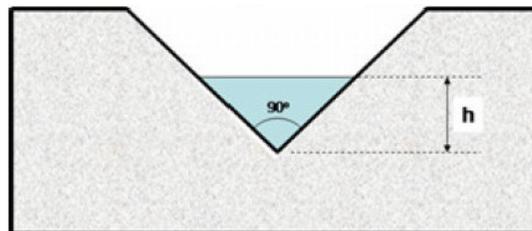


Figura 6: Vertedor triangular com soleira delgada em ângulo de 90° .

2.8 - Curva chave

Para a determinação da curva chave utilizou-se os dados de altura da lâmina de água até 0,75 m e as respectivas vazões. Aplicou-se o modelo de regressão polinomial do *software Excel* e obteve-se a equação.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os dados referentes à altura da lâmina de água, área da seção transversal, velocidade, vazão nos períodos de estiagem, vazão nos períodos de alturas de lâmina de água médias e altas e da curva chave do arroio da bacia hidrográfica escola urbana do Centro Universitário franciscano – UNIFRA.

O perfil da calha Parshall de fundo plano construído no software *AutoCad* é apresentado na figura 7. A equação de regressão contida nas figuras 8 e 9 não são necessárias para estimar valores de área na seção da calha Parshall (linear).

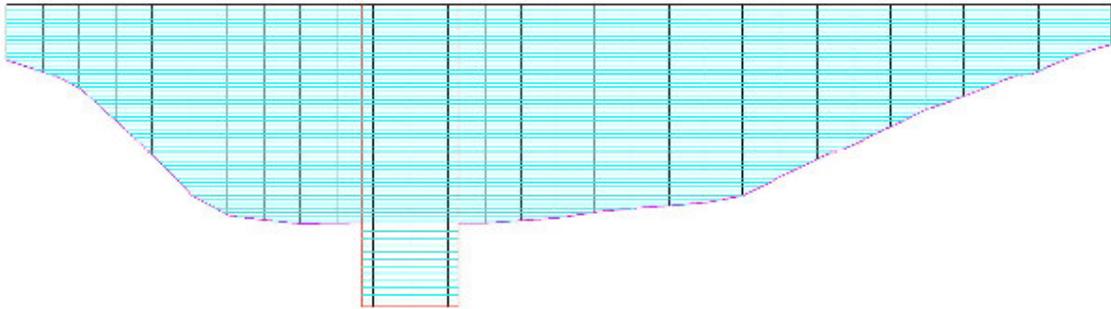


Figura 7: Perfil digitalizado da estação fluviométrica.

Nos resultados obtidos quando foi aplicada a equação da calha (altura x cota) para perfil completo, observou-se incoerência, como é mostrado na figura 8.

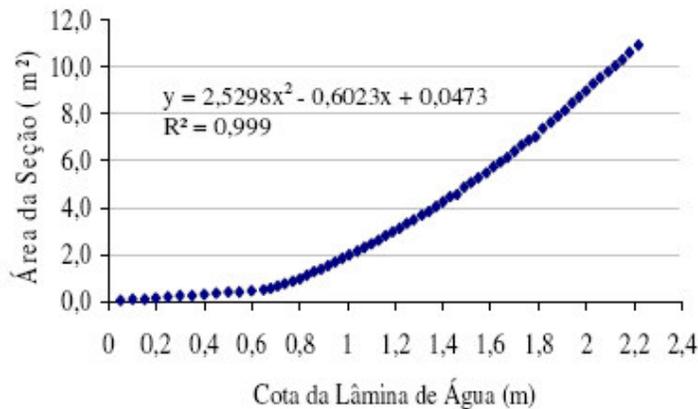


Figura 8: Cota da Lâmina de Água e Área da Seção Transversal.

Até a altura de 0,65 m, na calha Parshall, os valores da área foram subestimados. Com 0,25 m de lâmina de água, o valor obtido pela equação foi 3,5 vezes menor, embora o R^2 fosse na ordem de 0,999, o que mostra que os valores estimados necessitam ser comparados com os valores reais. Na figura 9 pode ser constatado o erro de estimativa dos valores de área para pequenos segmentos de altura na seção da calha Parshall, ocorridos na figura 8.

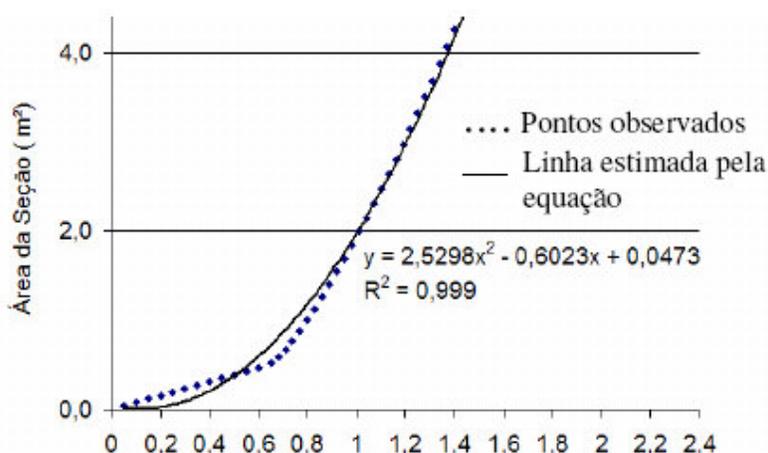


Figura 9: Escala ampliada da figura 8 relacionando a área da seção e cota da lâmina de água.

As novas regressões que estimam as áreas da seção transversal da calha Parshall e acima da calha são apresentadas, respectivamente nas figuras 10 e 11. A equação linear é aplicável até 0,65 m de altura de lâmina de água, na calha Parshall. Para estimar as áreas da seção acima da calha, utiliza-se a equação polinomial de segundo grau. Este procedimento permitiu a estimativa das áreas com maior precisão.

Aplicando os valores de velocidade e área da seção para cada altura fluviométrica na equação da continuidade [1] obteve-se as respectivas vazões apresentadas na tabela 3.

Tabela 3: Valores das alturas de lâmina de água, velocidades medidas na estação fluviométrica e respectivas vazões calculadas.

Altura da Lâmina de Água (m)	Velocidade (m.s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
0,75	1,262	1,03339
0,70	1,213	0,75889
0,68	1,241	0,68402
0,65	1,192	0,60713
0,62	1,156	0,56155
0,60	1,168	0,54903
0,55	1,235	0,53201
0,50	1,166	0,45649
0,48	1,128	0,42389
0,45	1,145	0,40329
0,43	0,818	0,27526
0,43	1,090	0,36679
0,43	1,052	0,35401

0,40	0,868	0,27163
0,40	0,885	0,27695
0,35	0,901	0,24657
0,35	0,849	0,23234
0,35	0,856	0,23425
0,34	0,890	0,23657
0,30	0,765	0,17930
0,30	0,810	0,18985
0,30	0,621	0,14555
0,30	0,835	0,19571
0,30	0,729	0,17086
0,30	0,571	0,13383
0,29	0,844	0,19119
0,28	0,608	0,13295
0,27	0,692	0,14588
0,27	0,802	0,16907
0,26	0,730	0,14816
0,25	0,685	0,13364
0,05	(Vertedor)	0,00450
0,03	(Vertedor)	0,00045

Na figura 10, observa-se que os valores se correlacionam de forma linear, isto é justificado pelo fato de que a calha Parshall de fundo plano tem dimensões de largura constante. Portanto, a equação que descreve o modelo matemático é de primeiro grau.

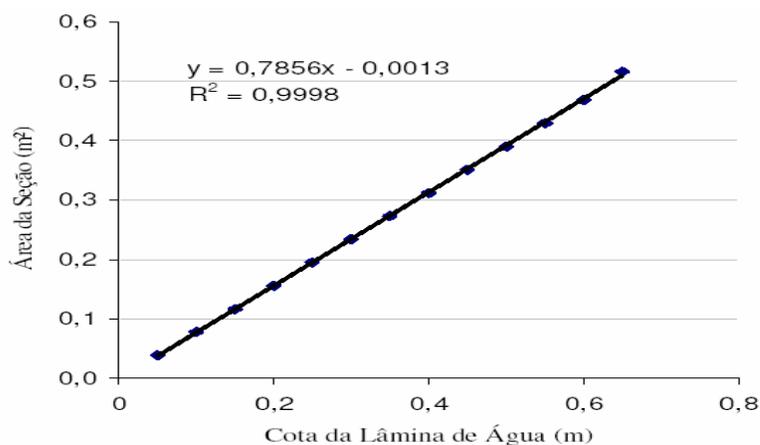


Figura 10: Área da seção transversal e cota da lâmina de água até 0,65 m.

A altura da lâmina de água foi relacionada por regressão polinomial com a área da seção, como é representado na figura 11. Como resultado, obteve-se uma equação do segundo grau com coeficiente de determinação $R^2 = 0,999$.

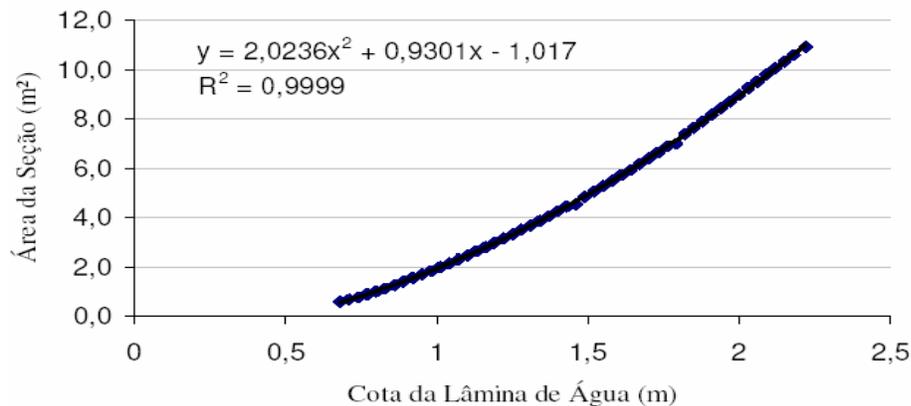


Figura 11: Área da seção transversal e cota da lâmina de água entre 0,65 m e 2,22 m.

A equação da curva chave do arroio da estação fluviométrica da bacia escola urbana, apresentada na figura 12, é descrita pela equação [3]. A relação polinomial existente possui elevado coeficiente de determinação, $R^2 = 0,968$, o que indica que ao introduzir na equação a variável altura da lâmina de água, 96% das variações dos valores de vazão são esclarecidos pelo modelo adotado. O coeficiente de correlação $r = 0,9838$ indica uma lata correlação positiva entre as variáveis.

$$Q = 1,3344 X^2 + 0,1835 X + 0,0015 \quad [3]$$

5 – CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que o trabalho foi realizado, conclui-se:

- O reduzido tempo de concentração da água na bacia urbana impossibilita a aquisição de maior número de dados de velocidade em períodos de cheia.
- O cálculo da área da seção fluviométrica em função da altura da lâmina de água utilizando a equação de regressão polinomial, com $R^2 = 0,999$, não apresenta resultados confiáveis no corpo da calha Parshall.
- A estimativa da área da seção transversal em função da altura da cota fluviométrica foi obtida por duas equações que proporcionam modelos fiéis com ótimo ajuste e

representatividade. Para o corpo da calha utilizou-se ($y = 0,7856x - 0,0013$) e para a seção superior ($y = 2,0236x^2 + 0,9301x - 1,017$).

- A curva chave do arroio até a altura de lâmina de água de 0,75 m, é descrita pela função quadrática $Q = 1,3344 X^2 + 0,1835 X + 0,0015$.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO NETO, J. M.; VILLELA, S. M. *Manual de Hidráulica*. Edgard Blücher, São Paulo, 1969. 669p.
- BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. *Normas para serviços de hidrometria*, São Paulo, 1977. 95 p.
- CICCO, V.; EMMERICH, W.; FUJIEDA, M. Determinação da curva-chave do vertedouro da bacia hidrográfica experimental “D” no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP. *Boletim Técnico do Instituto Florestal de São Paulo*, v.41, p 79-96, 1987.
- GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. *Hidrologia*. 2.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1988. 291 p.
- SANTOS, I. et al., *Hidrometria Aplicada*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, 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, p.1-26, 1987.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed Universidade/UFRGS; ABRH, 2000. 943 p.