

4- VAZÕES DOS CURSOS D'ÁGUA

4.1- Considerações iniciais

Nesse Capítulo serão abordadas as diferentes formas de estimativa das vazões mínimas, médias e máximas dos cursos d'água, dando um enfoque maior para as duas primeiras, que são as mais importantes para o Manejo dos Recursos Hídricos, no que diz respeito ao uso da água.

A avaliação das *vazões dos cursos d'água* geralmente não é uma tarefa fácil de ser executada. A aplicação pura e simples da equação de Manning $\left(Q = S \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot I^{1/2}\right)$, visando à determinação da vazão, esbarra no fato do coeficiente de rugosidade (n) ser de estimativa visual difícil, mesmo para pessoas treinadas. O popular método do flutuador também se mostra grosseiro, pois avalia a velocidade em apenas um ponto da seção, ponto esse sujeito ao efeito do vento e de correntes secundárias. Assim, o ideal é a avaliação das velocidades em vários pontos da seção (Figura 4.1), visando à obtenção de um valor médio.

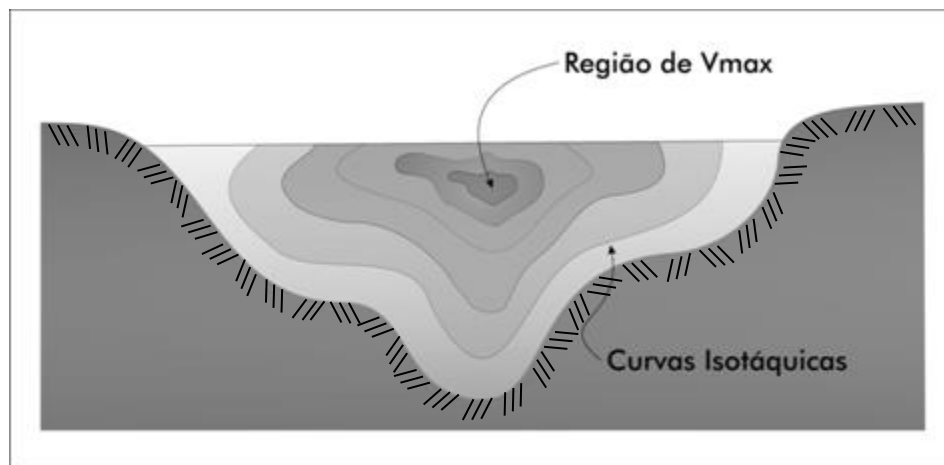


Figura 4.1- Ilustração das curvas de igual velocidade da água (isotáquicas) na seção de um córrego.

4.2- Medição da vazão com molinete hidrométrico

O *molinete* é uma hélice que é posicionada a certa profundidade do curso d'água (Figura 4.2) e que adquire uma rotação proporcional à velocidade da água. Após um determinado número de giros (10 ou 20, geralmente) o aparelho transmite um pulso

elétrico para um contador, que emite um sinal sonoro ou luminoso. Assim, cronometrando-se o tempo para 4 ou 5 sinais, é possível calcular a rotação da hélice.

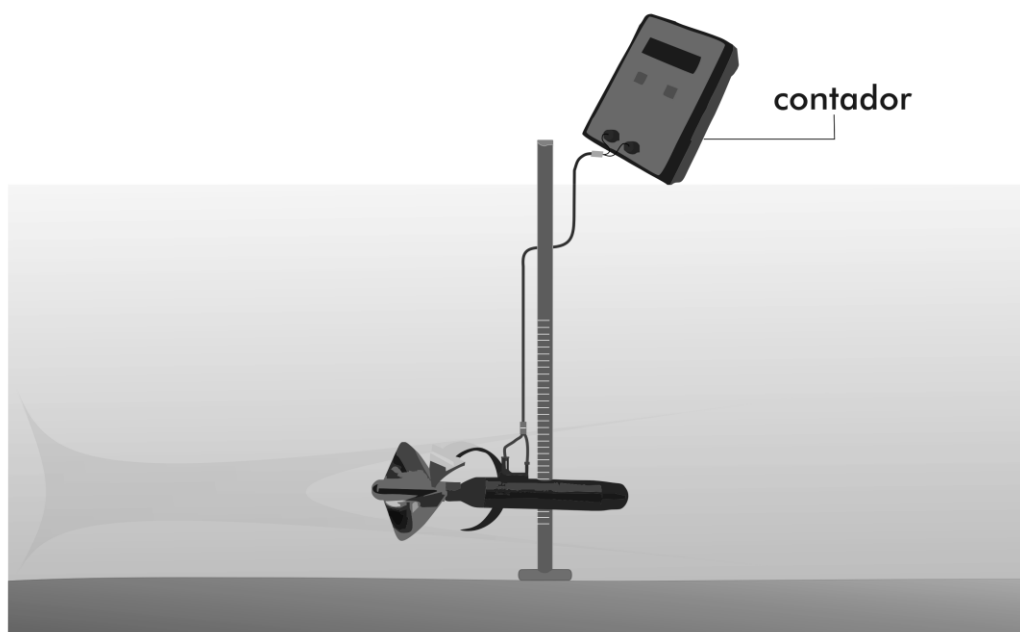


Figura 4.2- Esquema de um molinete hidrométrico, girando proporcionalmente à velocidade da água.

O fabricante do aparelho fornece ao usuário uma equação experimental, específica para o molinete em questão, que correlaciona a velocidade da água com a rotação da hélice; o IPT em São Paulo também calibra molinetes. Na maioria dos casos, essa equação é uma (ou duas) reta(s), de forma que é possível se obter a velocidade da água no ponto em que o aparelho foi instalado (Figura 4.3).

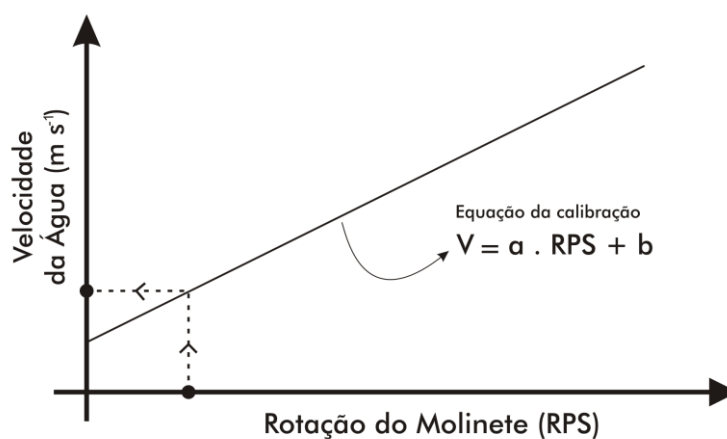


Figura 4.3- Equação de calibração do molinete, usada para transformar a rotação medida com a hélice em velocidade pontual da água.

Na Figura 4.4 estão ilustrados por um (x) os pontos de instalação do molinete em uma seção de um rio. A seção é dividida em uma série de sub-seções (no mínimo 5 para riachos, e maior que 10 para rios maiores) e realiza-se de 8 a 12 medições de velocidade em cada sub-seção, obtendo-se a velocidade média (V_m) para cada uma delas. As vazões, por sub-seção, serão dadas por:

$$Q_1 = \frac{(0 + h_1)}{2} \times \ell_1 \times V_{m1}; \quad Q_2 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} \times \ell_2 \times V_{m2}; \quad Q_3 = \frac{(h_2 + h_3)}{2} \times \ell_3 \times V_{m3}; \quad \dots \quad \text{equação 4.1}$$

Dessa forma, a vazão do curso d'água será dada pelo somatório das vazões parciais, ou seja: $Q = \sum Q_i$.

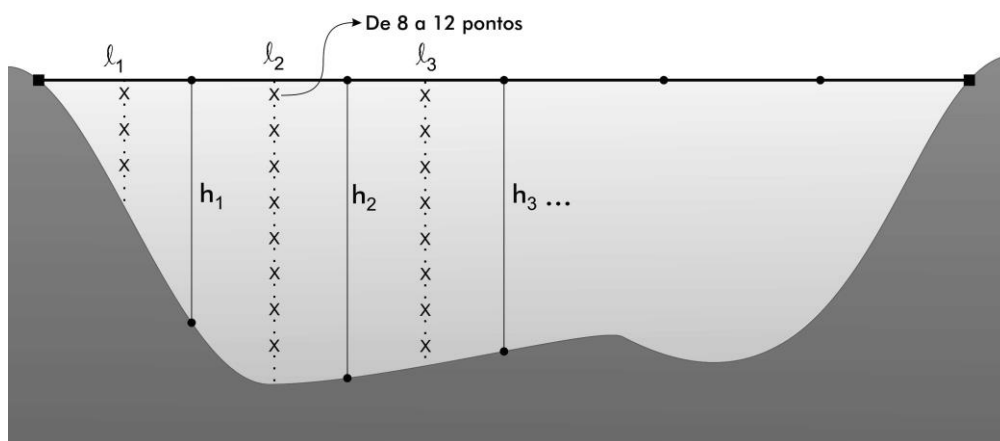


Figura 4.4- Pontos de medição da velocidade com um molinete hidrométrico, marcados com (x)

As profundidades (h) podem ser medidas com uma mira ou com uma trena com lastro. Quando se deseja uma medição mais rápida, pode-se adotar as profundidades de medição sugeridas na Tabela 4.1, apresentada por Pruski et al. (2006).

Tabela 4.1- Profundidades de medição sugeridas para o uso do molinete hidrométrico.

Profundidade (m)	Posição do molinete na vertical em relação à profundidade (P)
0,15 a 0,60	0,6P
0,60 a 1,20	0,2P e 0,8P
1,20 a 2,00	0,2P; 0,6P e 0,8P
2,00 a 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P e 0,8P
Acima de 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P; 0,8P e F

S se refere à leitura feita a 0,10 m da superfície e F à leitura feita no fundo e condicionada ao comprimento da haste utilizada.

Quando se usam as profundidades de medição sugeridas na Tabela 4.1 em uma dada vertical, a velocidade média (V_m) pode ser obtida por uma das fórmulas apresentadas na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Expressões para o cálculo da velocidade média em uma dada vertical.

Condição	Fórmula
Ponto único	$V_m = V_{(0,6P)}$
Dois pontos	$V_m = \frac{V_{(0,2P)} + V_{(0,8P)}}{2}$
Três pontos	$V_m = \frac{V_{(0,2P)} + 2V_{(0,6P)} + V_{(0,8P)}}{4}$

Para situações que envolvam mais de três medições ao longo de uma vertical, a velocidade média nesta vertical pode ser obtida pela equação 4.2.

$$V_m = \frac{V_1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} V_i + V_n}{2(n-1)} \quad \text{equação 4.2}$$

4.3- Medidores de efeito Doppler (ADCP ou ADP)

O Perfilador Acústico de Correntes pelo Efeito Doppler (ADCP ou ADP) é um sonar que tenta produzir um registro das atuais velocidades da água (correntes) para uma faixa de profundidades. É constituído de materiais cerâmicos e de vários componentes, entre eles: transdutores, um amplificador, um receptor e vários componentes de computador para processar e salvar as informações coletadas. É um equipamento bastante caro, e tem sido usado pela ANA para a medição da vazão em rios amazônicos de grande porte; seu desempenho não é bom em rios pequenos. Além

de fornecer a velocidade da corrente, realiza a batimetria da seção e mede a quantidade de sedimentos na água.

Utiliza o princípio de alteração Doppler, o qual estabelece que se uma fonte de som está se movendo em relação ao receptor, a frequência do som para o receptor é alterada, como está expresso pela equação 4.3.

$$F_d = 2 * F_s * (V/c) \quad \text{equação 4.3}$$

Em que: **V** é a velocidade relativa entre a origem e o receptor, **c** é a velocidade do som, **F_d** é a mudança na frequência recebida no receptor (efeito de alteração de Doppler) e **F_s** é a frequência emitida.

Os transdutores geram um pulso de som no qual a energia se propaga em formato cônico (de, por exemplo, 25° de abertura). Com a passagem do som pela água, parte dele é refletido em todas as direções por partículas em suspensão; outra parte do som é refletido de volta ao transdutor onde o receptor e os processadores eletrônicos medem a frequência recebida e o efeito de alteração de Doppler. Posteriormente, os processadores eletrônicos quantificam a velocidade da água ao longo do eixo de propagação do som (DNAEE, 1984).

Para produzir o perfil de velocidades de um curso d'água, o ADCP faz leituras do retorno do sinal em diferentes intervalos de tempo. Para saber qual é a profundidade total do curso d'água é necessário apenas identificar o sinal de retorno de maior intensidade. Este perfil de velocidades pode ser configurado para qualquer intervalo, por exemplo 1m ou 10m, sendo que, geralmente, este tipo de sensor tem a capacidade de atingir até 100m de profundidade, dependendo de sua configuração (de fabrica).

4.4- Medida do nível d'água

Como visto anteriormente, a medição direta da vazão é tarefa trabalhosa, cara e inviável de ser realizada todos os dias em uma rede de postos fluviométricos. Entretanto, como existe uma correlação entre o nível d'água de um rio e sua vazão, estabelece-se uma rotina de medição diária do nível d'água, que posteriormente será transformado em vazão.

4.4.1- Régua linimétrica

Rios de porte de médio a grande geralmente drenam bacias de tempo de concentração longo. Dessa forma, para se caracterizar a variação do nível d'água nesses rios, bastam 2 medições diárias. No Brasil, essas medições são realizadas às 7:00 e às 17:00 horas, por meio da leitura de uma *régua linimétrica* instalada na margem (Figura 4.5).

Essas réguas, com escala em cm, possuem 1 ou 2 metros de comprimento e são feitas de madeira laqueada ou aço inoxidável. Quando a variação do nível ultrapassa 1 ou 2 metros, utilizam-se várias réguas em série instaladas no barranco (Figura 4.6). É sempre conveniente que o zero da régua esteja relacionado a um RN local para que os valores de nível d'água possam ser utilizados em mapas planialtimétricos ou para que uma nova régua possa ser instalada a contento, em caso de perda devido à correnteza.



Figura 4.5- Régua linimétrica instalada em uma seção de medição.

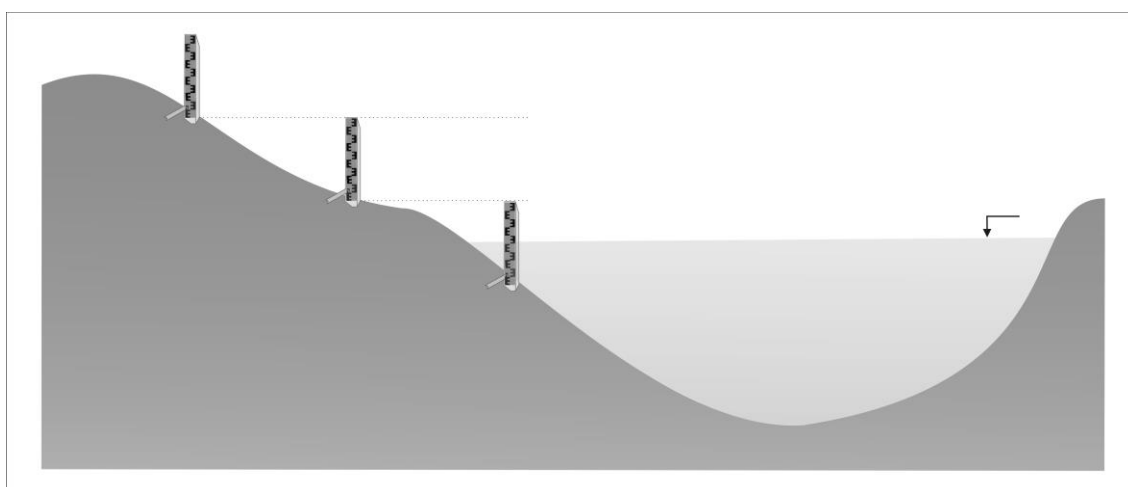


Figura 4.6- Réguas linimétricas instaladas em série.

4.4.2- Linígrafos

Bacias pequenas, principalmente as urbanizadas ou com declividade média forte, possuem o tempo de concentração pequeno. Desta forma, duas medições diárias não são suficientes para caracterizar com precisão as ondas de cheia e de recessão do rio. Nesse caso, é indispensável o uso de um aparelho que grave as oscilações do nível d'água ao longo do tempo; esse aparelho é o *linígrafo*.

Existem, basicamente, três tipos de linígrafos: os de bóia, os pneumáticos e os de célula de pressão; na Figura 4.7 está esquematizado um linígrafo de bóia.

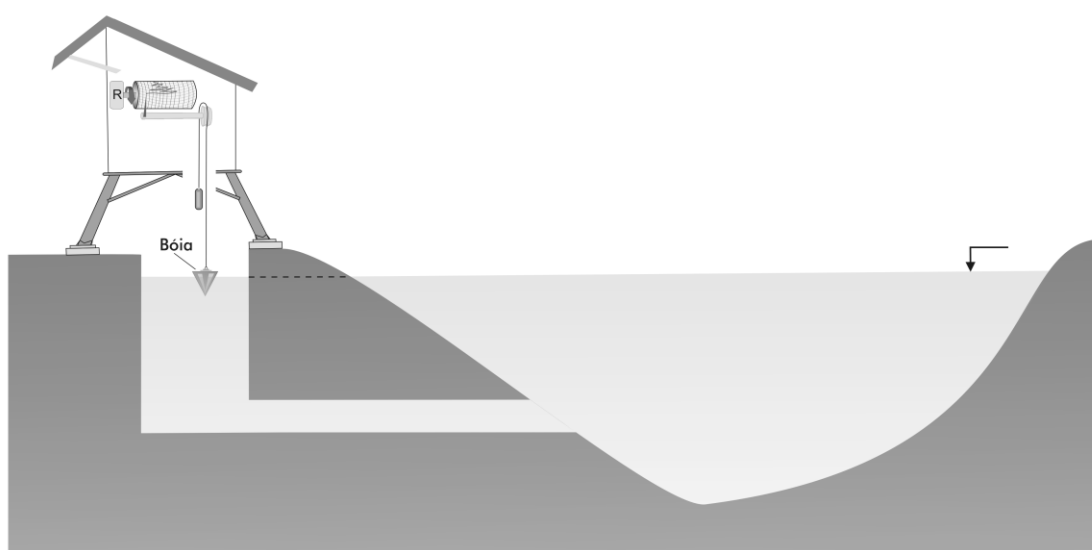


Figura 4.7- Esquema de um linígrafo de bóia de eixo horizontal

O *linígrafo de bóia* transforma as oscilações verticais do nível da água em um movimento de rotação de uma haste ranhurada, por meio de uma polia. Esta haste, por sua vez, aciona o movimento de translação de uma pena que grava o nível d'água no linígrama; este é colocado sobre um tambor, que se movimenta por meio de um instrumento de relojoaria (R).

O *linígrafo pneumático* é mais apropriado para barrancas de rio suaves, nas quais seja difícil a construção de um poço tranquilizador. Neste caso, uma mangueira pressurizada se estende até o meio do rio, e lá permanece, borbulhando ar ou nitrogênio. A pressão hidrostática proporcionada pela carga hidráulica do rio é lida por um manômetro e grafada em um linígrama.

O *linígrafo de célula de pressão* possui um diafragma como elemento sensível, de forma que é capaz de medir a carga hidráulica (ou a pressão absoluta) sobre o ponto de instalação. Subtraindo-se a profundidade do diafragma do linígrafo da carga hidráulica sobre o diafragma, obtém-se a profundidade da água desejada.

Estes três tipos de aparelho têm autonomia variada, para diferentes números de dias, e podem armazenar os resultados em papel, data-logger ou transmiti-los via rádio. Em SP, os linígrafos instalados pelo DAEE geralmente tem autonomia de 6 meses.

4.5- Curvas-chave

As *curvas-chave* relacionam a vazão medida diretamente no curso d'água com a altura do nível d'água. Elas são obtidas no início da operação do posto fluviométrico, realizando-se uma série de visitas ao posto, quando se mede a vazão diretamente com molinete e o respectivo nível da água. Geralmente se considera que são necessários um mínimo de 6 ou 7 pontos para se elaborar uma curva-chave. As curvas podem ser expressas na forma de gráficos, equações (Figura 4.8) ou tabelas.

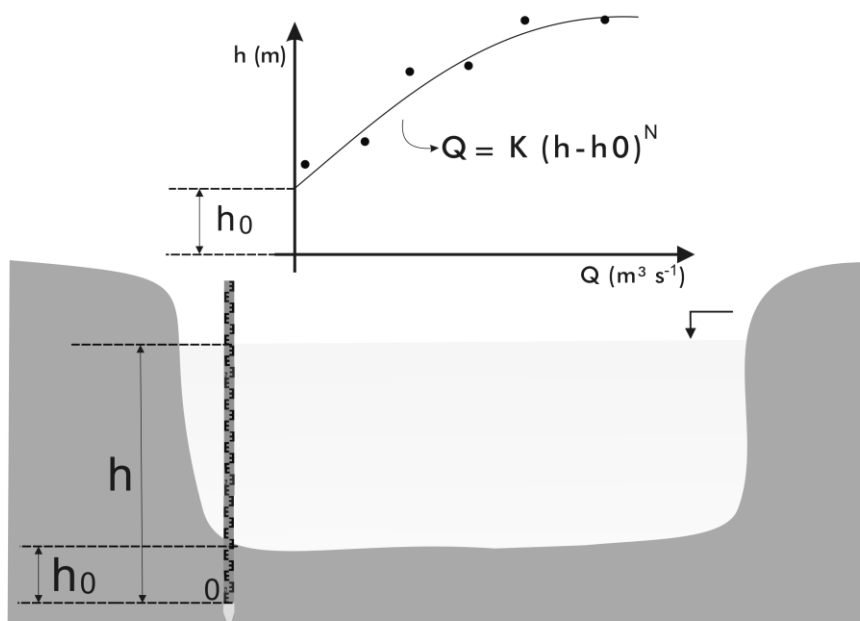


Figura 4.8- Curva-chave ajustada a uma equação do tipo potência

Dentre as equações mais usadas para o ajuste (potencial, polinomial e logarítmica) a potencial é uma das mais utilizadas. Para realizar o ajuste, arbitra-se um valor para h_0 e obtém-se K e N por regressão do tipo potência. Em seguida arbitra-se

outro valor para h_0 , e assim sucessivamente, até que se possa escolher aquele ajuste que forneceu o maior coeficiente de determinação (R^2).

Uma vez determinada a curva-chave de um posto, cessam-se as visitas da equipe de hidrometria e inicia-se a operação independente do posto: os valores de nível (h), lidos 2 vezes ao dia, são transformados em vazão pela equação de ajuste.

Com o passar dos anos (em média de 5 a 6) pode ocorrer erosão ou sedimentação na calha, sendo necessário, portanto, a obtenção de uma nova curva que será utilizada por mais um período no futuro. Assim, os elementos fundamentais para o funcionamento de um *posto fluviométrico* são: seção de medição, régua linimétrica e curva-chave.

No Estado de SP, existem redes de postos fluviométricos mantidas por diferentes entidades, como a ANA(Hidroweb), o DAEE/CTH, a ANEEL e por algumas empresas de saneamento como a SABESP, por exemplo.

4.6- Características desejáveis para a localização de um posto fluviométrico

a- Evitar curvas: nas curvas do rio, o nível da água na parte externa da curva aumenta ligeiramente em relação ao nível da parte interna, diminuindo o R^2 da curva-chave.

b- Preferir seções estreitas e profundas: para um erro de leitura vertical Δh , as seções largas e rasas acarretam um maior erro na respectiva vazão do que as estreitas e profundas.

c- Preferir seções sem extravasamento: é comum se extrapolar a parte superior da curva chave para a obtenção de vazões de cheia (utiliza-se um método baseado na equação de Chezy para tal); se o rio extravasa fora da calha, a extrapolação conterà um erro grande, pois houve uma modificação do formato da calha que não foi prevista pela curva.

d- Evitar corredeiras: os molinetes comuns operam em uma faixa de velocidade de 0,30 à 1,20 m/s. A presença de corredeiras exige métodos mais complexos de medição.

e- Evitar zonas de remanso: posições sujeitas a remanso, como trechos a montante de barragens ou a montante de entrada de outros rios no principal, podem ter uma variação de nível mesmo com a vazão mantida constante, o que conduz a um erro.

4.7- Vazões de interesse hidrológico e seus métodos de determinação

As principais vazões de interesse hidrológico são *as máximas, as mínimas e as médias*. Conforme o tamanho da série de dados medidos de vazão, o DAEE-SP recomenda diferentes procedimentos de obtenção dessas vazões:

4.7.1- Vazão máxima

É fundamental para o dimensionamento de estruturas *de controle de águas* naturais como travessias (bueiros, aduelas e pontilhões), vertedores, galerias de águas pluviais, terraços agrícolas, entre outras. O estudo das vazões máximas na região SE do Brasil utiliza o ano hidrológico, que vai de 1 de outubro de um ano a 30 de setembro do ano posterior, de modo a englobar o período chuvoso em um único ano.

- a) Se o número de dados da série > 25 anos \rightarrow análise estatística dos dados medidos.
- b) Se o número de dados da série > 10 e < 25 anos \rightarrow método Gradex (método semi-empírico idealizado na França).
- c) Se o número de dados da série > 3 e < 10 anos \rightarrow método baseado no Hidrograma Unitário.
- d) Se o número de dados da série < 3 anos ou inexistente \rightarrow método chuva-vazão não calibrado (Ex: Racional, I-Pai-Wu, Mac Math, Hidrógrafas Unitárias Sintéticas, etc).
- e) Evitar métodos totalmente empíricos (Ex: Meyer, Cook, Creager, Iskowsky, etc)

4.7.2- Vazão mínima

É importante para os *projetos de captação a fio d'água*, pois segundo a Lei Federal 9433(1997), as captações só são legais após serem providenciadas as outorgas, que garantem ao usuário o uso de uma fração da vazão mínima de referência. O estudo das mínimas na região SE utiliza o ano civil, de modo a englobar a estação seca em um único ano.

As principais vazões mínimas de referência são a Q7,10, a Q95 e a Q90, que são conceituadas a seguir:

Q7,10 \rightarrow é a vazão média, mínima de 7 dias consecutivos, com um período de retorno de 10 anos (é a vazão mínima de referência usada nos rios estaduais de SP, MG e ES, por exemplo).

Q95→ é a vazão que se espera que ocorra maior ou igual em 95% do tempo (é a vazão mínima de referência dos rios federais). É, também, muito usada pelo setor hidrelétrico para o dimensionamento de turbinas. No Estado de São Paulo, as Q95 representam, em média, 50% a mais de vazão que as Q7,10.

Q90→ é a vazão que se espera que ocorra maior ou igual em 90% do tempo (é a vazão mínima de referência utilizada nos rios de alguns Estados do NE)

Exemplo de determinação direta da Q95 e Q90

A tabela a seguir apresenta 10 anos da série histórica de vazões médias mensais do rio Piracicaba, medidas no posto de Artemis - SP. Com o objetivo de desenhar a curva de permanência, e estimar Q90, Q95 e a vazão média específica, proceder da seguinte forma:

- 1) Elaborar uma coluna com os meses/anos em uma planilha eletrônica;
- 2) Digitar os 120 dados de vazão em uma segunda coluna;
- 3) Copiar os dados de vazão para uma terceira coluna e colocá-los em ordem decrescente;
- 4) Elaborar uma quarta coluna com os números de ordem m (de 1 a 120);
- 5) Calcular as respectivas probabilidades ($P = \frac{m}{n + 1} * 100$) em uma quinta coluna, em que $n=120$;
- 6) Plotar as vazões da terceira coluna (eixo Y) em função das probabilidades da quinta coluna (eixo X) num gráfico de dispersão;
- 7) Achar o valor de Q90 e Q95 interpolando linearmente os valores na terceira e quinta colunas.
- 8) Dividir a média dos 120 dados pela área de drenagem do posto para achar a vazão média específica de longo período (expressá-la em $L / s / km^2$).

A curva de permanência das vazões é uma curva que indica as vazões medidas com o tempo de ocorrência \geq . Geralmente ela é feita com dados médios mensais, como no exemplo que se segue. Entretanto, pode também ser feita com dados diários de vazão, o que a torna mais precisa. A vazão diária nos postos do DAEE em SP é dada pela seguinte expressão:

$$Q_{\text{diária}} = \frac{Q_{7\text{horas}} + Q_{17\text{horas}}}{2}$$

equação 4.4

Em que:

Qdiária – vazão diária, m³/s;**Q7horas** – vazão medida às 7 horas da manhã, m³/s;**Q17horas** – vazão medida às 17 horas, m³/s.**Posto 4D-007**Rio Piracicaba. Descarga média mensal (valores em m³ s⁻¹)

Nome do posto: Artemis

Código do Posto: 4D-007, Piracema: #9□

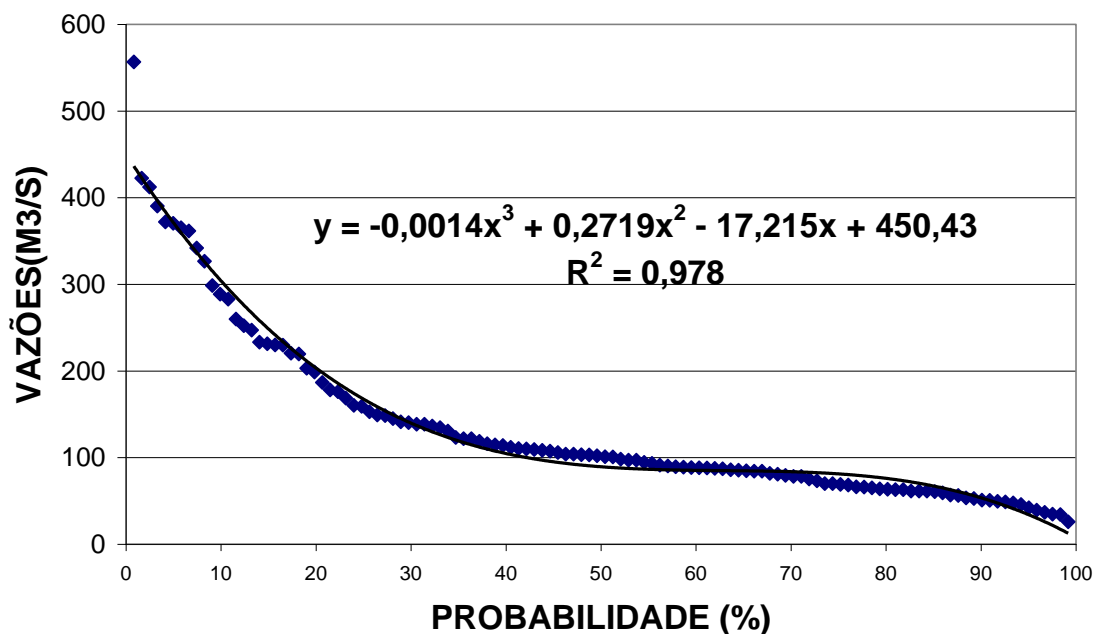
Latitude 22□ 41' Sul; Longitude 47□ 47' Oeste

Área de Drenagem: 11040 km²

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
1944	136,40	141,41	247,27	113,94	79,52	63,89	56,79	42,12	36,76	93,40	107,54	121,81
1945	84,69	231,51	111,95	85,50	61,28	138,53	104,07	61,47	51,06	39,41	87,16	63,59
1946	372,06	298,61	233,39	159,16	103,42	98,28	101,04	66,02	50,73	47,75	140,50	160,42
1947	288,68	390,30	422,50	198,88	148,53	118,93	105,97	90,46	110,39	78,27	73,17	87,50
1948	282,83	361,66	326,74	203,06	145,00	116,12	94,47	84,43	63,09	114,61	100,77	252,31
1949	138,57	230,14	168,70	134,68	91,32	78,25	59,36	34,85	25,99	62,98	88,04	88,58
1950	260,02	556,77	412,26	229,90	152,97	123,19	103,97	75,24	66,28	34,32	56,33	220,65
1951	370,42	365,29	341,82	186,67	121,96	103,12	88,21	81,82	69,87	88,90	110,06	176,11
1952	156,30	305,36	292,44	153,50	99,76	121,51	85,69	70,34	67,84	68,45	108,44	130,57
1953	97,00	84,34	80,91	102,14	69,11	65,18	53,58	49,57	48,99	70,43	86,92	73,40

Resposta:-Qmédia = 135,2 m³/s-Qmédia específica = 12,2 L / s / Km²-Q90 = 51,0 m³/s-Q95 = 42,1 m³/s

Curva de Permanência



Obs: ao invés de ajustar a Curva de Permanência a um modelo cúbico, como mostra a figura anterior, para um maior rigor, recomenda-se o ajuste à distribuição de Weibull no ramo à direita (mínimas), e à distribuição de Log Pearson III ou Gumbel no ramo à esquerda (máximos). Esses ajustes serão apresentados no Capítulo 7 deste texto.

Segundo o DAEE-SP, a sugestão quanto ao método de determinação das vazões mínimas é a seguinte:

- a) Se o número de anos da série histórica > 3 → análise estatística de evento extremo;
- b) Se o número de anos da série histórica < 3 ou for inexistente → método de regionalização das vazões.

4.7.3- Vazão média

A *vazão média de longo período* é importante pois fornece o potencial hídrico superficial total da bacia.

Para a sua determinação, as recomendações do DAEE-SP são as seguintes:

- a) Se a série de dados medidos > 3 anos → tirar a média dos valores diários de vazão.
- b) Se a série de dados medidos for < 3 anos ou inexistente → usar um método de regionalização das vazões.

A vazão média fornece uma segunda informação muito importante, que pode ser entendida visualizando-se o gráfico na Figura 4.9:

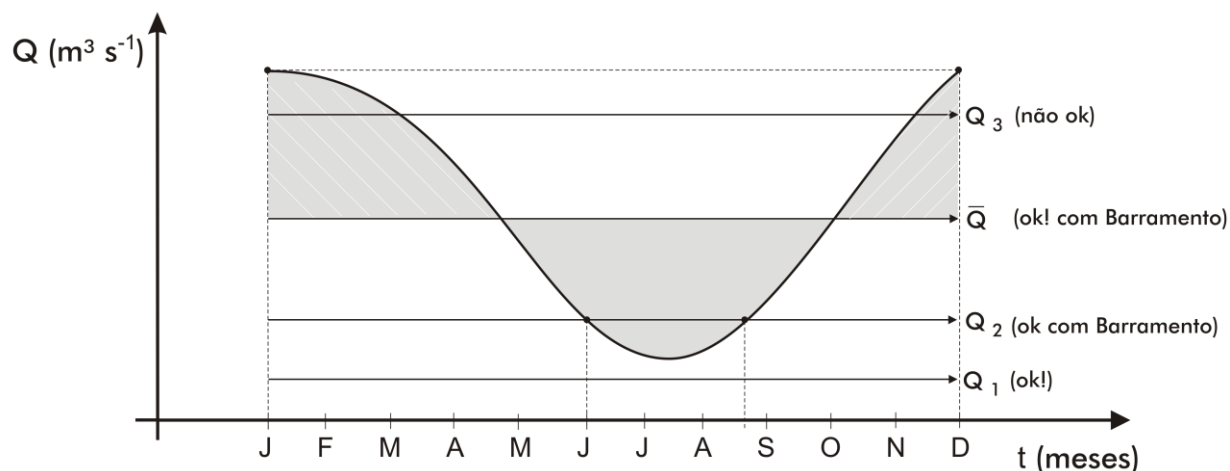


Figura 4.9- Contraste entre um fluviograma de um rio e as vazões de demanda Q_1 , Q_2 , Q_3 e $Q_{\text{média}}$.

A curva apresentada na Figura 4.9 está representando a variação das vazões de um rio ao longo de um ano, e as retas representam vazões de demanda constantes.

A vazão de demanda Q_1 pode ser captada constantemente ao longo do ano, pois é menor do que a menor vazão do rio.

A vazão de demanda Q_2 pode ser captada constantemente ao longo do ano, desde que se construa um reservatório, pois de Junho a meados de Agosto há um déficit de água. Esse reservatório pode ser enchido com a água que sobra do período chuvoso.

A vazão Q_3 não pode ser captada continuamente, nem mesmo com a construção de um reservatório, pois não há sobras no período chuvoso suficientes para enchê-lo.

A vazão $Q_{\text{média}}$ de longo período representa, então, teoricamente, a maior vazão possível de ser extraída com barramento (volume correspondente a área acima de $Q_{\text{média}}$ igual ao volume correspondente a área a baixo de $Q_{\text{média}}$). Na prática, como será visto posteriormente, para o barramento não ficar excessivamente grande e caro, esse valor varia de 60% a 80% da $Q_{\text{média}}$

4.8- Regionalização das variáveis hidrológicas

O termo “regionalizar” em Hidrologia tem o significado de “transferir dados”; ou seja, visando um melhor aproveitamento da malha hidrométrica, transferem-se dados de pontos onde há um posto fluviométrico instalado para pontos onde não há (RAO e

SRINIVAS, 2006; SADRI e BURN, 2011). A *regionalização*, portanto, consiste de uma série de técnicas e ferramentas que permitem explorar/extrapolar ao máximo as informações existentes nos postos monitorados

Esse processo pode ser feito de várias formas. Nesse texto serão abordados dois desses métodos.

4.8.1- Método baseado na vazão específica

É o mais simples dos métodos; geralmente é aplicado pelo próprio engenheiro que está realizando o estudo hidrológico da obra. Recomenda-se que as bacias envolvidas não sejam 3 vezes maior, uma do que a outra. Em sua aplicação, podem-se estabelecer 4 casos:

CASO 1: a seção de interesse está localizada a montante de um posto com vazão conhecida (Figura 4.10).

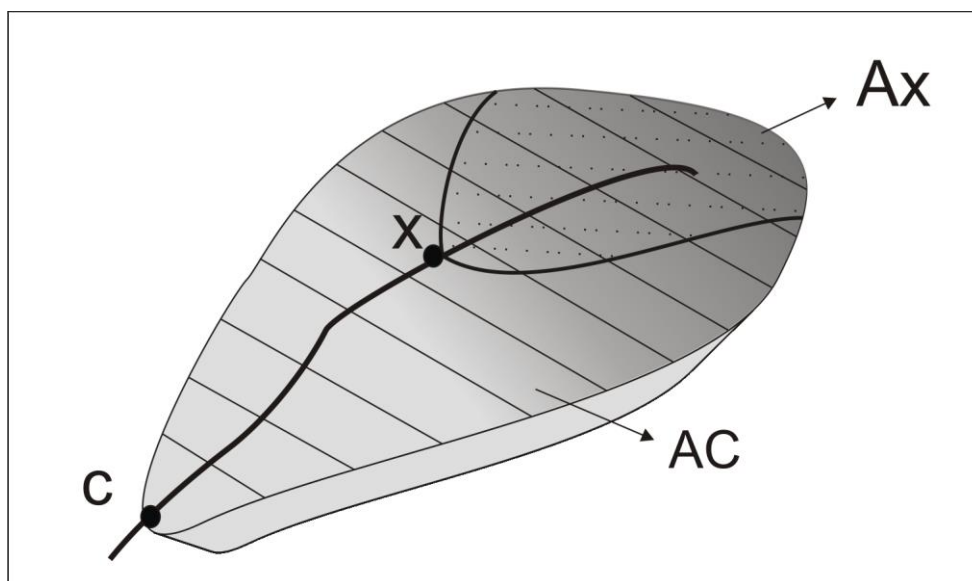


Figura 4.10- Transferência da vazão medida em C para o ponto x.

A *vazão específica* (q_c) será calculada por:

$$q_c \text{ (L/s/Km}^2\text{)} = \frac{Q_c \text{ (L/s)}}{A_c \text{ (Km}^2\text{)}}$$

A vazão desejada (Q_x) será dada por:

$$Q_x \text{ (L/s)} = q_c \text{ (L/s/Km}^2\text{)} \times A_x \text{ (Km}^2\text{)} \quad \therefore \quad Q_x = \frac{Q_c}{A_c} \cdot A_x \quad \text{equação 4.5}$$

CASO 2: a seção de interesse está localizada entre 2 pontos de vazão conhecida (Figura 4.11).

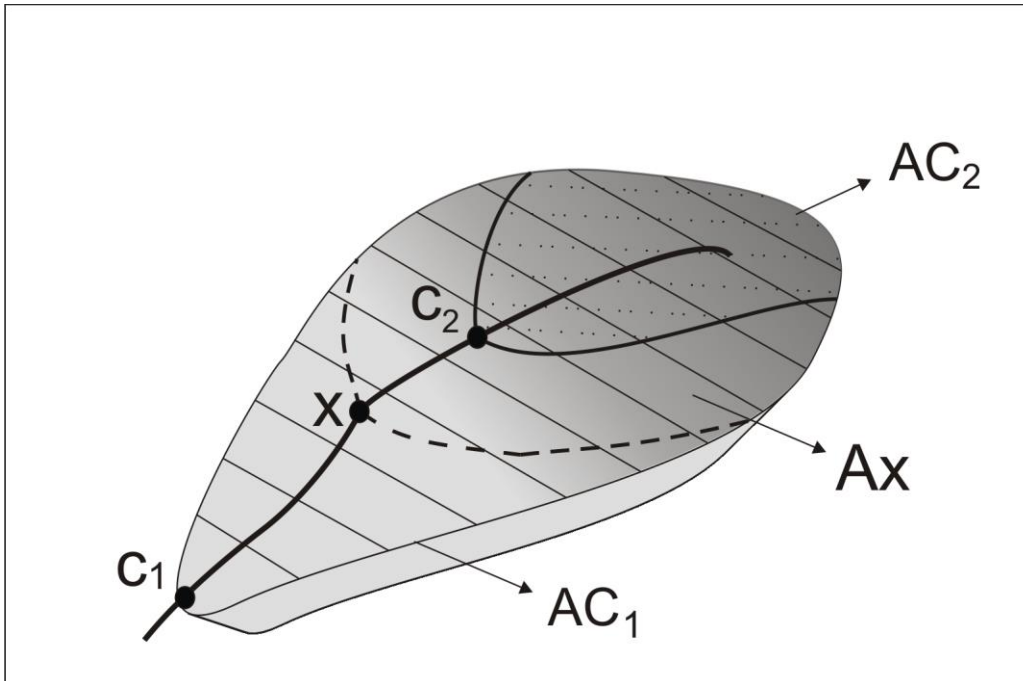


Figura 4.11- Estimativa da vazão em x em função das vazões conhecidas em 1 e em 2.

Utilizando raciocínio semelhante ao usado no primeiro caso, obtém-se:

$$Q_x = Q_{c2} + \frac{(Q_{c1} - Q_{c2})}{(A_{c1} - A_{c2})} (A_x - A_{c2}) \quad \text{equação 4.6}$$

CASO 3: seção de interesse localizada a jusante de um posto de vazão conhecida (Figura 4.12).

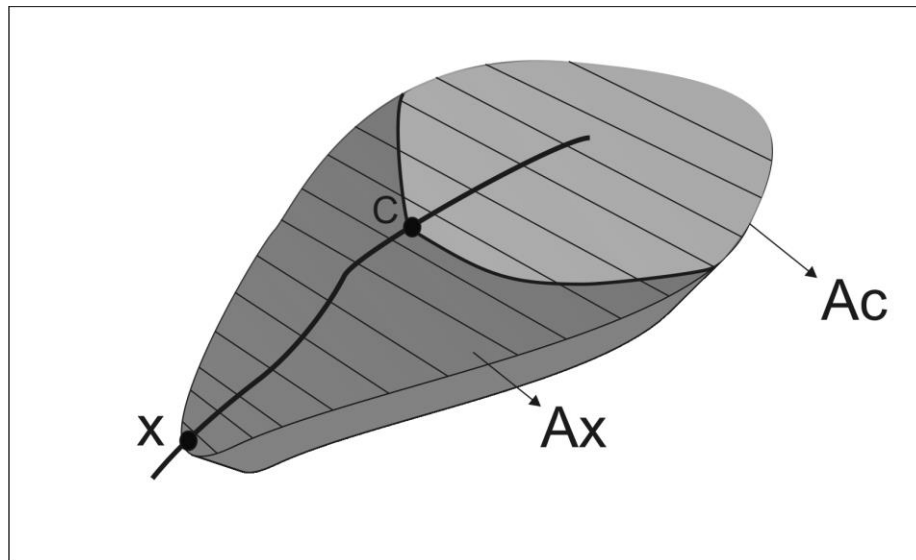


Figura 4.12- Transferência da vazão conhecida do ponto C para o ponto desconhecido x.

Nesse caso utiliza-se a mesma expressão apresentada no CASO 1, ou seja:

$$Q_x = A_x \cdot \frac{Q_c}{A_c} \quad \text{equação 4.7}$$

CASO 4: a seção de interesse está situada em um canal afluente, cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior (Figura 4.13).

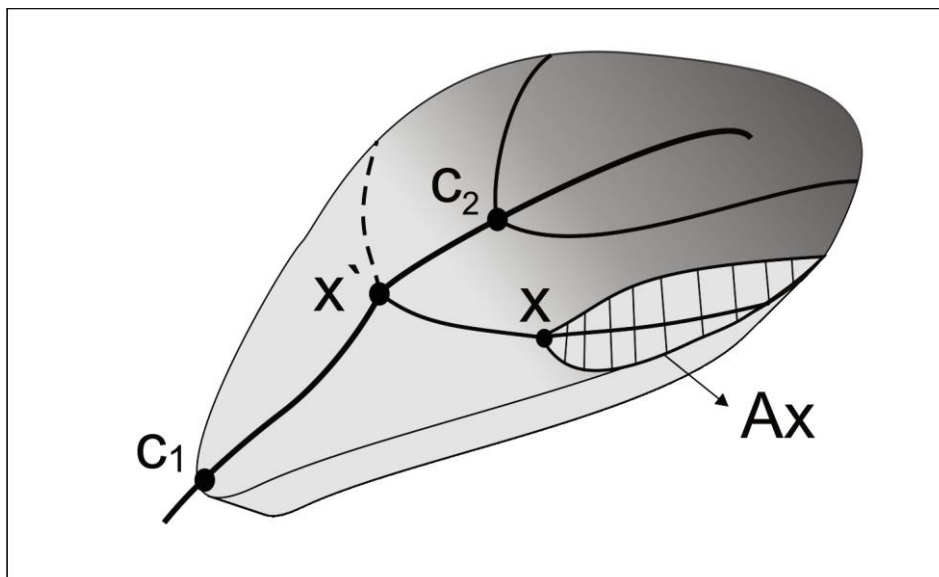


Figura 4.13- Transferência das vazões dos pontos em que ela é conhecida (1 e 2) para o ponto x', e em seguida, de x' para o ponto de interesse x.

Aplica-se, inicialmente a expressão do CASO 2 para obter-se a vazão em x' e, na sequência, a expressão do CASO 1 para obter-se a vazão em x .

$$Q_{x'} = Q_{c2} + \frac{(Ax' - Ac2)}{(Ac1 - Ac2)}(Q_{c1} - Q_{c2}) \quad \text{equação 4.8}$$

$$Q_x = Q_{x'} \cdot \frac{Ax}{Ax'} \quad \text{equação 4.9}$$

4.8.2- Método baseado na regressão múltipla

Esse método geralmente é desenvolvido por instituições de pesquisa e por universidades, devido ao fato de ser bem mais trabalhoso que o anterior, tendo em vista que é aplicado para grandes regiões (TUCCI, 2002). Como exemplo desse método será apresentado, nesse material, a *Regionalização das Variáveis Hidrológicas para o Estado de São Paulo* (LIAZI et al., 1988). Para executar esse trabalho foram utilizados dados de 444 postos pluviométricos e 307 postos fluviométricos do Estado de São Paulo. A experiência do DAEE com o cálculo de vazões específicas em diferentes localidades do Estado permitiu que o mesmo fosse dividido em 21 regiões hidrologicamente semelhantes, como é apresentado na Figura 4.15.

Explicando de uma forma bastante resumida, na Figura 4.14 está esquematizada uma dessas regiões, com 4 postos fluviométricos e vários postos pluviométricos. Inicialmente calcula-se a vazão média de longo período para cada um dos 4 postos e divide-se pela área de contribuição de cada posto, obtendo-se 4 vazões médias específicas ($Q_{m\text{ específica}} = \frac{Q_m}{A}$).

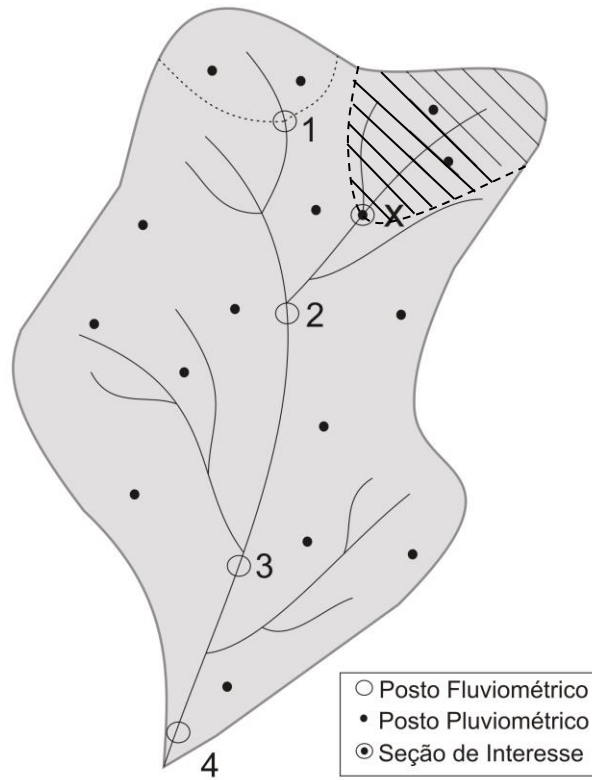


Figura 4.14- Região hidrologicamente semelhante com 4 postos fluviométricos e vários postos pluviométricos.

Em seguida, procura-se correlacionar essas vazões médias específicas com variáveis fisiográficas que possam explicá-las, ou seja:

Qm específica 1: P1, Dd1, L1, Ieq1, Kc1, ...

Qm específica 2: P2, Dd2, L2, Ieq2, Kc2, ...

.

.

Em que:

Q m específica – vazão média específica, L/s/Km²;

P – precipitação total anual, mm/ano;

Dd – densidade de drenagem, Km/Km²;

L – comprimento do talvegue, Km;

Ieq – declividade média equivalente do talvegue, m/Km; e

Kc – coeficiente de compacidade, adimensional.

Na sequência, faz-se uma *regressão múltipla*, por meio da qual se procura correlacionar a vazão média específica com as variáveis citadas a cima, ou seja:

$$Q \text{ média específica} = f (P, Dd, L, Ieq, Kc, \dots) \quad \text{equação 4.10}$$

Existem vários tipos de modelo de equações que podem ser utilizados nessa etapa. A seguir são citados alguns.

Modelos de regressão múltipla mais usados para regionalização

1) Modelo Linear

$$Q_{mesp} = a + b.P + c.Dd + d.L + e.Ieq + f.Kc + \dots \quad \text{equação 4.11}$$

2) Modelo Potencial

$$Q_{mesp} = a.P^b .Dd^c .L^d .Ieq^e .Kc^f \dots \quad \text{equação 4.12}$$

3) Modelo Exponencial

$$Q_{mesp} = e^{(a+b.P+c.Dd+d.L+e.Ieq+f.Kc\dots)} \quad \text{equação 4.13}$$

4) Modelo Logarítmico

$$Q_{mesp} = a + b.LnP + c.LnDd + d.LnL + e.LnIeq + f.LnKc + \dots \quad \text{equação 4.14}$$

5) Modelo Recíproco

$$Q_{mesp} = (a + b.P + c.Dd + d.L + e.Ieq + f.Kc + \dots)^{-1} \quad \text{equação 4.15}$$

No caso da Regionalização de SP, optou-se pelo modelo linear (4.11) e realizou-se uma *análise estatística* para se verificar qual dos coeficientes utilizados no modelo era, realmente, importante (significativo), obtendo-se:

$$Q_{mesp} = a^* + b^* .P + c^{ns} .Dd + d^{ns} .L + e^{ns} .Ieq + f^{ns} .Kc + \dots \quad \text{equação 4.16}$$

Em que * = significativo; ns = não significativo.

Assim, a expressão que fornece a vazão média específica, ficou reduzida a:

$$Q_{mesp} = a + b.P \quad \text{equação 4.17}$$

a) Vazão média

Quando se deseja uma estimativa da vazão média de longo período para um ponto X qualquer na bacia (Figura 4.14), basta multiplicar a vazão média específica obtida em (4.17) pela área de contribuição em X, ou seja:

$$Q_{\text{média}}(L/s) = Q_{\text{mesp}}(L/s/Km^2) \cdot A(Km^2) \quad \text{equação 4.18}$$

A vazão média específica das bacias brasileiras é bastante variável, indo de 2,0 L/s/Km² no Sertão Nordestino à 30 L/s/Km² na Amazônia. Nas regiões Sul e Sudeste varia, geralmente, de 8 a 25 L/s/Km², sendo este último valor relativo a rios localizados na Serra do Mar.

Uma vez localizado o ponto X, dentro de uma das 21 regiões paulistas, os parâmetros *a* e *b* podem ser obtidos na Tabela 4.1, apresentada a seguir. Na Figura 4.16 são apresentados valores aproximados de precipitação total anual (P) para o Estado de São Paulo.

Tabela 4.3- Parâmetros regionais da Regionalização das Variáveis Hidrológicas do Estado de São Paulo

gião	Média plu (Q)		Valores de XT						Val de A e B		Curvas de Permanência qp															
	a	b	Período de Retorno T						A	B	Frequência Acumulada (P [X > x]) em porcentagem															
			10	15	20	25	50	100			5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	75	80	85	90	95	100
A	-22,14	0,0292	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,3532	0,0398	2,608	2,045	1,618	1,325	1,165	1,093	0,950	0,810	0,693	0,590	0,535	0,498	0,443	0,393	0,348	0,260
B	-29,47	0,0315	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,4174	0,0426	2,150	1,734	1,505	1,366	1,250	1,153	0,994	0,846	0,745	0,640	0,588	0,545	0,498	0,430	0,371	0,165
C	-29,47	0,0315	0,748	0,723	0,708	0,698	0,673	0,656	0,4174	0,0426	2,150	1,734	1,505	1,366	1,250	1,153	0,994	0,846	0,745	0,640	0,588	0,545	0,498	0,430	0,371	0,165
D	-22,14	0,0292	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,5734	0,0329	1,947	1,597	1,394	1,271	1,193	1,111	0,996	0,897	0,820	0,727	0,687	0,646	0,607	0,560	0,510	0,423
E	-22,14	0,0292	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,4775	0,0330	2,142	1,676	1,496	1,372	1,278	1,160	0,960	0,834	0,744	0,664	0,626	0,580	0,546	0,504	0,440	0,358
F	-22,14	0,0292	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,6434	0,0252	1,797	1,533	1,400	1,297	1,232	1,165	1,003	0,905	0,822	0,743	0,715	0,672	0,643	0,598	0,558	0,465
G	-26,23	0,0278	0,632	0,588	0,561	0,543	0,496	0,461	0,4089	0,0332	2,396	1,983	1,664	1,442	1,255	1,121	0,923	0,789	0,679	0,592	0,547	0,506	0,469	0,420	0,363	0,223
H	-29,47	0,0315	0,748	0,723	0,708	0,698	0,673	0,656	0,4951	0,0279	2,089	1,788	1,579	1,389	1,239	1,118	0,957	0,845	0,750	0,664	0,627	0,590	0,538	0,490	0,434	0,324
I	-29,47	0,0315	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,6276	0,0283	1,913	1,538	1,365	1,270	1,173	1,103	0,980	0,895	0,808	0,740	0,705	0,673	0,635	0,585	0,540	0,413
J	-29,47	0,0315	0,708	0,674	0,655	0,641	0,607	0,581	0,4741	0,0342	2,272	1,792	1,526	1,366	1,231	1,125	0,948	0,807	0,715	0,628	0,596	0,566	0,523	0,462	0,414	0,288
K	-26,23	0,0278	0,689	0,658	0,639	0,626	0,595	0,572	0,4951	0,0279	2,089	1,788	1,579	1,389	1,239	1,118	0,957	0,845	0,750	0,664	0,627	0,590	0,538	0,490	0,434	0,324
L	-26,23	0,0278	0,759	0,733	0,717	0,706	0,677	0,654	0,6537	0,0267	1,770	1,517	1,390	1,310	1,225	1,158	1,012	0,915	0,827	0,748	0,717	0,667	0,628	0,583	0,527	0,420
M	-4,62	0,0098	0,759	0,733	0,717	0,706	0,677	0,654	0,6141	0,0257	1,970	1,666	1,468	1,294	1,181	1,096	0,961	0,874	0,790	0,714	0,679	0,646	0,604	0,570	0,516	0,429
N	-26,23	0,0278	0,689	0,658	0,639	0,626	0,595	0,572	0,4119	0,0295	2,396	1,983	1,664	1,442	1,255	1,121	0,923	0,789	0,679	0,592	0,547	0,506	0,469	0,420	0,363	0,223
O	-26,23	0,0278	0,689	0,658	0,639	0,626	0,595	0,572	0,3599	0,0312	2,408	2,010	1,750	1,538	1,346	1,179	0,935	0,775	0,645	0,547	0,505	0,462	0,418	0,374	0,316	0,170
P	-26,23	0,0278	0,619	0,577	0,552	0,535	0,492	0,459	0,3599	0,0312	2,408	2,010	1,750	1,538	1,346	1,179	0,935	0,775	0,645	0,547	0,505	0,462	0,418	0,374	0,316	0,170
Q	-4,62	0,0098	0,633	0,572	0,533	0,504	0,426	0,358	0,6537	0,0267	1,770	1,517	1,390	1,310	1,225	1,158	1,012	0,915	0,827	0,748	0,717	0,667	0,628	0,583	0,527	0,420
R	-4,62	0,0098	0,661	0,629	0,610	0,598	0,568	0,546	0,6141	0,0257	1,940	1,640	1,453	1,320	1,203	1,113	0,967	0,873	0,803	0,713	0,670	0,627	0,577	0,527	0,463	0,340
S	-4,62	0,0098	0,661	0,629	0,610	0,598	0,568	0,546	0,5218	0,0284	2,325	1,823	1,588	1,352	1,188	1,097	0,925	0,810	0,708	0,633	0,598	0,563	0,525	0,488	0,420	0,293
T	-4,62	0,0098	0,661	0,629	0,610	0,598	0,568	0,546	0,4119	0,0295	2,471	2,156	1,751	1,468	1,324	1,109	0,880	0,781	0,674	0,581	0,517	0,481	0,429	0,380	0,316	0,241
U	-4,62	0,0098	0,594	0,518	0,469	0,433	0,330	0,240	0,4119	0,0295	2,471	2,156	1,751	1,468	1,324	1,109	0,880	0,781	0,674	0,581	0,517	0,481	0,429	0,380	0,316	0,241

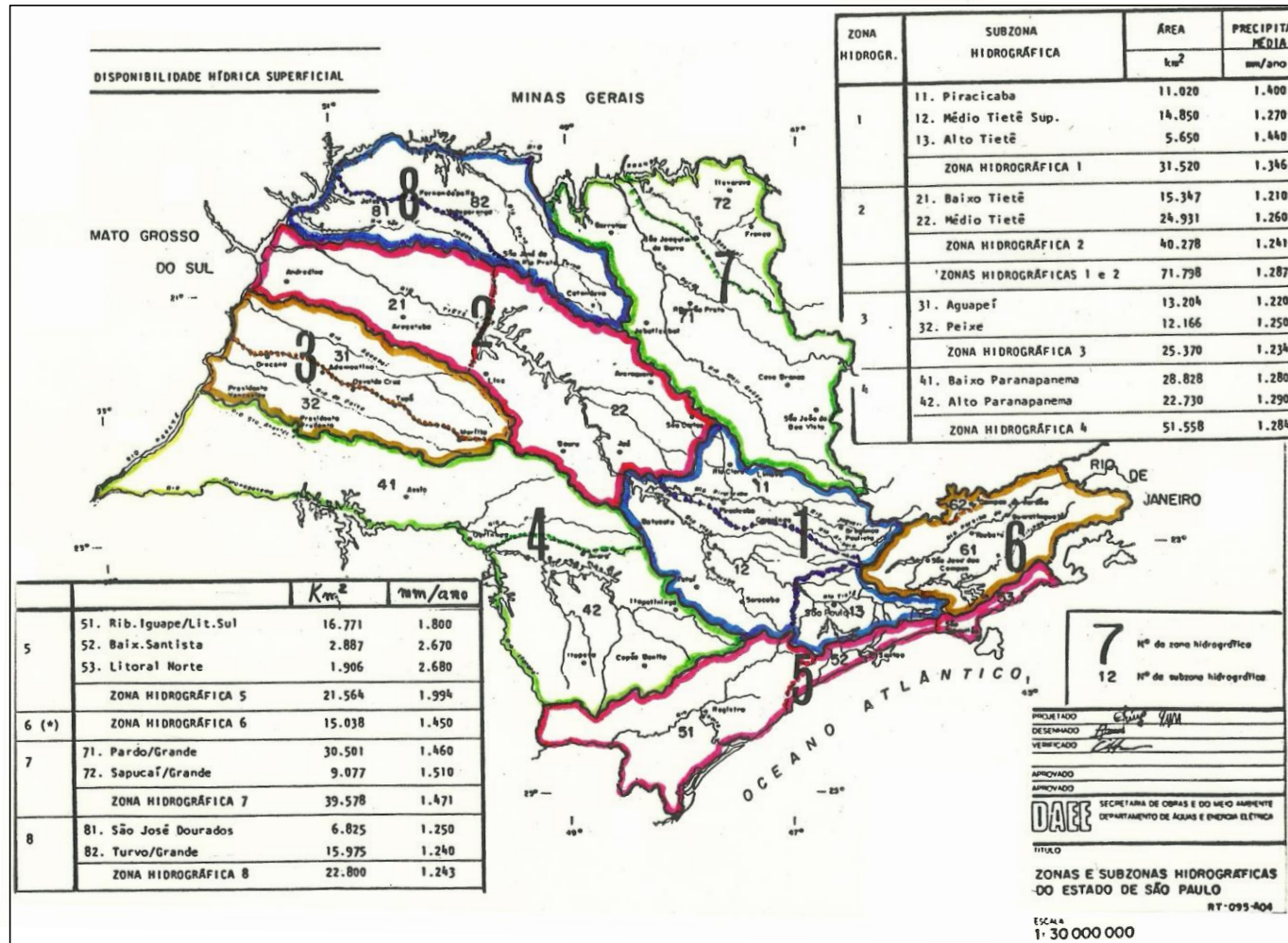


Figura 4.16 – Valores aproximados de precipitação em diferentes zonas do Estado de São Paulo.

Exemplo 1: estimar a vazão média de longo período de um ribeirão localizado no município de Araraquara - SP, com uma área de contribuição de 200 km².

Resposta:

-Araraquara → Região M (Figura 4.15) → $a = -4,62$; $b = 0,0098$ (Tabela 4.3)

-Araraquara → sub-zona 2.2 (Figura 4.16) → $P = 1.260$ mm/ano

$Q_{\text{média}} \text{ específica} = a + b.P = -4,62 + 0,0098 \cdot 1.260 = 7,73$ L/s/Km²

$Q_{\text{média}} = 7,73$ L/s/Km² x 200 Km² = 1.546 L/s

b) Vazões mínimas

Procedimentos semelhantes ao utilizados para se regionalizar a vazão média foram usados para as mínimas, fornecendo as expressões:

$$Q_{95} = q_{95} \cdot Q_{\text{média}} \quad \text{equação 4.19}$$

$$Q_{90} = q_{90} \cdot Q_{\text{média}} \quad \text{equação 4.20}$$

$$Q_{7,10} = C_{7,m} \cdot XT_{10} \cdot (A+B) \cdot Q_{\text{média}} \quad \text{e quação 4.21}$$

Os parâmetros q_{95} , q_{90} , XT_{10} , A e B podem ser obtidos na Tabela 4.3. O parâmetro $C_{7,m}$ é obtido no mapa esquematizado na Figura 4.17.

Exemplo 2: calcular Q_{95} , Q_{90} e $Q_{7,10}$ para o ribeirão do exemplo anterior.

Resposta:

-Araraquara → Região M (Tabela 4.3) → $q_{95} = 0,516$; $q_{90} = 0,570$; $XT_{10} = 0,759$; $A = 0,6141$; $B = 0,0257$

-Araraquara → Região Z (Figura 4.17) → $C_{7,m} = 0,85$

$$-Q_{95} = 0,516 \times 1.546 = 797,7 \text{ L/s}$$

$$-Q_{90} = 0,570 \times 1.546 = 881,2 \text{ L/s}$$

$$-Q_{7,10} = 0,85 \times 0,759 \times (0,6141 + 0,0257) \times 1.546 = 638,1 \text{ L/s}$$

Deve ser destacado que $Q_{90} > Q_{95} > Q_{7,10}$.

c) Volume de reservatório

O volume de água necessário a um barramento também pode ser estimado nesse trabalho de regionalização; essa abordagem servirá de introdução ao Capítulo 5. O volume útil de um reservatório para um período de retorno de 10 anos (VR10) é dado pela equação 4.22:

$$VR_{10} = \frac{[QF - XT_{10} \cdot A \cdot Q_{m\u00e9dia}]^2}{4 \cdot XT_{10} \cdot B \cdot Q_{m\u00e9dia}} \times K \quad \text{equação 4.22}$$

Em que:

VR10 – volume útil do reservatório para um período de retorno de 10 anos, m³;

QF – vazão firme de regularização (representa a soma da vazão de jusante com a vazão de demanda, mais as perdas por evaporação no lago e por infiltração no maciço), m³/s;

XT10, A, B – coeficientes locais (Tabela 4.3);

Qm\u00e9dia – vazão média de longo período, m³/s; e

K – número médio de segundos em 1 mês = $\frac{3600 \times 24 \times 365}{12}$

Exemplo 3:

Considera-se que o ribeirão do exemplo anterior ($Q_{7,10} = 638 \text{ L/s}$) está sendo cogitado para uma possível captação para irrigação. Consultado o órgão gestor (DAEE), este libera uma vazão de apenas 10 L/s para captação a fio d'água, ou seja, supondo não haver usuários a montante, a vazão de jusante deverá ser de $638 - 10 = 628 \text{ L/s}$.

Imaginando que a vazão de demanda do futuro irrigante seja bem maior (120 L/s) o DAEE sugere que o mesmo construa um barramento para regularizar uma vazão

firme $QF \approx 628 + 120 = 748$ L/s (desprezando as perdas). Qual deverá ser o volume útil do barramento ?

$$VR_{10} = \frac{[QF - XT_{10} \cdot A \cdot Q_{m\u00e9dia}]^2}{4 \cdot XT_{10} \cdot B \cdot Q_{m\u00e9dia}} \times K = \frac{[0,748 - 0,759 \times 0,6141 \times 1,546]^2}{4 \times 0,759 \times 0,00257 \times 1,456} \times \frac{3600 \times 24 \times 365}{12} \therefore$$

$$VR_{10} = 16.363,9 \text{ m}^3$$

Tendo em vista que haverá perdas por evaporação no reservatório, é comum se utilizar um acréscimo de 20%, ou seja:

$$VR_{10\text{pr\u00e1tico}} = 16.363,9 \times 1,20 = 19.636,7 \text{ m}^3$$

Apenas para dar um valor de ordem de grandeza do volume calculado anteriormente, considerando a hipótese de o reservatório ter uma profundidade média de 3,5 metros, a área do seu espelho hidráulico será $\frac{19.636,7 \text{ m}^3}{3,5 \text{ m}} = 5.610,5 \text{ m}^2 \approx 0,56 \text{ ha}$.

Exemplo 4: repetir o exemplo 3, considerando $P = 1374$ mm/ano e todas as outras variáveis iguais.

Resposta:

$$Q_{m\u00e9dia} = 1,769 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{90} = 1,008 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{95} = 0,913 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{7,10} = 0,730 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$QF = 0,840 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$VR_{10} = 4.554,1 \text{ m}^3 \text{ (sem considerar o acréscimo de 20\%)}$$

Exemplo 5: acessar o software *Regionalização Hidrológica* no seguinte site:

→ WWW.daee.sp.gov.br

→ Serviços

→ Regionalização Hidrológica

Repetir o exemplo 4, considerando as seguintes coordenadas geográficas:

Latitude: 21° 45'

Longitude: 48° 15'

Resposta: o software espacializa as precipitações totais anuais do Estado de São Paulo. As coordenadas dadas a cima fornecem uma precipitação de 1.374 mm/ano, de modo que o resultado do exemplo 5 será exatamente o mesmo daquele calculado manualmente no exemplo 4.

Observação 1: ao se utilizar o software é necessário se corrigir o valor de QF e clicar em recalcular, pois o valor inicial que o programa fornece refere-se a $QF = 0,50 \times Q_{m\u00e9dia}$.

Observação 2: se forem calculados os valores de volume do reservatório para valores de vazão firme de regularização (QF) maiores, pode-se construir o gráfico apresentado na Figura 4.18. Esse gráfico é chamado de *curva de regularização*, e indica que aumentando-se VR10, o aumento em QF não é linear, tendendo mais a uma equação de segundo grau ou do tipo potência. Isto indica que, para se conseguir aumentar sucessivamente a QF, os valores de VR10 crescem muito. Daí recomendar-se que QF deva ser no máximo igual a de 50 a 80% da $Q_{m\u00e9dia}$, o que visa prevenir que VR10 se torne excessivamente grande e o barramento muito caro. A Figura 4.18 foi construída para um período de retorno de 10 anos (90% de garantia de atendimento). Caso fossem calculados os VR para períodos de retorno de 20 e 100 anos (95 e 99% de garantia), ter-se-ia uma família de curvas de regularização, para diferentes *níveis de segurança* (ver Capítulo 5).

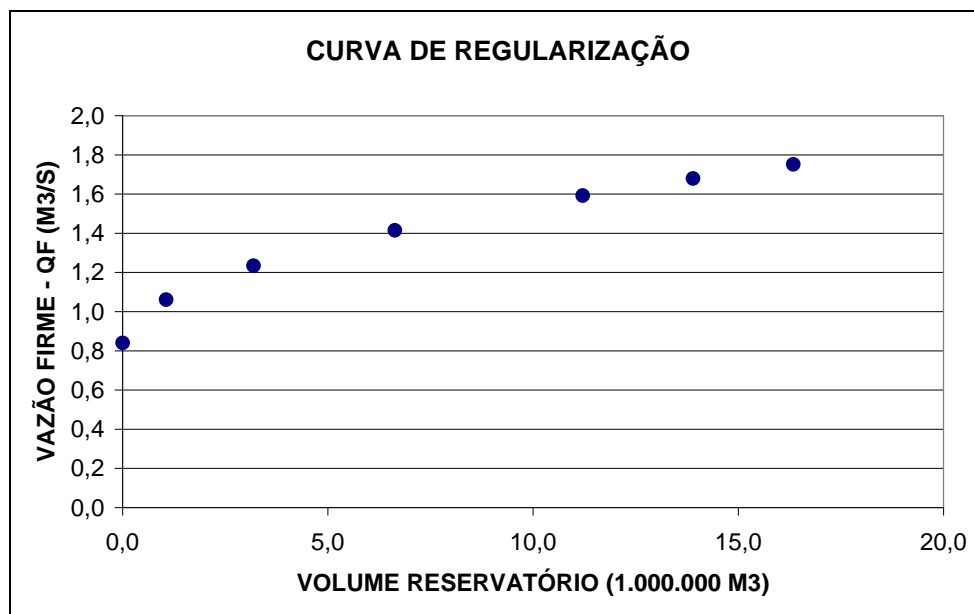


Figura 4.18- Aumento do volume do reservatório necessário para regularizar vazões sucessivamente crescentes.

Observação 3: Wolff (2012) reavaliou a Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo e obteve uma concordância muito boa desta com seus resultados. A experiência do DAEE tem revelado que erra-se mais quando a regionalização é aplicada a pequenas bacias (< 50 km²), pois estas tendem a apresentar uma heterogeneidade maior.

Exemplo 6:

Um barramento de 2,26 ha de espelho d'água e cerca de 3,5 m de profundidade média tem uma área de contribuição de 141,5 ha e está localizado perto da cidade de Angatuba, ao sul do Estado de São Paulo; as coordenadas geográficas medidas próximas ao centro da bacia são 23° 31' 22,41" S e 48° 33' 58,34" W.

Sabendo-se que:

- *A vazão firme de regularização máxima será considerada igual a 60% da Qmédia (critério prático do DAEE);
- *Considerar as perdas (evaporação e percolação do maciço) como 5% de Qmédia;
- *A vazão a ser mantida a jusante será de 75% da Q_{7,10};
- *Pretende-se atender a 2 pivôs rebocáveis com área total de 60 ha;
- *A vazão específica real da bomba será considerada igual a 1,0 L/s/ha;
- *Pretende-se irrigar 20 horas por dia, 15 dias por mês e 6 meses por ano com a água deste barramento.

Pede-se:

- 1) Calcular a vazão contínua de demanda máxima que pode ser atendida pela micro-bacia.
- 2) Verificar se os 2 pivôs poderão ser atendidos.
- 3) Discutir se o aumento da altura da baragem será uma prática recomendada.

Solução:

1) A equação de regularização do barramento será dada por:

$$QF = Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + \text{Perdas}$$

$$QF = Q_{\text{demanda}} + Q_{\text{jusante}} + 0,05 \cdot Q_{\text{média}}$$

Considerando que $QF = 0,60 \cdot Q_{\text{média}}$ e que $Q_{\text{jusante}} = 0,75 \cdot Q_{7,10}$, vem que:

$$0,60 Q_{\text{média}} = Q_{\text{demanda}} + 0,75 \cdot Q_{7,10} + 0,05 Q_{\text{média}} \quad \text{equação 4.23}$$

Entrando-se no software do DAEE-SP com as coordenadas geográficas da bacia e com a área da bacia, obtém-se $Q_{\text{média}} = 11 \text{ L/s}$ e $Q_{7,10} = 3 \text{ L/s}$. Substituindo-se esses valores em 4.23, vem que:

$$Q_{\text{demanda Max}} = 0,60 \cdot 11 - 0,05 \cdot 11 - 0,75 \cdot 3 = 3,8 \text{ L/s}$$

Entenda-se que 3,8 L/s é a maior vazão possível de ser captada na bacia de forma contínua (24 horas por dia e 365 dias por ano).

2) No Capítulo 5 será visto que a vazão contínua pode ser dada pela expressão 4.24, ou seja:

$$Q_{\text{contínua}} (\text{L/s}) = Q_{\text{bomba}} \times \frac{n^{\circ} \text{ horas por dia}}{24 \text{ horas}} \times \frac{n^{\circ} \text{ dias por mês}}{30 \text{ dias}} \times \frac{n^{\circ} \text{ meses por ano}}{12 \text{ meses}} \quad \text{equação 4.24}$$

$$\text{Assim: } 3,8 = Q_{\text{bomba}} \times \frac{20}{24} \times \frac{15}{30,417} \times \frac{6}{12} \quad \therefore Q_{\text{bomba}} = 18,49 \text{ L/s}$$

Como a vazão específica necessária a bomba é de 1,0 L/s/ha, conclui-se que só poderão ser irrigados 18,49 ha, ou seja, não poderá ser irrigado nem 1 pivô completo, ao longo dos anos, sustentavelmente.

3) O volume real do açude é de $2,26 \text{ ha} \times 10.000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 3,5 \text{ m} = 79.100 \text{ m}^3$.

A vazão firme de regularização foi apresentada como:

$$QF = 0,60 \cdot Q_{\text{média}} = 0,60 \cdot 11 = 6,6 \text{ L/s}$$

Entrando com $QF = 6,6 \text{ L/s}$ no software do DAEE e clicando em recalcular, obtém-se:

$$VR10 = 19.000 \text{ m}^3$$

Daí conclui-se que, para satisfazer a máxima demanda possível ($Q_d = 3,8 \text{ L/s}$) é necessário um reservatório de 19.000 m^3 apenas, ou seja, o açude real (79.100 m^3) tem volume mais do que o suficiente. Assim, conclui-se que não haverá nenhum benefício em aumentar o tamanho do açude, pois a limitação real está na pequena área de contribuição para o açude (área da micro-bacia hidrográfica).

4.9- Exercícios propostos

a) Em uma medição de vazão realizada com molinete em uma estação hidrométrica foram determinadas as medidas apresentadas na tabela a seguir. Determinar a vazão e a velocidade média na seção.

Distância (m)		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Profundidade(m)		0	1,0	4,3	7,2	8,5	7,4	5,6	4,7	3,5	2,1	1,0	0
Velocidade (m/s)	0,2p	0	1,4	1,9	2,6	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1	1,8	1,5	0
	0,8p	0	0,7	1,2	1,8	2,0	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0

Resposta: $Q = 180,65 \text{ m}^3/\text{s}$; $V_{\text{média}} = Q / A = 180,65 / 89,6 = 2,02 \text{ m/s}$

b) Um ribeirão localizado na região de Ituverava drena uma bacia **crítica** de 150 Km^2 , ou seja, bacia onde já foi outorgado aos usuários mais do que 50% da $Q_{7,10}$; assim, não são concedidas outorgas para captação a fio d'água. Deseja-se captar uma vazão

contínua de 100 L/s em um ponto onde não há usuários a montante. Pedese: Qmédia específica, Qmédia, Q90, Q95, Q7,10 e VR10. Calcular manualmente.

Respostas:

$$Q_{\text{média específica}} = 15,748 \text{ L/s/Km}^2;$$

$$Q_{\text{média}} = 2.362,2 \text{ L/s};$$

$$Q_{90} = 883,46 \text{ L/s};$$

$$Q_{95} = 746,46 \text{ L/s};$$

$$Q_{7,10} = 457,49 \text{ L/s};$$

$$Q_F = 557,49 \text{ L/s};$$

$$VR = 16.869,6 \text{ m}^3 \text{ (Já com os 20\% incluído)}.$$

c) Sendo dados:

Área próxima a cidade de Araçatuba (Região Hidrologia T, sub-zona hidrográfica 2.1);

Área de contribuição = 200 Km²;

Demanda de água total média contínua (para 3 pivôs centrais)= 90 L/s;

Vazão outorgada para captação a fio d'água = zero L/s (Bacia crítica);

Profundidade média da bacia hidráulica do barramento = 3,5 m;

Considerar que não há usuários outorgados a montante.

Pedese: estimar a área do espelho hidráulico do barramento em ha.

Fórmulas:

$$Q_{\text{média esp}} (\text{L/s/Km}^2) = a + b.P$$

$$Q_{\text{média}} (\text{L/s}) = Q_{\text{média específica}} \times \text{Área}$$

$$Q_{7,10} (\text{L/s}) = C_{7,m} \times X_{T_{10}} \times (A+B) \times Q_{\text{média}}$$

$$Q_{\text{jusante}} = Q_{7,10} - Q_{\text{outorg. capt. fio d'água}}$$

$$Q_F \approx Q_{\text{jusante}} + Q_{\text{demanda}}$$

$$VR_{10} = \frac{[Q_F - X_{T_{10}} \cdot A \cdot Q_{\text{média}}]^2}{4 \cdot X_{T_{10}} \cdot B \cdot Q_{\text{média}}} \times \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600}{12} \text{ (lembre-se que nesta equação as vazões}$$

entram em m³/s e que VR sai em m³)

OBS: multiplicar VR₁₀ por 1,20 para considerar as perdas por evaporação.

Resposta: $VR_{10} = 26.540 \text{ m}^3$; $VR = 31.848 \text{ m}^3$; Área espelho barragem = 0,9 ha.

d) Deseja-se captar 200 L/s em um córrego, cuja área de contribuição é de 350 Km². Obteve-se, com o DAEE, uma vazão para captação a fio d'água de apenas 20 L/s, havendo uma recomendação de barramento, para que os 200 L/s fosse outorgado. Estime a área da superfície do futuro lago da barragem, sabendo-se que:

-Coordenadas obtidas próximas ao centro da bacia → LAT=21°00'00"; LONG=49°00'00"

-Considere $QF \approx Q_{\text{jusante}} + Q_{\text{demanda}}$

-Após o cálculo de VR, dê uma folga de 20% para contabilizar as perdas

-Calcule a área do espelho hidráulico dividindo VR por uma profundidade média do lago de 3,5 m.

-Considere que não há outorgas concedidas a montante.

-Utilize o programa do sítio do DAEE.

Resposta: Área do espelho hidráulico do lago da barragem = 3,02 ha.

e) A Usina São Manoel, localizada no município de São Manoel – SP, está estudando a possibilidade de implementar uma captação alternativa para as suas necessidades, em um ponto de um ribeirão localizado a cerca de 3,5 Km da Usina.

Sendo dados:

*Área de captação do ponto escolhido (área da micro-bacia hidrográfica) = 5.000 ha;

*Coordenadas próximas ao centro da área de captação: LAT = 22° 40'; LONG = 48° 40' (REGIÃO G)

*Demanda da Usina = 600 m³/h, 24 horas / dia, durante safra estimada em 250 dias / ano

*Precipitação média anual de longo período para as coordenadas acima = 1.298,3 mm

*Não há outorgas a montante do ponto considerado.

*Como o ribeirão deságua no lago da barragem de Barra Bonita, localizado a poucos quilômetros a jusante do ponto estudado, e sendo este percurso realizado integralmente dentro da propriedade da Usina, pode-se adotar o critério do valor mínimo ($Q_{\text{jusante}} = 50\% \cdot Q_{7,10}$).

Pede-se:

- 1) Verificar se uma captação a fio d'água satisfaz a demanda da Usina.
- 2) Caso não seja possível, verificar se uma captação com barramento satisfaz a demanda (utilize o critério prático do DAEE que propõe que a máxima vazão de demanda média contínua a ser captada com barramento seja aquela em que $QF = 60\% Q_{\text{média}}$).
- 3) Caso seja possível a captação com barramento, estimar o volume útil e a área alagada normal do reservatório (com profundidade média de 3,5 m), fazendo:

$$QF = Q_{\text{demanda média}} + Q_{\text{jusante}} + 0,05 \cdot Q_{\text{média}}$$

Obs: como as perdas já estão sendo consideradas na fórmula acima, não há necessidade de se adicionar 20% sobre VR_{10} .

Equações da Regonalização de SP:

$$Q_{\text{média esp}} (\text{L/s/Km}^2) = a + b.P$$

$$Q_{\text{média}} (\text{L/s}) = Q_{\text{média específica}} \times \text{Área}$$

$$Q_{7,10} (\text{L/s}) = C_{7,m} \times XT_{10} \times (A+B) \times Q_{\text{média}}$$

$$VR_{10} = \frac{[QF - XT_{10} \cdot A \cdot Q_{\text{média}}]^2}{4 \cdot XT_{10} \cdot B \cdot Q_{\text{média}}} \times \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600}{12} \quad (\text{lembre-se que nesta equação as vazões}$$

entram em m^3/s e que VR sai em m^3)

Respostas:

- 1) Como $Q_{\text{bomba}} = 0,167 \text{ m}^3/\text{s} > 50\% Q_{7,10} = 0,084 \text{ m}^3/\text{s}$ a captação a fio d'água não pode ser outorgada.
- 2) Como $QF = 0,218 \text{ m}^3/\text{s} < 60\% Q_{\text{média}} = 0,243 \text{ m}^3/\text{s}$ a captação com barramento é possível.
- 3) $VR = 71.000 \text{ m}^3$.

f) Deseja-se calcular a máxima vazão que pode ser outorgada a fio d'água no ponto X, esquematizado na figura a seguir, segundo o critério paulista (outorgar no máximo 50% da $Q_{7,10}$, investigando-se a montante e a jusante). As vazões que já tem outorga estão localizadas nos pontos A, B, C, e D, quais sejam:

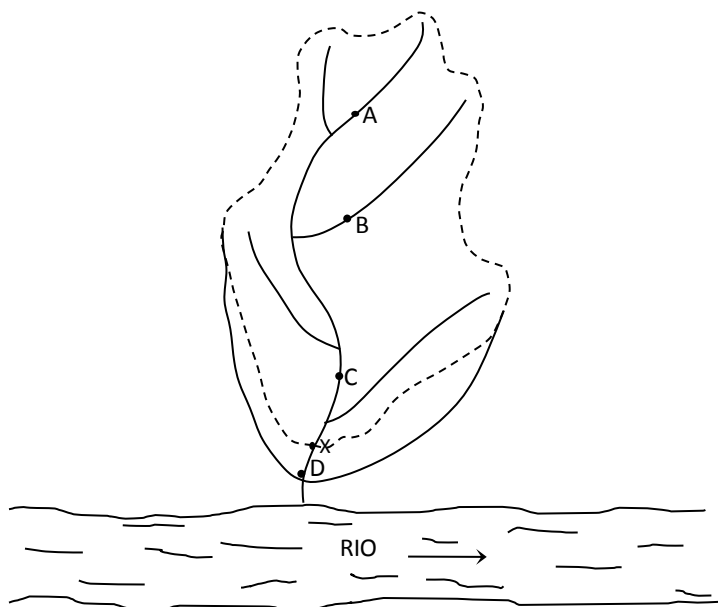
$$QA = 10 \text{ L/s};$$

$$QB = 20 \text{ L/s};$$

$$Qc = 10 \text{ L/s}$$

$$Q_D = 20 \text{ L/s}$$

Os valores de $Q_{7,10}$ estimados para o ponto X e para o ponto D são, respectivamente, $Q_{7,10}(X)=100 \text{ L/s}$ e $Q_{7,10}(D)=130 \text{ L/s}$.



Resposta: $Q_{out}(X)_{Max} = 5,0 \text{ L/s}$.

g) O IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) estabelece que, para captações a fio d'água, o máximo permitido é de 30% da $Q_{7,10}$ (deve-se sempre manter no mínimo 70% da $Q_{7,10}$ a jusante). Considerando que foram levantados os seguintes valores:

- $Q_{7,10}(x) = 300 \text{ L/s}$

- $Q_{7,10}(4) = 400 \text{ L/s}$

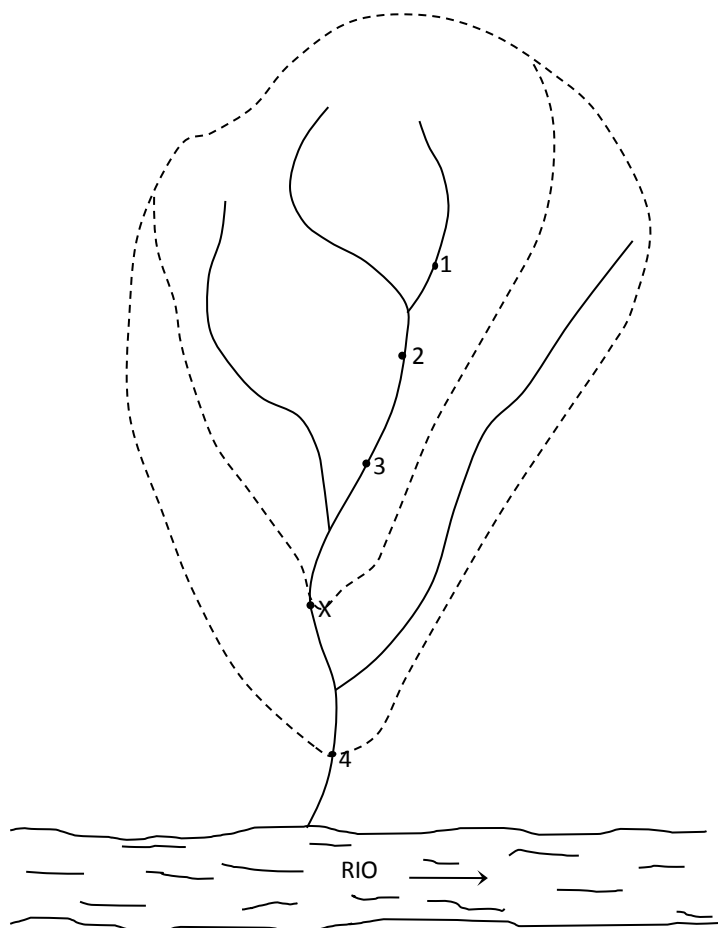
- $Q_{outorg. (1)} = 10 \text{ L/s}$

- $Q_{outorg. (2)} = 30 \text{ L/s}$

- $Q_{outorg. (3)} = 20 \text{ L/s}$

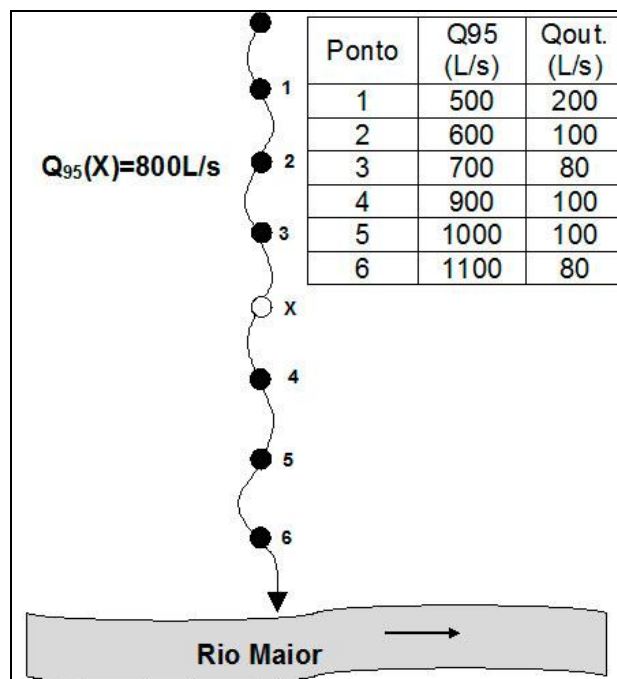
- $Q_{outorg. (4)} = 10 \text{ L/s}$

Determine a máxima vazão que pode ser outorgada em X, a fio d'água.



Resposta: $Q_{out}(X)_{Max} = 30 \text{ L/s}$

h) Na figura a seguir, está representado um ribeirão federal com 6 usuários que possuem outorga para captação a fio d'água. A tabela apresenta a Q95 e a vazão que foi outorgada (Q_{out}) para cada ponto, em L/s. Sabendo-se que a lei que regula a outorga para os rios da União estabelece que a máxima vazão outorgável a fio d'água deve ser de 70% da Q95 (ou seja, deve-se sempre manter no mínimo 30% da Q95 em cada trecho do ribeirão), verifique se pode ser concedida outorga para o futuro usuário X e, em caso afirmativo, qual a máxima vazão a ser outorgada, prevendo-se uma captação a fio d'água em X.



Resposta: $Q_{out}(X)_{Max} = 110 \text{ L/s}$

i) Um critério prático utilizado pelos técnicos do DAEE para estabelecer a máxima vazão possível capaz de ser captada **com barramento** é considerar que, nessa situação, a vazão firme poderá assumir o valor de cerca de 60% da vazão média de longo período. Tendo em vista essa suposição, e considerando que:

1- A vazão firme de regularização é a soma da vazão de demanda, mais a de jusante, mais as perdas (assumidas como 5% da vazão média);

2- A vazão de jusante deverá ser de 50% da $Q_{7,10}$;

3- A vazão média, da área em questão, é cerca de 3 vezes a $Q_{7,10}$.

* Calcule que percentagem da $Q_{7,10}$ poderá ser captada nessa situação.

Resposta: 115% da $Q_{7,10}$

j) Deseja-se fazer um cálculo expedito para uma outorga de captação a fio d'água para um pivô central. Considere os seguintes dados:

Dados:

* Demanda líquida de irrigação máxima = 6 mm/dia

* Eficiência de irrigação = 80%

- * Área irrigada = 70 ha
- * Número de horas de operação = 19 horas por dia
- *Número de dias de operação = 15 dias por mês
- *Número de meses de operação = 7 meses por ano
- Considere que o mês médio possui 30,417 dias

Pede-se:

- j.1-** Calcular a vazão real necessária à moto-bomba (Q_{bomba}) em L / seg.
- j.2-** Calcular a vazão demandada média contínua ($Q_{demanda}$) em L/seg, necessária a um eventual cálculo de volume de reservatório.

Respostas: $Q_{bomba} = 76,7 \text{ L/s}$; $Q_{demanda} \text{ média contínua} = 17,5 \text{ L/s}$

D)Determinar a área que deveria ter uma bacia hidrográfica hipotética, capaz de fornecer água para se irrigar 1 ha por aspersão no Campus da ESALQ/USP (LAT: $22^{\circ} 42'$; LONG: $47^{\circ} 38'$). Considere 2 situações:

- a)**A captação será feita a fio d'água
- b)**A captação será feita com barramento.

OUTROS DADOS

- 1-Lâmina bruta máxima de irrigação = 7 mm/dia; bombeamento de 20 horas por dia.
- 2-Na captação a fio d'água usar 50% da $Q_{7,10}$ (ou seja, não há outras outorgas concedidas na bacia).
- 3-Na captação com barramento considerar $Q_{demanda} = 60\%$ da $Q_{média} - 50\% Q_{7,10} - 0,05 Q_{média}$ (perdas)
- 4-Pretende-se irrigar 200 dias por ano
- 5-Usar o software do site do DAEE

Resposta: (a) $A_{bacia} = 83,08 \text{ km}^2$ (b) $A_{bacia} = 9,41 \text{ km}^2$