

**ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ” – ESALQ/USP
LER 1440 – HIDROLOGIA E DRENAGEM**

Prof. Fernando Campos Mendonça

4 – REGIME DOS CURSOS DE ÁGUA

4.1. Medição da vazão de rios

(FIGURA – RIO E ISOTÁQUICAS)

Método do molinete hidrométrico:

(FIGURA – MOLINETE)

$$0,3 \leq V \leq 1,2 \text{ m/s}$$

(DATASHOW – FOTO DE MOLINETE)

Medição em pontos rasos:

$$\bar{V}_i = V_{0,6hi}$$

ou

$$\bar{V}_i = \frac{V_{0,8hi} + V_{0,2hi}}{2}$$

(GRÁFICO – CURVA V x RPS)

(FIGURA – PERFIL MOLHADO)

$$Q_i = V_i \times S_i$$

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n V_i \times S_i$$

3.1) Medição do nível de água

a) Réguas linimétricas:

(FIGURA – RÉGUA ÚNICA E MÚLTIPLAS RÉGUAS)

b) Linígrafos:

- Facilidade de leitura e registro de dados;
- Aumento da precisão em locais com grande oscilação de vazão

Ex.: pequenos rios em zonas urbanas

- Tipos:

- de bóia
- pneumático
- de célula de carga

(DATASHOW – FOTOS DE LINÍGRAFOS)

3.2) Curva-chave da seção do rio

- Leitura do nível de água (h) com régua linimétrica ou de linígrafo;
- Medição de vazão;
- Gráfico Q x h

(FIGURA – GRÁFICO Q x h)

- Regressão polinomial – Equação $Q = f(h)$

Ex.: $Q = a (h - h_0)^b$ $Q = a + b \cdot h + c \cdot h^2$

Localização do posto fluviométrico:

1 – Evitar:

- curvas
- bancos de areia
- seções espraiadas
- pontos de extravasamento
- remansos (proximidade de barragens, entrada de afluentes etc.)
- corredeiras

2 – Preferir seções estreitas e profundas

3 – Avaliar BHs de diferentes tamanhos

3.3) Vazões de interesse hidrológico e métodos para sua determinação

a) Vazão máxima (Q_{max})

- Utilizada em obras de controle

Situações:

a.1) Medição dados c/ série ideal (≥ 25 anos)

- Análise estatística de dados medidos
- Limitações: baixo número de dados e de postos fluviométricos

(DATASHOW – ENCHENTES DO RIO ITAJAÍ EM BLUMENAU)

(DATASHOW – POSTOS DO DAEE NO VALE DO PARAÍBA)

a.2) Medição dados c/ série intermediária (3 anos < série < 25 anos)

- Métodos chuva-vazão calibrados (Racional, I Pai Wu etc.)
- Método da hidrógrafa unitária
- Relação chuva medida x vazão medida
- Extrapolação por regra de três (períodos de retorno maiores)

a.3) Série inexistente ou pequena (< 3 anos)

- Métodos chuva-vazão calibrados (Racional, I Pai Wu etc.)
-

b) Vazão mínima (Q_{\min})

- Utilizada em captação a fio d'água (processo de outorga), planejamento e gestão de recursos hídricos em BHs

Situações:

- b.1) Série de dados ideal (≥ 3 anos)
 - Análise estatística de dados medidos
- b.2) Série inexistente ou pequena (< 3 anos)
 - Regionalização hidrológica

Padrões de Q_{\min} :

- $Q_{7,10}$ – Vazão mínima de 7 dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos
- Q_{90} – vazão mínima esperada em 90% do tempo (ano hidrológico)
- Q_{95} – vazão mínima esperada em 95% do tempo (ano hidrológico)

Determinação de Q_{90} e Q_{95}

- Gráfico e curva de permanência (DATASHOW – CURVA DE PERM.)
- Cálculo da probabilidade de excedência ($P = m/n+1$) e período de retorno ($T = 1/P$)

EXERCÍCIO 7 (EXTRA-CLASSE – ENVIADO POR E-MAIL): Determinação de vazões mínimas (Q_{90} e Q_{95}) e da vazão específica (Q_{esp} , $L/s/km^2$)

c) Vazão média (\bar{Q})

Situações:

- c.1) Medição de dados com série ideal (≥ 3 anos)
 - Média aritmética simples
 - c.2) Série inexistente ou pequena (< 3 anos)
 - Regionalização hidrológica
-

d) Fluviograma de um dado ano

(FIGURA – FLUVIOGRAMA TÍPICO DE UM DADO ANO – REGIÕES S, SE e CO)

Situações de captação ($Q_{captada}$):d.1) Q_1 : Captação a fio d'água (Sem déficit de vazão, Q_{min} é suficiente)Captação = Q_{min} ou fração dela (vários usuários)d.2) Q_2 : Captação com barramento (Déficit < excedente do período úmido)Captação = \bar{Q} d.3) Q_3 : Captação impossível, mesmo com barramento (Déficit > exc. do período úmido)

- A vazão média de longo período representa, teoricamente, a máxima vazão possível de ser captada com barramento.

- Na prática, a vazão máxima a ser captada varia de 50% a 70% de \bar{Q} , devido à evaporação no espelho d'água do reservatório e à necessidade de manter uma vazão mínima a jusante do reservatório (para vizinhos abaixo).

$$50\% \bar{Q} \leq \max Q_{capt} \leq 70\% \bar{Q}$$

3.4) Regionalização de vazões

Regionalizar = transferir dados

Métodos:**4.5.1) Método da vazão específica**

(FIGURA - BH e SUB-BACIA)

$$\overline{Q_{esp(L/s/km^2)}} = \frac{\bar{Q}_{(L/s)}}{A(km^2)}$$

$$\bar{Q}_1 = \overline{Q_{esp}} \times A_1$$

Obs.: $A_1 \geq 0,1 A$

4.5.2) Método da regressão múltipla

“Regionalização das Variáveis Hidrológicas para o Estado de São Paulo” (DAEE, 1988)

- Divisão de SP: 21 regiões hidrologicamente homogêneas
- Em cada região:
 - Dados fluviométricos (307 postos)
 - Dados pluviométricos (444 postos)

(FIGURA – BH, POSTOS E CÁLCULO DA VAZÃO ESPECÍFICA)

- Análise estatística – Regressão múltipla (várias variáveis)

$$\overline{Q_{esp_1}} = f(P_1, Dd_1, L_1, Ieq_1, Kc_1, \dots)$$

$$\overline{Q_{esp_2}} = f(P_2, Dd_2, L_2, Ieq_2, Kc_2, \dots)$$

- Vários modelos de equações (linear, quadrática, cúbica, exponencial, potencial etc.)
- Teste de significância das variáveis analisadas
- Descarte das variáveis não significativas

- Resultado: bom ajuste com equação linear e variável P (chuva)

$$\overline{Q_{esp_1}} = a + b \cdot \bar{P}$$

$\overline{Q_{esp_1}}$ - vazão específica da bacia (L/s/km²)

P – precipitação anual (mm/ano)

Exercício de fixação (Sala de aula) (DISTRIBUIR XEROX C/ MAPAS E TABELAS):

- 1) Estimar a vazão média de longo período (\bar{Q}), a vazão mínima com 90% e 95% de probabilidade (Q_{90} e Q_{95}) e a vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) de um ribeirão localizado no município de Araraquara, com área de contribuição de 200 km².

Resolução:

- a) Vazão média de longo período (\bar{Q}):

- a.1) Localizar Araraquara no mapa de regiões hidrológicas (Mapa 1)

Região M

- a.2) Procurar os parâmetros “a” e “b” da equação de vazão específica (Tabela 1)

$$a = -4,62$$

$$b = 0,0098$$

- a.3) Estimativa de P (Mapa 2)

Araraquara → Zona 2, subzona 2.2 (Médio Tietê)

Parte de trás do mapa: $\bar{P} = 1260$ mm/ano

- a.4) Cálculo de $\overline{Q_{esp}}$

$$\text{Equação: } \overline{Q_{esp}} = a + b \bar{P}$$

$$\overline{Q_{esp}} = -4,62 + 0,0098 \times 1260$$

$$\overline{Q_{esp}} = 7,73 \text{ L/s/Km}^2$$

- a.5) Cálculo de \bar{Q} :

$$A = 200 \text{ Km}^2$$

$$\overline{Q_{esp}} = 7,73 \text{ L/s/Km}^2$$

$$\bar{Q} = \overline{Q_{esp}} \times A = 7,73 \times 200$$

$$\bar{Q} = 1546 \text{ L/s ou } 1,546 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Vazões mínimas (Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$):

$$Q_{90} = q_{90} \times \bar{Q} \qquad Q_{95} = q_{95} \times \bar{Q}$$

q_{90} e q_{95} – valores tabelados (Tabela 1)

$$Q_{7,10} = C_{7,m} \times XT_{10} \times (A + B) \times \bar{Q}$$

b.1) Q_{90} e Q_{95} :

Região M \rightarrow Tabela 2 – $q_{90} = 0,570$
 $q_{95} = 0,516$

$$Q_{90} = 0,570 \times 1546 = 881,22 \text{ L/s} \qquad Q_{95} = 0,516 \times 1546 = 797,7 \text{ L/s}$$

b.2) $Q_{7,10}$:

Mapa 3: Araraquara \rightarrow Região Z

$$C_{7,m} = 0,85$$

Tabela 1: Região M \rightarrow $XT_{10} = 0,759$
 $A = 0,6141$
 $B = 0,0257$

$$Q_{7,10} = C_{7,m} \times XT_{10} \times (A + B) \times \bar{Q}$$

$$Q_{7,10} = 0,85 \times 0,759 \times (0,6141 + 0,0257) \times 1546$$

$$Q_{7,10} = 638 \text{ L/s}$$

Conclusão: $Q_{7,10} < Q_{95} < Q_{90}$ ($Q_{7,10} \cong Q_{98}$)

2) Com o valor da $Q_{7,10}$ do exercício anterior, calcule o volume e área do espelho d'água do reservatório necessário para manter uma vazão firme (Q_{firme}) a jusante, de acordo com os dados a seguir:

Dados:

Profundidade média do reservatório: $h_R = 2,5$ m

$Q_{7,10} = 638$ L/s

Vazão outorgada a fio d'água: $Q_{\text{outorg}} = 10$ L/s

Vazão demandada: $Q_{\text{demanda}} = 120$ L/s

$Q_{\text{jusante}} = Q_{7,10} - Q_{\text{outorg}} = 628$ L/s

$Q_{\text{firme}} = Q_{\text{jusante}} + Q_{\text{demanda}} = 628 + 120 = 748$ L/s ou $0,748$ m³/s

Cálculo do volume do reservatório (T = 10 anos):

$$VR_{10} = \frac{(Q_F - XT_{10} \cdot A \cdot \bar{Q})^2}{4 \cdot XT_{10} \cdot B \cdot \bar{Q}} \cdot K \cdot F_E$$

Q_F – vazão firme de saída do reservatório (m³/s)

\bar{Q} – vazão média de longo período (m³/s)

F_E – fator de evaporação do espelho d'água

K – número médio de segundos em um mês

$$K = \frac{60 \frac{s}{min} \times 60 \frac{min}{h} \times 24 \frac{h}{dia} \times 365 \frac{dia}{ano}}{12 \text{ mês/ano}} = 2.628.000$$

Para a região Sudeste consideram-se perdas de 20% por evaporação no espelho d'água, portanto:

$F_E = 1,2$

$$VR_{10} = \frac{(748 - 0,759 \cdot 0,6141 \cdot 1,546)^2}{4 \cdot 0,759 \cdot 0,0257 \cdot 1546} \cdot 2628000 \cdot 1,2$$

$VR_{10} = 19.636,7$ m³

$h_R = 2,5$ m \Rightarrow $A_R = 19.636,7 \div 2,5 = 7854,7$ m² (\cong superf. lago da Engenharia)

Exercício 8 (Extra-classe):

- a) Refaça o exercício da sala de aula considerando os mesmos dados de entrada, com exceção de $\bar{P} = 1374$ mm/ano.

- b) Refaça o mesmo exercício utilizando o software online do DAEE e considerando:
Lat. 21°45' S
Long. 48°15' O
Website DAEE: www.dace.sp.gov.br
Link: Hidrometeorologia → Banco de dados hidrológicos → Regionalização hidrológica

Exercício 9 (Sala de aula - Entregar):

Dados:

Local: Ituverava, SP

Área da BH: 150 km²

Q_{outorg} = 0 L/s (bacia crítica)

Q_{demanda} = 100 L/s

Pede-se:

$\overline{Q_{esp}}$

\bar{Q}

Q₉₀ e Q₉₅

Q_{7,10}

VR₁₀