

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

Prof. Fernando Campos Mendonça

**Aula 6**

**5 – RESERVATÓRIOS**

**1) Considerações iniciais**

**1.1) Demandas no meio rural**

**a) Finalidades do reservatório/barramento**

- Paisagismo: embelezamento de propriedades. O volume é pouco relevante.
- Obtenção de queda d'água: acionamento de carneiro hidráulico, roda d'água ou pequena turbina. O aspecto mais importante é a diferença de cota ( $\Delta z$ )
- Amortecimento de cheias: o reservatório deve operar vazio na maior parte do tempo, para encher durante o pico de cheia (Bacias de detenção em meio urbano, ou “piscinões”).
- Regularização de vazões\*: o volume é fundamental. Tipo de reservatório mais importante no meio agrícola.

\* Este tipo será focado na aula.

**b) Tipos de regularização**

- Vazão de entrada ( $Q_e$ ) constante e vazão de demanda ( $Q_d$ ) variável ( $Q_{d\text{ máx}} > \bar{Q}$ )  
Ex.: Caixas d'água em cidades
- $Q_e$  variável e  $Q_d$  constante.  
Ex.: barramento para consumo de água no meio rural. Reservatórios para regularização de vazão. (Este tipo será focado na aula)

**1.2) Consumo de água**

**a) Estimativa do volume a ser armazenado** → Conhecimento do consumo de água

Expressão do consumo (2 formas):

- Vol./tempo → mais adequado a pequenos consumos
- Vazão contínua → mais adequado à irrigação

## Consumo de água em atividades (DAKER, 1988)

Especificação	Consumo (L/dia)
Homem	100 – 200
Aves (10 cabeças)	2 – 3
Caprinos	4 – 5
Suíños	5 – 8
Suíños + higiene	12 – 15
Bovinos	30 – 60
Equinos	35 – 50
Pequenas hortas e jardins (por m <sup>2</sup> )	3 - 7

b) Fatores que influenciam o consumo humano per capita:

- Padrão sócio-econômico
- Industrialização
- % de hidrômetros instalados
- % de perdas na rede de distribuição
- Clima da região
- Tarifação
- Política

c) Consumo urbano:

Consumo de água em algumas localidades (L/hab/dia):

Cidades:

Campinas – 270  
 São Paulo – 350  
 Chicago – 930  
 Berlim – 137  
 Berlim – 137

Estados:

AL – 131  
 RJ – 795

Países:

Israel (judeus) – 250  
 Israel (palestinos) – 80  
 Brasil – 250  
 Canadá – 350  
 África – < 50

d) Consumo industrial (agroindústria):

Frigoríficos: Bovinos – 2500 L/animal  
 Suíños – 1200 L/animal  
 Aves – 15-25 L/animal

Usina sucroalcooleira: 150 – 300 m<sup>3</sup>/t cana processadae) Consumo rural

Animais: Bovinos 30 - 60 L/cab · dia  
 Suíños (+ higiene) 12 - 15 L/cab · dia  
 Aves (frango) 0,2 - 0,3 L/cab · dia

**Irrigação:**

- 60 – 70% do consumo mundial de água

Obs.: Bacias PCJ

Abastecimento doméstico = 42%

Uso industrial = 36%

Uso rural = 22% (Irrigação = 19%; Outros = 3%)

- Consumo por hectare depende de:
  - Clima regional
  - Tipo de cultura e estágio de desenvolvimento (Kc)
  - Método de irrigação (Eficiência)
  - Tipo de solo (perdas por percolação)
- Recomendação do DAEE: estimar consumo com balanço hídrico climatológico
- Cálculos rápidos de consumo diário (Anteprojetos):
  - Gotejamento: 0,5 L/s/ha
  - Microaspersão: 0,7 L/s/ha
  - Aspersão convencional: 1,0 L/s/ha
  - Sulcos: 1,5 L/s/ha
  - Inundação: 2,5 L/s/ha

**Exemplos de cálculo:**1) Consumo de água x Eficiência de irrigação

Consumo da cultura: 6,5 mm/dia;

Eficiência de irrigação:  $Ei_1 = 75\%$  (0,75);  $Ei_2 = 85\%$  (0,85)

$Ei_1 = 0,75$

$$\text{Cons} = \frac{6,5 \text{ mm/dia}}{0,75} = 8,7 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 87000 \frac{\text{l}}{\text{ha} \cdot \text{dia}}$$

$$\text{Cons} = \frac{87000 \frac{\text{l}}{\text{ha} \cdot \text{dia}}}{86400 \frac{\text{s}}{\text{dia}}} \cong 1,0 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{ha}}$$

$Ei_2 = 0,85$

$$\text{Cons} = \frac{6,5 \text{ mm/dia}}{0,85} = 7,65 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 76500 \frac{\text{l}}{\text{ha} \cdot \text{dia}}$$

$$\text{Cons} = \frac{76500 \frac{\text{l}}{\text{ha} \cdot \text{dia}}}{86400 \frac{\text{s}}{\text{dia}}} \cong 0,9 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{ha}}$$

2) Irrigação x Consumo doméstico:

Quantas pessoas podem ser abastecidas em uma cidade (300 L/hab.dia) com a água usada para irrigar 1 ha por aspersão convencional ( $E_i = 0,75$ ;  $cons = 1$  L/s.ha)?

$$N_{hab} = \frac{1 \frac{l}{s.ha} \times 3600 \frac{s}{h} \times 24 \frac{h}{dia}}{300 \frac{l}{hab.dia}} = 288 \text{ hab.dia}$$

f) Uso “consuntivo” (consumptive use): água não retorna diretamente ao manancial

- Irrigação

g) Uso não consuntivo: água retorna diretamente ao manancial

- Captação industrial: retorno de 91% (efluentes)
- Abastecimento doméstico: retorno de 83% (efluentes)
- Dessedentação de animais: retorno de 65% (urina e fezes)
- Aquicultura
- Geração de energia elétrica
- Recreação

h) Equipamentos domésticos x gasto de água:

- Descarga em vaso sanitário convencional: 10 - 12 L
- Descarga c/ acionamento duplo: 6 L (sólidos)  
3 L (líquidos)
- Chuveiro convencional: 20 L/min

## 2. Pequenas barragens de terra

(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – ESQUEMA DE PEQUENA BARRAGEM DE TERRA)

Impactos ambientais negativos dos pequenos barramentos:

- Perda de área útil
- Degradação das áreas de empréstimo
- Aumento das perdas por evaporação
- Salinização devido à elevação do lençol freático  
Ex.: Sobradinho
  - Perdas de 200 m<sup>3</sup>/s (Evaporação)
  - Acréscimo de 500 m<sup>3</sup>/s no mês mais seco
  - Redução de 1000 m<sup>3</sup>/s no mês mais chuvoso
- Dano à vegetação ripária (mata ciliar)
- Interrupção à migração de peixes
- Possível interrupção de rodovias e inundação de vilas

### 2.1) Topografia – Curvas cota x área, cota x volume e altura da barragem (H x Vol)

(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – BARRAGEM E CURVAS DE NÍVEL X ÁREA INUNDADA)

(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – BARRAGEM E CURVAS COTA X VOLUME)

(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – BARRAGEM E CURVAS H X VOLUME)

### 2.2) Dimensionamento do vertedor da barragem

- Determinação da vazão máxima amortecida ( $Q_{m\acute{a}x}^*$ )

$$Q_{m\acute{a}x}^* = \frac{[Q_{m\acute{a}x} (T=100) \cdot 3 tc] - 2 \Delta Vol}{3 tc}$$

$Q_{m\acute{a}x}^*$  – vazão máxima amortecida pela barragem, em m<sup>3</sup>/s

$Q_{m\acute{a}x} (T=100)$  – vazão máxima com período de retorno de 10 anos, que ocorreria sem a barragem, em m<sup>3</sup>/s

tc – tempo de concentração, em segundos

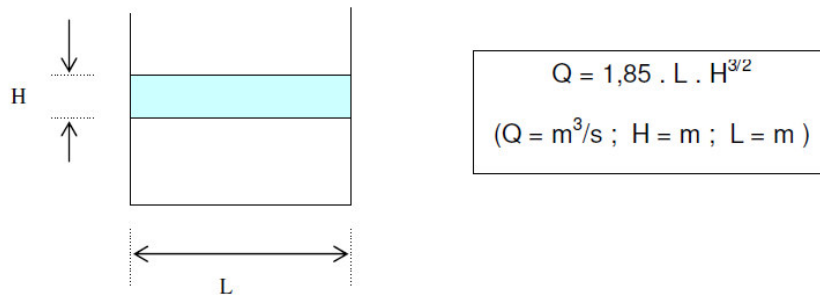
$\Delta Vol$  – variação do volume devido à cota de enchente da barragem (he), em m<sup>3</sup>

Equações dos vertedores mais comuns:

Retangulares:

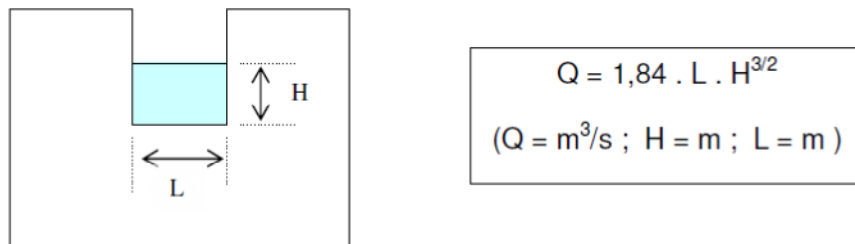
Sem contração lateral:  $Q = 1,85 \cdot L \cdot H^{1,5}$  (Parede delgada)

$Q = 1,55 \cdot L \cdot H^{1,5}$  (Parede espessa)



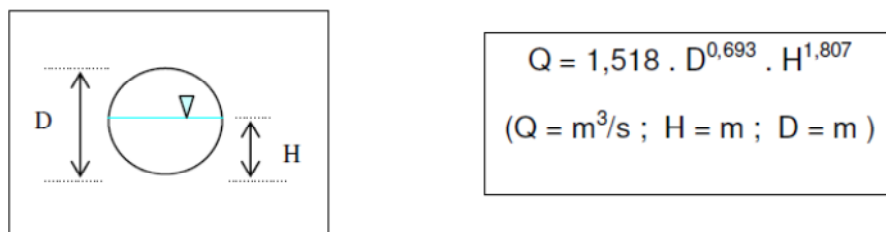
**Figura 1 - Vertedor retangular sem contração lateral**

Com contração lateral:  $Q = 1,84 \cdot L \cdot H^{1,5}$



**Figura 2 - Vertedor retangular com contrações laterais**

Circular:  $Q = 1,5185 \cdot D^{0,693} \cdot H^{1,807}$



**Figura 3 - Vertedor circular**

Exemplo: Determinar a largura da soleira de quatro tipos de vertedor de uma barragem de terra (retangular sem contração lateral de parede espessa e de parede delgada, retangular sem contração lateral e circular).

Dados:

$$Q_{\text{máx}} (T=100) = 21 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_c = 33 \text{ min} \Rightarrow t_c = 33 \times 60 = 1980 \text{ s}$$

$$h_e = 80 \text{ cm} \Rightarrow H = 0,8 \text{ m}$$

$$\Delta \text{Vol} = 35000 \text{ m}^3$$

Resolução:

Cálculo da vazão máxima amortecida:

$$Q_{\text{máx}}^* = \frac{21 \times 3 \times 1980 - 2 \times 35000}{3 \times 1980} = 9,2155 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dimensionamento dos vertedores:

a) Retangulares:

- Sem contração lateral

$$\begin{aligned} \text{- Parede espessa: } \quad 9,2155 &= 1,55 \cdot L \cdot 0,8^{1,5} \\ \therefore L &= 8,31 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Parede delgada: } \quad 9,2155 &= 1,85 \cdot L \cdot 0,8^{1,5} \\ \therefore L &= 6,96 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Com contração lateral: } \quad 9,2155 &= 1,84 \cdot L \cdot 0,8^{1,5} \\ \therefore L &= 7,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{a) } \underline{\text{Circular:}} \quad 9,2155 &= 1,5185 \cdot D^{0,693} \cdot 0,8^{1,807} \\ \therefore D &= 24,14 \text{ m} \end{aligned}$$

Obs.: Se forem utilizados 8 vertedores circulares (4 tubos em cada lado da crista):

$$Q = 9,2155 / 8 = 1,152 \text{ m}^3/\text{s} \quad \Rightarrow \quad D = 1,20 \text{ m}$$

### 2.3) Estimativa (cálculo) do volume do reservatório

#### Métodos:

- Sem dados de vazões mensais
  - Aproximação baseada no módulo da bacia hidrográfica ( $\alpha$ )
  - Estudos de regionalização
- Com dados de vazões mensais: balanço hidrológico

#### a) Estimativa de volume do reservatório em dados de vazões medidas

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

- $Q_F$  – vazão firme  
 $A$  – área de contribuição ou área da bacia  
 $A, B, XT_T$  – parâmetros de regionalização  
 $\bar{Q}$  – vazão média de longo período  
 $K$  – n<sup>o</sup> médio de segundos

#### b) Estimativa de volume do reservatório sem dados de vazões medidas e sem regionalização (Aproximação por meio do módulo da bacia) – Projetos de irrigação

- Cálculo do volume de demanda ( $V_d$ ):

$$V_d = \frac{A_i \cdot 10000 \cdot \frac{ETC}{1000} \cdot T_{ai}}{E_i} \cdot F_E$$

- $A_i$  – área irrigada, ha  
 $T_{ai}$  – tempo (período) anual de irrigação, dias/ano  
 $E_i$  – eficiência de irrigação (decimal)  
 $F_E$  – fator de correção devido à evaporação ( $F_E = 1 + Ev\% / 100$ )

- Cálculo o volume que pode ser fornecido pela bacia ( $V_f$ ):

$$V_f = A \cdot 10000 \cdot \frac{ppt}{1000} \cdot \alpha \cdot K_i \cdot F_{out}$$

- $A$  – área de contribuição, ha  
 $\alpha$  – módulo da bacia (decimal) (% da ppt que gera vazão na seção de controle)  
 $K_i$  – coeficiente de incerteza ( $K_i = 0,75$ )  
 $F_{out}$  – fator de outorga (definido pela instituição outorgante)



- Verificação de viabilidade do projeto:

$$\text{Se } V_d < V_f \Rightarrow \text{OK!}$$

- Cálculo do volume do reservatório (VR):

$$VR = V_d - V_{out}$$

$V_o$  – volume outorgado a fio d'água (sem barramento)

$$V_o = \frac{Q_{min} \cdot F_{out} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot T_{ai}}{1000}$$

Exemplo: Estimar o volume útil e a área do espelho d'água de um reservatório para suprir uma área irrigada.

Dados:

Área irrigada = 80 ha

$\overline{ETc} = 3$  mm/dia

Efic. de irrigação = 80% ( $E_i = 0,8$ )

Período anual de irrigação:  $T_{ai} = 180$  dias/ano

Área da bacia hidrográfica:  $A = 5000$  ha

Precipitação média anual:  $ppt = 1300$  mm/ano

Evaporação no lago da barragem:  $E_v = 20\%$

Módulo da bacia:  $\alpha = 0,30$

Vazão mínima:  $Q_{min} = 50$  L/s

Fator de outorga:  $F_{out} = 20\%$   $Q_{min} = 0,2$

Profundidade média da barragem:  $\bar{h} = 2,5$  m

Resolução:

- Cálculo do volume de demanda ( $V_d$ ):

$$V_d = \frac{80 \cdot 10000 \cdot \frac{3,0}{1000} \cdot 180}{0,8} \cdot 1,2 = 648.000 \text{ m}^3$$

- Cálculo o volume que pode ser fornecido pela bacia ( $V_f$ ):

$$V_f = 5000 \cdot 10000 \cdot \frac{1300}{1000} \cdot 0,30 \cdot 0,75 \cdot 0,20 = 2925000 \text{ m}^3$$

- Verificação de viabilidade do projeto:

$$V_d < V_f \Rightarrow \text{OK!}$$

- Cálculo do volume do reservatório (VR):

$$VR = 648000 - \frac{50 \cdot 0,20 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 180}{1000} = 648000 - 155520$$

$$VR = 492480 \text{ m}^3$$

- Cálculo do espelho d'água da barragem:

$$A_e = \frac{VR}{\bar{h}} = \frac{492480}{2,5} = 196992 \text{ m}^2 \text{ ou } 19,7 \text{ ha}$$

### c) Cálculo com dados de vazões mensais

Exemplo: Cálculo do volume útil do reservatório para suprir uma área irrigada.

**(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – Esquema de entradas e saídas de água da barragem)**

$$Q_{E \text{ efet}} = Q_{EB} + ppt - Q_j + Ev$$

$Q_{E \text{ efet}}$  – vazão de entrada efetiva

$Q_{EB}$  – vazão de entrada bruta

ppt – precipitação pluvial (chuva)

$Q_j$  – vazão de jusante (estabelecida pela instituição outorgante)

Ev – evaporação de água no reservatório

**(XEROX – SÉRGIO – Nº 5 – Gráfico e tabela de balanço hidrológico)**

Exemplo: Calcular o volume do reservatório para regularização de vazão utilizando os seguintes dados ( $C_i$  = coluna “i”;  $i = 1$  a 13):

**(DISTRIBUIR XEROX – EXERCÍCIO - Tabela de balanço hidrológico)**

Área estimada do espelho hidráulico: 5 ha (50.000 m<sup>2</sup>)

Módulo da bacia hidrográfica:  $\alpha = 0,25$

$C_1$  – Vazão de entrada bruta:  $Q_{E \text{ bruta}}$  (L/s) → Ver tabela

$C_2$  – Vazão de jusante:  $Q_j = 18$  L/s

$C_3$  – Vazão demandada:  $Q_d = 80$  L/s

$C_4$  – Evaporação do tanque Classe A (ECA, mm/mês) → Ver tabela

$C_5$  – Precipitação mensal:  $P_m$  → Ver tabela

Obs.: N° médio de dias/mês =  $365 / 12 = 30,417$  dias/mês

$C_6$  – Volume bruto mensal (m<sup>3</sup> x 1000):  $V_{Bm} = C_1 \times \frac{3600 \frac{s}{h} \times 24 \frac{h}{dia} \times 30,417 \frac{dias}{mês}}{10^6}$

$C_7$  – Volume mensal que passará a jusante:  $V_j = C_2 \times \frac{3600 \frac{s}{h} \times 24 \frac{h}{dia} \times 30,417 \frac{dias}{mês}}{10^6}$

$C_8$  – Volume mensal demandado:  $V_d = C_3 \times \frac{3600 \frac{s}{h} \times 24 \frac{h}{dia} \times 30,417 \frac{dias}{mês}}{10^6}$

$C_9$  – Volume evaporado mensal:  $V_E = C_4 \times \frac{A_{eh} (m^2) \times 0,70}{10^6}$

$A_{eh}$  – área do espelho hidráulico

$C_{10}$  – Volume da precipitação mensal:  $V_{ppt} = C_5 \times \frac{A_{eh} (m^2) \times 0,75}{10^6}$

$C_{11}$  – Volume de entrada efetivo (Ppt líq. mensal):  $V_{E \text{ efet}} = C_6 - C_7 - C_9 + C_{10}$

$C_{12}$  – Volume mensal a ser armazenado: Se  $C_8 > C_{11} \Rightarrow V_{arm} = C_8 - C_{11}$

Se  $C_8 \leq C_{11} \Rightarrow V_{arm} = 0$

$C_{13}$  – Volume do reservatório:  $VR = \sum C_{11}$

PLANILHA PARA CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO													
	DADOS DE ENTRADA					CORREÇÕES E TRANSFORMAÇÕES DE UNIDADES					BALANÇO E SAÍDAS		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MÊS	Q <sub>EB</sub>	Q <sub>j</sub>	Q <sub>d</sub>	ECA	PPT	Vol <sub>EB</sub>	Vol <sub>J</sub>	Vol <sub>d</sub>	Vol <sub>EV</sub>	Vol <sub>PPT</sub>	Vol <sub>Eefet</sub>	Vol <sub>Arm</sub>	Vol <sub>Eefet Acum</sub>
	----- (L/s) -----			(mm/mês)		----- m <sup>3</sup> x 1000 -----					----- m <sup>3</sup> x 1000 -----		
JAN	400	18	80	150	300	1051,20	47,30	210,24	5,25	11,25	1009,90	0	1009,90
FEV	200	18	80	170	200	525,60	47,30	210,24	5,95	7,50	479,85	0	1489,74
MAR	100	18	80	140	150	262,80	47,30	210,24	4,90	5,63	216,22	0	1705,96
ABR	60	18	80	120	120	157,68	47,30	210,24	4,20	4,50	110,68	99,56	1816,64
MAI	55	18	80	100	80	144,54	47,30	210,24	3,50	3,00	96,74	113,50	1913,38
JUN	50	18	80	90	50	131,40	47,30	210,24	3,15	1,88	82,82	127,42	1996,20
JUL	45	18	80	70	20	118,26	47,30	210,24	2,45	0,75	69,26	140,98	2065,45
AGO	40	18	80	60	0	105,12	47,30	210,24	2,10	0,00	55,72	154,52	2121,17
SET	30	18	80	70	50	78,84	47,30	210,24	2,45	1,88	30,96	179,28	2152,13
OUT	50	18	80	90	70	131,40	47,30	210,24	3,15	2,63	83,57	126,67	2235,70
NOV	100	18	80	100	100	262,80	47,30	210,24	3,50	3,75	215,75	0	2451,45
DEZ	300	18	80	120	200	788,40	47,30	210,24	4,20	7,50	744,40	0	3195,84
Área do espelho hidráulico (ha):					5,0						VR (m <sup>3</sup> x 1000):	941,94	
Módulo da bacia hidrográfica (α):					0,25						Vol <sub>Eef</sub> Anual (m <sup>3</sup> x 1000):	24153,55	
											Q <sub>Eef</sub> média (L/s):	101,34	

Q <sub>EB</sub> - Vazão de entrada bruta	Vol <sub>EB</sub> - volume de entrada bruto
Q <sub>j</sub> - vazão a jusante do reservatório	Vol <sub>J</sub> - volume que deve chegar a jusante do reservatório
Q <sub>d</sub> - vazão demandada	Vol <sub>d</sub> - volume demandado pelo projeto
ECA - evaporação de água no tanque Classe A	Vol <sub>EV</sub> - volume evaporado no espelho hidráulico do reservatório
PPT - precipitação pluvial	Vol <sub>PPT</sub> - volume de precipitação pluvial sobre o reservatório
	VR - volume do reservatório