

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

Prof. Fernando Campos Mendonça

4 - ESCOAMENTO SUPERFICIAL

3) escoamento superficial

3.1) Considerações iniciais

3.1.1) Q_T e $Q_{m\acute{a}x}$ em cursos d'água superficiais (rios, córregos etc.)

a) Efêmeros: $Q_T = Q_{SUP}$

b) Permanentes: $Q_T = Q_{SUP} + Q_{SUB}$

▪ Cursos pequenos: $Q_{SUP} = 90\% Q_{m\acute{a}x}$ $Q_{SUB} = 10\% Q_{m\acute{a}x}$

3.1.2) Destinos da precipitação intensa:

a) Interceptação vegetal

b) Armazenamento:

- Zona radicular
- Superficial

c) escoamento:

- Superficial (rápido)
- Subsuperficial (médio)

d) Infiltração: Esc. subterrâneo → LF (lento)

e) Ppt direta na calha

RIO

(TRANSPARÊNCIA Aula 4_transp4-1 – VAZÃO DE UM RIO)

3.1.3) Vazão de pico dos rios (Q_p):

f) Grandes e médios: $Q_p = Q_{SUP} + Q_{SUB}$

g) Pequenos: $Q_p \approx Q_{SUP}$

3.1.4) Hidrógrafas das chuvas:

(DESENHOS – CADERNO – HIDRÓGRAFAS)

3.2) Método Racional.

Observações:

- a) Coeficiente de escoamento superficial (C)
- b) Determinação do tempo de concentração (t_c)

Exercícios 1 e 2 – Cálculo de t_c e estimativa de Q_p **Exercício 3 – Cálculo do diâmetro de um bueiro (ϕ)**

ENTREGA DE FOLHA DE EXERCÍCIO - DIMENSIONAMENTO DE TRAVESSIA

(DESENHO DE UM BUEIRO SOB ESTRADA)

1 – Cálculo do declive dos trechos 1-2 (pastagem fechada) e 2-0 (talvegue)

DEIXAR ALUNOS RESOLVEREM

Solução:Trecho 1-2: $L_1 = 3,9 \text{ cm} \times 50 \text{ m/cm} = 195 \text{ m}$

$$\Delta z_1 = 90 - 82 = 8 \text{ m}$$

$$I_1 = \Delta z_1 / L_1 = 8 / 195 = 0,041 \text{ m/m ou } 4,1\%$$

Pastagem fechada $\rightarrow K = 0,08$ Trecho 2-0: $L_2 = 3,9 \text{ cm} \times 50 \text{ m/cm} = 195 \text{ m}$ Talvegue $\rightarrow K = 0,45$

$$\Delta z = 82 - 80 = 2 \text{ m}$$

$$I_2 = \Delta z_2 / L_2 = 2 / 195 = 0,0103 \text{ m/m ou } 1,03\%$$

2 – Cálculo do tempo de concentração

$$t_c = t_{p1} + t_{p2}$$

$$t_p = \frac{L}{K\sqrt{I}}$$

$$t_c = \frac{195}{0,08\sqrt{4,1}} + \frac{195}{0,45\sqrt{1,03}} = 1203,8 + 427 = 1630,8 \text{ s ou } 27,18 \text{ min ou } 0,453 \text{ h}$$

3 – Tempo de concentração em minutos: $t_c = 27,18 \text{ min}$

4 - Cálculo da chuva ($t = t_c$ e $T = 100$ anos)

$$T = 27,18 \text{ min}$$

Tabela CETESB (Pfafstetter): Goiânia

t (min)	h (mm)	i (mm/h)
15	46	184
30	66	132
27,18

$\Delta t = 15$ (between 15 and 30)
 $\Delta h = x$ (between 46 and 66)
 $\Delta i = -52$ (between 184 and 132)

$$t = 27,18 \text{ min}; T = 100 \Rightarrow i = 137,4 \text{ mm/h}; h = 62,24 \text{ mm}$$

5 – Tempo de concentração em horas: $t_c = 0,453 \text{ h}$

6 – Intensidade de precipitação considerada: $t = 27,18 \text{ min} \Rightarrow i = 137,4 \text{ mm/h}$

7 – Determinação do coeficiente de escoamento superficial (C):

Tabela SCS-USDA: Pastagem em solo argiloso $\Rightarrow C = 0,40$

8 – Cálculo da vazão de pico:

$$Q_p = \frac{C i A}{360} = \frac{0,40 \times 137,4 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \times 14,3 \text{ ha}}{360} = 2,18 \text{ m}^3/\text{s}$$

9 – Cálculo do diâmetro do bueiro:

$$H_{\max} = 0,5 \text{ m} \quad (\text{DESENHO DO BUEIRO})$$

$$C_d = 0,73$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} C_d \sqrt{2 g H} \Rightarrow D = \frac{4 Q}{\pi C_d \sqrt{2 g H}} = \frac{4 \times 2,18}{\pi \times 0,73 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,5}} = 1,1 \text{ m}$$

$$D_c = 1500 \text{ mm}$$

Exercício 4 – Dimensionamento de dreno de encosta

Calcular a vazão de pico de escoamento superficial (Q_p) para o dreno da figura abaixo.

Planta baixa:

(DESENHO – ENCOSTA, VÁRZEA, RIO E DRENO)

Perfil longitudinal:

(DESENHO DO PERFIL)

$$Q = Q_p$$

$$t_c = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3}$$

(Água só entra até o ponto 3)

Dados:

Local: Piracicaba, SP

Solo argiloso com pastagem fechada

Aluguel de retroescavadeira: R\$/h 120,00 a 140,00

Trechos:

$$1-2: K_{1-2} = 0,08; I = 8\%$$

$$2-3: K_{2-3} = 0,45; I = 0,2\%$$

Cálculo de t_c :
$$t_c = t_{p1-2} + t_{p2-3} = \frac{400}{0,08 \sqrt{8}} + \frac{500}{0,45 \sqrt{0,2}} = 16626,7 \text{ s} \quad \text{ou} \quad 70,9 \text{ min}$$

Cálculo de “ i ”:

$$T = 10 \text{ anos}$$

$$t = 70,9 \text{ min}$$

$$i = \frac{2010,05 \times T^{0,16}}{(t+21)^{0,91}} = \frac{2010,05 \times 10^{0,16}}{(70,9 + 21)^{0,91}} = 47,65 \text{ mm/h}$$

Cálculo de Q_p :

Tabela SCS-USDA: Pastagem em solo argiloso $c/ I = 8\% \rightarrow C = 0,55$

$$i = 47,65 \text{ mm/h}$$

$$A = 400 \text{ m} \times 500 \text{ m} = 200.000 \text{ m}^2 = 20 \text{ ha}$$

$$Q_p = \frac{C i A}{360} = \frac{0,55 \times 47,65 \frac{mm}{h} \times 20 ha}{360}$$

$$Q_p = 14,56 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dimensionamento do dreno:

(DESENHO DO DRENO C/MEDIDAS)

Supondo $n = 0,030 \rightarrow$ Cálculo da vazão

Opções de caçamba: 35 cm, 40 cm, 50 cm

$$\text{Equação de Manning: } Q = \frac{S}{n} R_H^{2/3} I^{0,5}$$

$$R_H = \text{raio hidráulico } R_H = \frac{S}{P}$$

S = área da seção molhada, m^2

P = perímetro molhado, m

I – declividade do canal, m/m

c) Áreas em paralelo:

(DESENHO DE BHs EM PARALELO)

- 1 – Não somar Q_{p1} e Q_{p2} ;
- 2 – Considerar as BHs como uma só e usar o maior dos t_c ;
- 3 – Usar coeficiente C ponderado pela área de cada BH;
- 4 – Usar a área total (soma das áreas das BHs).

d) Áreas em série:

Ex.: terraços em desnível.

(DESENHO – TERRAÇOS EM DESNÍVEL – PLANTA BAIXA E PERFIL)

Tabela de dimensionamento:

P/ dimensionar	t_c	Área de contribuição
* T_{2-6}	1-2-6	1265
T_{2-6}	2-3-7	2376
...

**C ₆₋₇	1-2-6	1265
C ₇₋₈	1-2-6-7	1375
C ₈₋₉	1-2-6-7-8	1485

*T – terraço **C - canal

Obs.: Os tempos de concentração não são iguais para cada trecho, portanto não se deve somar as vazões de pico de cada terraço para calcular a vazão de pico total no ponto de descarga.

Exercício para casa – Cálculo de vazão de pico para área com terraços

Software PLUVIO 2.1 → $i = \frac{K T^a}{(t+b)^c}$

t = 30 min

T = 10 anos

Terraços de escoamento (Planta enviada por e-mail)

Fazer apenas Terraço 5B e Canal CD

e) Fórmula empírica para cálculo de tc:

“California culverts practice formula”

(Fórmula prática para bueiros da Califórnia)

(DESENHO DE BH mostrando L)

$$tc = 57 \left(\frac{L^2}{I_{eq}} \right)^{0,385}$$

L – comprimento axial da BH (km)

I_{eq} – declividade equivalente do talvegue (m/km)

- Método mais simples que o método das sete trajetórias

- Tendência de superestimar Q_p, devido ao cálculo de tc dar valores menores

tc ↓ i ↑ Q_p ↑

f) Estimativa aproximada do coeficiente “C” (efeito da urbanização)

C = f (uso do solo) (TRANSPARÊNCIA HIDROLtransp3-8.pdf)

g) Problemas da Fórmula Racional para grandes áreas

1 – Não considera o amortecimento da cheia (acúmulo de água na calha)

↑ ↓

- 2 – Não considera que, para t_c elevado, C deveria ser reduzido ($t_c > C$)
 3 – Não considera a distribuição espacial da chuva ($h = h_{\text{epicentro}}$)
 4 – Áreas maiores (> 50 ha) \rightarrow superestimativa de Q_p
 * Fórmula Racional tem uso restrito a áreas de até 50 ha

3.3) Fórmula Racional Modificada (DAEE)

50 ha $< A \leq 200$ ha

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \cdot D$$

$$D = 1 - 0,009 \frac{L}{2}$$

L – comprimento axial da BH (km)

3.4) Método de I-Pai-Wu (1963)

200 ha $< A \leq 20.000$ ha

$$Q_p = \frac{1}{360} \times C^* \times i \times A^{0,9} \times 100 \times K \rightarrow \boxed{Q_p = 0,278 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K}$$

A – área da BH (km^2)

K – fator de redução de chuva em relação à área da BH

TRANSPARÊNCIA – GRÁFICO $K = f(A_b)$

$$C^* = C \times \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)}$$

$$F = \frac{L}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \rightarrow \text{Fator de forma de I-Pai-Wu}$$

Ex.: $F = 1,0$ $C^* = 0,750 \times C$

$F = 1,5$ $C^* = 0,699 \times C$

$F = 2,0$ $C^* = 0,666 \times C$

BHs grandes $\rightarrow Q_{\text{sub}}$ (ou Q_{base}) contribui para a vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$)

$$Q_{\text{máx}} = Q_p + Q_{\text{base}}$$

$$\text{Aproximação: } Q_{\text{base}} = 0,1 Q_p$$

$$Q_{\text{máx}} = 1,1 Q_p \rightarrow \text{Áreas maiores que 50 ha}$$

Exercício (sala de aula):

Cálculo de $Q_{\text{máx}}$ da BH pelo método de I-Pai-Wu e comparação do resultado com o obtido pelo Método Racional.

Dados:

$$A = 20000 \text{ ha (200 km}^2\text{)}$$

$$C = 0,30$$

$$L = 35 \text{ km}$$

$$I_{\text{eq}} = 1,8 \text{ m/km}$$

$$\text{Equação de chuva intensa de Piracicaba: } i = \frac{2010,05 \times T^{0,16}}{(t+21)^{0,91}}$$

$$T = 50 \text{ anos}$$

Resolução:

a) Método de I-Pai-Wu

$$F = \frac{L}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{35}{2\sqrt{\frac{200}{\pi}}} = 2,19$$

$$C^* = C \times \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)} = 0,30 \times \frac{\left(\frac{2}{1+2,19}\right)}{\left(\frac{4}{2+2,19}\right)} = 0,197$$

$$tc = 57 \left(\frac{L^2}{I_{\text{eq}}}\right)^{0,385} = 57 \left(\frac{35^2}{1,8}\right)^{0,385} = 702,3 \text{ min ou } 11,7 \text{ h}$$

$$i = \frac{2010,05 \times T^{0,16}}{(t+21)^{0,91}} = \frac{2010,05 \times 10^{0,16}}{(702,3 + 21)^{0,91}} = 9,43 \text{ mm/h}$$

Tabela: $A = 200 \text{ km}^2 \rightarrow K = 0,92$ (TRANSPARÊNCIA OU DATASHOW)

$$Q_p = 0,278 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K = 0,278 \times 0,197 \times 9,43 \times 200^{0,9} \times 0,92$$

$$Q_p = 55,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{máx}} = 1,1 Q_p = 1,1 \times 55,9 = 61,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Método Racional

$$C = 0,30$$

$$i = 9,43 \text{ mm/h}$$

$$A = 20.000 \text{ ha}$$

$$Q_p = \frac{C i A}{360} = \frac{0,30 \times 9,43 \times 20000}{360} = 157,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{máx}} = Q_p = 157,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Comparação:

I-Pai-Wu: $Q_{\text{máx}} = 61,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Racional: $Q_{\text{máx}} = 157,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Diferença: $- 95,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (- 61%)

Obs.: Quando é possível assumir $Q_{\text{máx}} = Q_p$, a bacia hidrográfica é chamada de MICROBACIA.