

**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

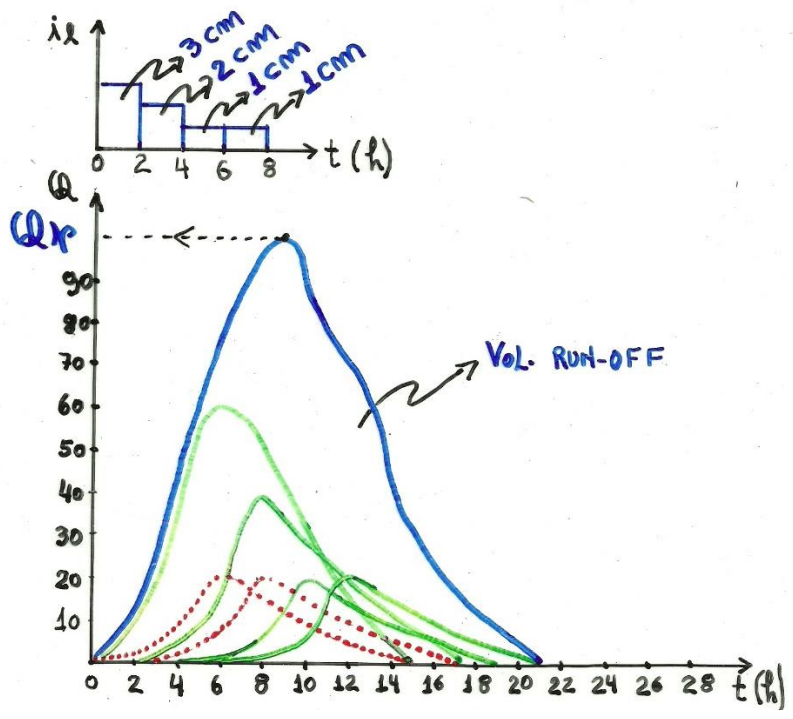
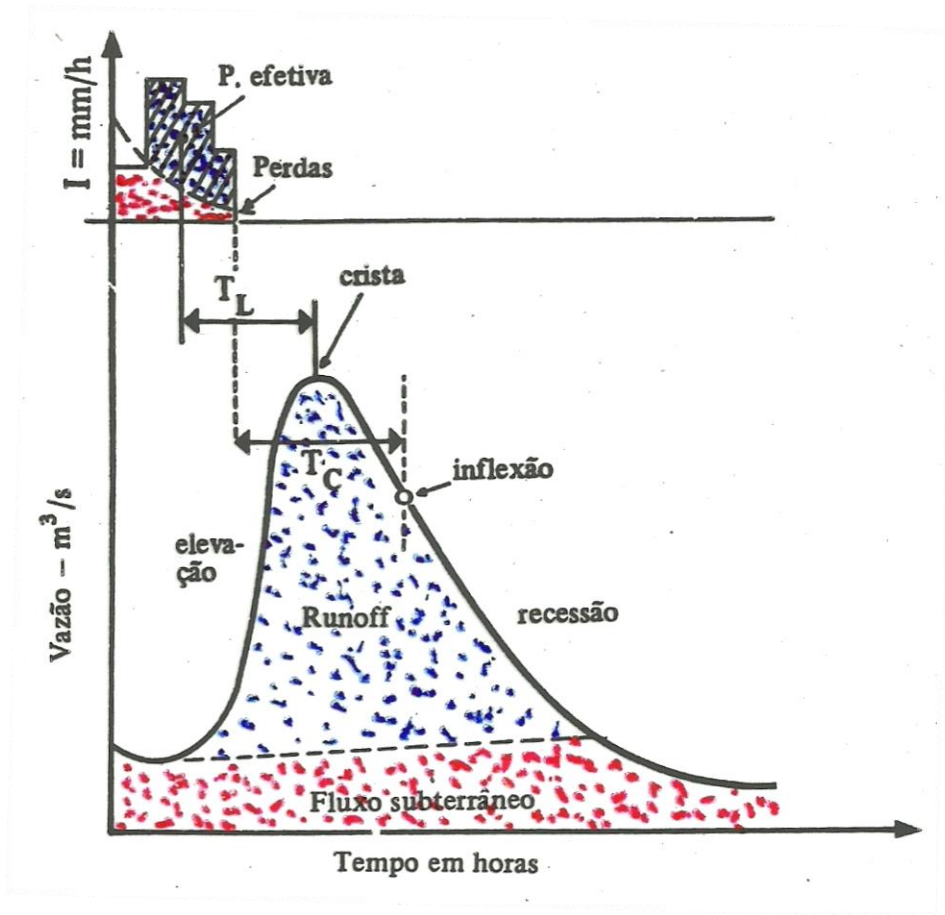
(TRANSPARÊNCIA Aula 4_transp4-1 – VAZÃO DE UM RIO)

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:



3.2) Método Racional (MULVANEY, 1851).

Observações:

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

Exercícios 1 e 2 – Cálculo de tc 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 2-1: $L_1 = 3,9 \text{ cm} \times 50 \text{ m/cm} = 195 \text{ m}$

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

$$I_1 = \Delta z_1 / L_1 = 8 / 195 = 0,0410 \text{ m/m ou } 4,10\%$$

Pastagem fechada $\rightarrow K = 0,08$

Trecho 1-0: $L_2 = 3,9 \text{ cm} \times 50 \text{ m/cm} = 195 \text{ m}$

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

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

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

$$t_c = \frac{195}{0,08\sqrt{4,1}} + \frac{195}{0,45\sqrt{1,03}} = 1156,3 + 382,9 = 1539,2 \text{ s ou } 25,7 \text{ min ou } 0,43 \text{ h}$$

3 – Tempo de concentração em minutos: $t_c = 25,7 \text{ min}$

4 - Cálculo da chuva ($t = t_c$ e $T = 100 \text{ anos}$)

$$T = 25,7 \text{ min}$$

Tabela CETESB (Pfafstetter): Goiânia

t (min)	h (mm)	i (mm/h)
$\left. \begin{matrix} 15 \\ 30 \\ 25,7 \end{matrix} \right\} \Delta t = 15$ $\Delta t = 12,18$	$\left. \begin{matrix} 46 \\ 66 \\ \dots \end{matrix} \right\} \Delta h = 20$ $\Delta h = x$	$\left. \begin{matrix} 184 \\ 132 \\ \dots \end{matrix} \right\} \Delta i = - 52$ $\Delta i = y$

$$t = 25,7 \text{ min}; T = 100 \Rightarrow i = 140,2 \text{ mm/h}; h = 60,3 \text{ mm}$$

5 – Tempo de concentração em horas: $t_c = 0,43 \text{ h}$

6 – Intensidade de precipitação considerada: $t = 25,7 \text{ min} \Rightarrow i = 140,2 \text{ mm/h}$

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:

$$Q_p = \frac{C \ i \ A}{360} = \frac{0,40 \times 140,2 \frac{mm}{h} \times 14,3 \ ha}{360} = 2,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

9 – Cálculo do diâmetro do bueiro:

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

$$C_d = 0,73$$

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} C_d \sqrt{2 g H} \Rightarrow D = \frac{4 Q}{\pi C_d \sqrt{2 g H}} = \frac{4 \times 2,22}{\pi \times 0,73 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,5}} = 1,1 \text{ m}$$

$$D_c = 1,1 \text{ m ou } 1100 \text{ mm}$$

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 180,00

Trechos:

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

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

Cálculo de t_c :
$$t_c = t_{p1-2} + t_{p2-3} = \frac{400}{0,08 \sqrt{8}} + \frac{500}{0,45 \sqrt{0,2}} = 4252,3 \text{ s} \quad \text{ou } 70,9 \text{ min}$$

Cálculo de “i”:

$T = 10$ anos

$t = 70,9$ min

Cálculo de Q_p :

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

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

$i = 47,65$ mm/h

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

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

$$Q_p = 1,456 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dimensionamento do dreno:

(DESENHO DO DRENO C/MEDIDAS)

$b = 0,35$ m

$S = 1,86 \text{ m}^2$ $P = 3,74 \text{ m}$ $R_h = 0,497$

$Q = 1,74 \text{ m}^3/\text{s}$

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

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

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

$R_H =$ 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_p das BHs (Q_{p1} ; Q_{p2} ; etc.).
- 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 _{3-A}	1-3-A	1-2-3-4
T _{5-B}	3-5-B	3-4-5-6
T _{7-C}	5-7-C	5-6-7-8
...
**C _{A-B}	1-3-A	1-2-3-4
C _{B-C}	1-3-A-B	1-2-5-6
C _{C-D}	1-3-A-B-C	1-2-7-8
C _{D-E}	1-3-A-B-C-D	1-2-9-10
C _{E-S}	1-3-A-B-C-D-E	1-2-11-12

*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 terraçosSoftware PLUVIO 2.1 $\rightarrow i = \frac{K T^a}{(t+b)^c}$

Calcular:

- a) O tempo de concentração (t_c) e a duração das chuvas de projeto (t) de cada terraço e dos trechos do canal;
- b) A intensidade de cada chuva de projeto (i);
- c) A vazão de pico de cada terraço ($T = 10$ anos) e dos trechos do canal ($T = 25$ anos);

Terraços de escoamento (Planta e este texto disponíveis no site do LEB)

Fazer cálculos para todos os terraços e todos os trechos do canal.

e) Fórmula empírica para cálculo de tc:

“California culverts practice formula”

(Fórmula prática para bueiros da Califórnia)

(DESENHO DE BH mostrando L)

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

tc – tempo de concentração (min)

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)

$C = f(\text{uso do solo})$ (TRANSPARÊNCIA HIDROLtransp4-8.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 tc elevado, C deveria ser reduzido (tc ↑ C ↓)

3 – Não considera a distribuição espacial da chuva ($h = h_{epicentro}$)

4 – Áreas maiores (> 50 ha) → superestimativa de Q_p

* Fórmula Racional tem uso restrito a áreas de até 50 ha

3.3) Fórmula Racional Modificada (DAEE)

50 ha < A ≤ 200 ha

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

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

L – comprimento axial da BH (km)

3.4) Método de I-Pai-Wu (1963)

200 ha < A ≤ 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 (km²)

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

TRANSPARÊNCIA – GRÁFICO K = f (Ab)

$$C^* = C \times \frac{\left(\frac{2}{1+F}\right)}{\left(\frac{4}{2+F}\right)} \quad F = \frac{L}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \rightarrow \text{Fator de forma de I-Pai-Wu}$$

Ex.: F = 1,0 C* = 0,750 x C

F = 1,5 C* = 0,699 x C

F = 2,0 C* = 0,666 x C

BHs grandes → Q_{sub} (ou Q_{base}) contribui para a vazão máxima (Q_{máx})

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

Aproximação: Q_{base} = 0,1 Q_p

Q_{máx} = 1,1 Q_p → Áreas maiores que 50 ha

Exercício (sala de aula):

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

Dados:

A = 20000 ha (200 km²)

C = 0,30

L = 35 km

I_{eq} = 1,8 m/km

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

T = 50 anos

Resolução:a) Método de I-Pai-Wu

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

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

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

$$i = \frac{2010,05 \times T^{0,16}}{(t+21)^{0,91}} = \frac{2010,05 \times 50^{0,16}}{(702,3 + 21)^{0,91}} = 9,4 \text{ mm/h}$$

Tabela: $A = 200 \text{ km}^2 \rightarrow K = 0,9161$ (DATASHOW + regra de 3)

$$Q_p = 0,278 \cdot C^* \cdot i \cdot A^{0,9} \cdot K = 0,278 \times 0,197 \times 9,4 \times 200^{0,9} \times 0,9161$$

$$Q_p = 55,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{máx}} = 1,1 Q_p = 1,1 \times 55,53 = 61,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Método Racional

$$C = 0,30$$

$$i = 9,4 \text{ mm/h}$$

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

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} = \frac{0,30 \times 9,4 \times 20000}{360} = 156,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{máx}} = Q_p = 156,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

Comparação:

I-Pai-Wu: $Q_{\text{máx}} = 61,3 \text{ m}^3/\text{s}$ Racional: $Q_{\text{máx}} = 156,7 \text{ m}^3/\text{s}$

Diferença: $- 95,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (- 61%)

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