

Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP



HIDROLOGIA E HIDRÁULICA APLICADAS (LOB1216)

Aula 11 Escoamento Superficial

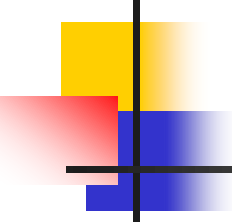
Prof. MSc. Paulo Ricardo Amador Mendes



Escoamento superficial

Fase do ciclo hidrológico que trata da ocorrência e transporte da água na superfície terrestre por efeito da gravidade.

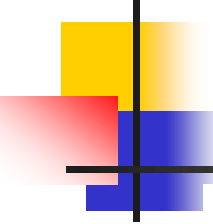
Estudo que engloba desde a gota de água que cai na superfície do solo (saturado ou impermeável) e escorre superficialmente, até o curso de água que desemboca no mar.



Constituição das redes de drenagem superficial

Águas livres: águas correm livremente pela superfície do terreno e cujo escoamento é dado pela linha de maior declive do terreno, sem caminho preferencial.

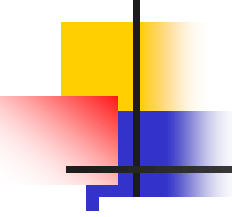
Importância: conhecimento do processo de erosão e problemas ligados à conservação do solo.



Constituição das redes de drenagem superficial

Águas sujeitas: águas que correm em canais naturais formados pela capacidade erosiva do torrente, formando uma rede de drenagem preferencial para o escoamento.

O conjunto de *microrredes de drenagem* contribuem para as redes de drenagem de uma bacia, compreendendo os formadores, subafluentes e afluentes do curso de água principal. **Importância:** conhecimento do processo de fluxo de afluentes e rio principal que encaminha as águas para o destino final.

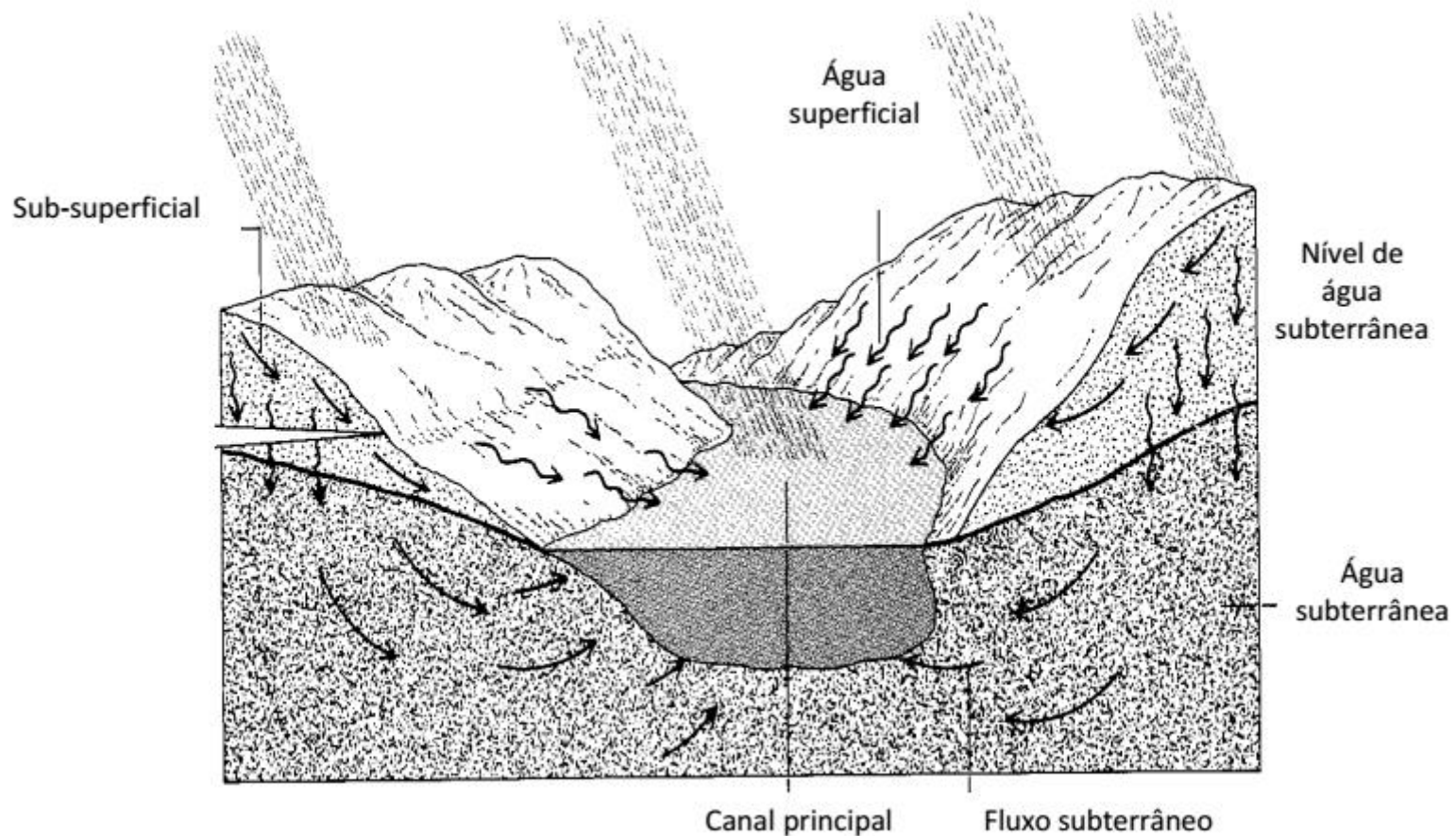


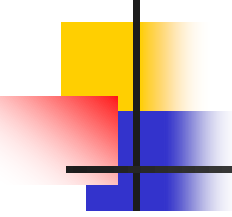
Componentes do escoamento de cursos d'água

As águas provenientes da precipitação atingem o leito do curso de água por quatro vias diversas:

- Precipitação direta no leito do curso
- Escoamento superficial;
- Escoamento subsuperficial;
- Escoamento subterrâneo;

Componentes do escoamento de cursos d'água





Fatores que influenciam o escoamento superficial

- **Fatores de natureza climática:** relacionados à precipitação

Intensidade: influencia no tempo de saturação do solo

Duração: para intensidade constante e maior tempo

Chuva antecedente: solo úmido facilita saturação

Fatores que influenciam o escoamento superficial

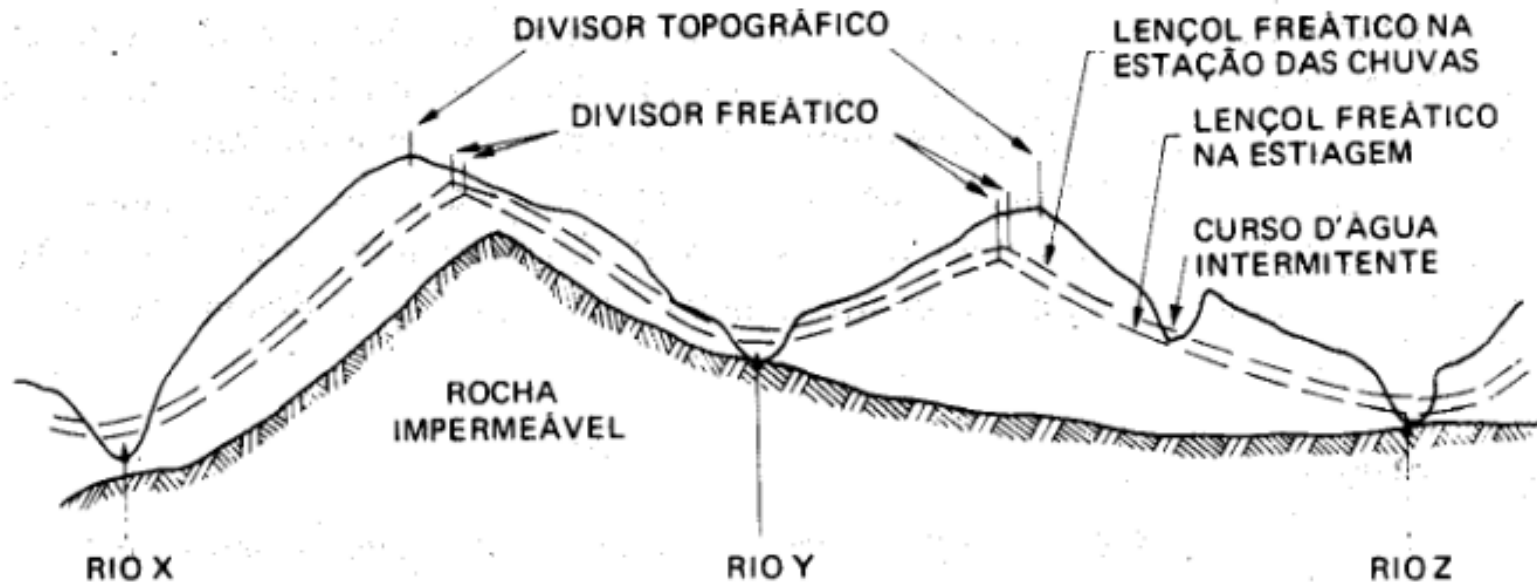


Figura 2.1 – Corte transversal de uma bacia (Fonte: VILLELA, 1975)



Fatores que influenciam o escoamento superficial

- *Fatores de natureza fisiográfica:* relacionados com características físicas da bacia.

- *Área da bacia*
- *Forma da bacia*
- *Permeabilidade e capacidade de infiltração*
- *Topografia*

Fatores que influenciam o escoamento superficial

Área de drenagem → é a área plana inclusa entre seus divisores topográficos. É obtida com a utilização de um planímetro.

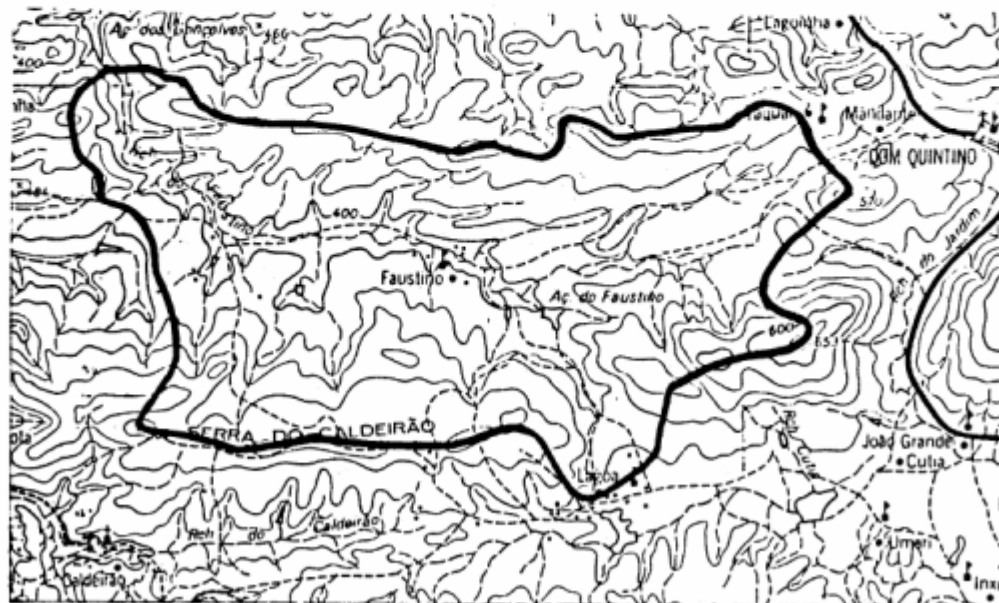
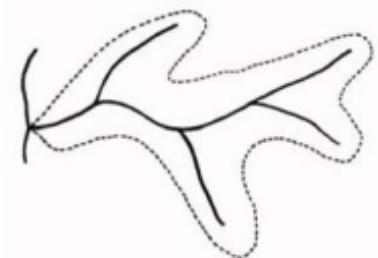


Figura 2.2 – Bacia hidrográfica do Riacho do Faustino (Crato-Ceará)

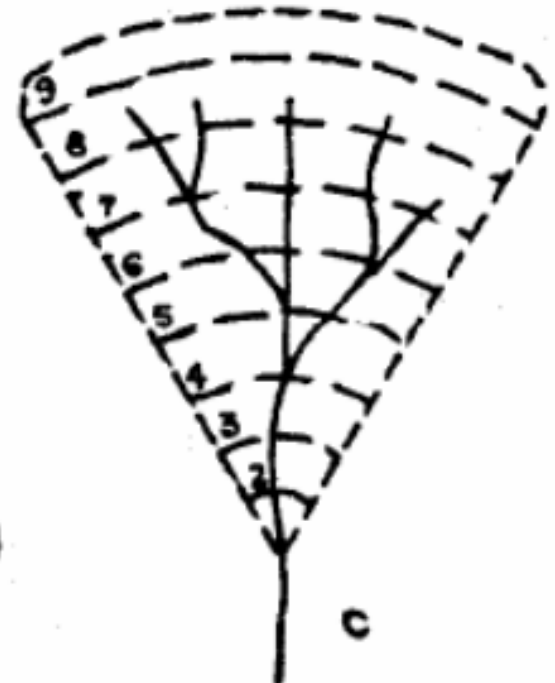
Fatores que influenciam o escoamento superficial

Forma da bacia → contorno definido → apresenta-se um formato → formato tem uma influência sobre o escoamento global;

Ex.: 3 bacias de formatos diferentes, porém de mesma área e sujeitas a uma precipitação de mesma intensidade



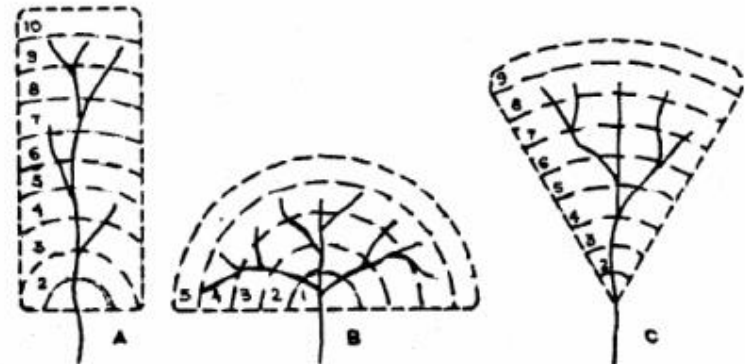
Fatores que influenciam o escoamento superficial



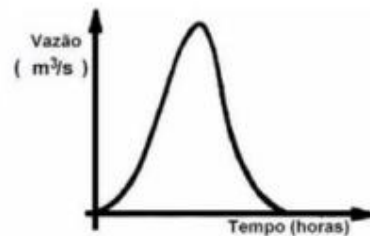
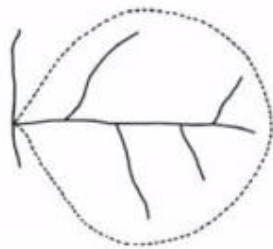
Fatores que influenciam o escoamento superficial

- A bacia de formato A levará 10 unidades de tempo (digamos horas) para que todos os pontos da bacia tenham contribuído para a descarga (tempo de concentração);
- A bacia de formato B precisará de 5,0 horas;
- A bacia de formato C precisará de 8,5 horas;

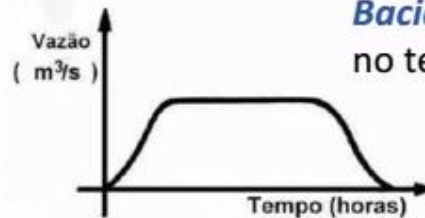
Assim a água será fornecida ao rio principal mais rapidamente na bacia B, depois em C e A, nesta ordem.



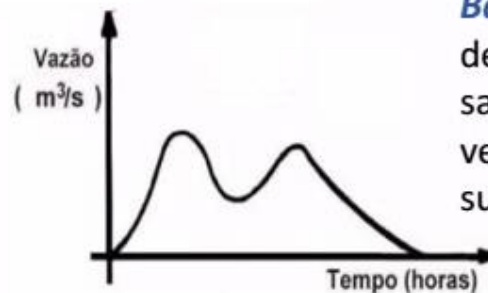
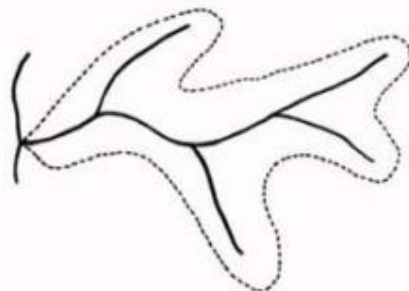
Fatores que influenciam o escoamento superficial



Bacia arredondada: toda a água escoada alcança a saída ao mesmo tempo (enchente maior).



Bacia elíptica: escoamento distribuído no tempo (enchente menor).

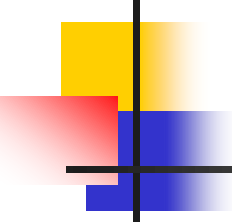


Bacia radial ou ramificada: conjunto de sub-bacias que convergem em uma saída (enchente varia de acordo com a velocidade de escoamento em cada sub-bacia).

Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

- Vazão
- Coeficiente de escoamento superficial
- Tempo de concentração
- Tempo de recorrência
- Nível de água.

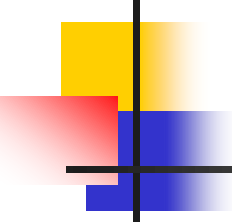




Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

Vazão ou descarga (Q): volumen escoado por unidade de tempo (m^3/s ; L/s). Pode referir-se em vazão por unidade de área da bacia de drenagem (vazão específica) que serve de elemento comparativo entre bacias.

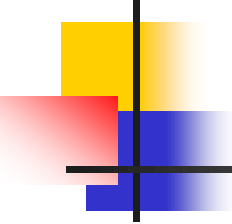
Importa: vazões máximas, vazões mínimas em intervalos de tempo como hora, dia, mês, ano.



Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

Coeficiente de escoamento superficial (C): ou de deflúvio ou “run off” é definido como a razão entre o volume de água total escoado superficialmente na seção e o volume de água precipitado na bacia contribuinte

$$C = \frac{V_{\text{escoado}}}{V_{\text{precipitado}}}$$



Método racional para cálculo de vazão máxima de escoamento

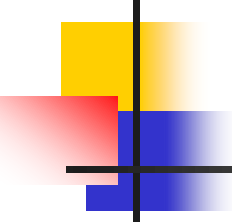
$$Q_{sMax} = C \cdot i \cdot A$$

C: coeficiente de deflúvio ou de escoamento

Q: vazão

i: intensidade de chuva

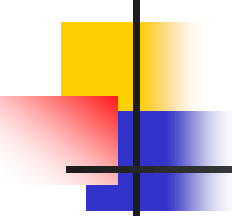
A: área de drenagem



Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

Tempo de concentração (T_c): tempo em que a chuva , que cai no ponto mais distante da secção considerada de uma bacia, leva para atingir esta seção.

Se a chuva cobre toda a bacia , o tempo de concentração mede o tempo que leva para que toda a bacia contribua para o escoamento superficial na seção em estudo.



Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

- Fórmulas empíricas para tempo de concentração:

- Kirpich

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Desenvolvida com dados de 7 bacias < 0,5 km²

S= declividade (m/km)

A= área da bacia (km²)

L= comprimento do curso (km)

H= diferença de cota (m)

T_c= tempo concentração (min)

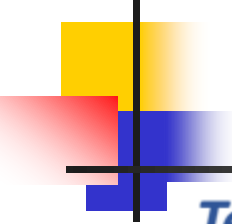
Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

- Dooge

$$t_c = 21,88 \cdot \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}}$$

Desenvolvida com dados de 10 bacias entre 140 e 930 km²

S= declividade (m/km)
A= área da bacia (km²)
Tc= tempo concentração (min)

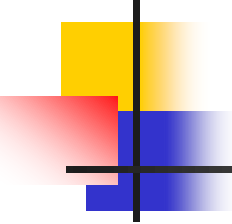


Grandezas que caracterizam o escoamento superficial

Tempo de recorrência (T_c): ou período de retorno ou frequência, é o período de tempo médio em que um determinado evento (neste caso, vazão) é igualado ou superado pelo menos uma vez.

Número de ocorrências de uma mesma vazão em um dado intervalo de tempo

Nível de água (h): altura atingida pelo nível de água em relação a um nível de referência.



Cálculo de velocidade de escoamento (coeficiente)

A velocidade de escoamento superficial é fornecida pela fórmula:

$$V = k \times S^{0,5}$$

Bidone e Tucci, 1995

Sendo:

V= velocidade (m/s);

S= declividade (m/m)

k= coeficiente conforme Tabela (3.2)

Cálculo de velocidade de escoamento (coeficiente)

Tabela 3.2-Coefficientes “k” (SCN, 1975)

Uso da terra e regime de escoamento	Coeficiente k
Floresta com muita folhagem no solo	0,76
Área com pouco cultivo; terraceamento	1,52
Pasto ou grama baixa	2,13
Áreas cultivadas	2,74
Solo quase nu sem cultivo	3,05
Caminhos de escoamento em grama, pasto	4,57
Superfície pavimentada; pequenas vossorocas de nascentes	6,10

Fonte: adaptado de Bidone e Tucci p. 86 in Drenagem Urbana, Tucci, Porto et al., ABRH

$$V = k \times S^{0,5}$$

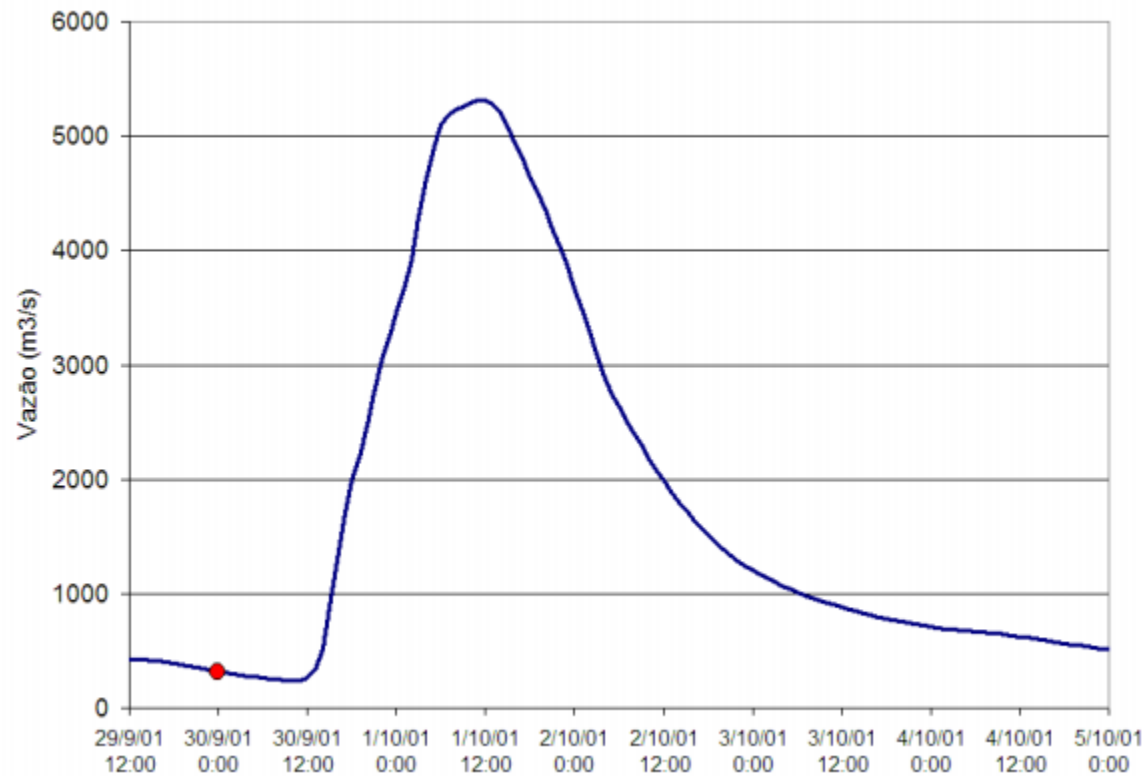
Hidrograma

Denomina-se hidrograma à representação gráfica da variação da vazão em relação ao tempo.

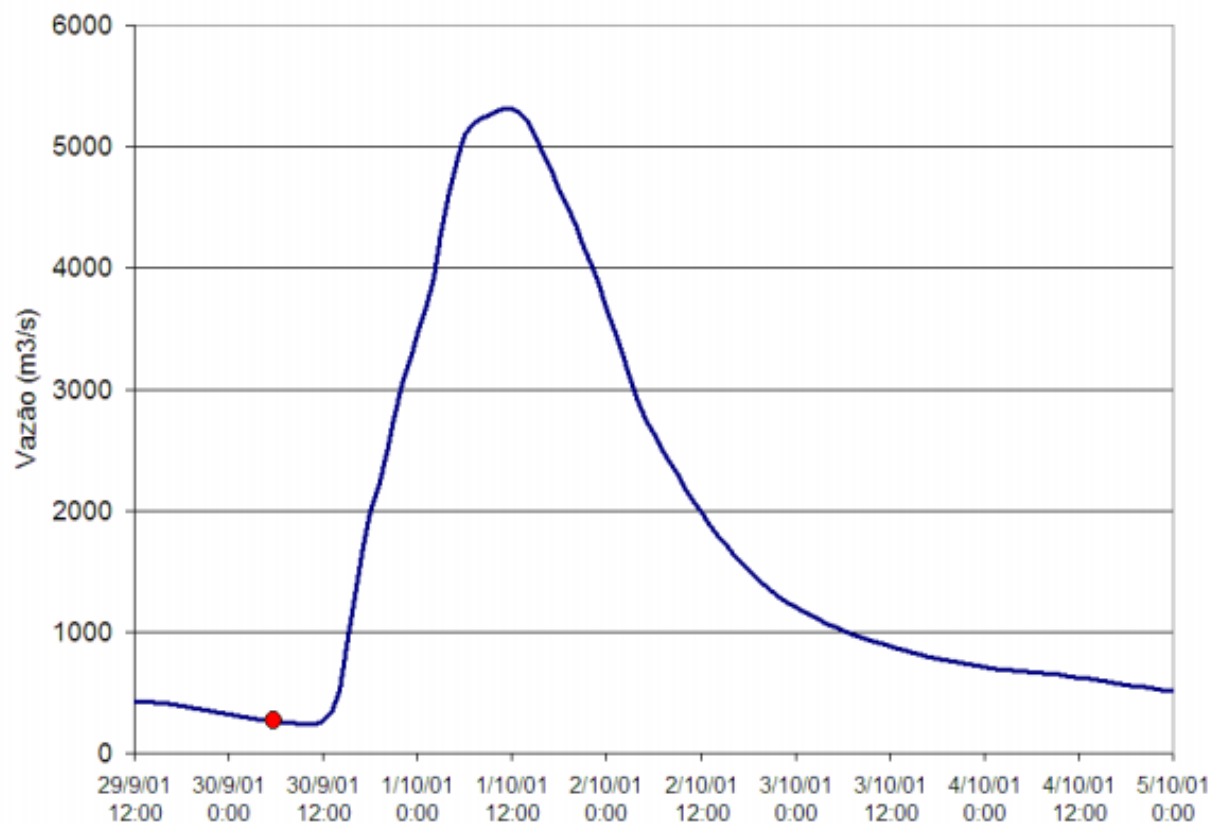


Fig. 6.1 – Usina Barra Bonita – Rio Tietê – Corredeira do Matão

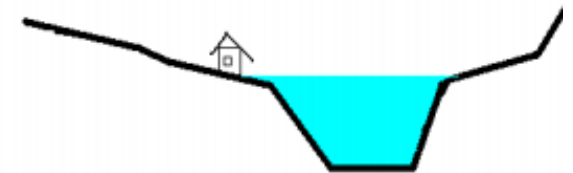
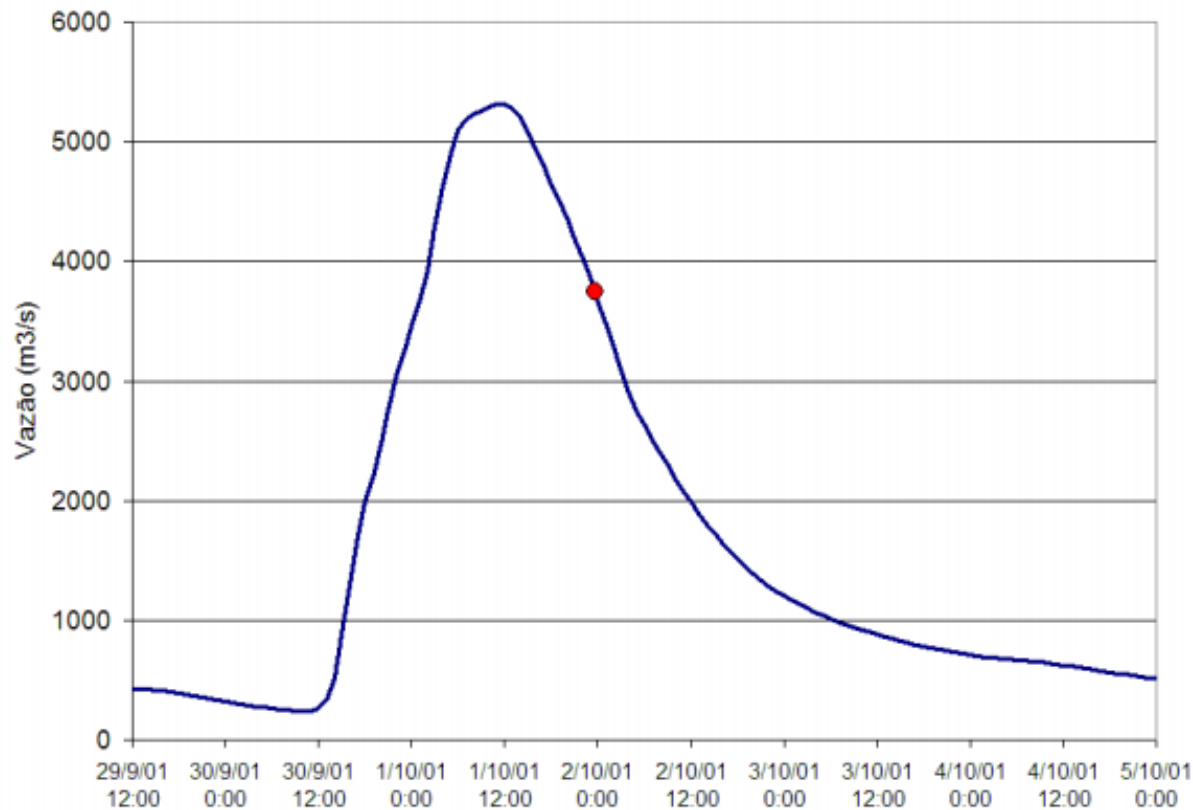
Hidrograma



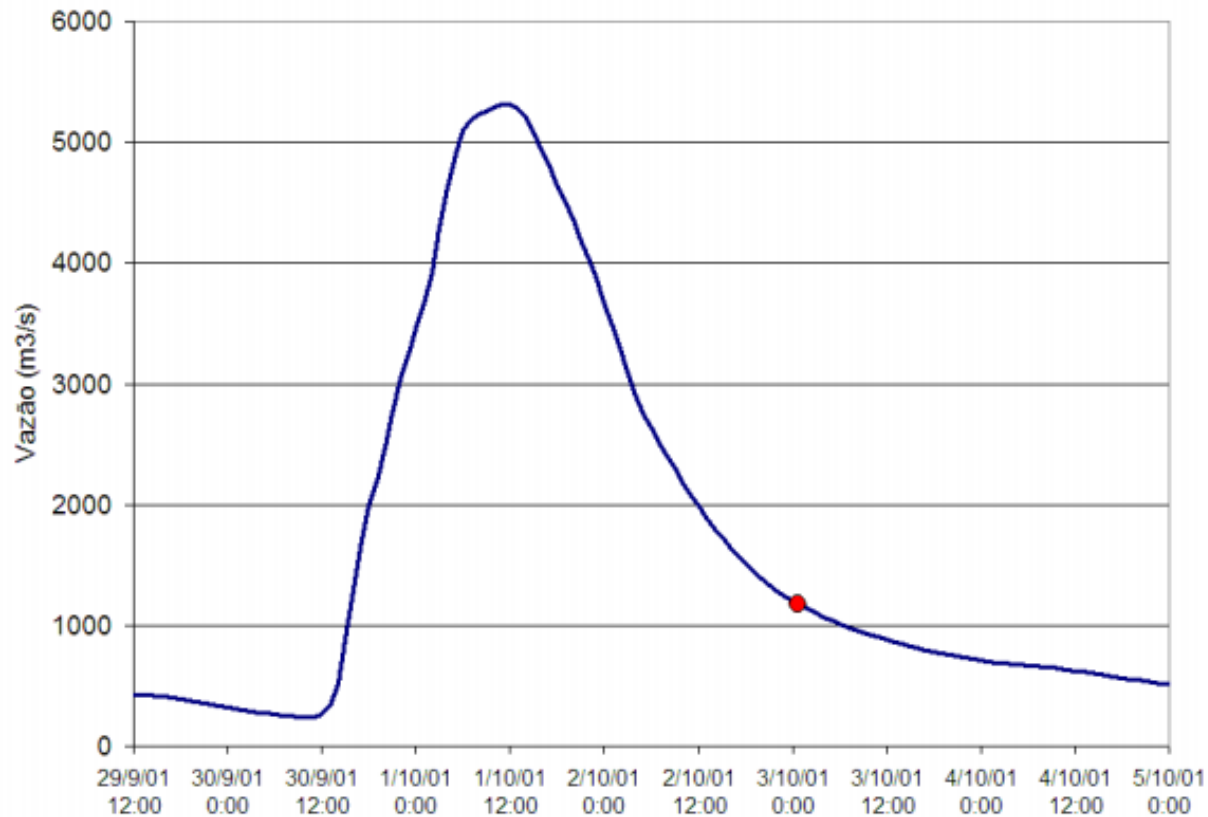
Hidrograma



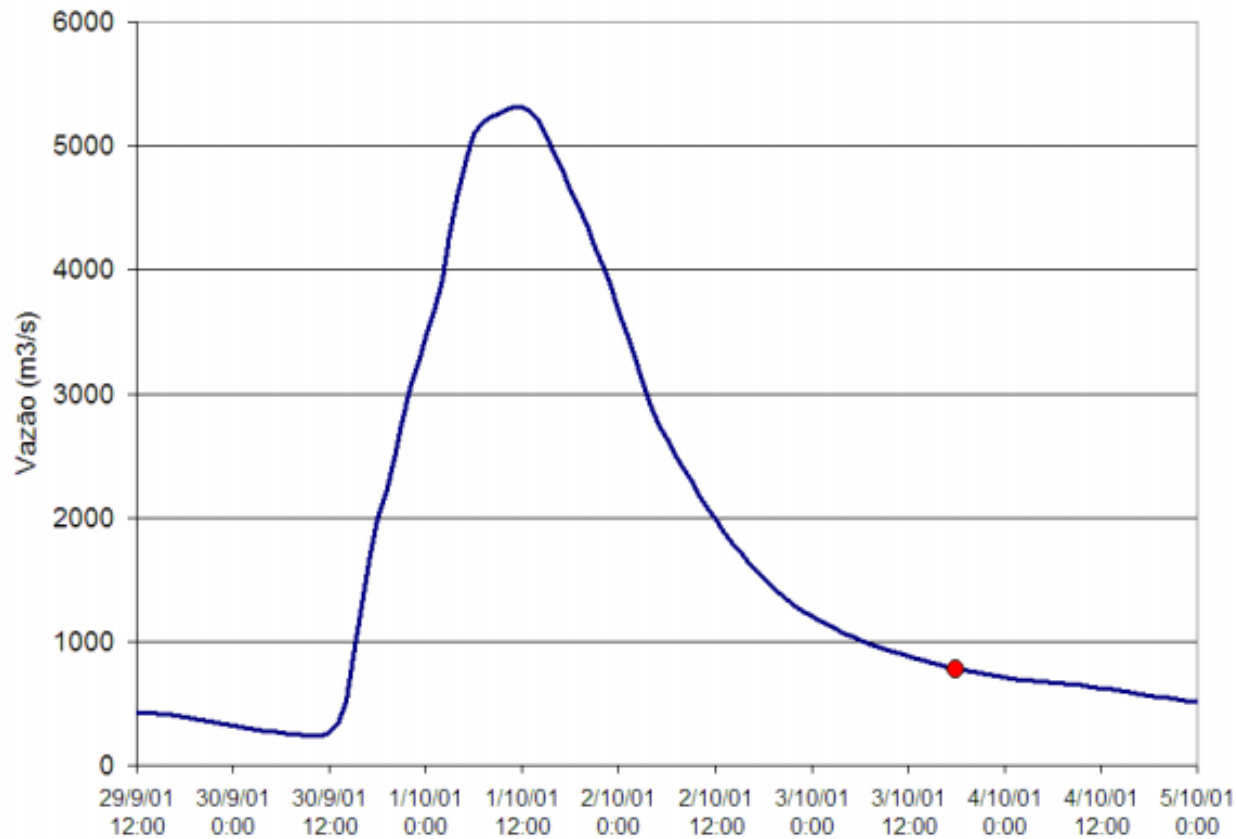
Hidrograma



Hidrograma



Hidrograma



1 – Início do escoamento superficial

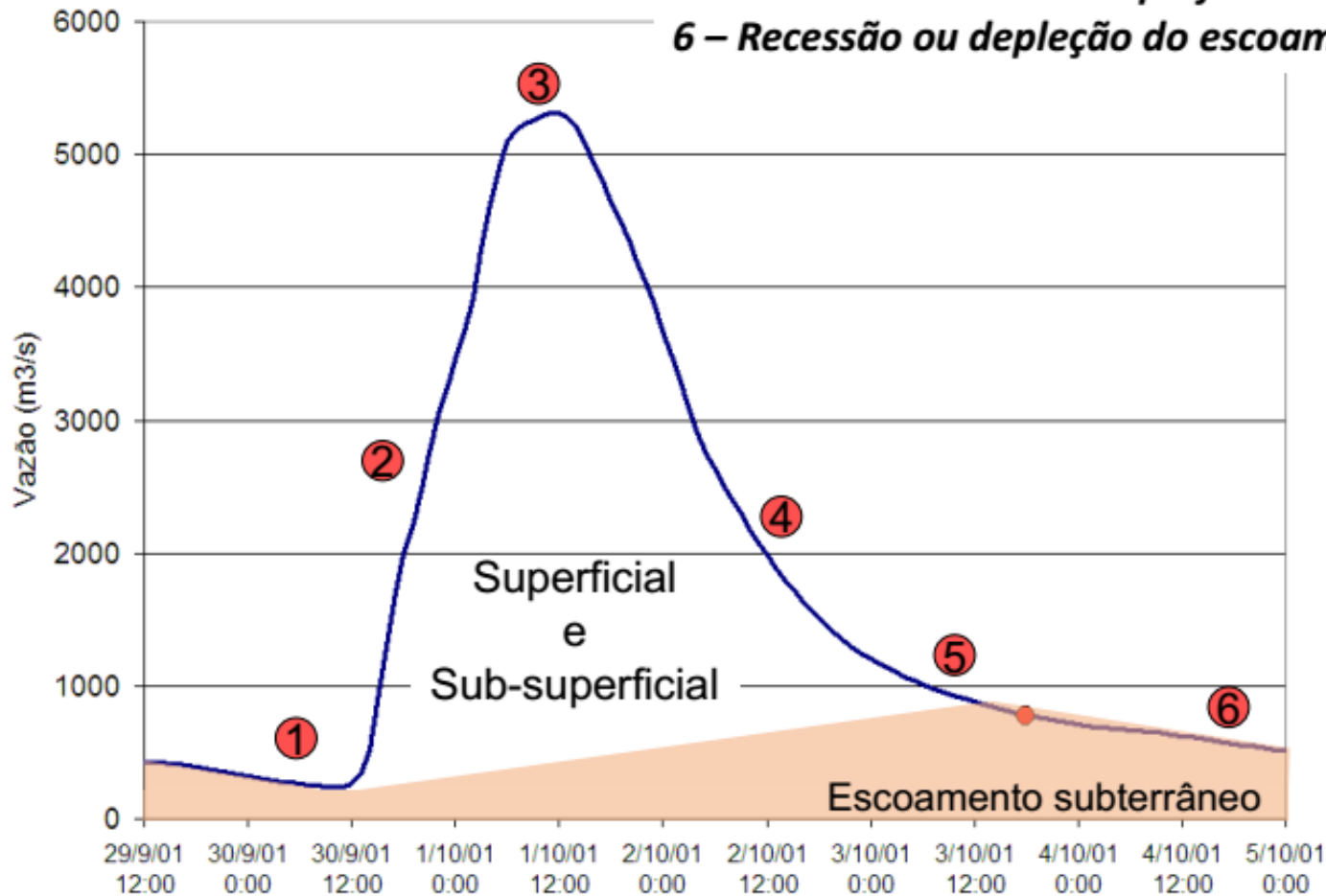
2 – Ascensão do hidrograma

3 – Pico do hidrograma

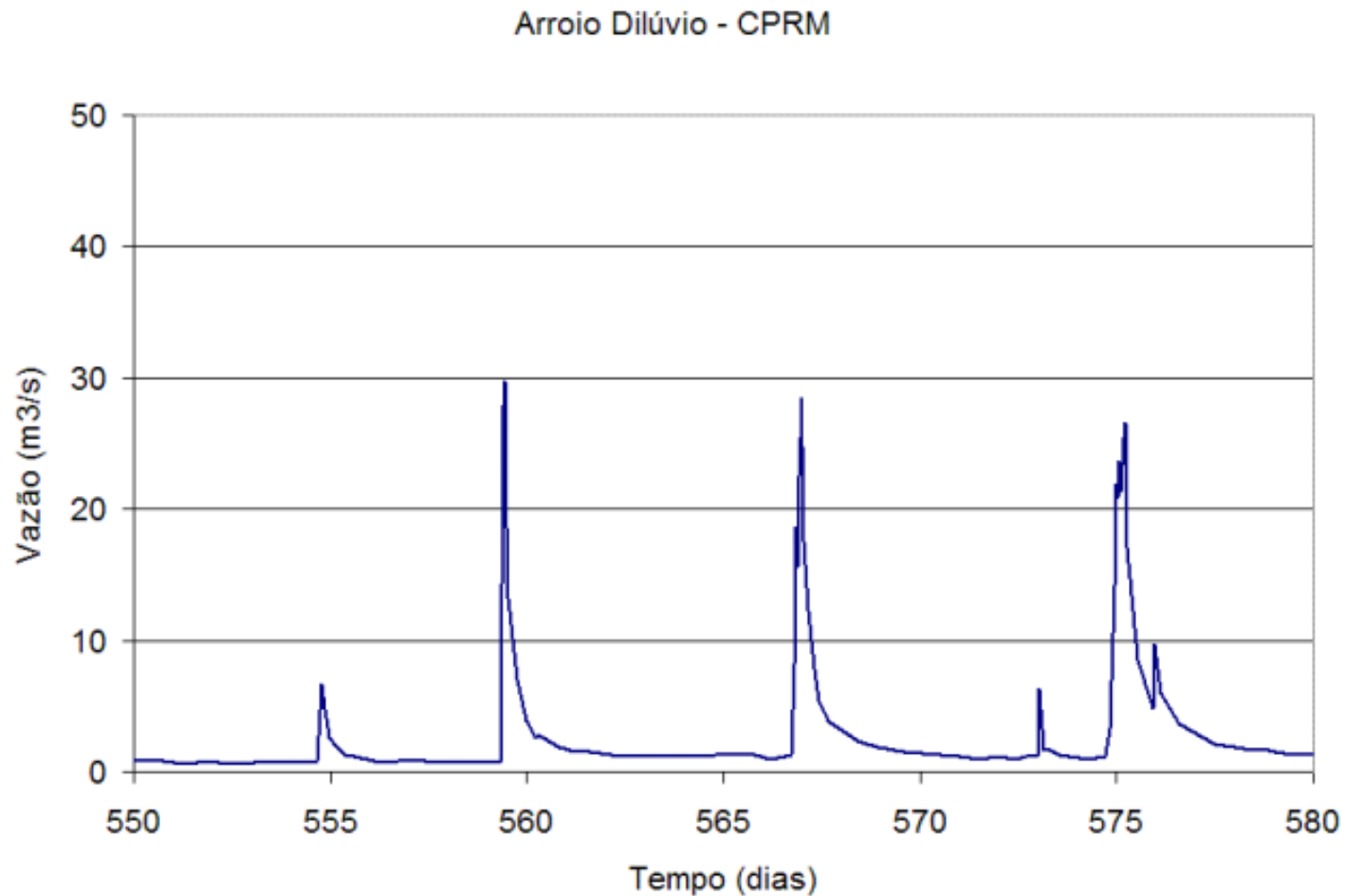
4 – Recessão do hidrograma

5 – Fim do escoamento superficial

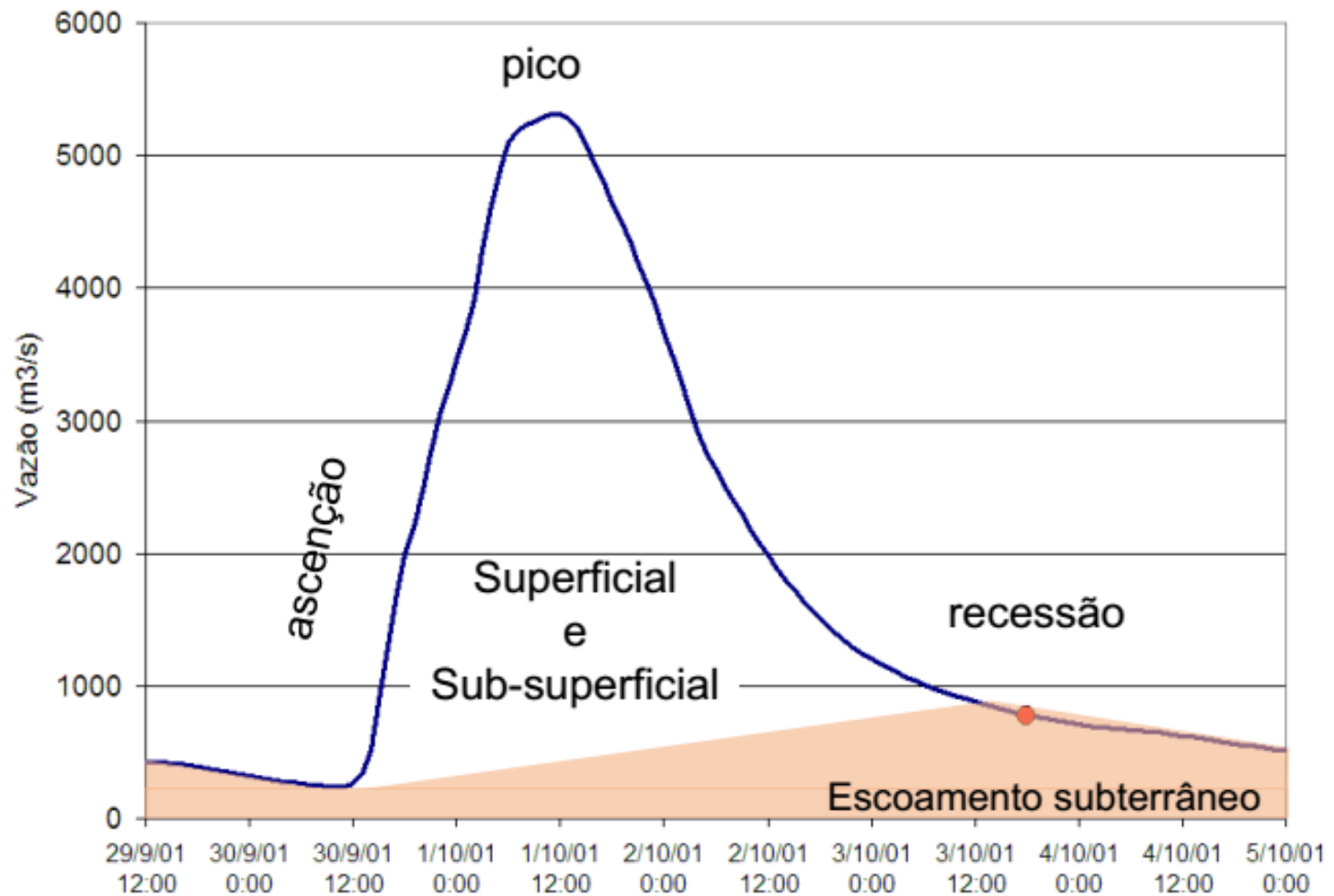
6 – Recessão ou depleção do escoamento subterrâneo



Exemplo de hidrograma

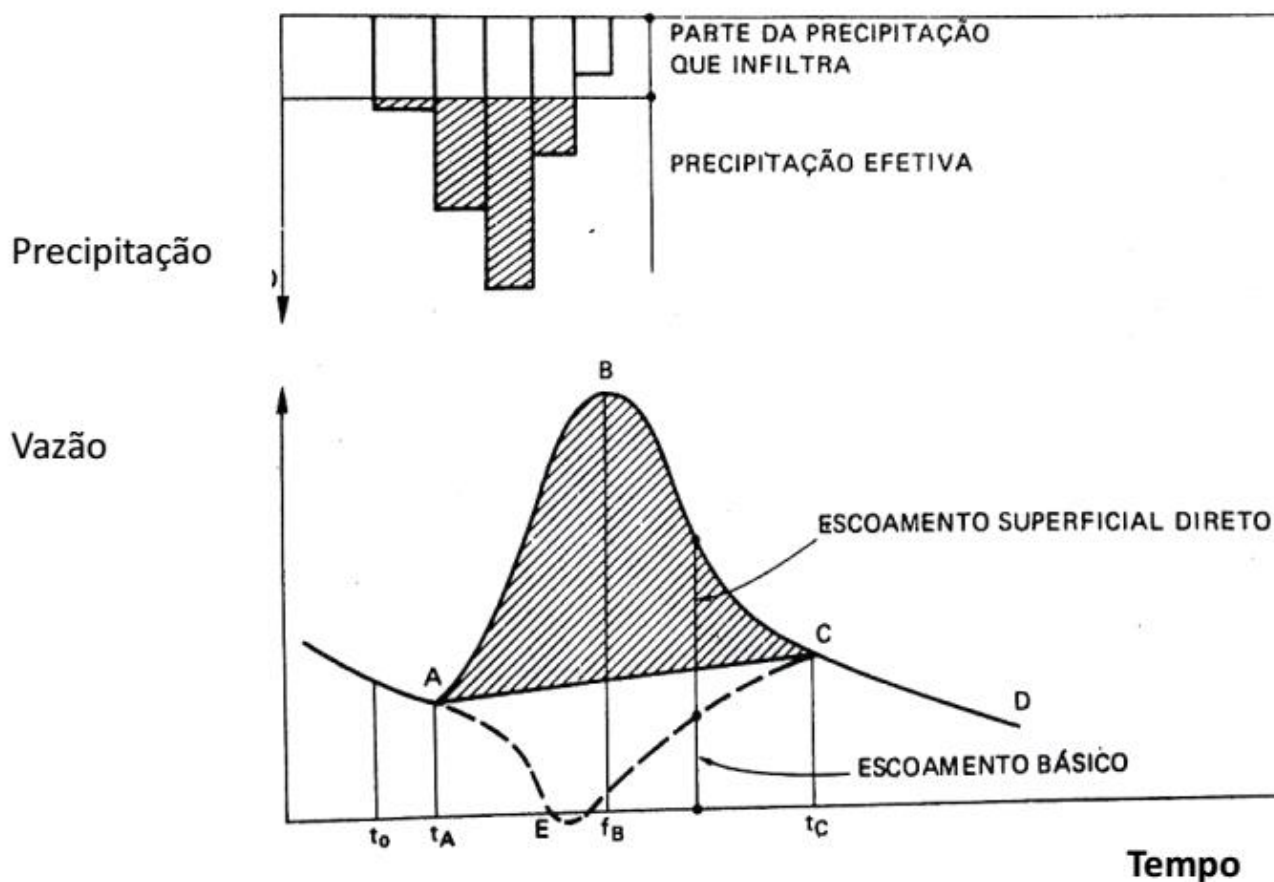


Formação de hidrograma



Ietograma

Gráfico que isola os picos do hidrograma para analisar os fenômenos hidrológicos.





Ietograma-Hidrograma

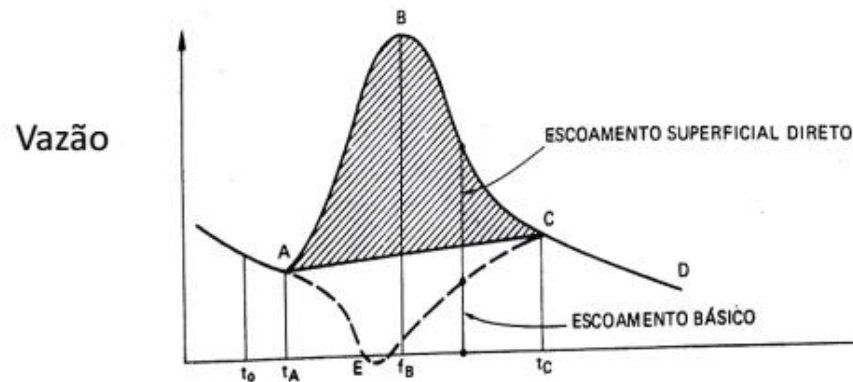
Início de precipitação (t_0) : parte é interceptada e evaporada, outra parte infiltrada. Corresponde ao intervalo de tempo (t_0-t_A)

Início de escoamento superficial direto (A): após excedida a capacidade de infiltração. A vazão aumenta até atingir o máximo (B), quando toda a bacia estiver contribuindo. A duração da precipitação é menor ou igual ao intervalo (t_0-t_B).

Fim da precipitação (B-C): o escoamento superficial prossegue durante certo tempo e a curva de vazão vai diminuindo. Ao trecho B-C do hidrograma denomina-se **curva de depleção do escoamento superficial**.

Contribuição do lençol (escoamento básico): curva AEC corresponde à contribuição das águas subterrâneas, que varia devido à parte da precipitação que se infiltra.

Ietograma-Hidrograma

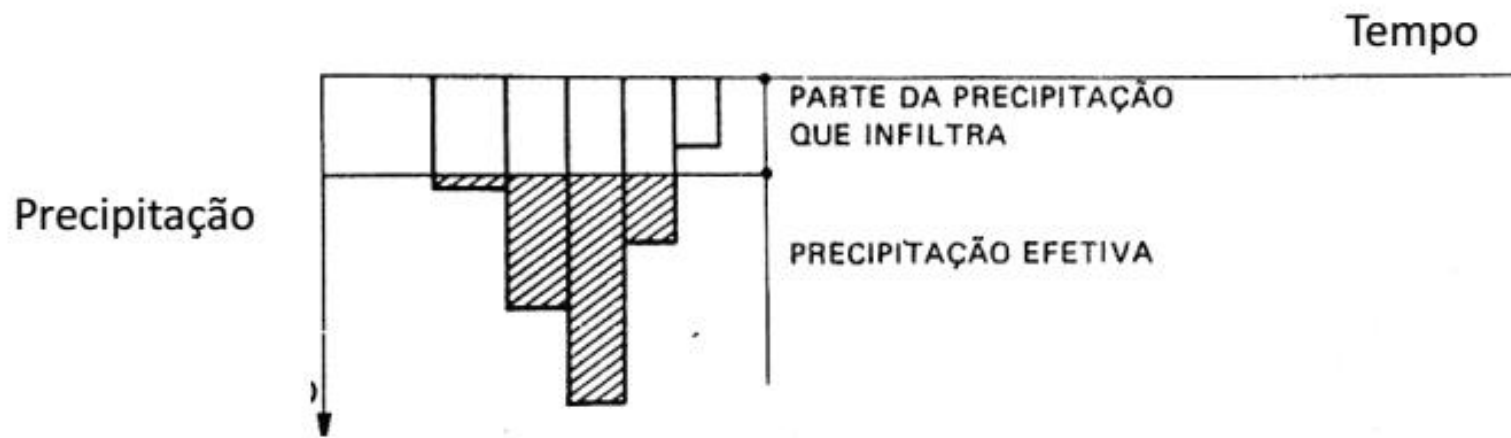


A determinação do volume escoado superficialmente é feita por planimetria da área ABCA.

Uma vez determinado o volume total escoado e conhecendo o total precipitado pode-se calcular o coeficiente de escoamento superficial

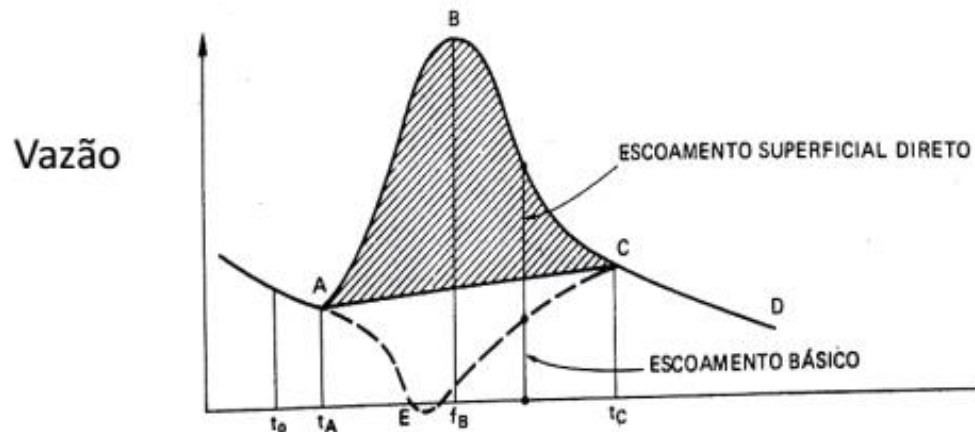
$$C = \frac{V_{\text{escoado}}}{V_{\text{precipitado}}}$$

Ietograma-Hidrograma



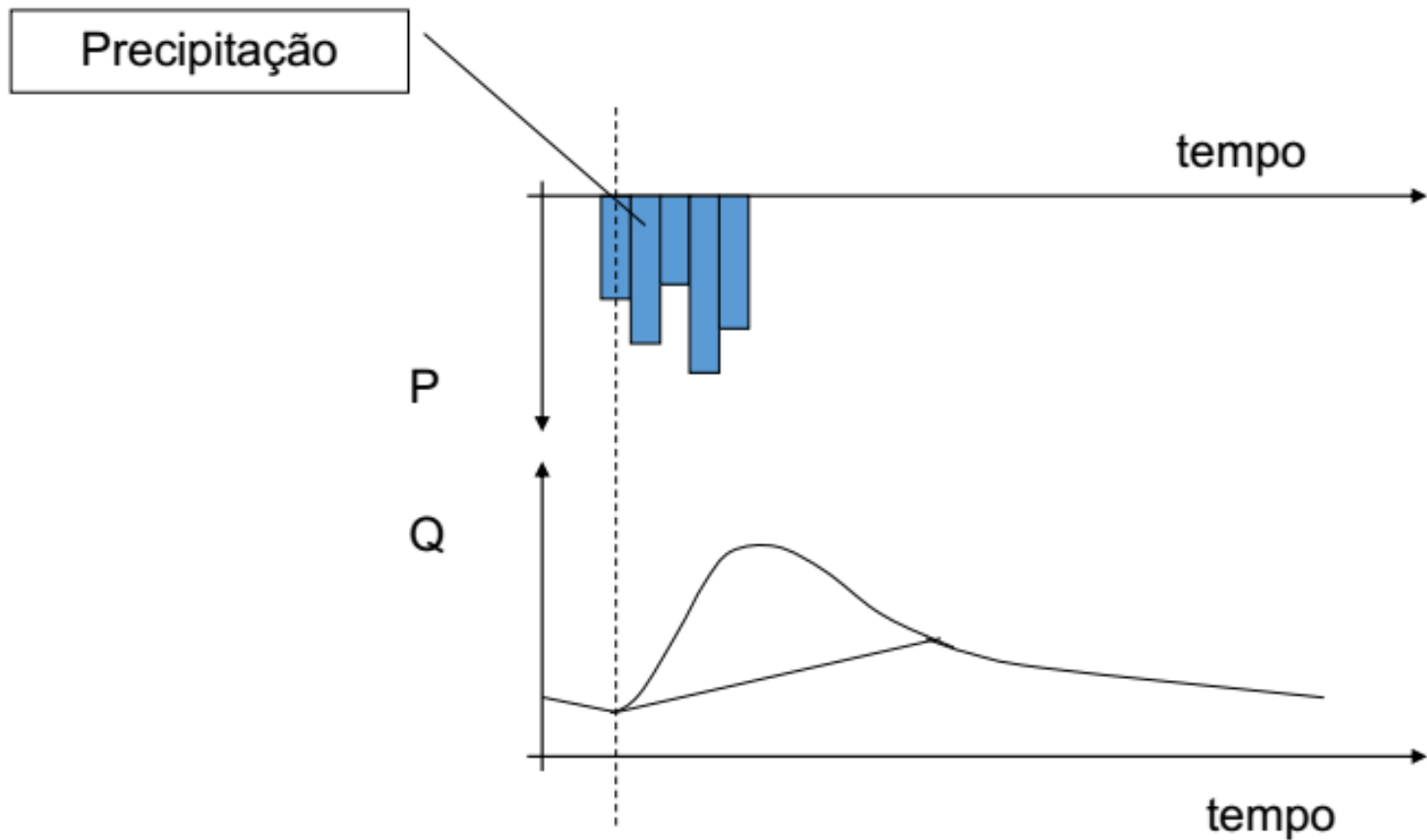
Dividindo-se o volume total escoado pela área da bacia, determina-se a precipitação efetiva, ou excesso de precipitação.

Ietograma-Hidrograma

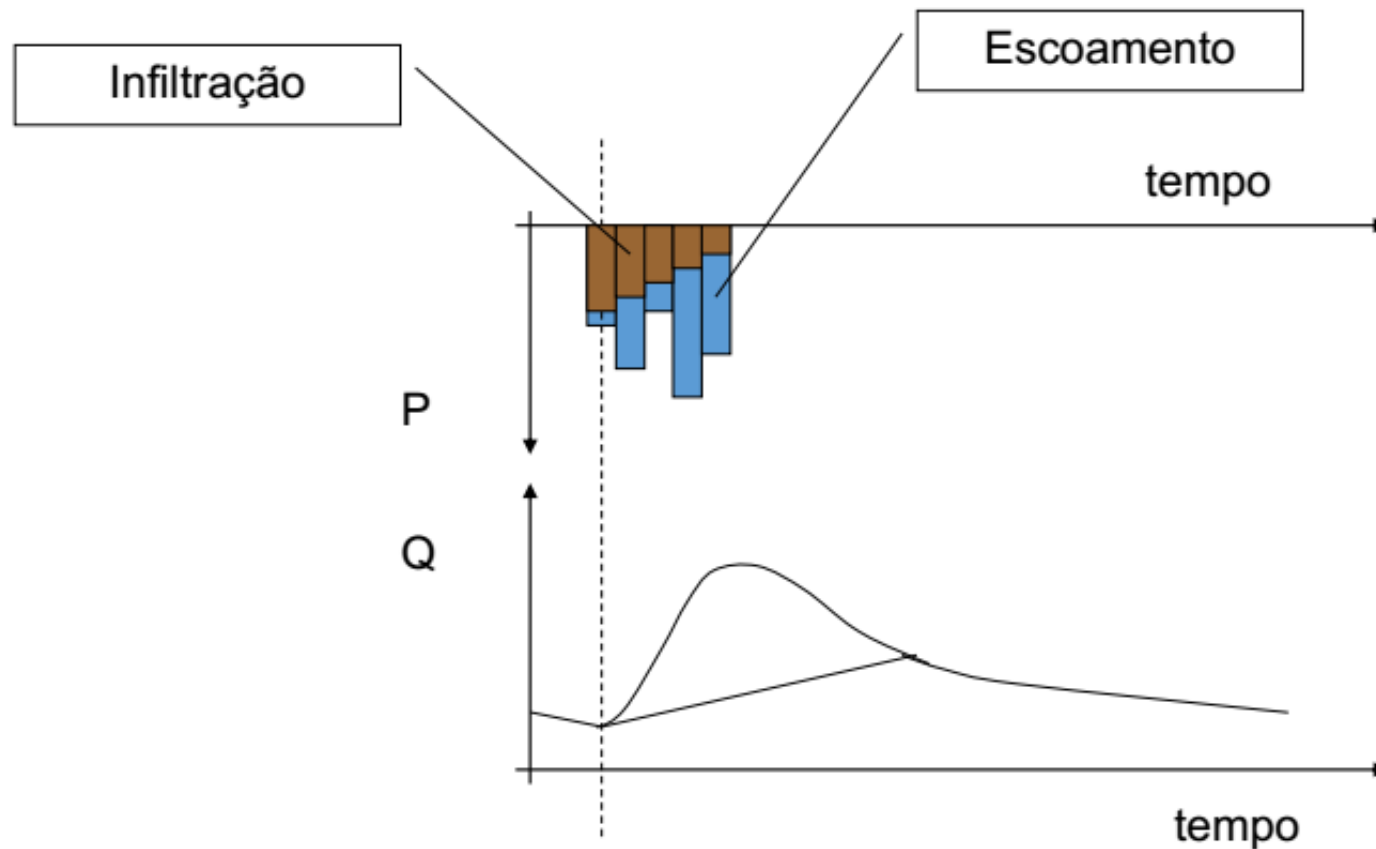


A curva CD do hidrograma é denominada de **curva de depleção da água** do solo. Curva muito importante para estudos hidrológicos em estiagens, que pode ser deduzida a partir de que a variação com o tempo da vazão do aquífero é proporcional à própria vazão do escoamento básico.

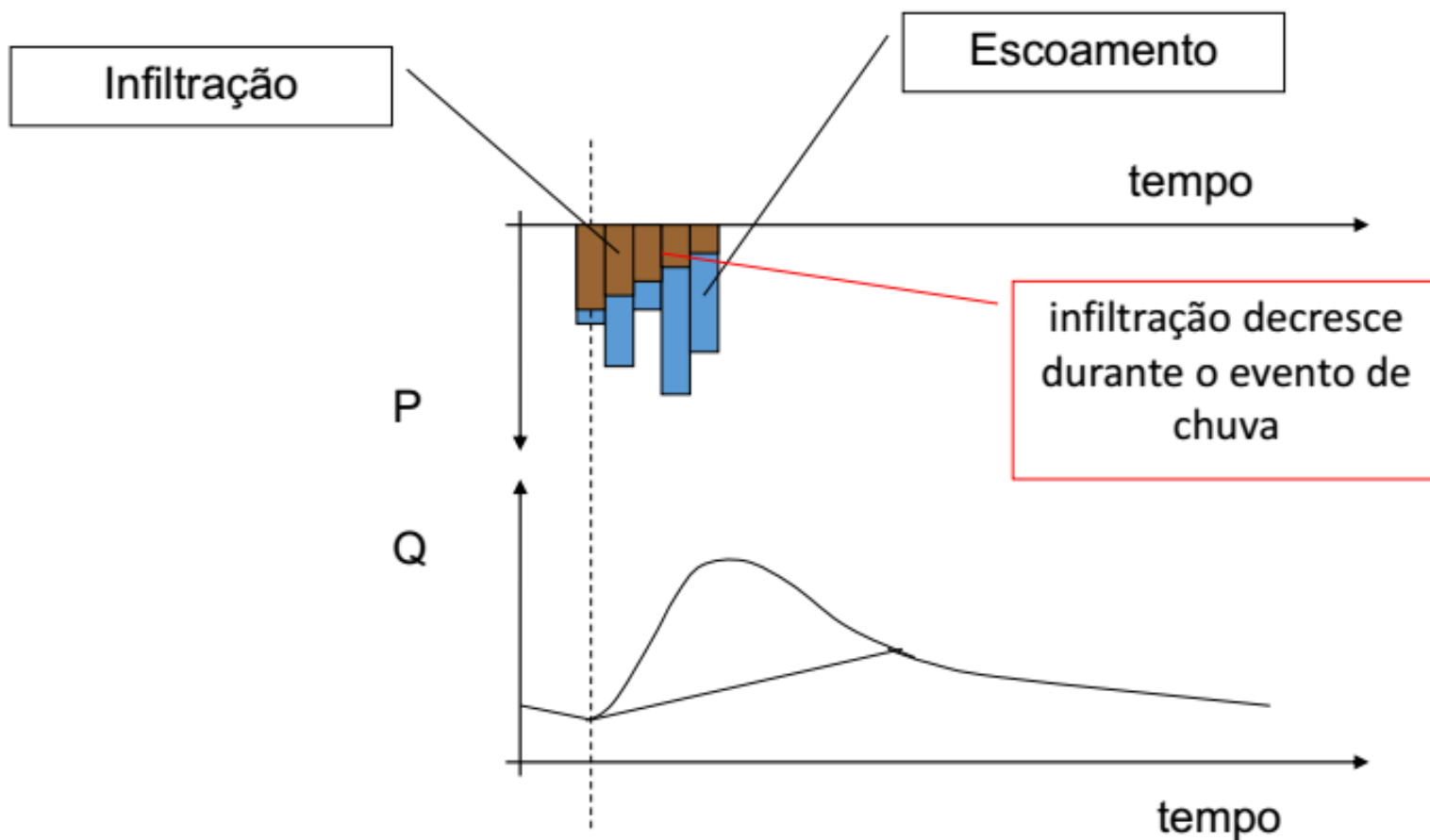
Ietograma-Hidrograma



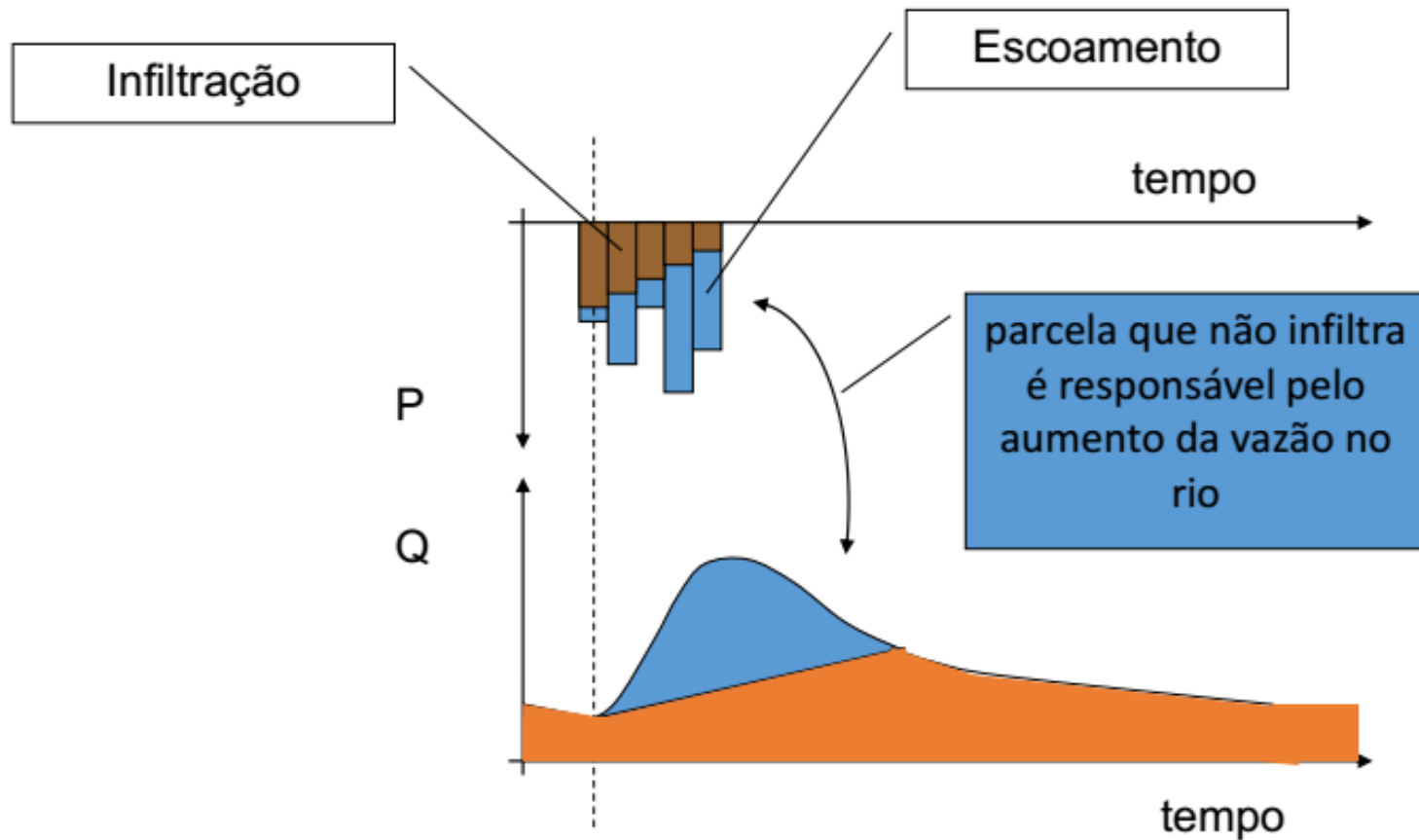
Ietograma-Hidrograma



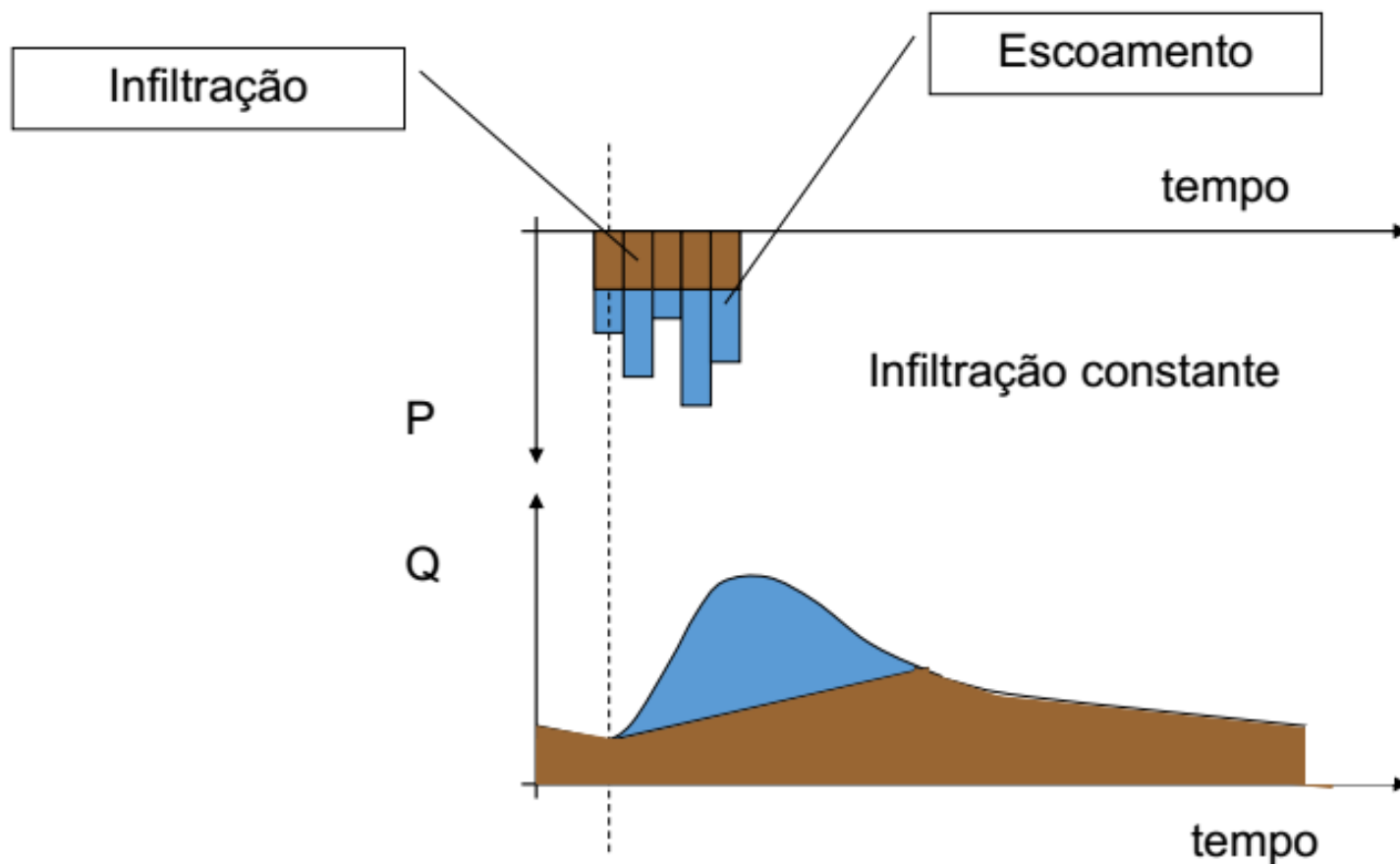
Ietograma-Hidrograma



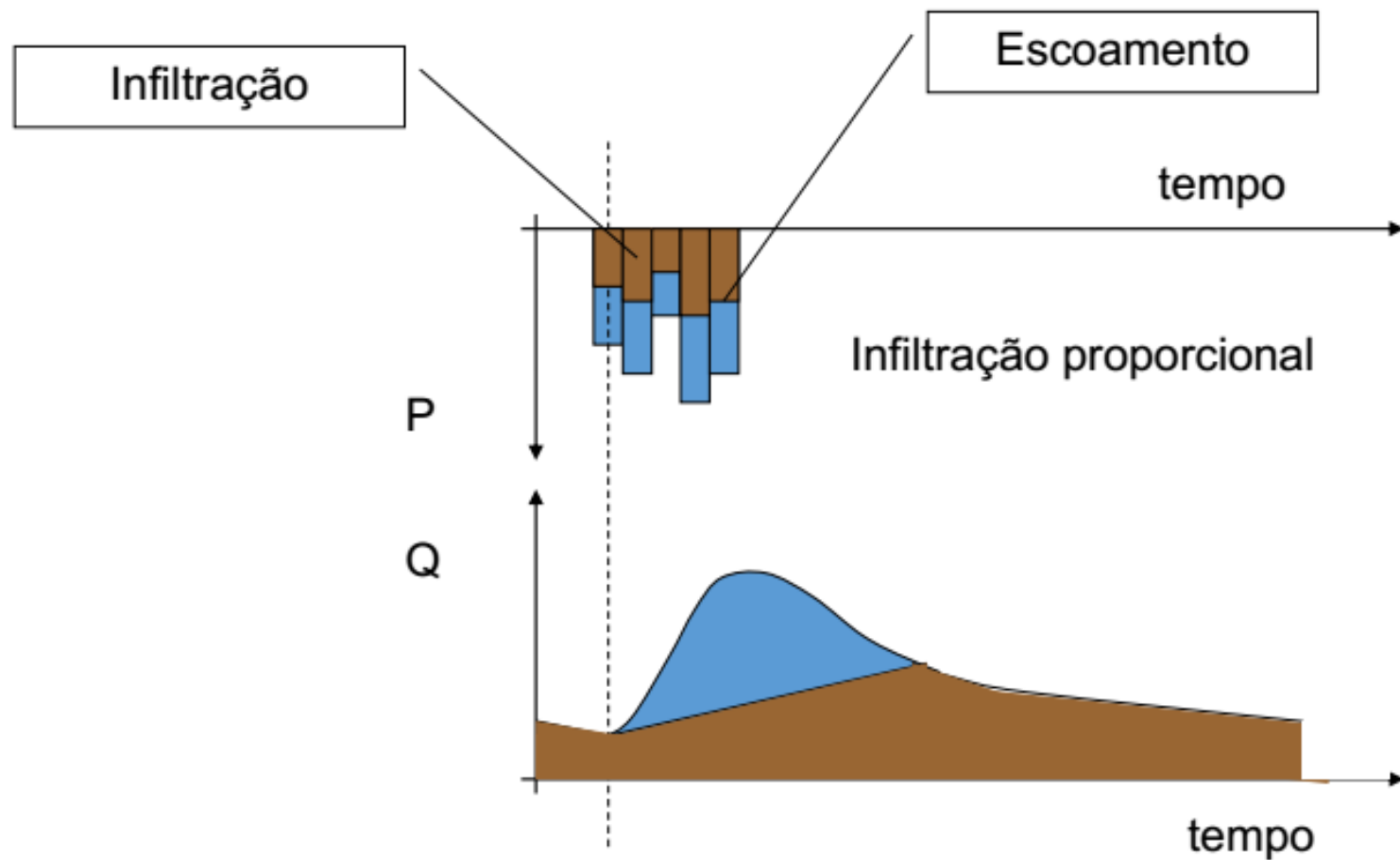
Ietograma-Hidrograma



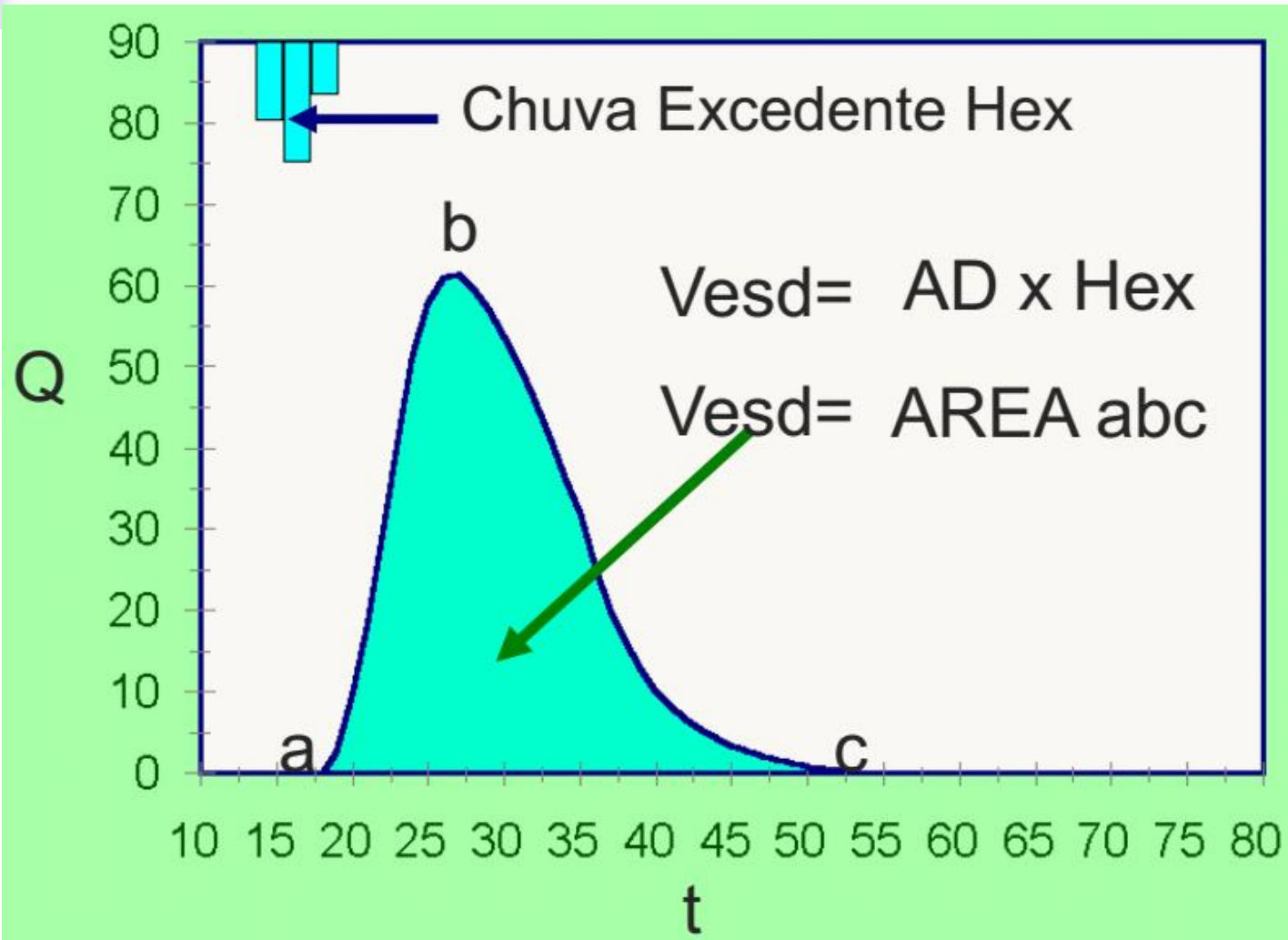
Ietograma-Hidrograma



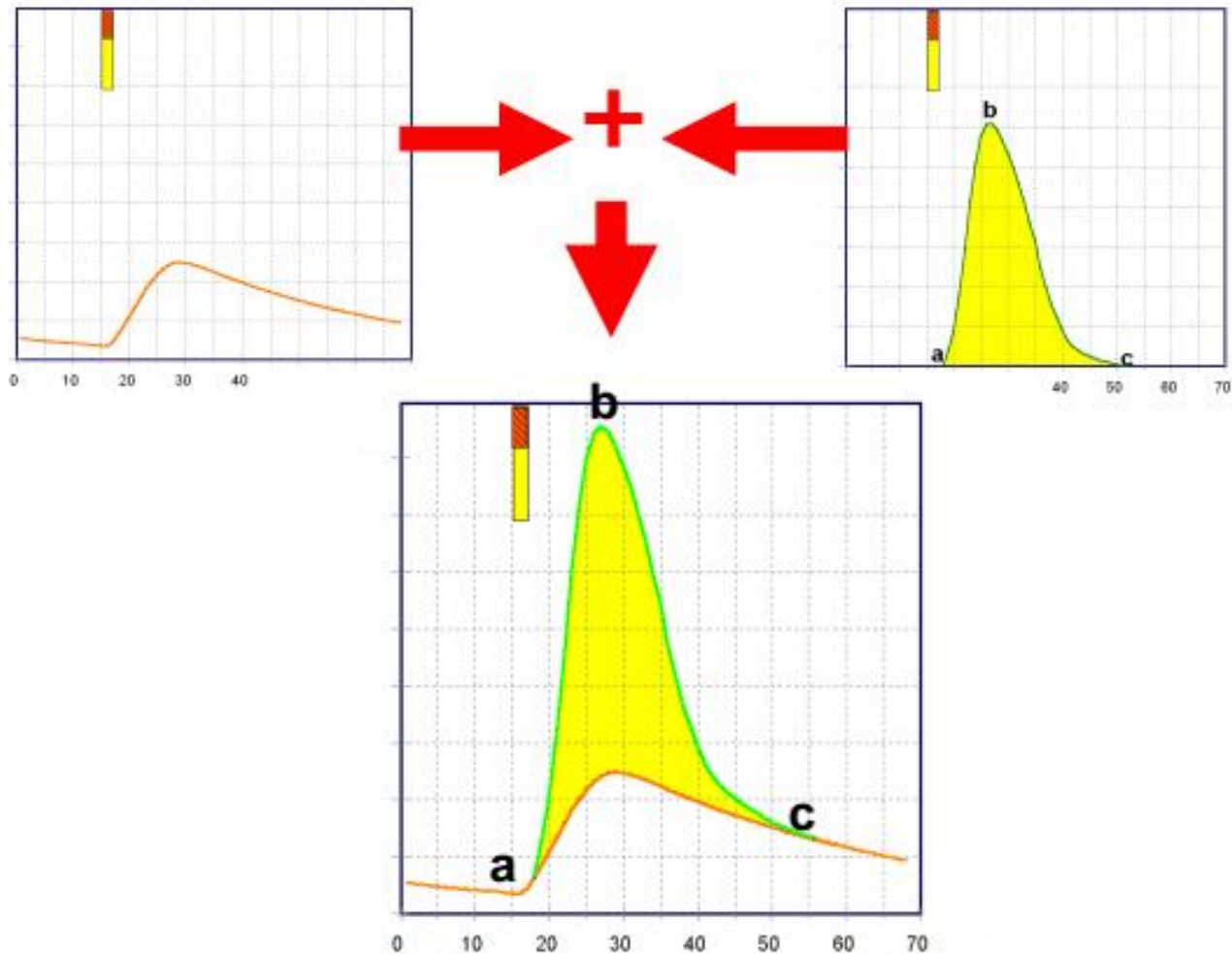
Ietograma-Hidrograma



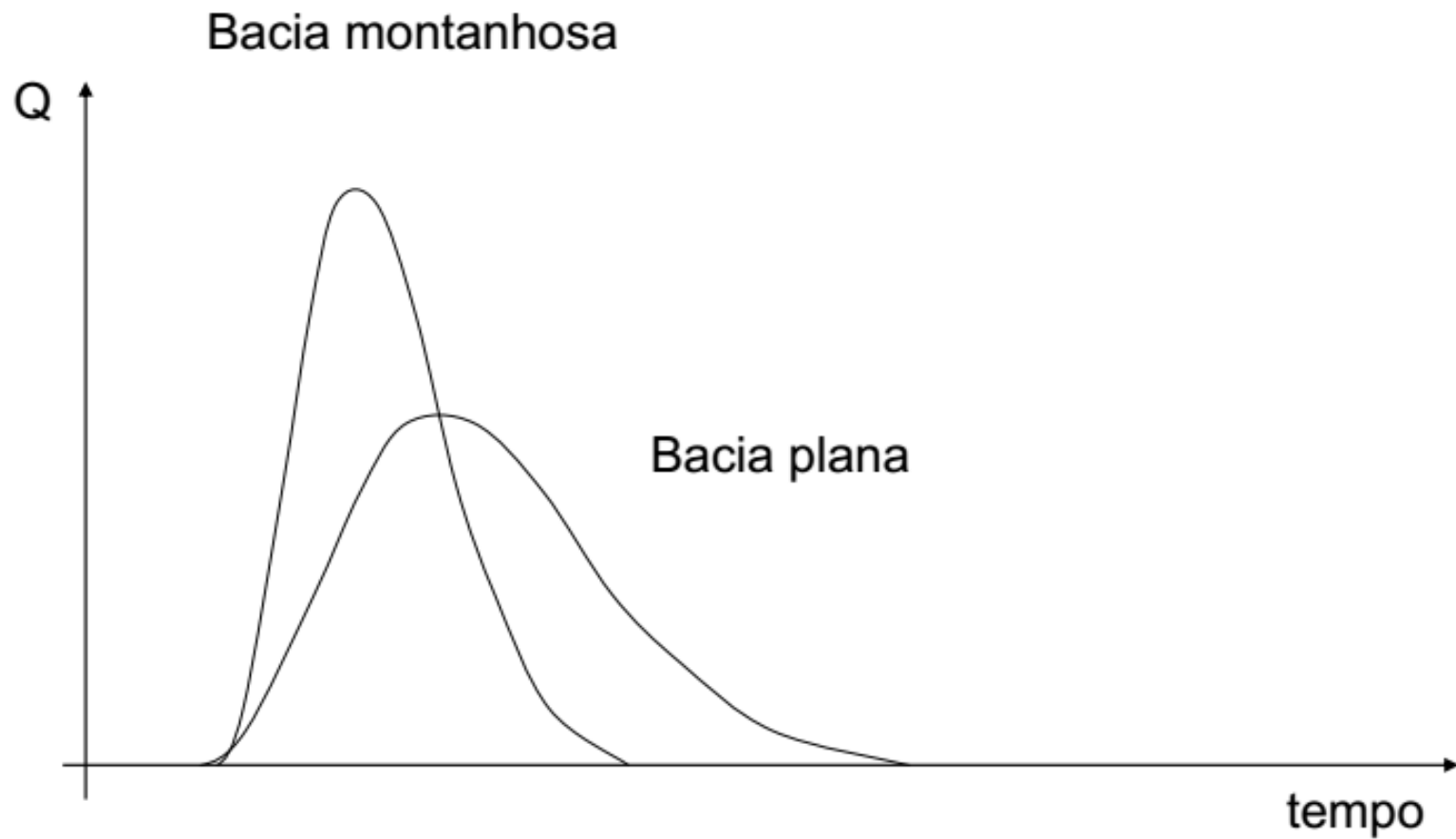
Ietograma-Hidrograma



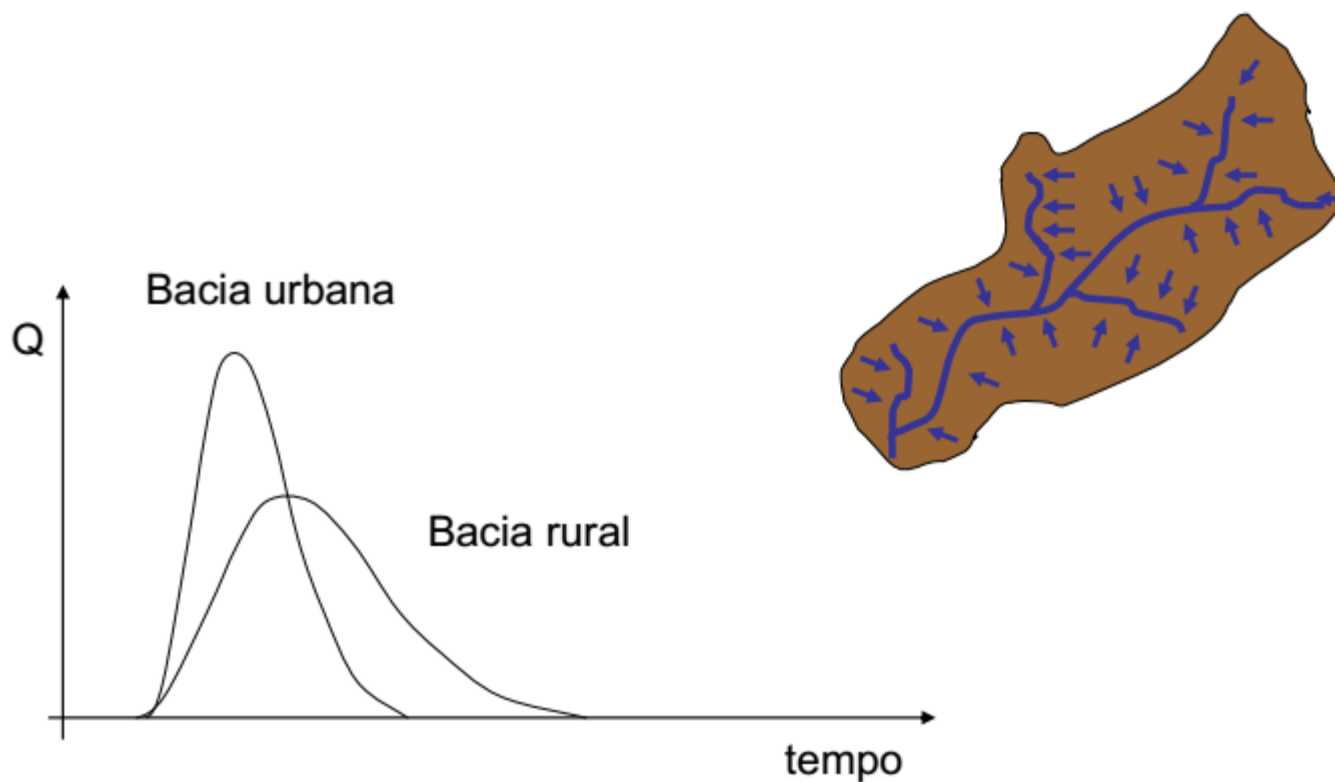
Síntese do Hidrograma



Hidrograma

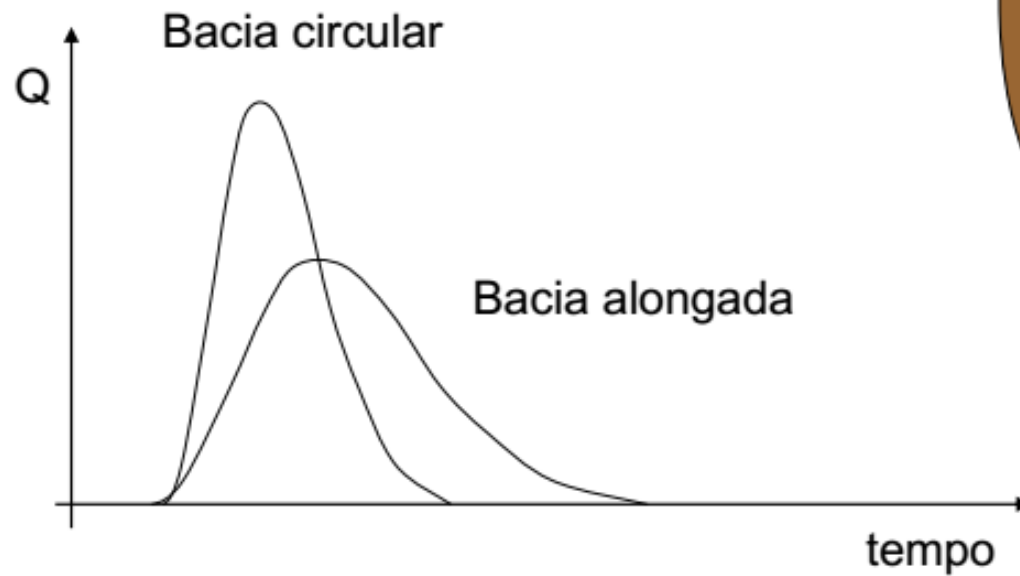


Hidrograma

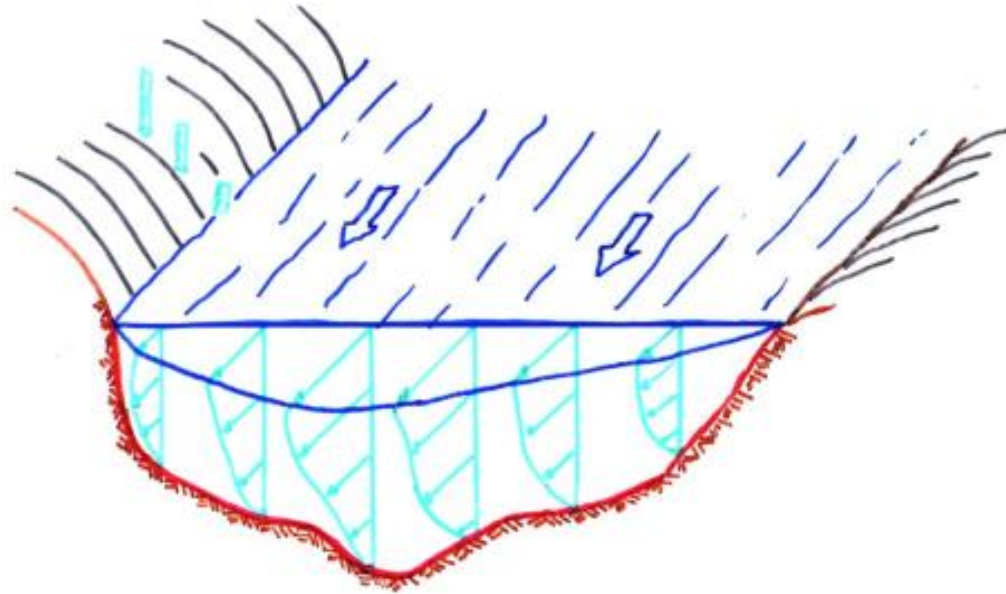


Obras de drenagem tornam o escoamento mais rápido

Hidrograma



Perfis de velocidade de escoamento – rios

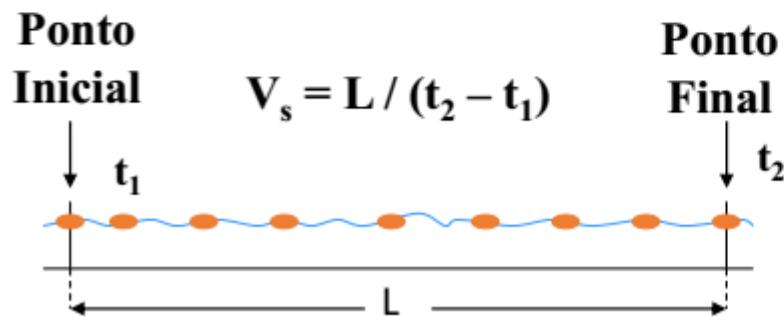


Os rios são sistemas dinâmicos que mudam seu regime de vazante até o regime de cheias em poucos anos e remodelam seus vales em longos períodos de tempo.

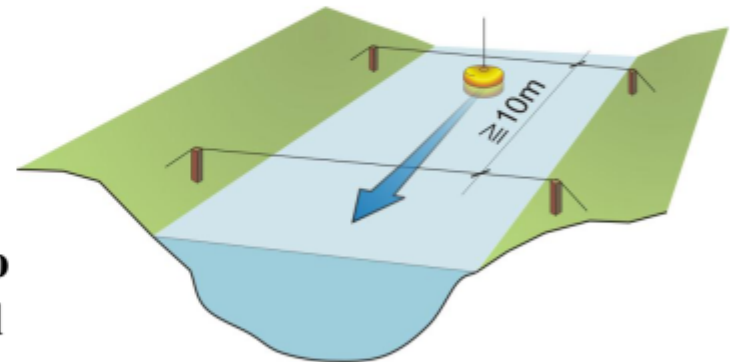
Medição de vazão - Expedita

Utilizando um flutuador:

- Escolher um trecho retilíneo do rio que tenha seção constante;
- Marcar uma distância de no mínimo 10m;
- Medir a área da seção do rio;
- Lançar o flutuador e contar o tempo para percorrer a distância demarcada.
- Calcular a vazão com a fórmula.



Onde: V_s é a velocidade do flutuador



Vazão na seção A:

$$Q = (C \cdot V_s) \cdot A$$

Onde: $0,6 \leq C \leq 0,8$

Medição de vazão – Volumétrica

- ❑ Conceito de vazão, $Q = \Delta V / \Delta t$
- ❑ Marca-se o tempo para preencher um volume conhecido
- ❑ Aplicável para pequenas vazões
- ❑ Aplicável onde a água pode ser recolhida



Medição de vazão – Colorimétrica (ou radiativa)

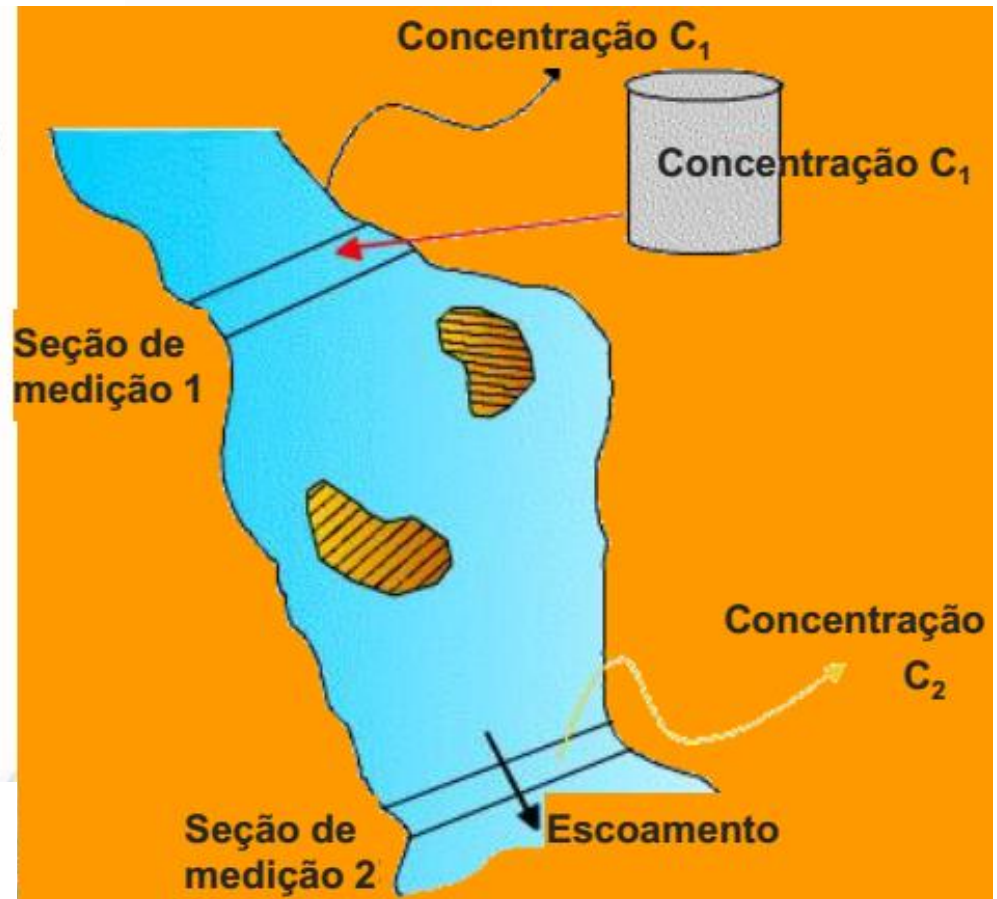
$$q \cdot C_1 = (Q + q) \cdot C_2$$

q = vazão constante do soluto

C_1 = concentração do soluto

Q = vazão do curso d'água

C_2 = concentração da mistura a jusante



Medição de vazão – Colorimétrica (ou radiativa)

- ❑ Aplicável a rios com turbulência (rios de montanha) para garantir mistura completa
- ❑ Quando o “soluto” é radiativo, deve-se corrigir o efeito do decaimento no tempo



Medição de vazão – Vertedores

- ❑ Retangular (Francis): $Q = 1,84 (L - 0.2 H)^{1.5}$
- ❑ Triangular (Thompson): $Q = 1,4 H^{2.5}$
- ❑ Necessidade de construção
- ❑ Problemas de assoreamento
- ❑ Remanso a montante



Medição de vazão – Calha Parshall

- ❑ $Q_{\text{livre}} = K \cdot H^n$
- ❑ $Q_{\text{afogado}} = Q_{\text{livre}} \cdot \text{Coeficiente de Redução}$
- ❑ Não interfere no escoamento (não provoca remanso como os vertedores)
- ❑ Dimensões limitadas a pequenos canais

Para pequenas vazões existem calhas pré fabricadas em fibra de vidro

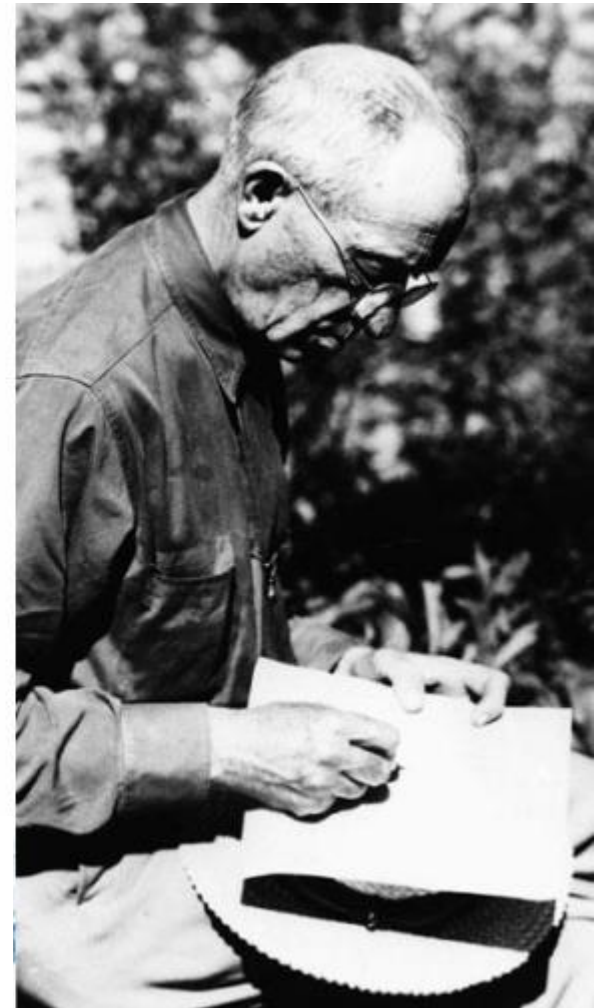


Medição de vazão – Calha Parshall

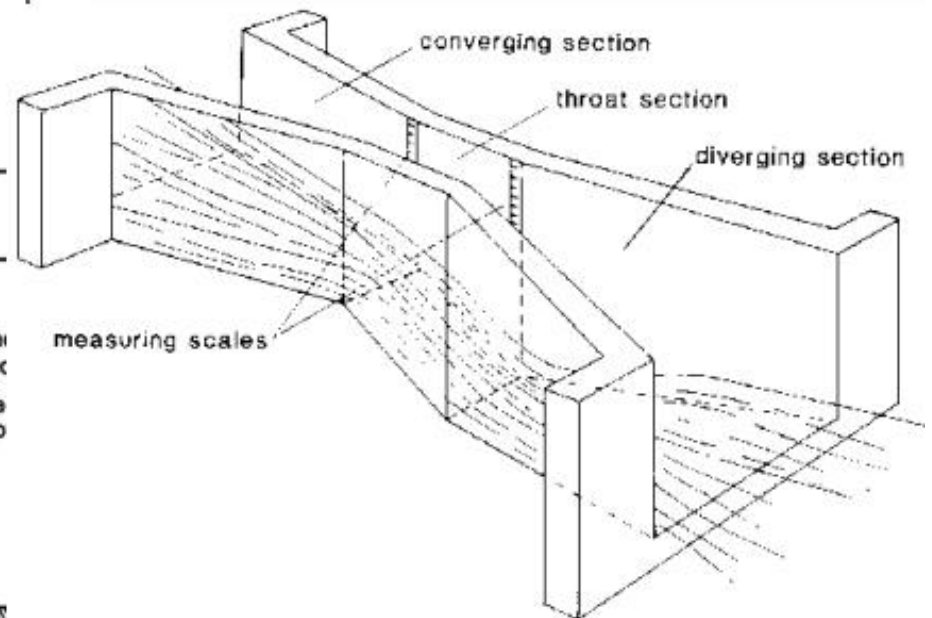
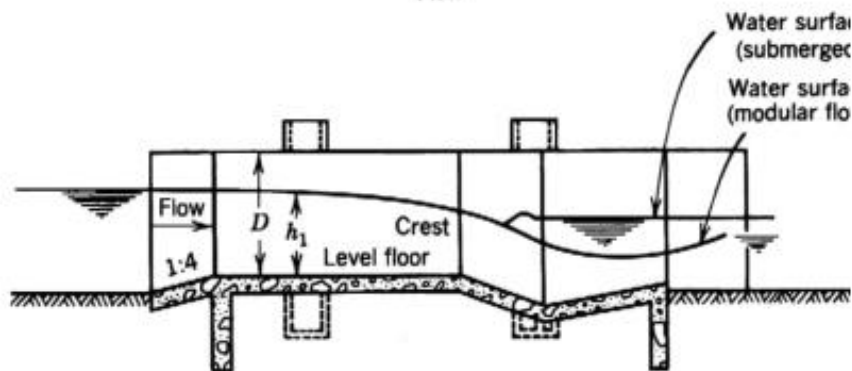
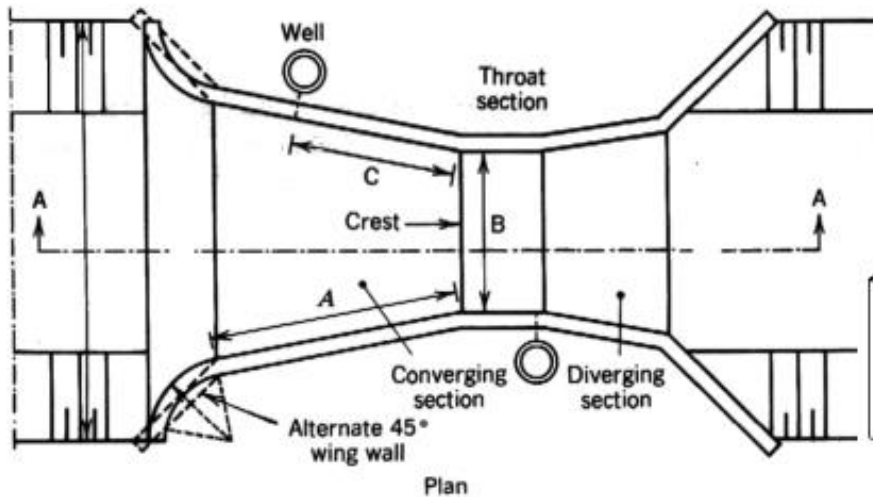


Ralph L. Parshall (1881-1959)

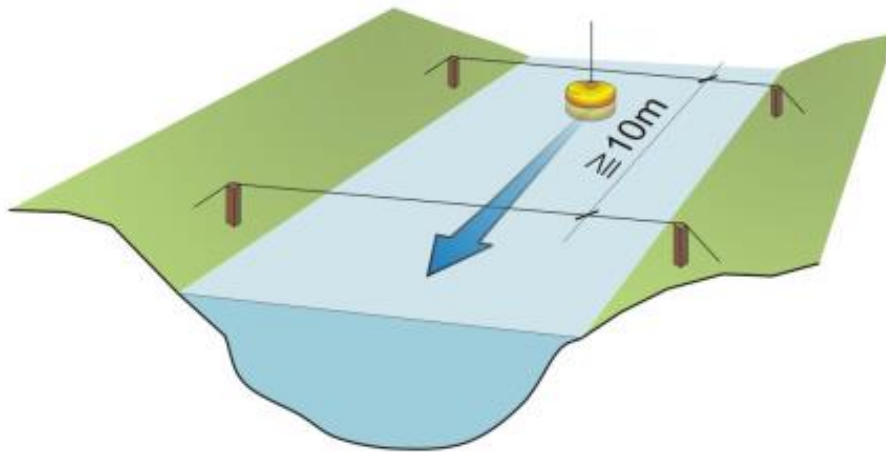
Um pioneiro no campo da engenharia civil e hidrologia, Parshall é mais conhecido por desenvolver a Calha Parshall no laboratório de hidrologia da Colorado Agricultural College's em 1921.



Medição de vazão – Calha Parshall



Medição de vazão - Expedita



$$Q = \frac{0,8 L \times \bar{A}}{t}$$

Q	vazão (m³/s)
L	comprimento (m)
A	área média da seção (m²)
t	tempo de percurso do flutuador (s)

$Q = 0,8.A.V$. A vazão ou descarga (Q) é o produto da área da seção transversal (A) pela velocidade média do escoamento (V).

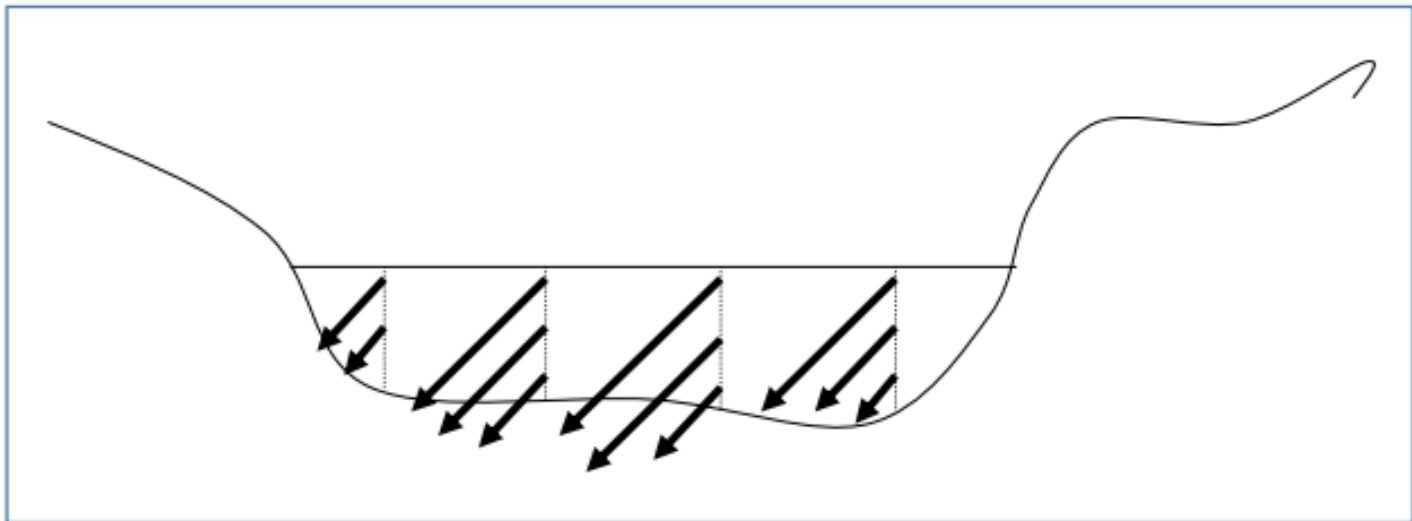
O coeficiente redutor de 0,8 significa que a velocidade média do fluxo é, em média, 20% inferior do que a apresentada na superfície do espelho d'água.

Medição indireta

$$Q = A \cdot V$$

A = área

V = velocidade

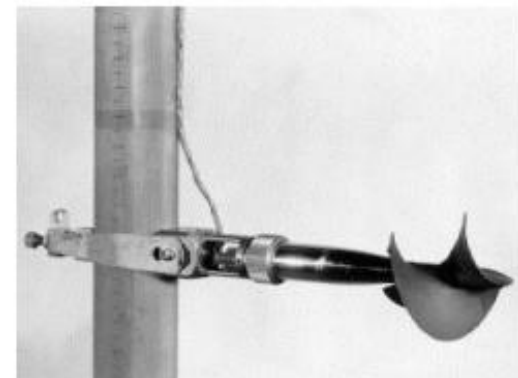


Velocidades diferentes em diferentes pontos da seção do rio

Medição de velocidade da água - Molinete

Características:

- Velocidade pontual
- Calibração para obter relação: (n° de revoluções/min) e (velocidade m/s)
- Pode ser utilizado a bordo de barcos ou de teleféricos sobre a seção do rio
- A velocidade é conhecida contando o numero de revoluções realizadas em um intervalo de tempo (> 30s em geral)



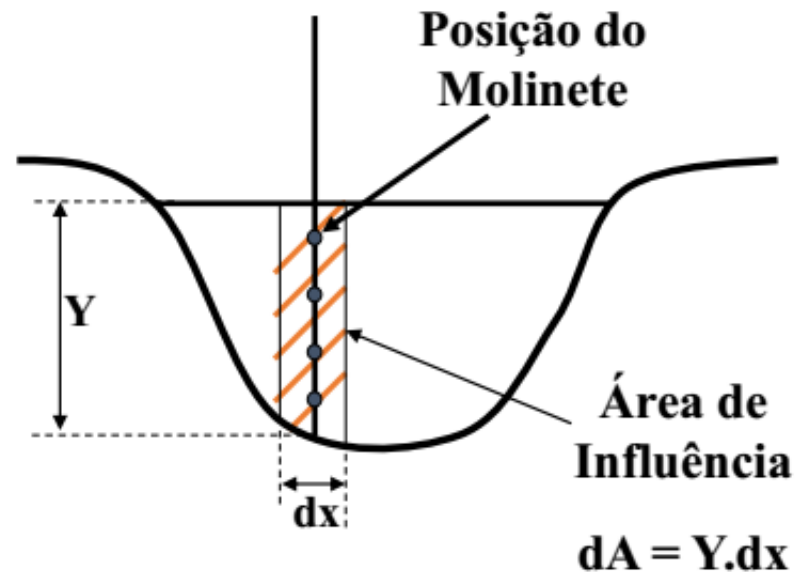
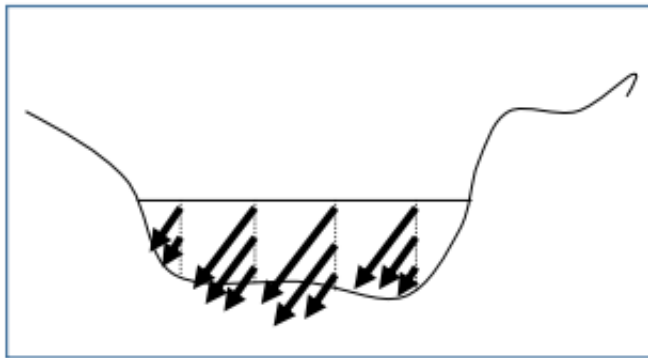
Medição de velocidade da água - Molinete



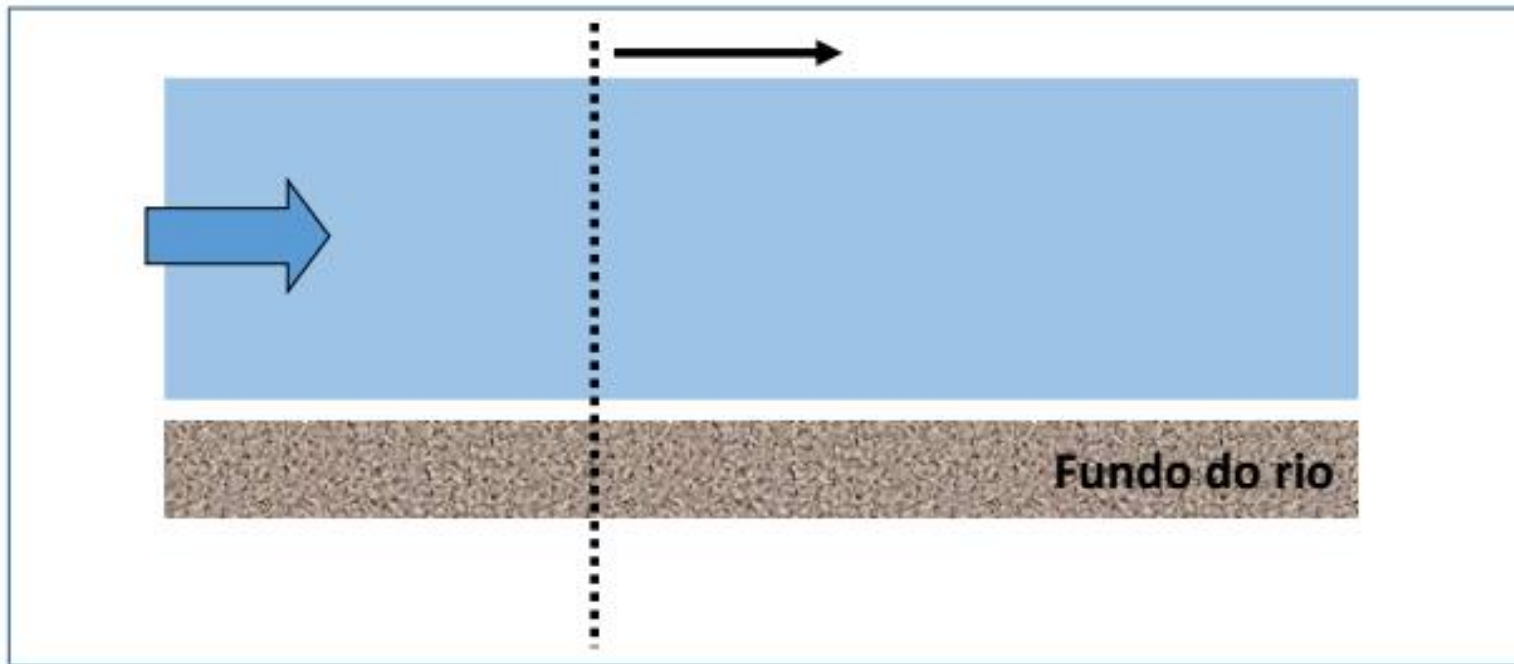
Preso à haste
Medição à vau – Pequenas
vazões – 1,20 m

Onde medir velocidade

- Quantos pontos são necessários?
- Normalmente se divide a seção num certo número de verticais e cada vertical em um certo número de pontos.

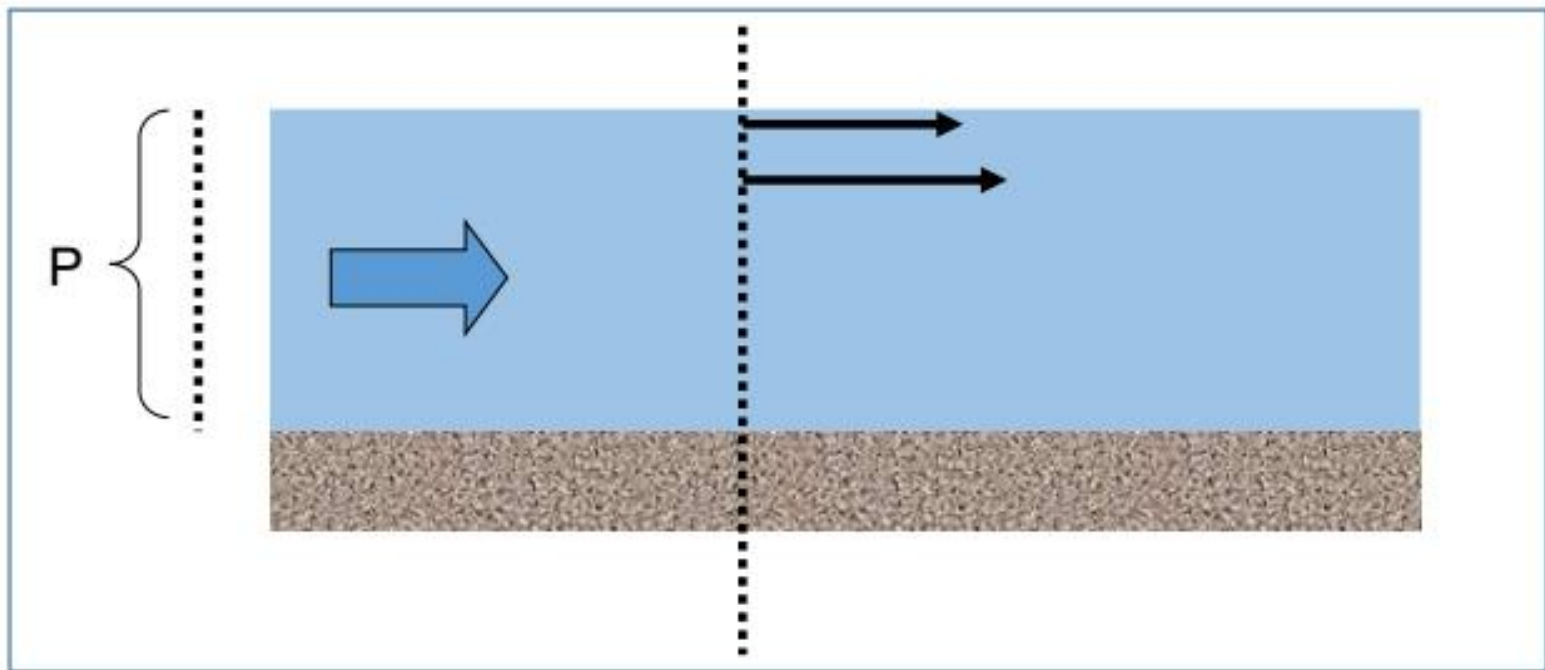


Perfil de velocidades



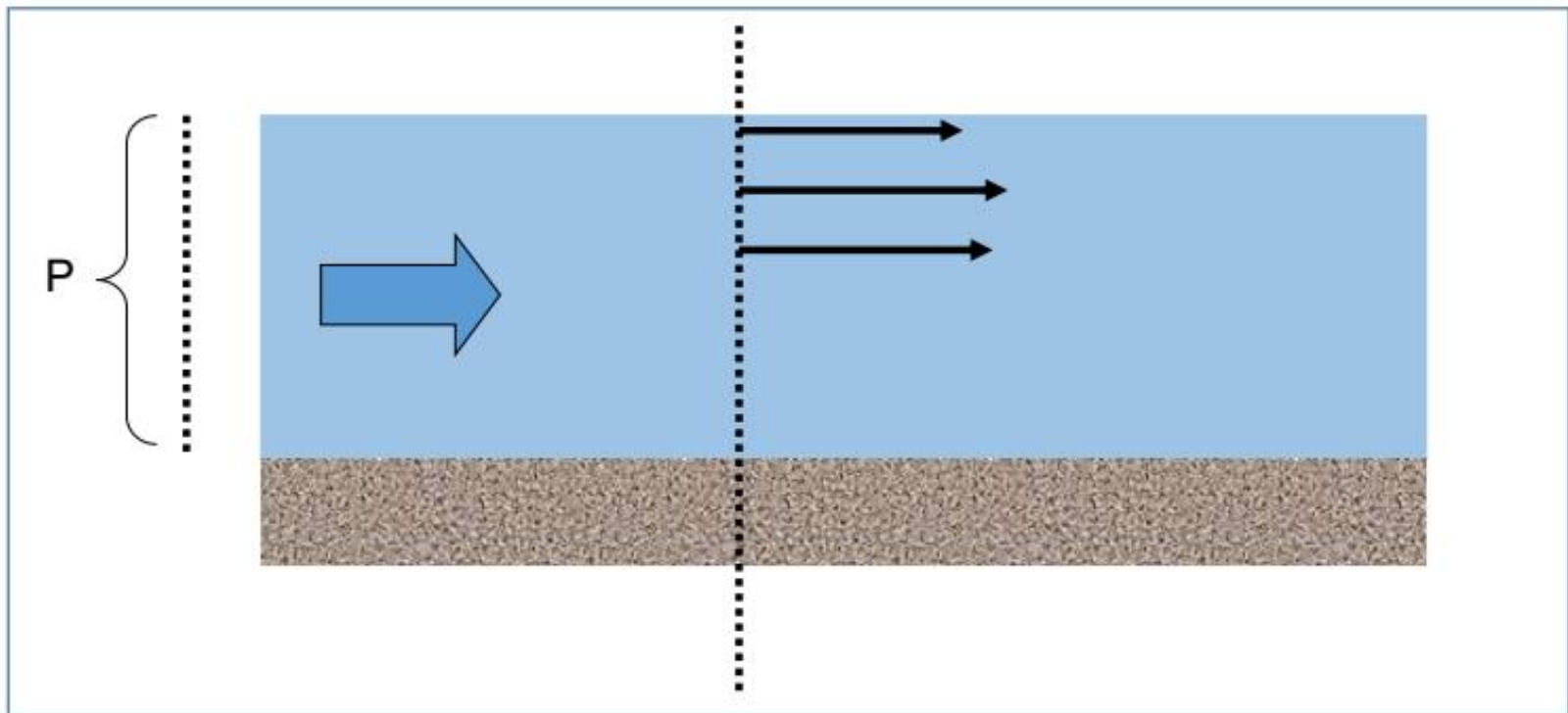
1 - medindo na superfície (submergir a hélice)

Perfil de velocidades



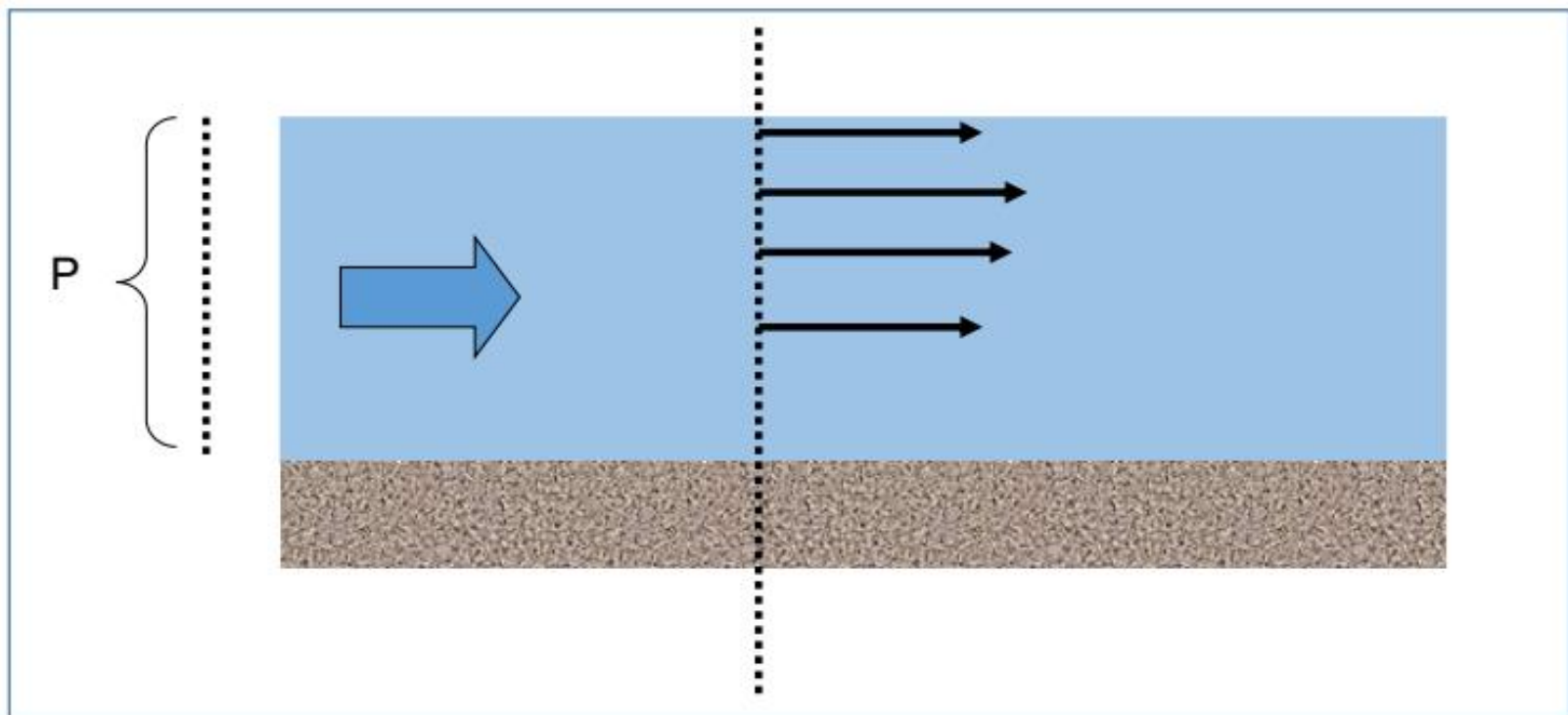
2 - medindo a 20 % da profundidade total ($0,2 \times P$)

Perfil de velocidades



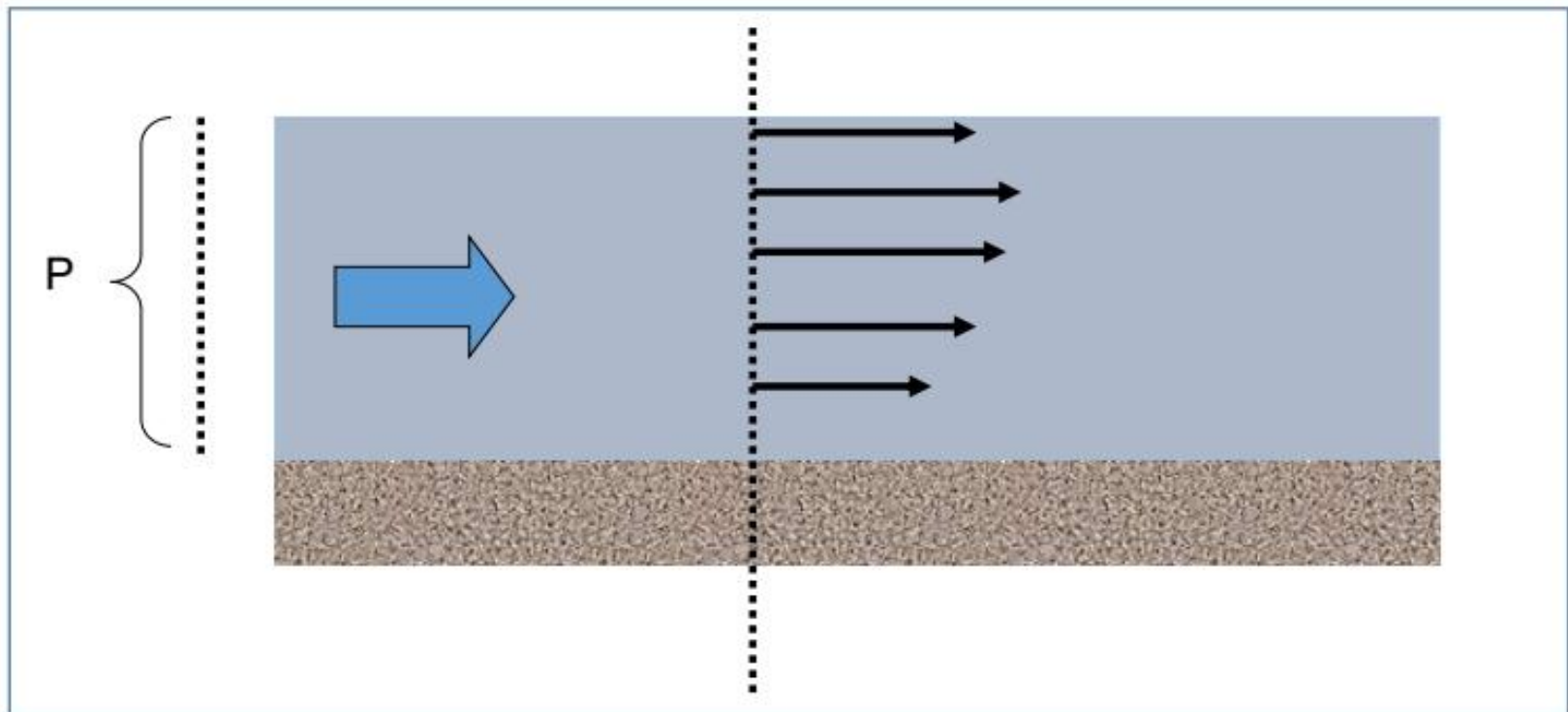
3 - medindo a 40 % da profundidade total ($0,4 \times P$)

Perfil de velocidades



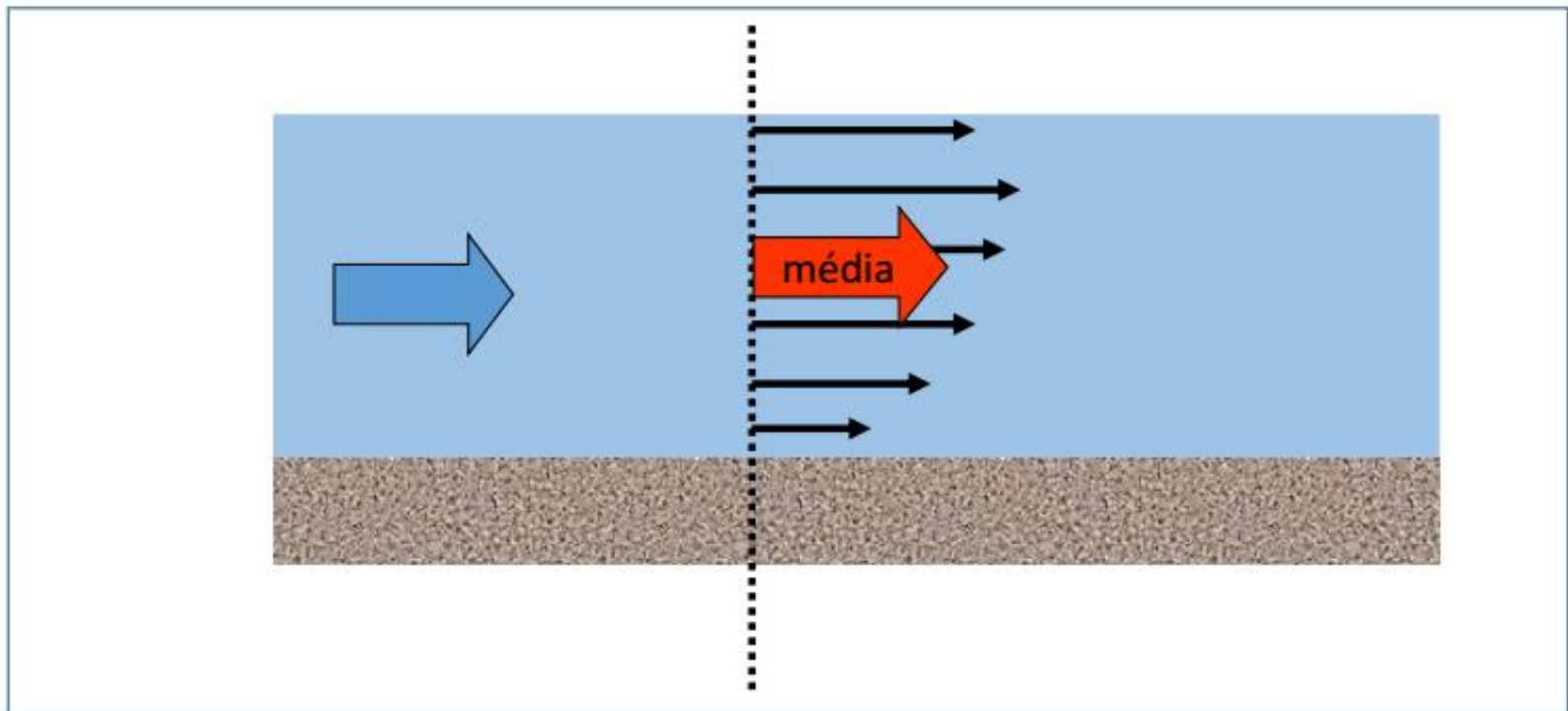
4 - medindo a 60 % da profundidade total ($0,6 \times P$)

Perfil de velocidades



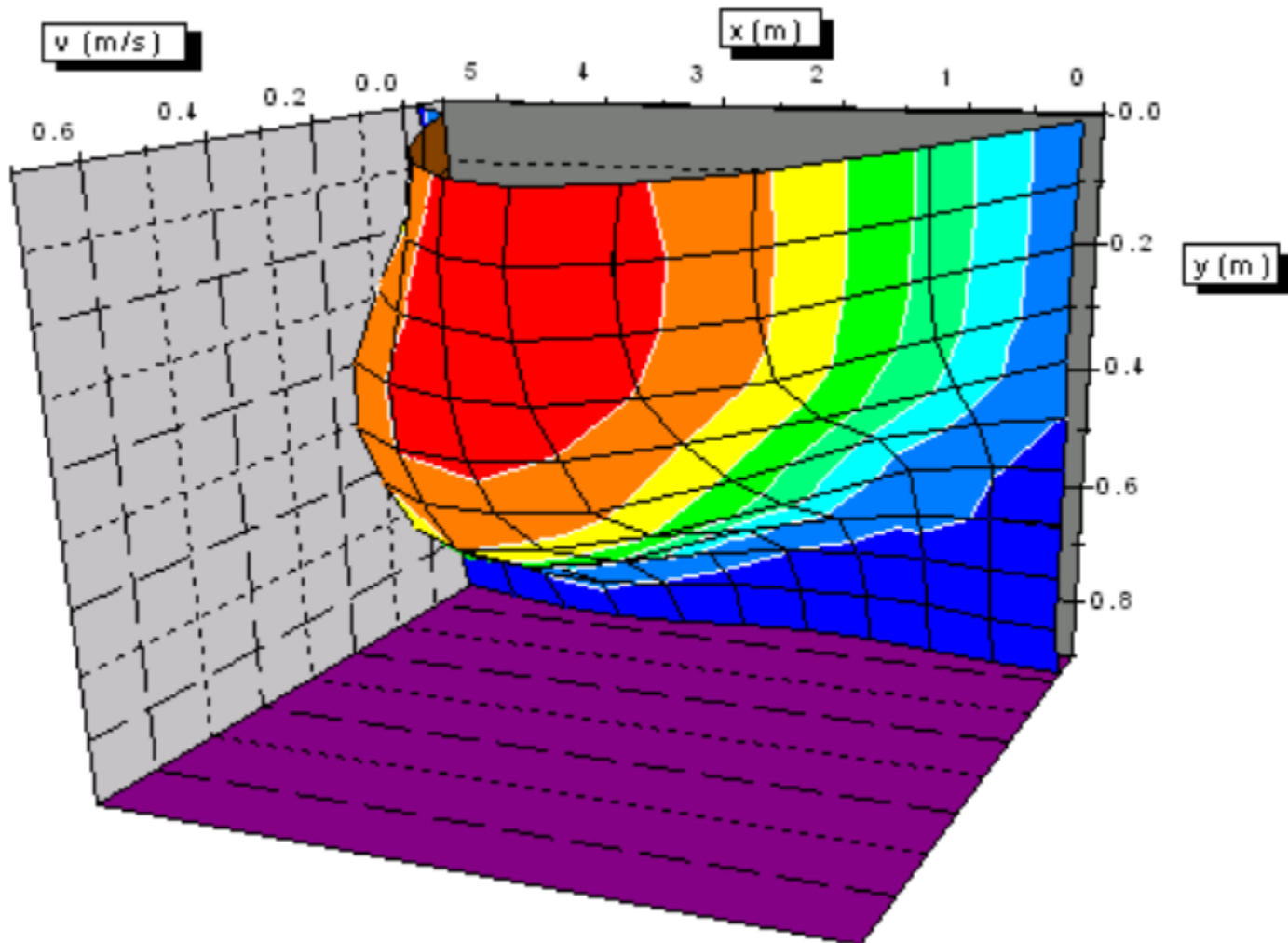
5 - medindo a 80 % da profundidade total ($0,8 \times P$)

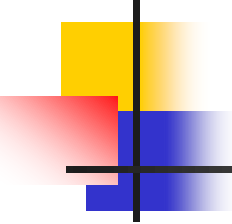
Perfil de velocidades



Usar apenas 1 ponto pode significar superestimativa ou Subestimativa.

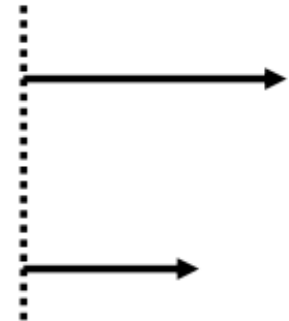
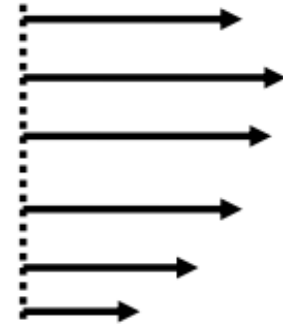
Perfil de velocidades

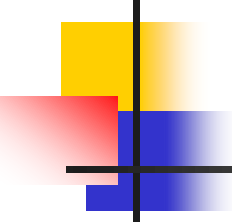




Quantos pontos?

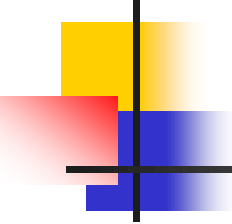
- Método detalhado
 - Muitos pontos em cada vertical
- Método simplificado
 - Apenas dois pontos em cada vertical





Método detalhado

Pontos	Posição na vertical	Velocidade média	Profundidade do rio	
1	0,6 P	$V_m = V(0,6)$	0,15 a 0,6 m	
2	0,2 e 0,8 P	$V_m = [V(0,2) + V(0,8)]/2$	0,6 a 1,2 m	
3	0,2; 0,6 e 0,8 P	$V_m = [V(0,2) + 2.V(0,6) + V(0,8)]/4$	1,2 a 2,0 m	
4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 P	$V_m = [V(0,2) + 2.V(0,4) + 2.V(0,6) + V(0,8)]/6$	2,0 a 4,0 m	
6	Sup; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e Fundo	$V_m = [V_s + 2(V(0,2) + V(0,4) + V(0,6) + V(0,8)) + V_f]/10$	> 4,0 m	



Método simplificado

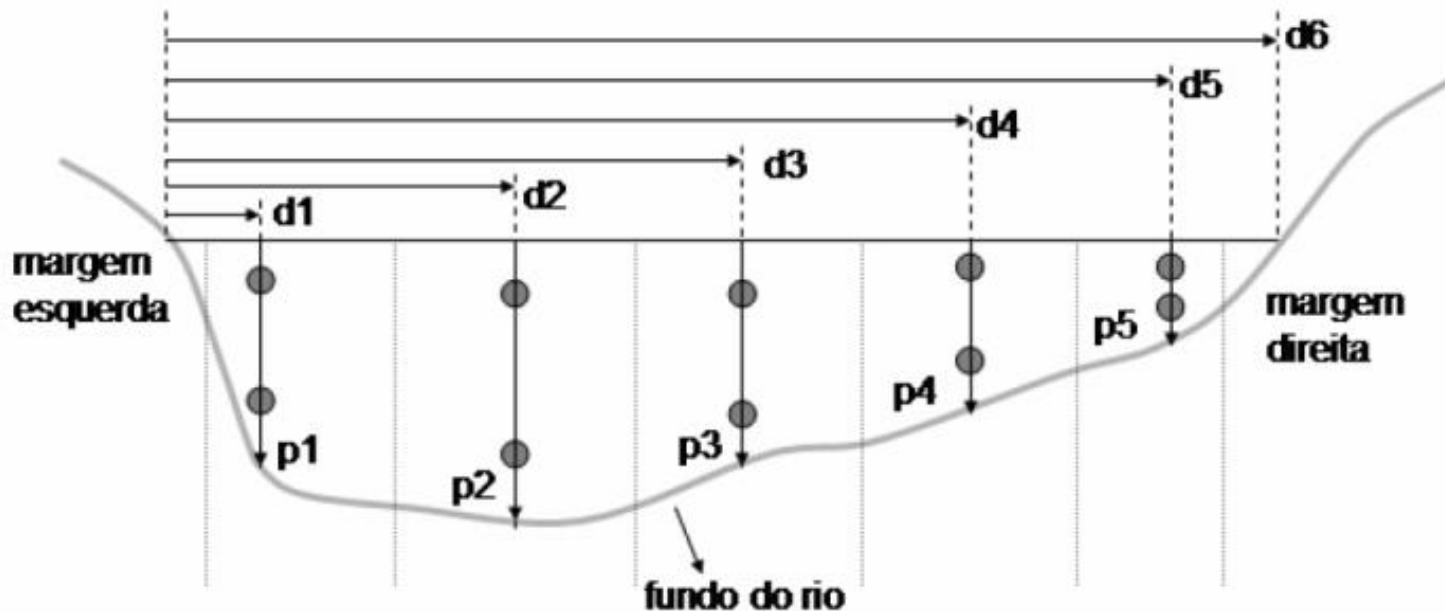
Pontos	Posição na vertical	Velocidade média	Profundidade do rio	
1	0,6 P	$V_m = V(0,6)$	< 0,6 m	
2	0,2 e 0,8 P	$V_m = [V(0,2) + V(0,8)]/2$	> 0,6 m	



Número de verticais

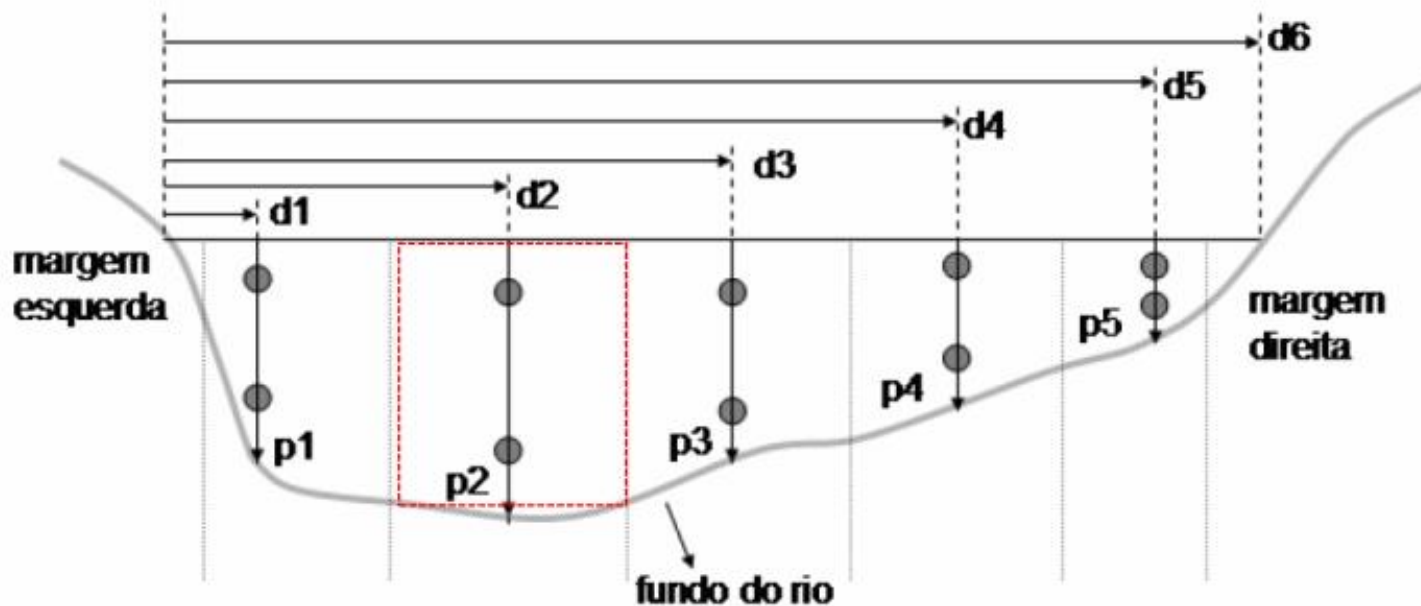
Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)	Número de verticais
≤ 3	0,3	10
3 a 6	0,5	6 a 12
6 a 15	1	6 a 15
15 a 30	2	7 a 15
30 a 50	3	10 a 16
50 a 80	4	12 a 20
80 a 150	6	13 a 25
150 a 250	8	18 a 30
≥ 250	12	> 20

Determinação da área



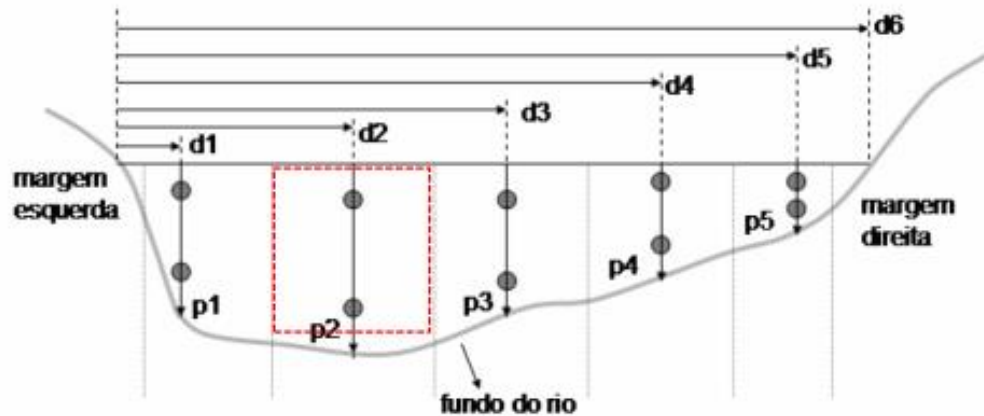
Exemplo de medição de vazão em uma seção de um rio, com a indicação das verticais, distâncias (d) e profundidades (p). Os pontos indicam as posições em que é medida a velocidade no caso de utilizar dois pontos por vertical

Determinação da área



Detalhe da seção do rio para a qual é válida a velocidade média da vertical de número

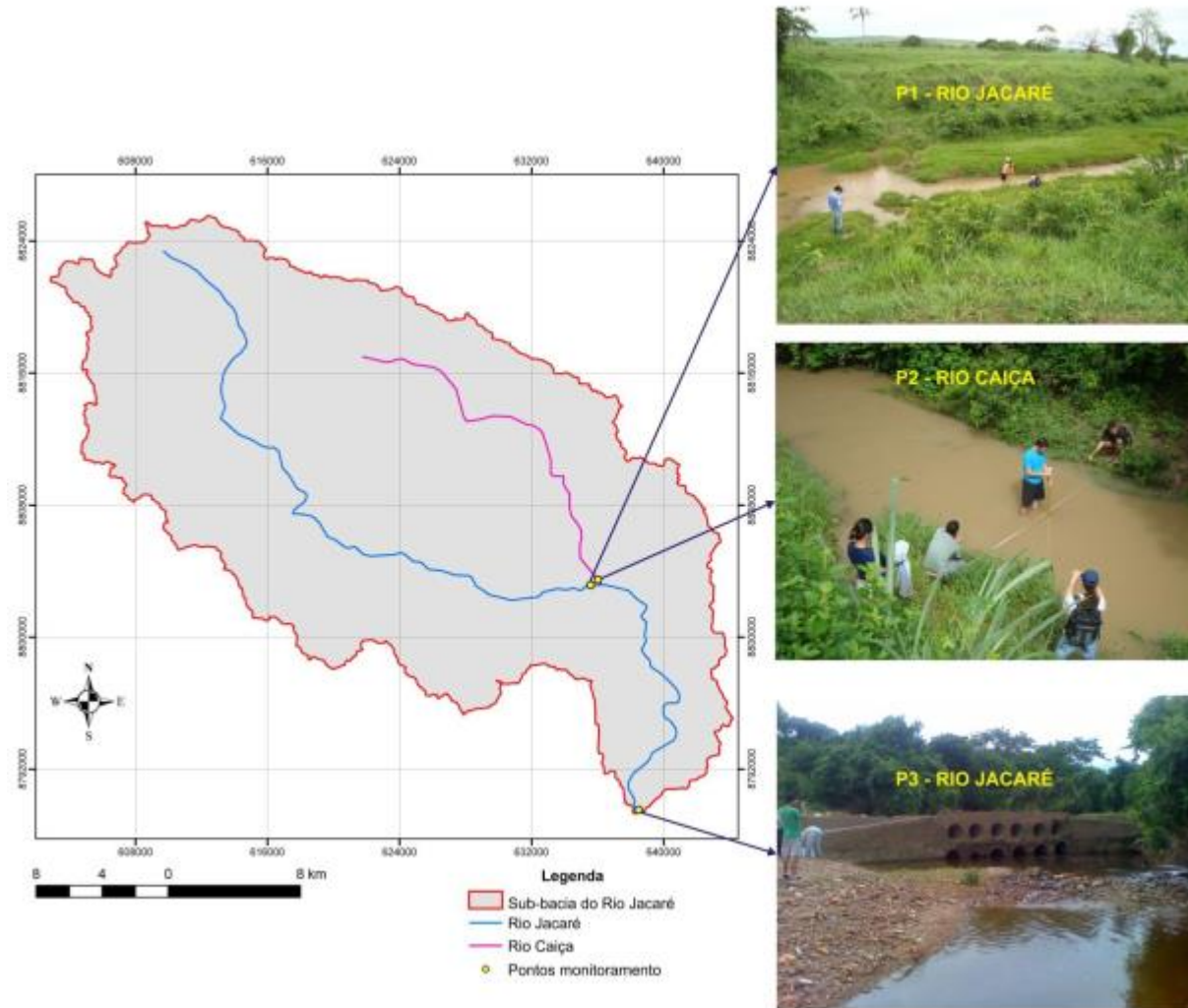
Determinação da área



$$A_i = p_i \cdot \left(\frac{(d_i + d_{i+1})}{2} - \frac{(d_{i-1} + d_i)}{2} \right) = p_i \cdot \left(\frac{(d_{i+1} - d_{i-1})}{2} \right)$$

Onde “i” indica a vertical que está sendo considerada; p é a profundidade; d é a distância da vertical até a margem,

Medição com molinete no rio Jacaré-SE



Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

- ADCP transmite um sinal acústico e ouve o eco que retorna depois de atingir partículas na água
- A velocidade é calculada, com base no conceito do efeito Doppler



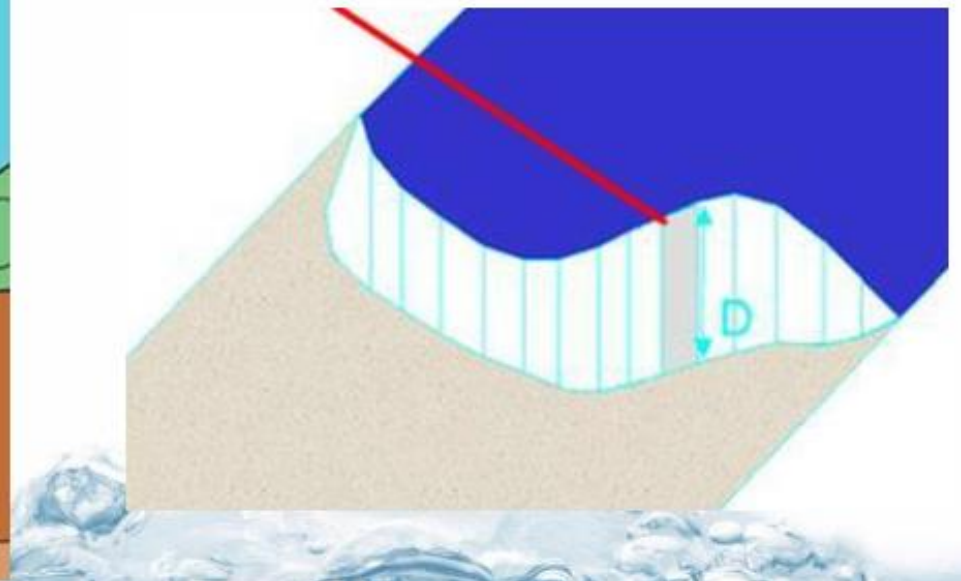
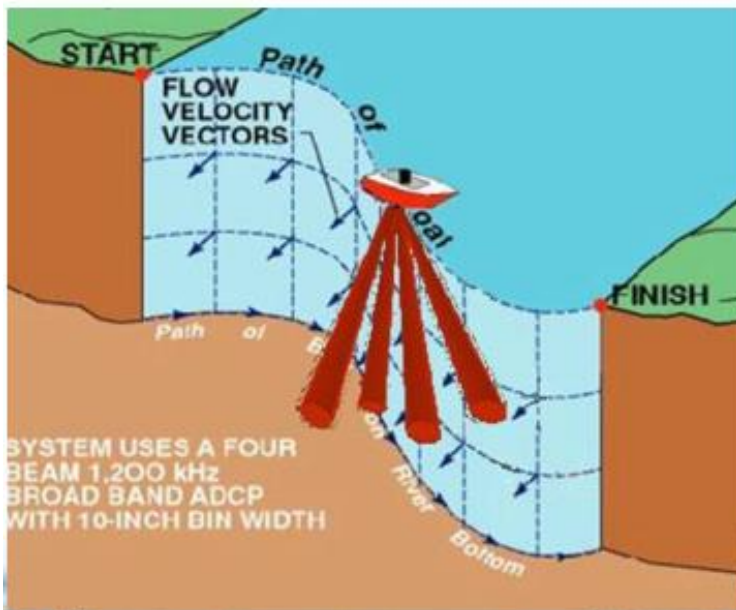
Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

- ADCPs obtêm velocidades nas três dimensões



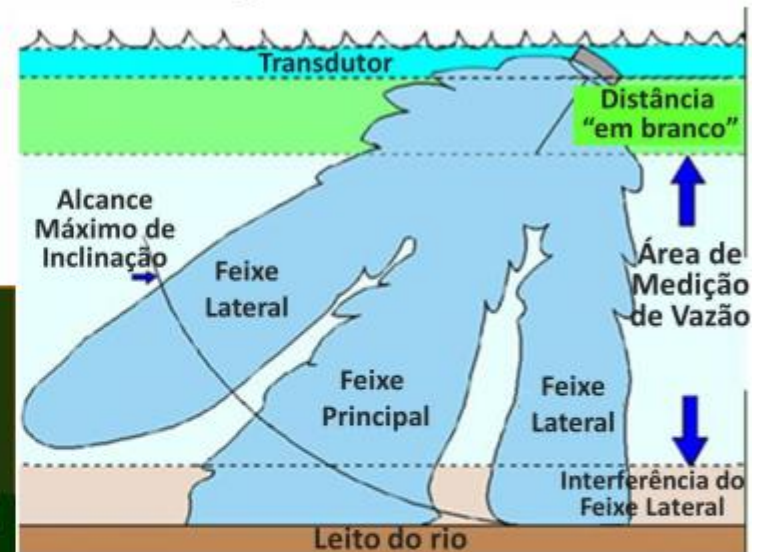
Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

- O cálculo da vazão é feito de forma semelhante ao método de velocidades, onde se calculam as vazões em pequenos trechos da seção



Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

- O ADCP não mede velocidades em algumas áreas da seção transversal.



Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

Tipos de montagens do ADCP



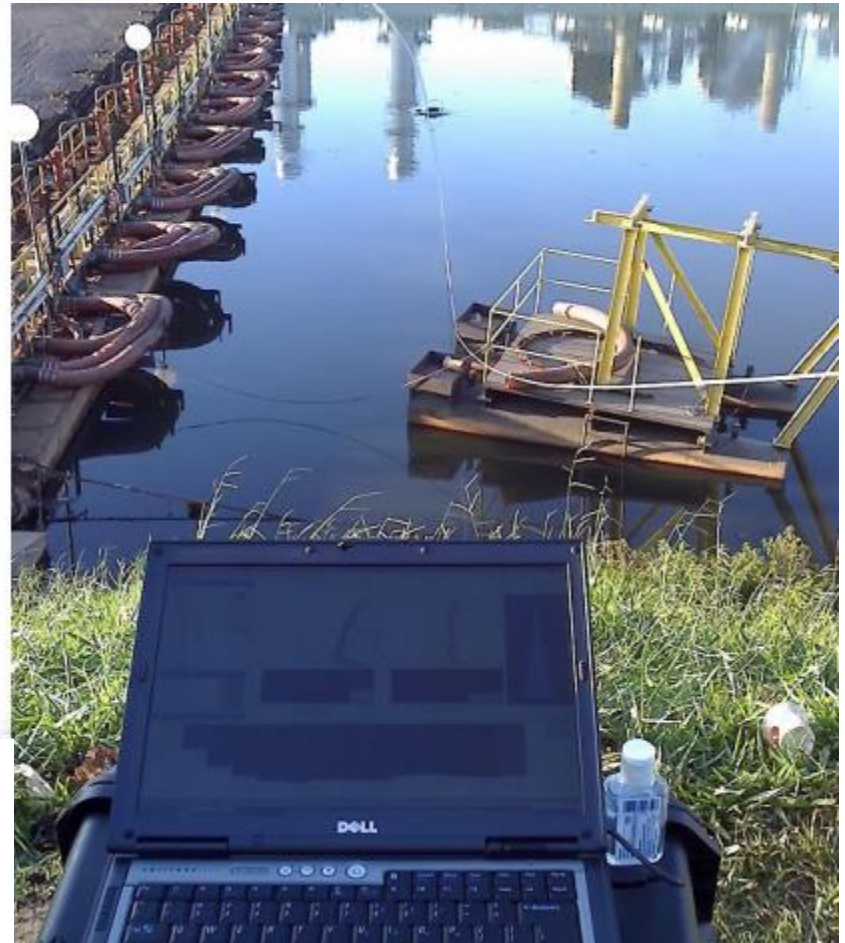
ADCP montado em barco



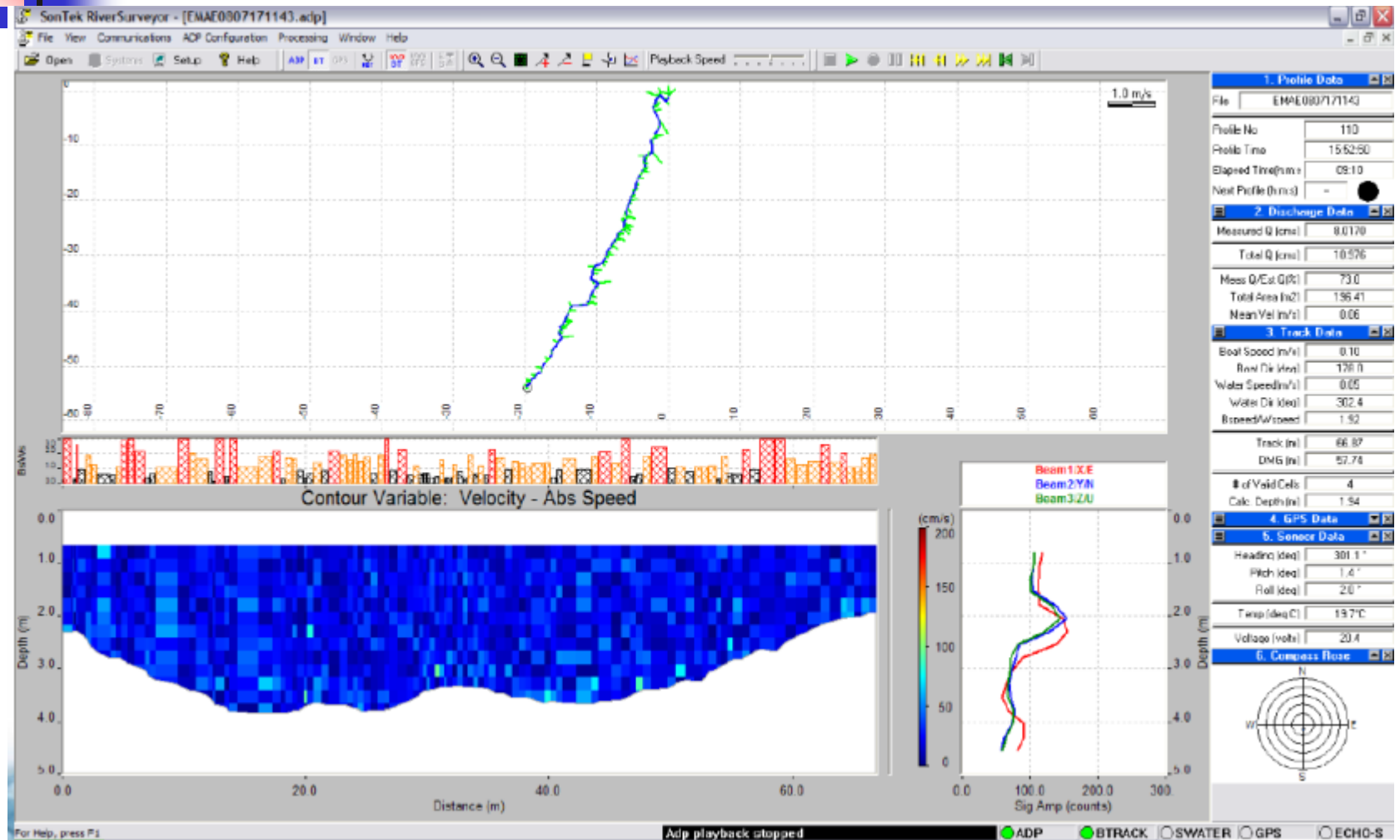
Detalhe do equipamento montado em um “mini catamarã”

Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

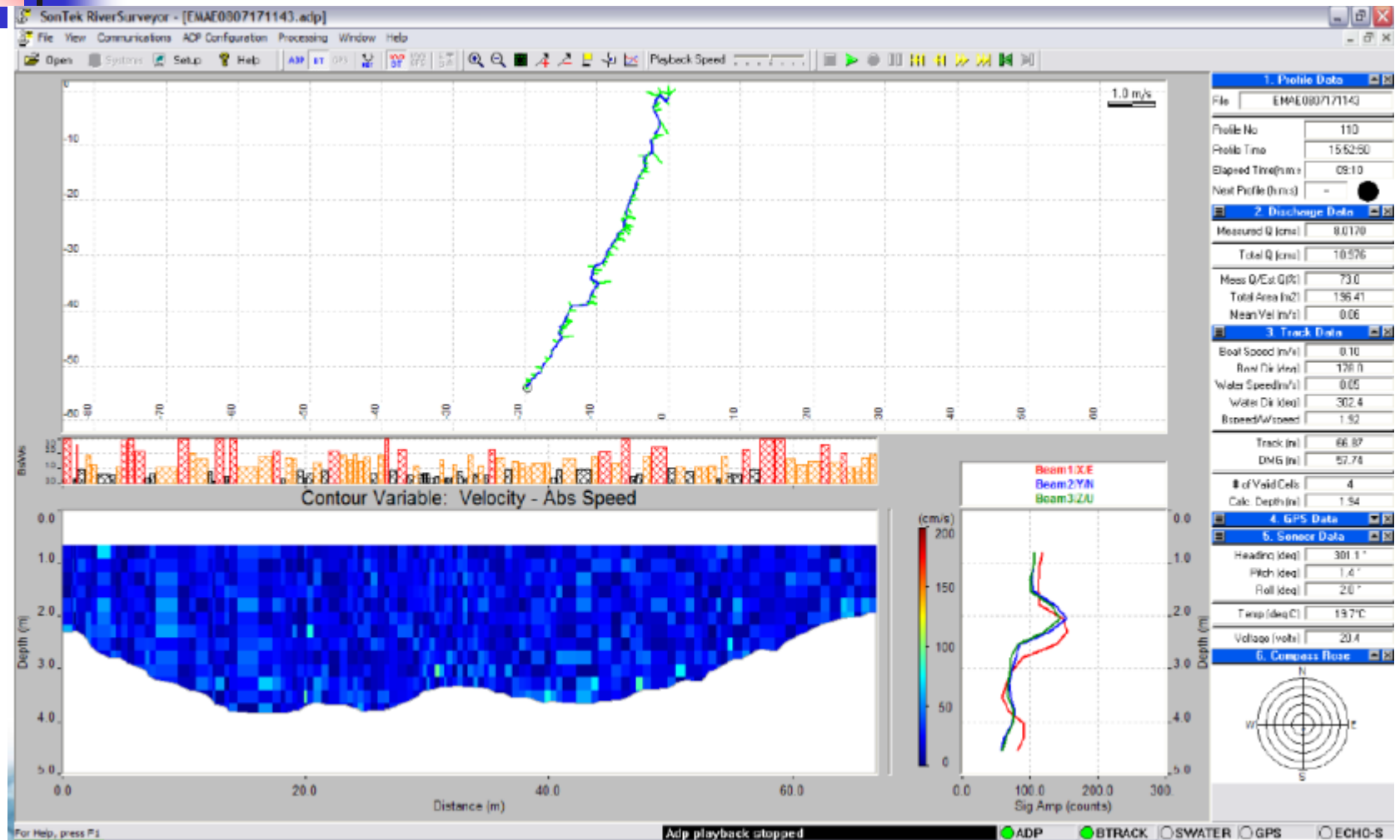
- O “RiverCat” transmite os dados diretamente ao notebook dotado de um software que interpreta os dados, integra as velocidades e calcula a vazão

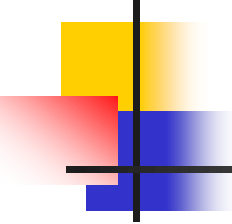


Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)



Medição com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

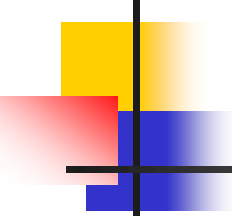




Vazão

$$Q = \sum_{i=1}^N V_i \cdot A_i$$

A vazão será dada pelo somatório do produto entre velocidade média e área de cada vertical.



Medida do nível da água

O registro sistemático dos níveis de água constitui a base dos estudos fluviométricos. Determinar esta grandeza é importante pela possibilidade de ser relacionada à vazão.

PERMITE

- Controle de inundações
- Navegabilidade dos cursos hídricos
- Localização de obras nas margens do rio

Equipamento de medidas de nível ou altura

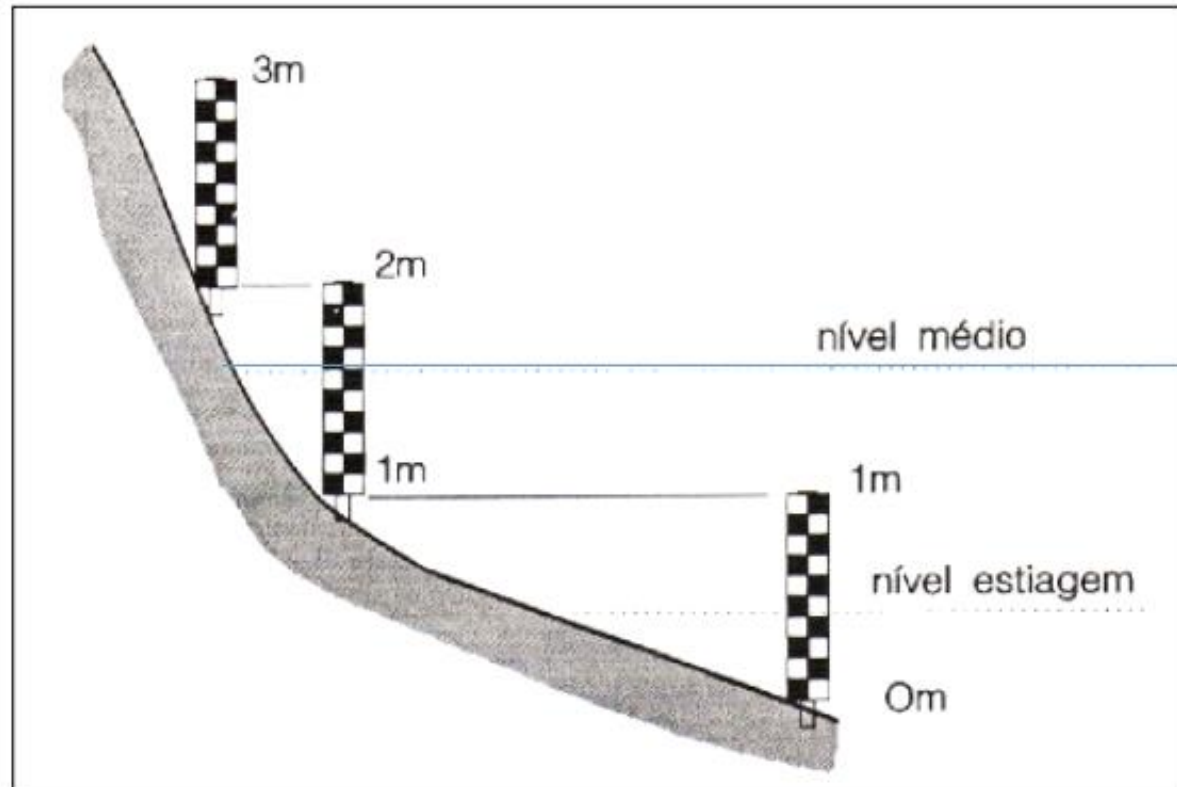
Limnímetros (fluviômetros)

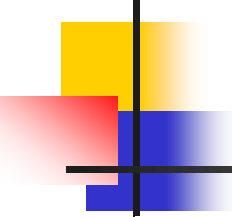
Observação direta do nível de água em uma escala graduada em centímetros, em geral de ferro esmaltado, madeira o aço inoxidável, colocada verticalmente no leito do rio, em posição que permita a leitura fácil.



Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnímetros (fluviômetros)

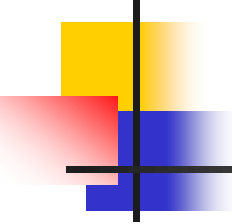




Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnímetros (fluviômetros) – CUIDADOS QUE SE DEVE TER

- Deve ser observada a oscilação máxima de nível que possa ocorrer.
- Utilizar no mínimo, duas referências de nível máximo
- Realizar pelo menos duas observações diárias sistemáticas (horas fixas) e observações detalhadas (de hora em hora) sempre que ocorram variações bruscas do nível de água.
- Evitar oscilações da superfície provocadas por ondas (por vento, passagens de embarcações, etc) Geralmente são $> 2\text{cm}$



Equipamento de medidas de nível ou altura

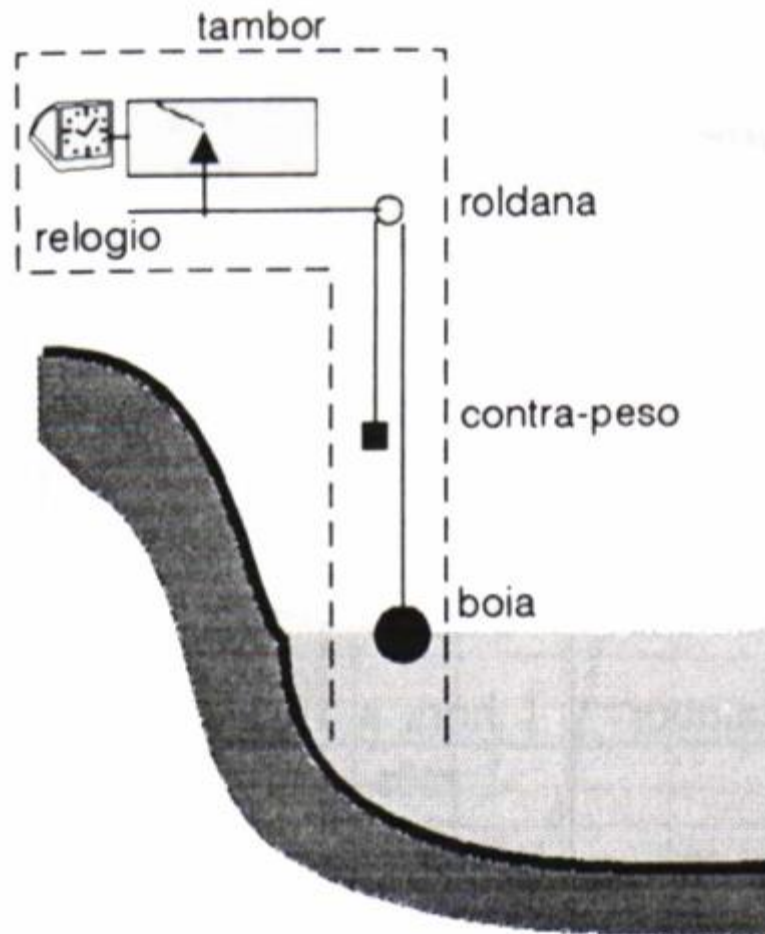
Limnógrafos (fluviógrafos)

.
Aparelhos que registram continuamente as variações de nível de água. Existem dois tipos fundamentais de instrumentos

- Baseados no movimento de um flutuador
- Baseados no registro de pressão de água.

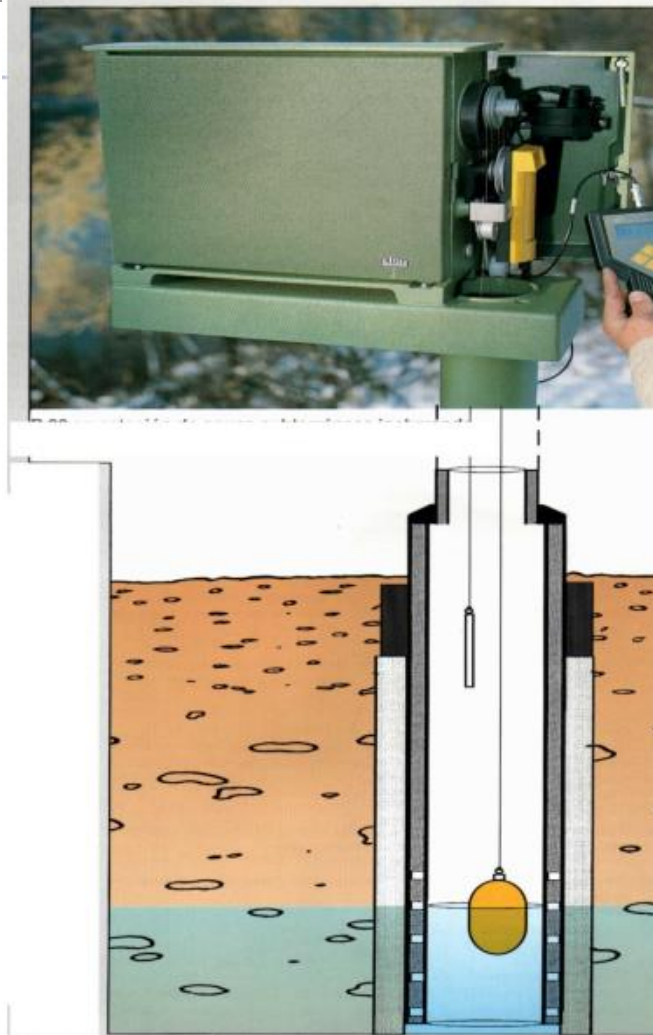
Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnógrafos de boia



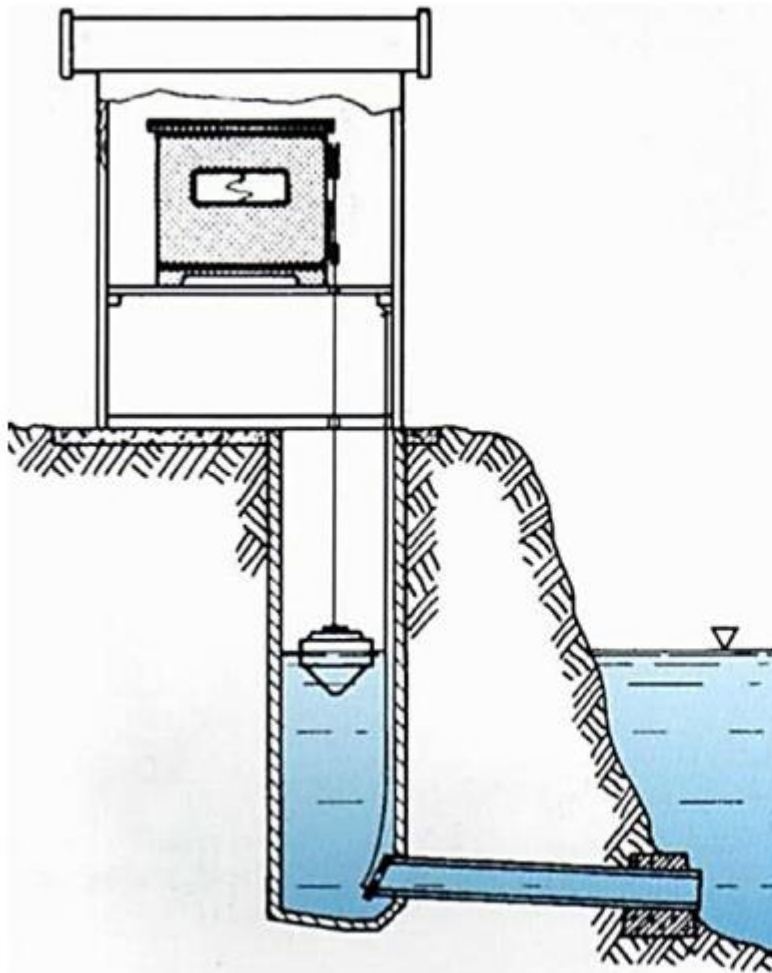
Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnógrafos de boia



Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnógrafos de boia



Limnigrafo com tubo de comunicação direta com o curso de água instalado na margem do curso de água.

Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnígrafos de boia

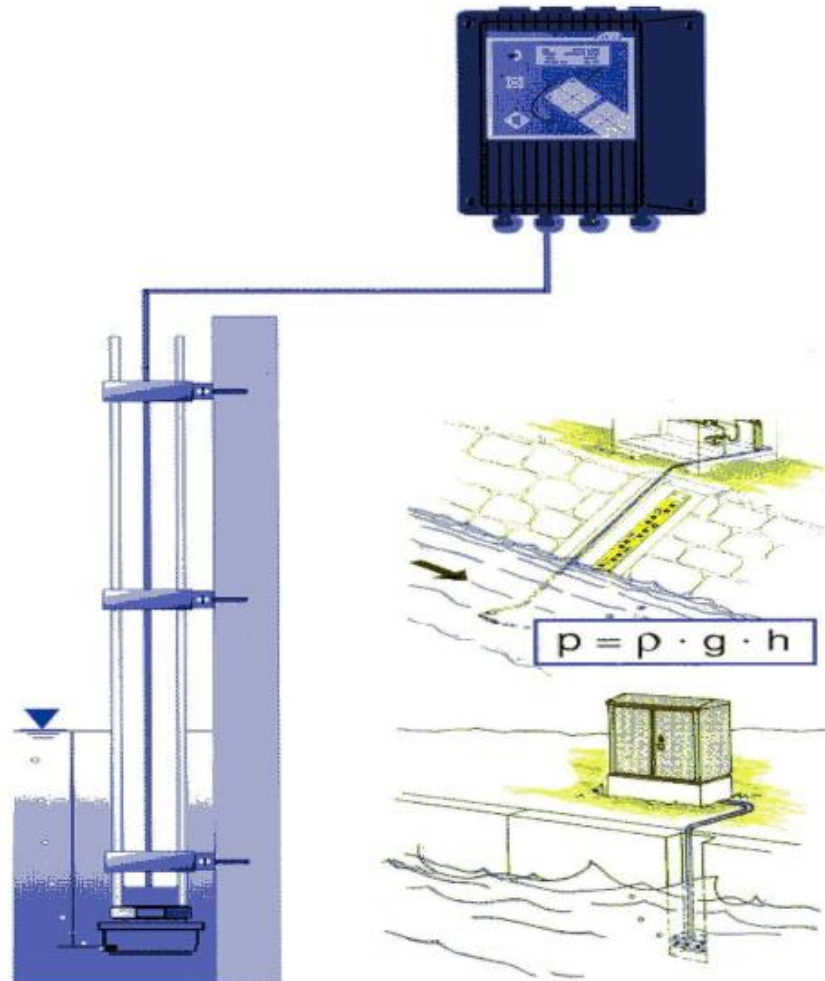


Equipamento de medidas de nível ou altura

Limnigrafos de pressão

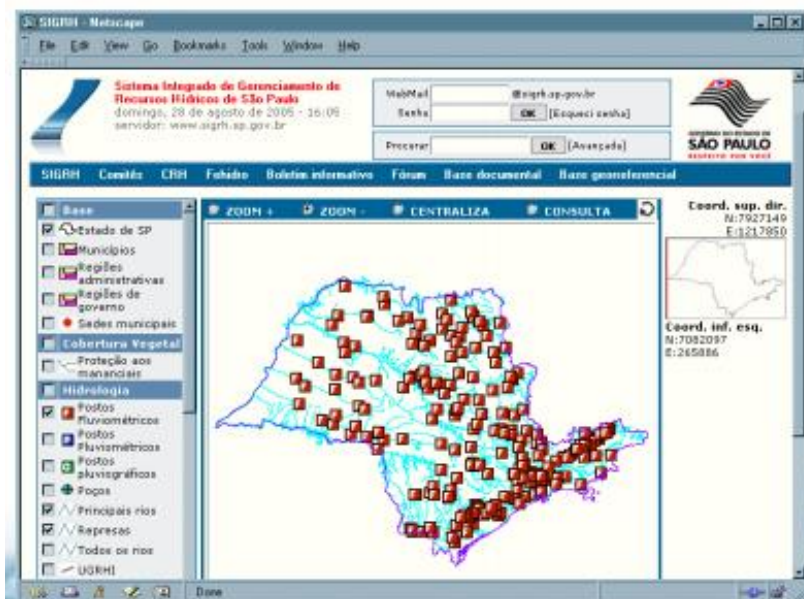
Consta de uma célula de pressão, colocada no interior de uma campânula perfurada mantida no fundo da água.

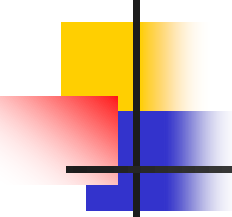
A célula é ligada por um tubo plástico ou de cobre diretamente ao manômetro registrador.



Estações fluviométricas

“Atualmente, estão cadastradas no Banco de dados hidrológicos da ANA, 22.333 estações hidrometeorológicas, sendo 14.189 estações pluviométricas e 8.144 estações fluviométricas. Estão em operação no país, através das diversas entidades, cerca de 8.760 estações pluviométricas e 4.133 estações fluviométricas”





Estações fluviométricas

- Para reduzir custos, medem-se níveis d'água e por meio de uma função (curva-chave) se obtém as vazões correspondentes.
- Locais de medição de vazões e níveis:
 - **postos fluviométricos**: os níveis são medidos diariamente, às 7 h e às 18 h.
 - **postos fluviográficos**: os níveis são registrados continuamente, em papel ou meio magnético
- Rede Hidrométrica do DAEE no Estado de São Paulo
 - 150 postos fluviométricos
 - 50 postos fluviográficos
 - 10 postos sedimentométricos

Estações fluviométricas

Exemplo de caderneta de campo

Um observador (morador local) faz as leituras duas vezes ao dia.

Envia a caderneta de campo para o escritório uma vez por mês.

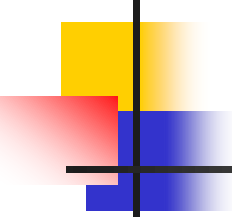
DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - C.T.H.
Avenida Presidente Kennedy, 3233 — Caixa Postal, 39 — CEP 06290 — Osasco
POSTO FLUVIOMÉTRICO

Posto Ponte Joaquin Justino Mês Março de 19 2000
Município Guairá
Rio Pardo Zona 3ª 5 B-0 0 1 F

VISTO	DIA	LEITURA DA ESCALA		VISTO	DIA	LEITURA DA ESCALA	
		7 horas	18 horas			7 horas	18 horas
	1	321	321		18	299	298
	2	320	317		19	285	280
	3	310	305		20	271	268
	4	305	294		21	266	270
	5	290	287		22	280	284
	6	279	274		23	280	287
	7	265	262		24	293	298
	8	256	254		25	301	301
	9	253	252		26	299	293
	10	257	265		27	283	280
	11	278	292		28	276	274
	12	293	294		29	276	290
	13	299	298		30	293	293
	14	299	301		31	293	293
	15	302	301		30	295	296
					31	300	301

Observações:

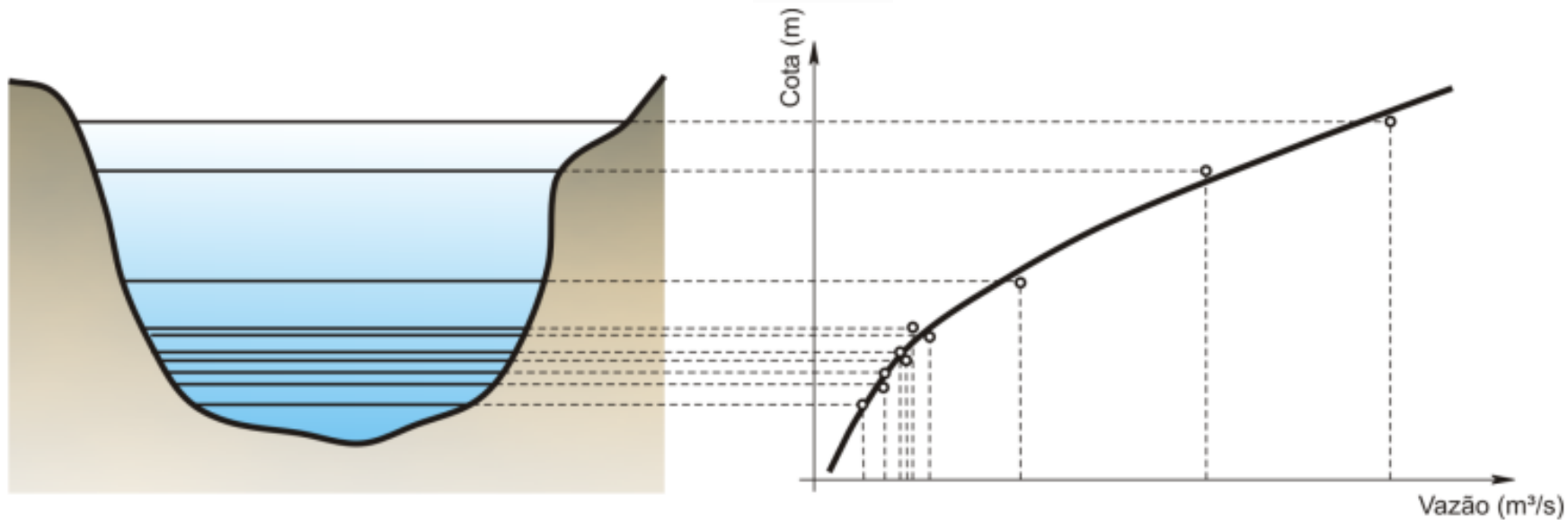
Data: 31/03/2000 Observador: João Carlos S. Pereira
(Nome legível)



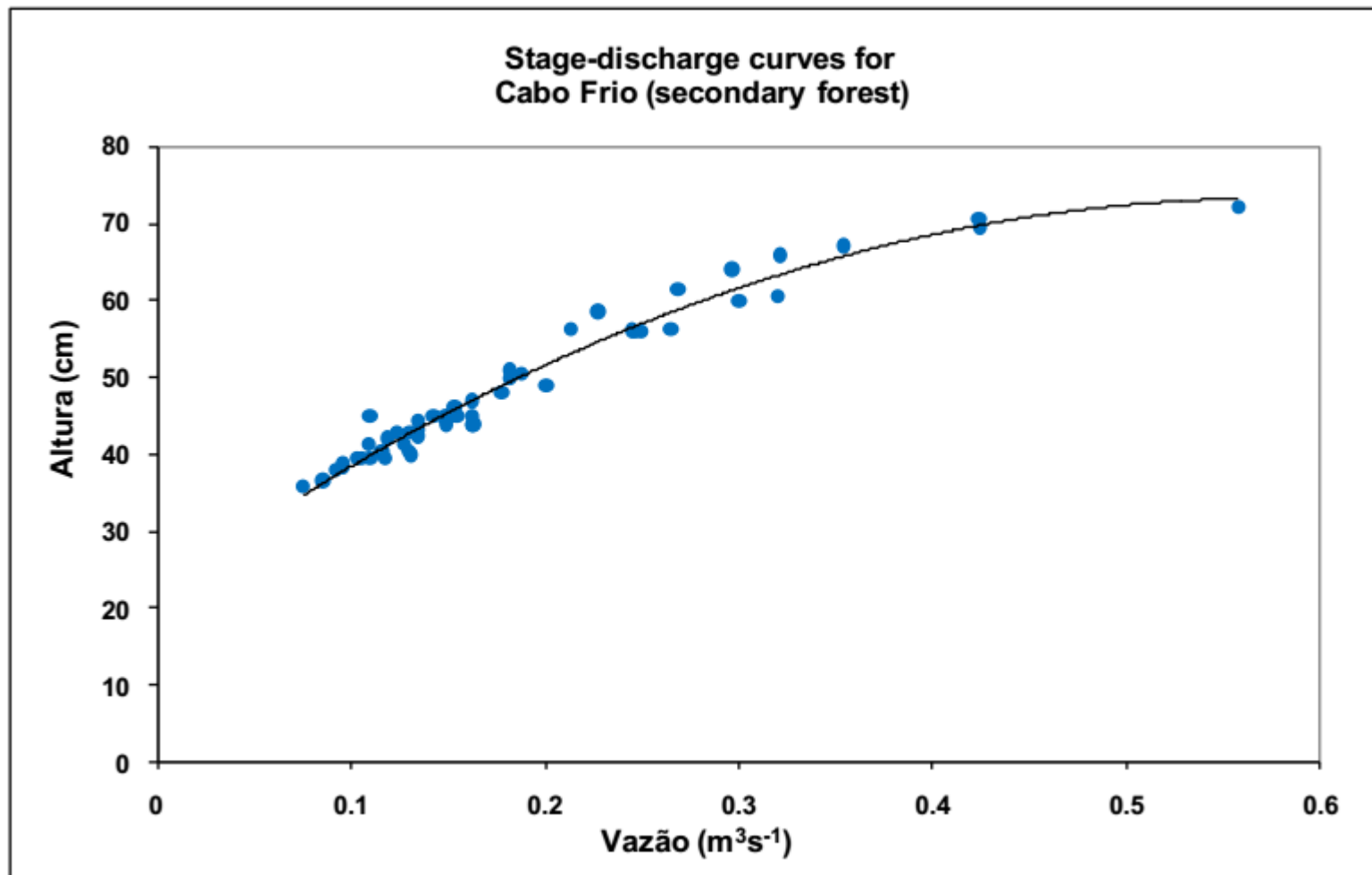
Curva chave

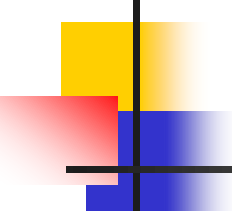
- A determinação de vazões é um processo demorado e oneroso, principalmente em grandes rios;
- Toda medida de vazão é referida a um nível, altura ou uma cota de referência. A vazão medida é função dessa cota.
- Experimentalmente, determina-se a relação entre a altura e a vazão. Essa relação denomina-se curva chave, que é específica de cada seção do rio.
- **A curva chave se justifica porque é muito mais fácil medir o nível do rio do que sua vazão**

Curva chave



Curva chave





Curva chave

A experiência tem mostrado que o nível d'água (h) e a vazão (Q) ajustam-se bem à curva do tipo potencial, que é dada por:

$$Q = a \cdot (h - h_0)^b$$

onde:

Q – vazão na seção do posto;

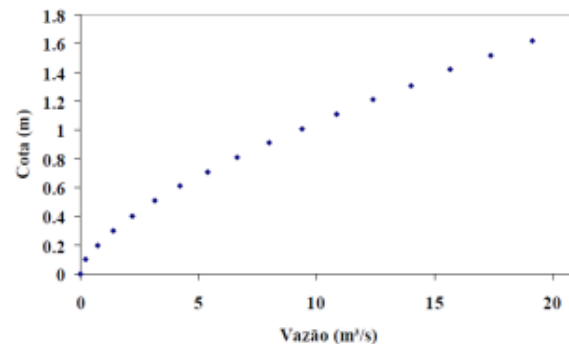
h - nível d'água (leitura na régua);

h_0 – valor de h para $Q = 0$;

a e b - parâmetros de ajuste.

Curva chave

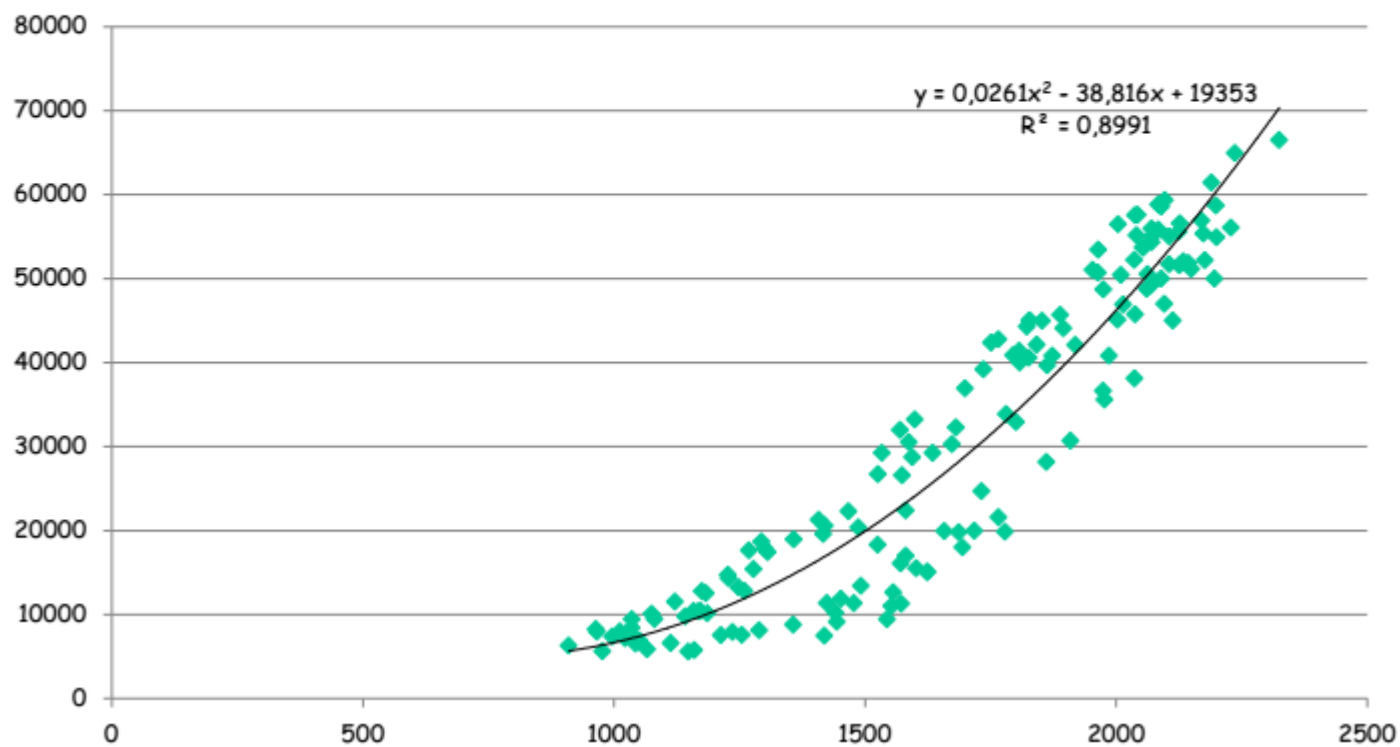
Traçado da curva chave



- A curva chave pode ser determinada a partir de um método de ajustes de curva – interpolação dos pontos;
- Extrapolação - deve ser cuidadosa, pois pode haver variações consideráveis na seção transversal do rio;
- Interpretação da curva-chave - deve considerar todas as informações disponíveis, pesquisando-se históricos e relatórios de inspeção, alterações da posição das réguas e das seções transversais, e possíveis mudanças nas condições de escoamento nas proximidades das seções

Curva chave

Traçado da curva chave



Curva chave

Variação da curva-chave com o tempo

- Curva-chave: intimamente ligada às características hidráulicas da seção de controle
- Variação da expressão matemática quando há variação nestas constantes
- Alterações na geometria da seção: erosões ou assoreamento causam mudanças na velocidade do escoamento, relações entre área, raio hidráulico e profundidade, afetando a relação cota-descarga

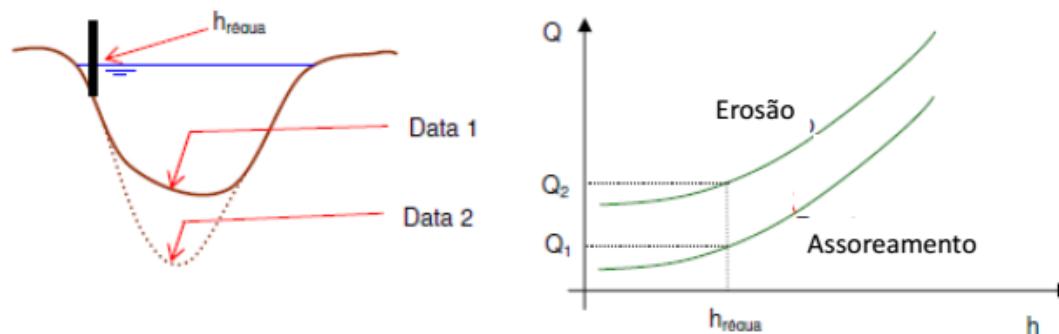
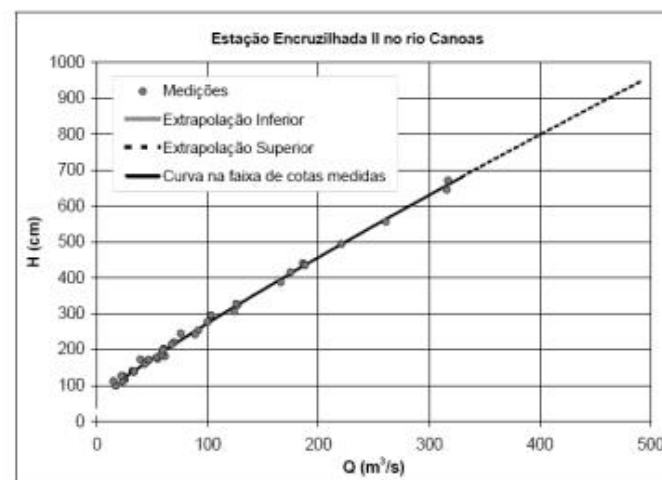
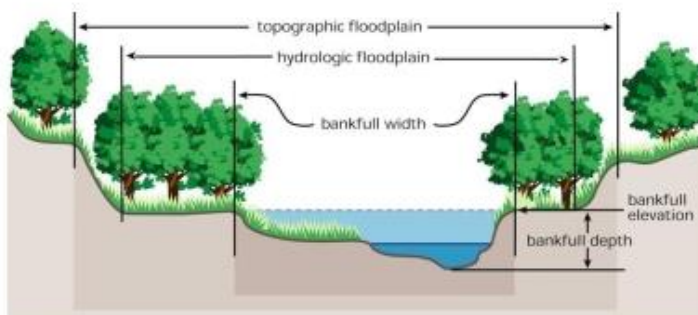


Figura 32 – Alteração da seção ao longo do tempo e conseqüente reflexo na curva cota-descarga.

Curva chave

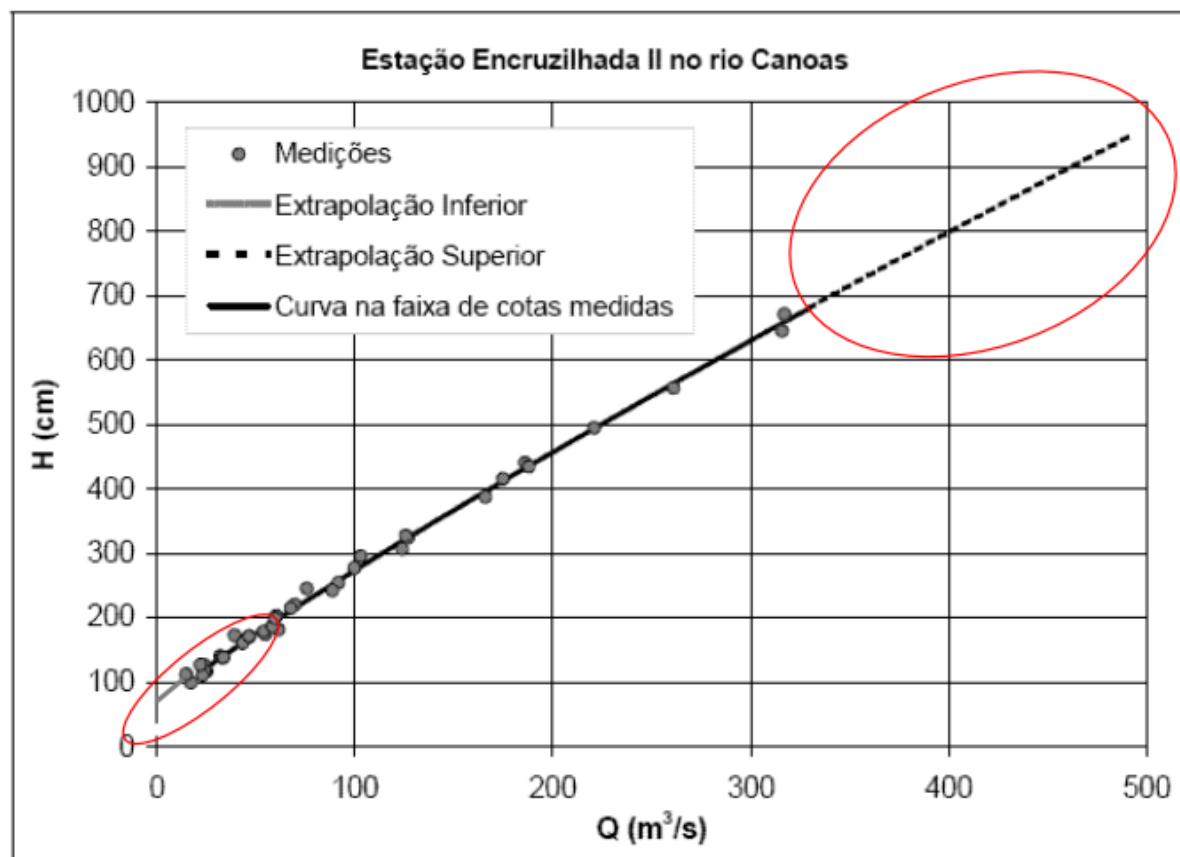
Extrapolação da curva chave



Uma extrapolação da curva-chave é necessária quando as cotas observadas no posto fluviométrico superam as máximas cotas medidas simultaneamente às medições de vazão, ou quando as cotas observadas são inferiores às menores cotas medidas simultaneamente às medições de vazão, como mostra a Figura 13. 15.

Curva chave

Extrapolação da curva chave

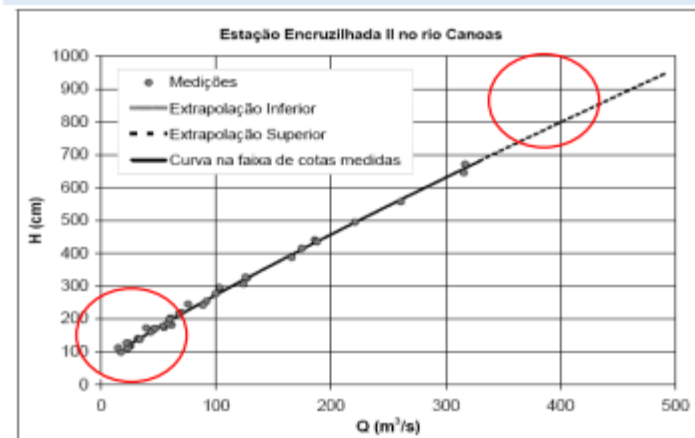


Curva chave

Extrapolação da curva chave

- Quando a extrapolação é para cotas observadas superiores às utilizadas na elaboração da curva-chave, denomina-se extrapolação superior.
- Quando é para cotas inferiores às cotas utilizadas na elaboração da curva-chave, a extrapolação é chamada inferior.

- A extrapolação superior de curvas-chave é muito importante porque dificilmente existirão medições de vazão coincidentes com as maiores cheias observadas.

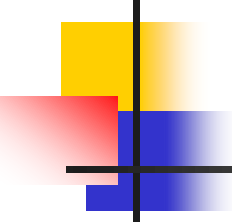




Curva chave

Seção para controle de nível - medições

- **Lugar de fácil acesso**
- **Seção com forma regular** – a regularidade da seção facilita a operação de levantamento dos pares cota-vazão, diminuindo a possibilidade de erros na determinação da curva-chave
- **Trecho retilíneo e com declividade constante** – o escoamento possui um comportamento relativamente uniforme nas suas imediações. Isso facilita as medições a serem realizadas, não havendo perturbações no escoamento devido a meandros ou ressaltos decorrentes da variação da declividade
- **Margem e leito não erodíveis** – garante a integridade da seção levantada por longo tempo
- **Velocidades entre 0,2 e 2 m/s** – minimiza o erro das medições
- **Constância das características hidráulicas** – nível, velocidade, declividade, área da seção



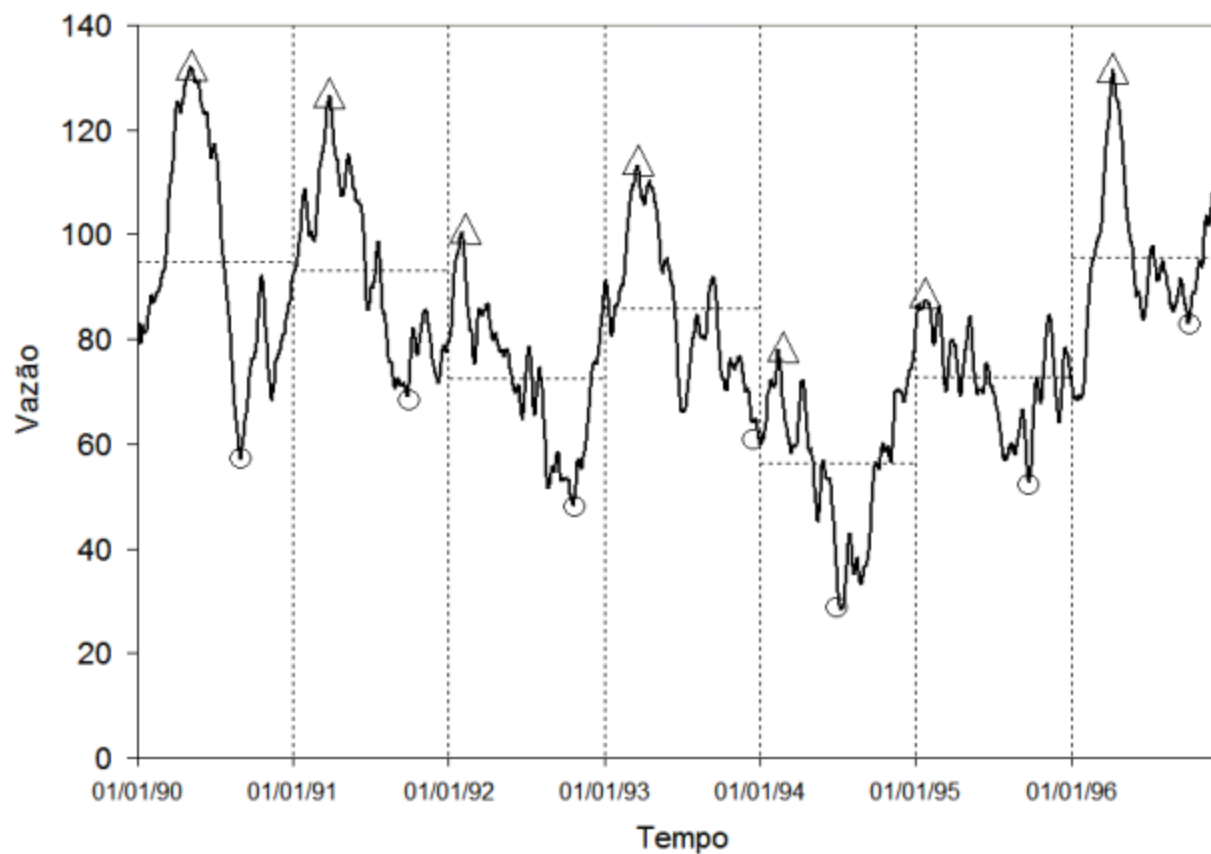
Curva chave

Séries históricas

- Úteis para diversos projetos de engenharia
- Responder perguntas tais como:
 - Onde existe água?*
 - Quanta água existe?*
 - Como ela varia sazonalmente?*
- Balanceamento das disponibilidades e demandas ao longo do tempo
- Riscos no abastecimento em função da diminuição da vazão
- Dimensionamento das obras hidráulicas

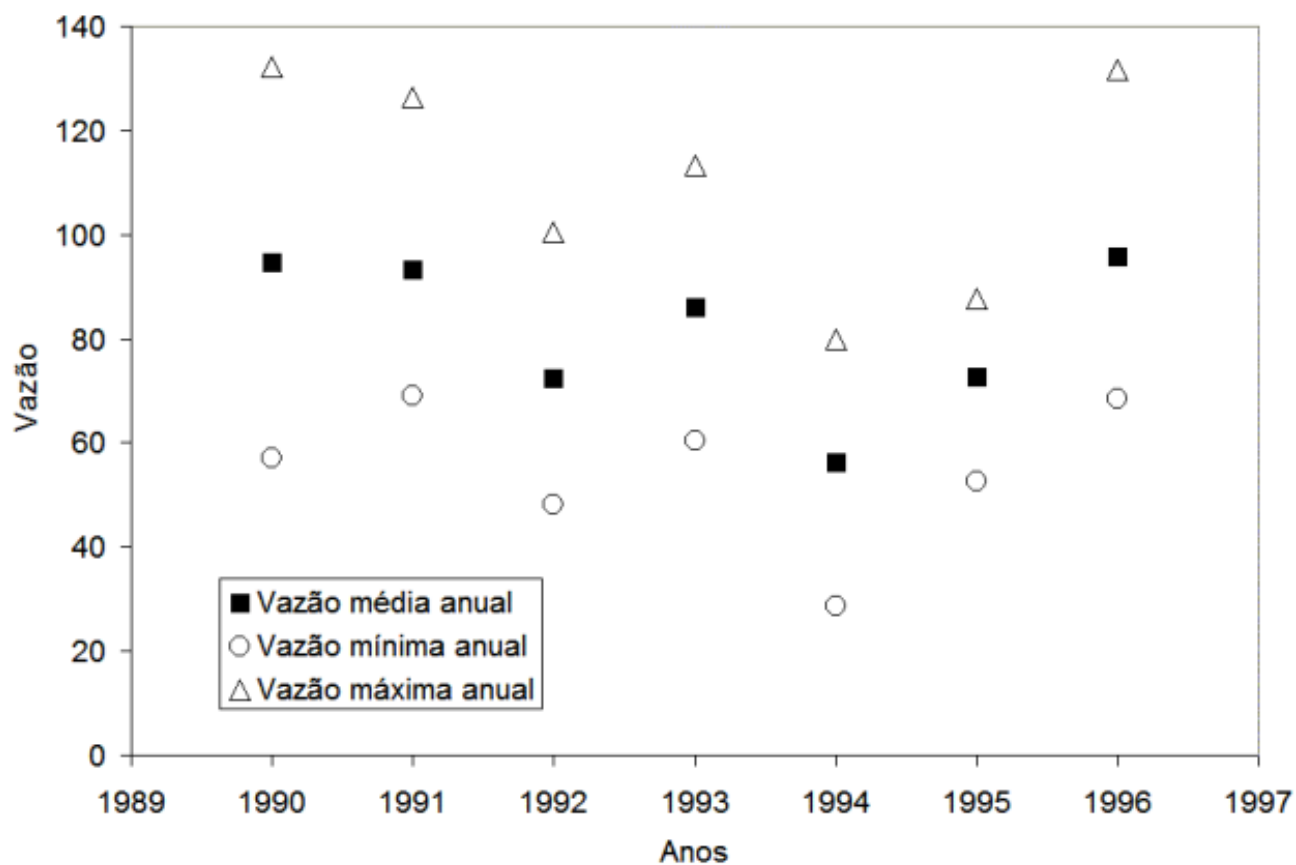
Curva chave

Séries históricas



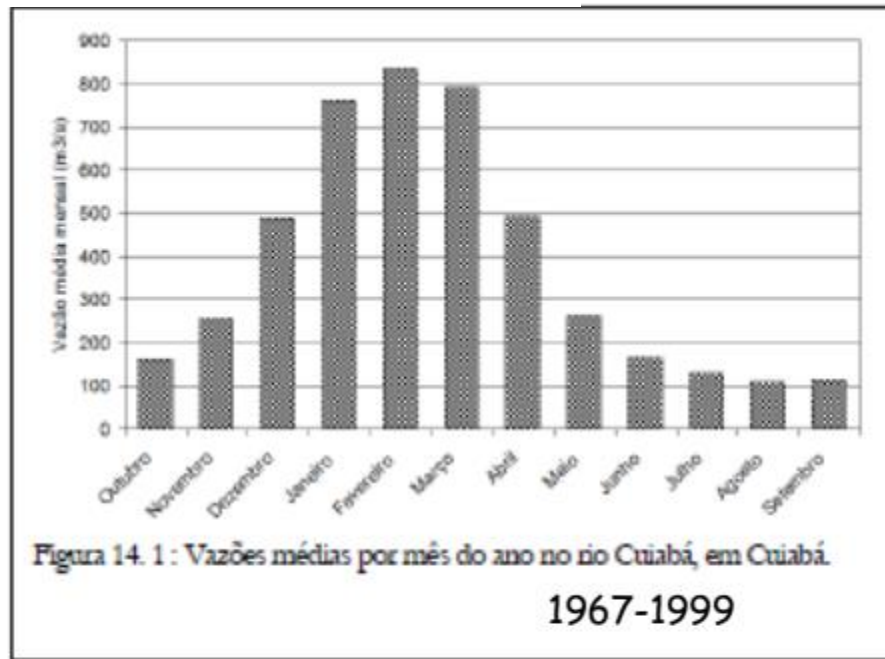
Curva chave

Séries históricas



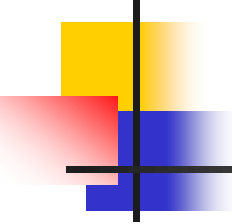
Curva chave

Vazão média de um rio



$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- Média de toda a série de vazões ou precipitações registradas
- Importante na avaliação da **avaliação da sazonalidade** de uma bacia



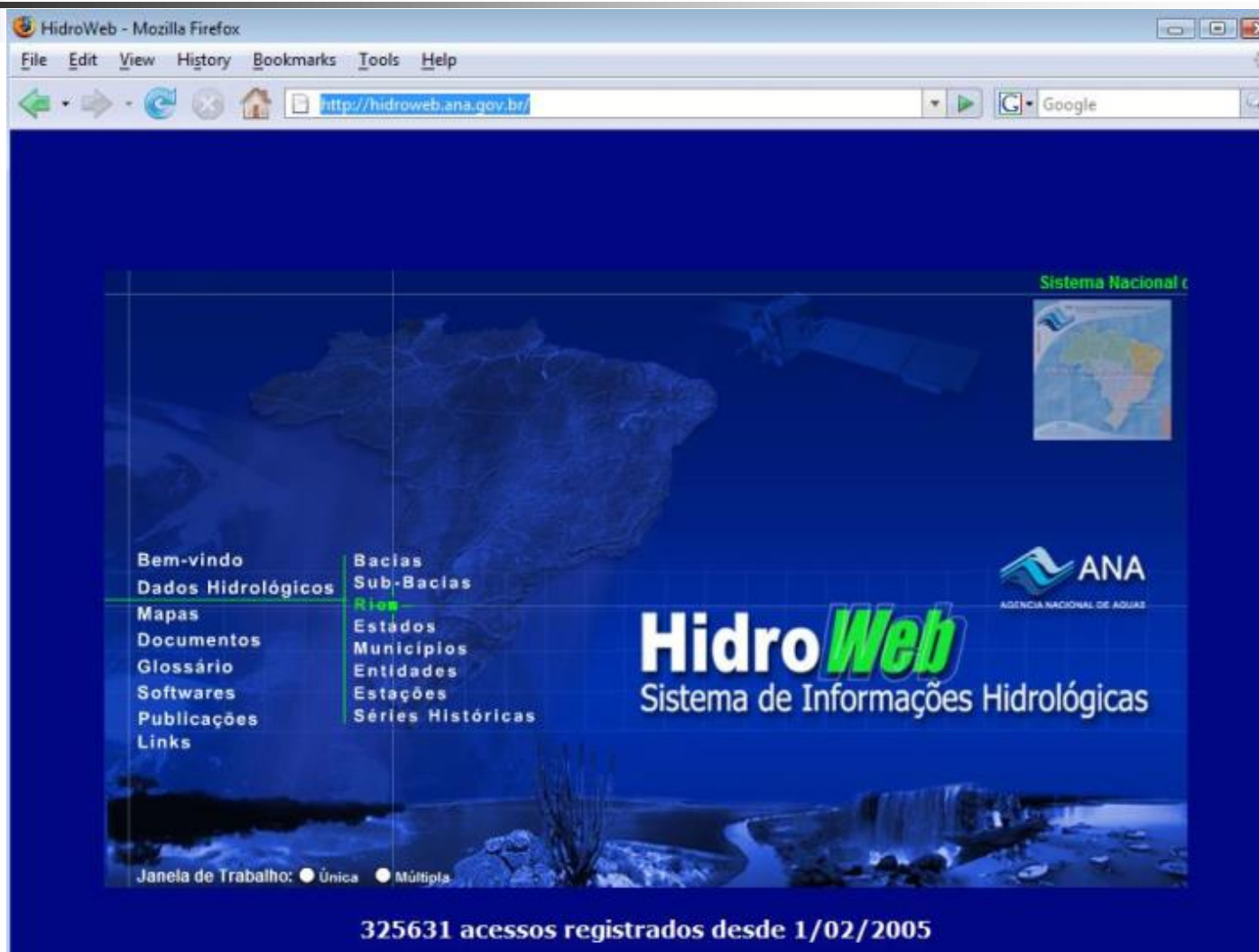
Orgãos responsáveis pelas medições

- A Lei 9.433/97 – Política Nacional de Recursos Hídricos e Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)
- Órgãos gestores de recursos hídricos
 - Nacional: Agência Nacional de Águas (ANA)
 - Estadual: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE)

www.sigrh.sp.gov.br (Dados hidrológicos)
www.ana.gov.br (Hidroweb)



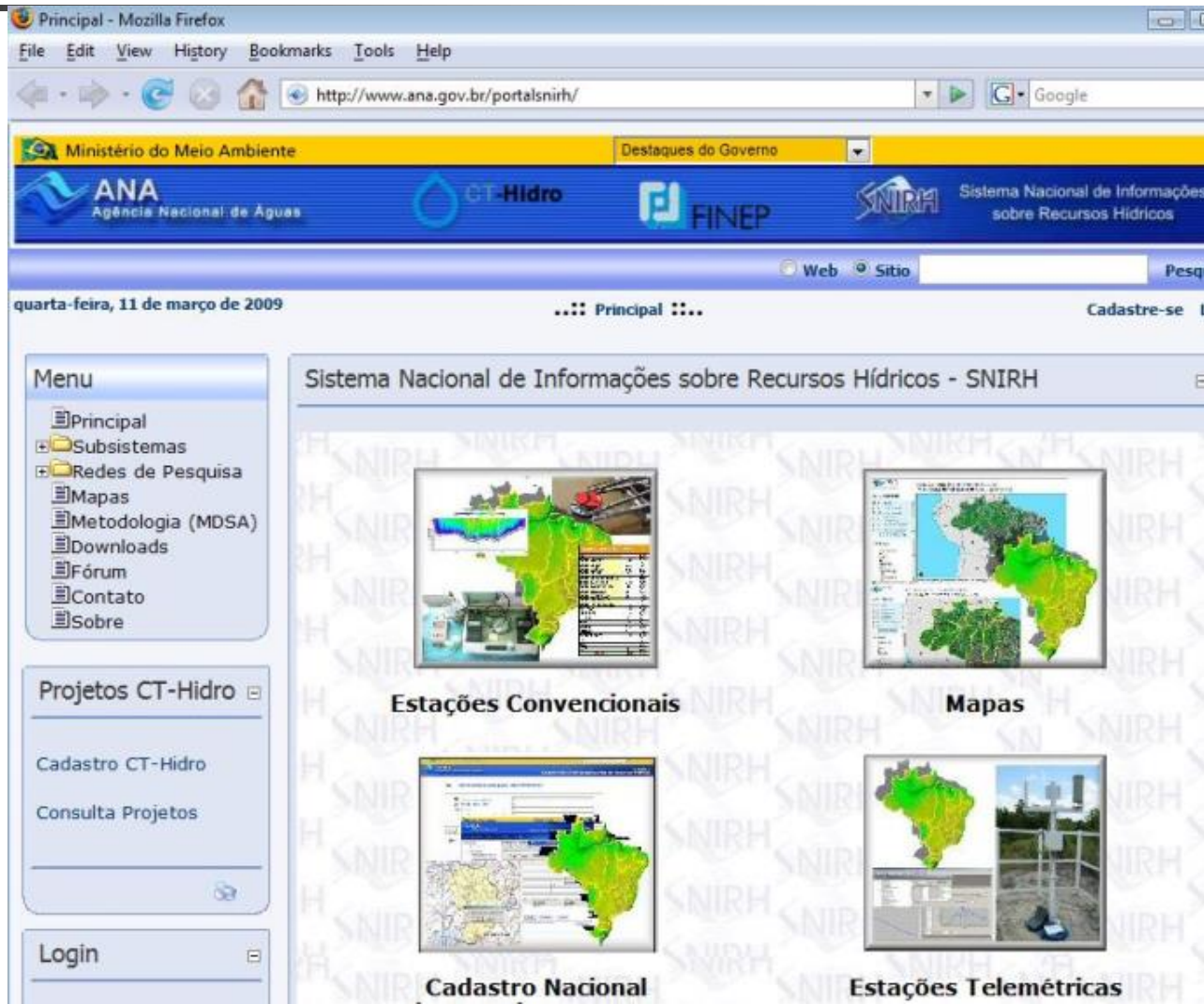
Orgãos responsáveis pelas medições

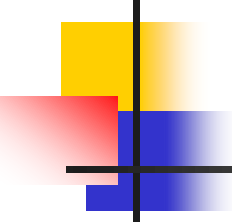


Orgãos medições

responsáveis

pelas



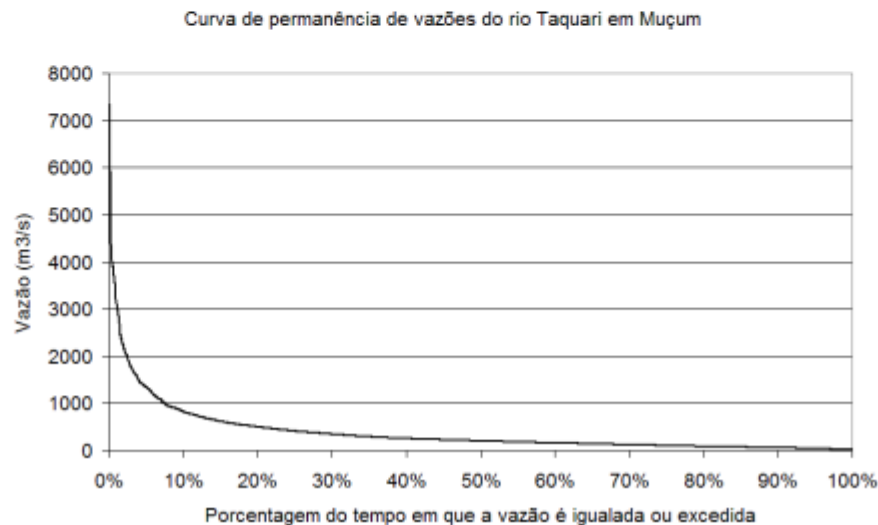


Curva de permanência

- Histograma de freqüências acumuladas relativas às vazões de um rio em determinado local – hidrograma organizado do maior para o menor
- Análise dos dados de vazão, tipo:
 1. *O rio tem uma vazão aproximadamente constante ou extremamente variável entre os extremos máximo e mínimo?*
 2. *Qual é a porcentagem de tempo em que o rio apresenta vazões em uma determinada faixa?*
 3. *Qual é a porcentagem de tempo em que um rio tem vazão suficiente para atender a uma determinada demanda?*

Curva de permanência

- **Curva de permanência** – expressa a relação entre a vazão e a frequência com que esta vazão é superada ou igualada
- Ela pode ser elaborada a partir de dados diários ou de dados mensais de vazão
- Relativamente fácil de obter, desde que existam dados de vazão



Curva de permanência

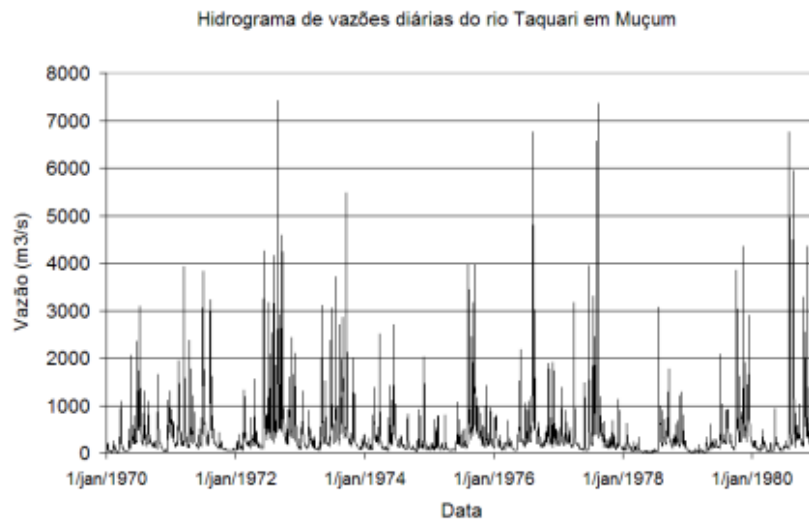
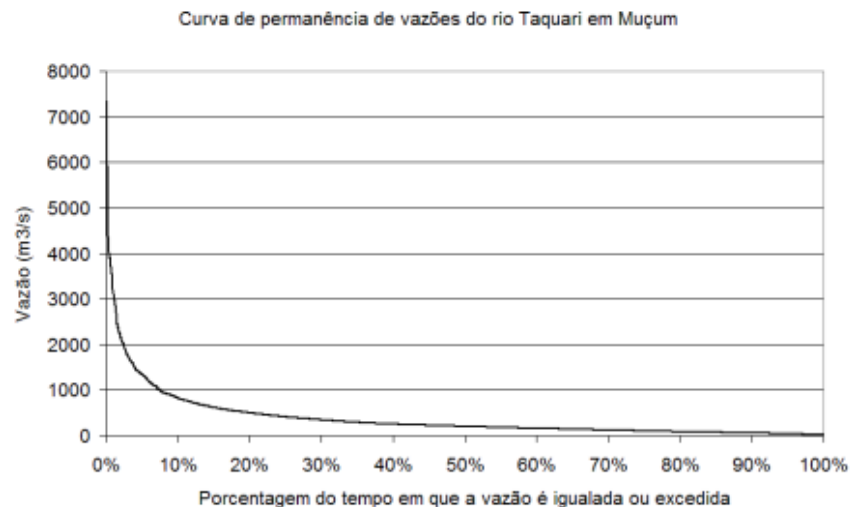
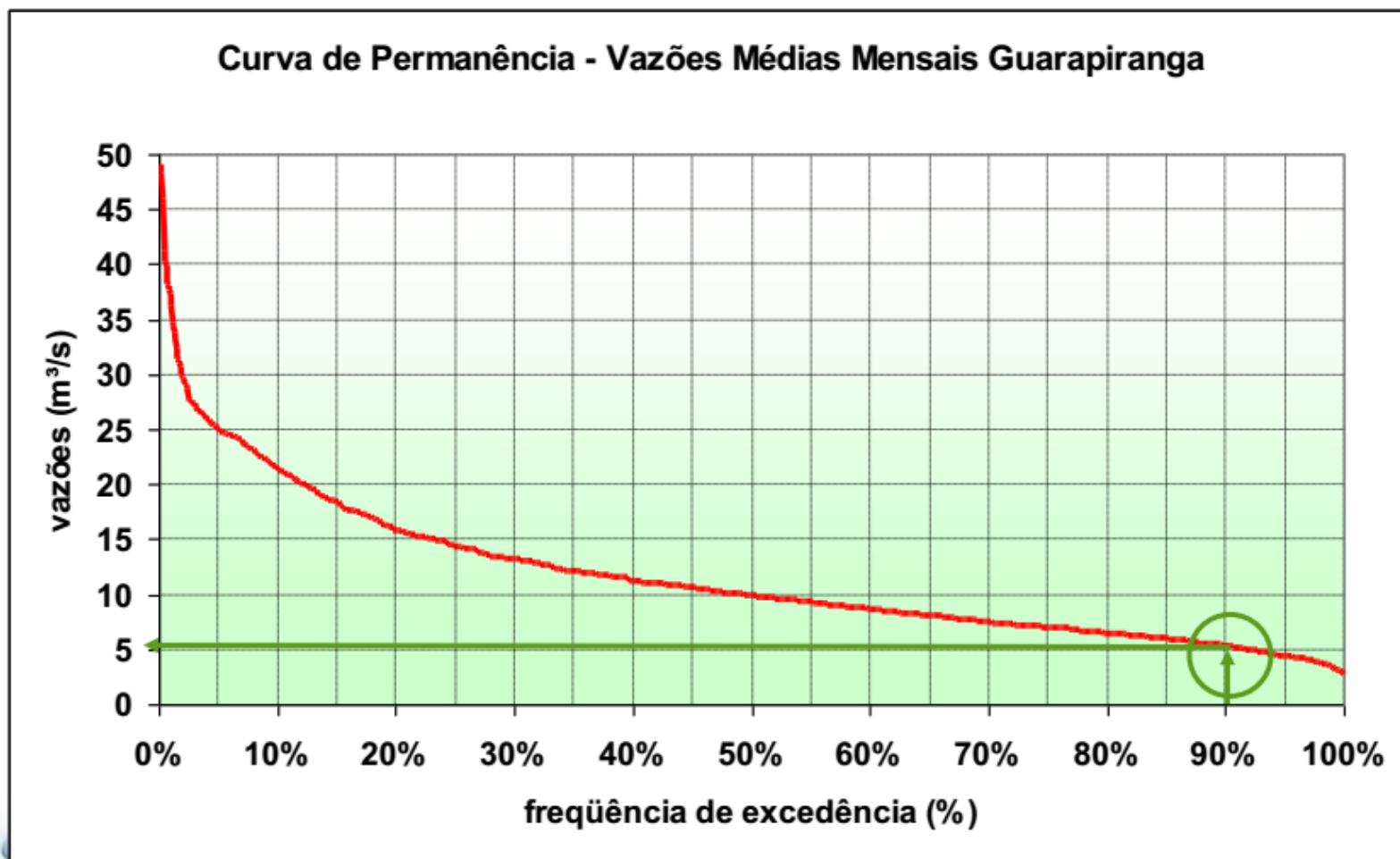


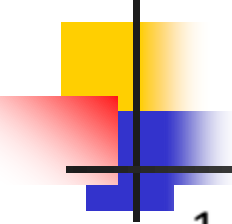
Figura 14. 2: Hidrograma de vazões diárias do rio Taquari em Muçum (RS) e a curva de permanência correspondente



Curva de permanência

Exemplo: a vazão de 5,4 m³/s é igualada ou superada em 90% dos meses



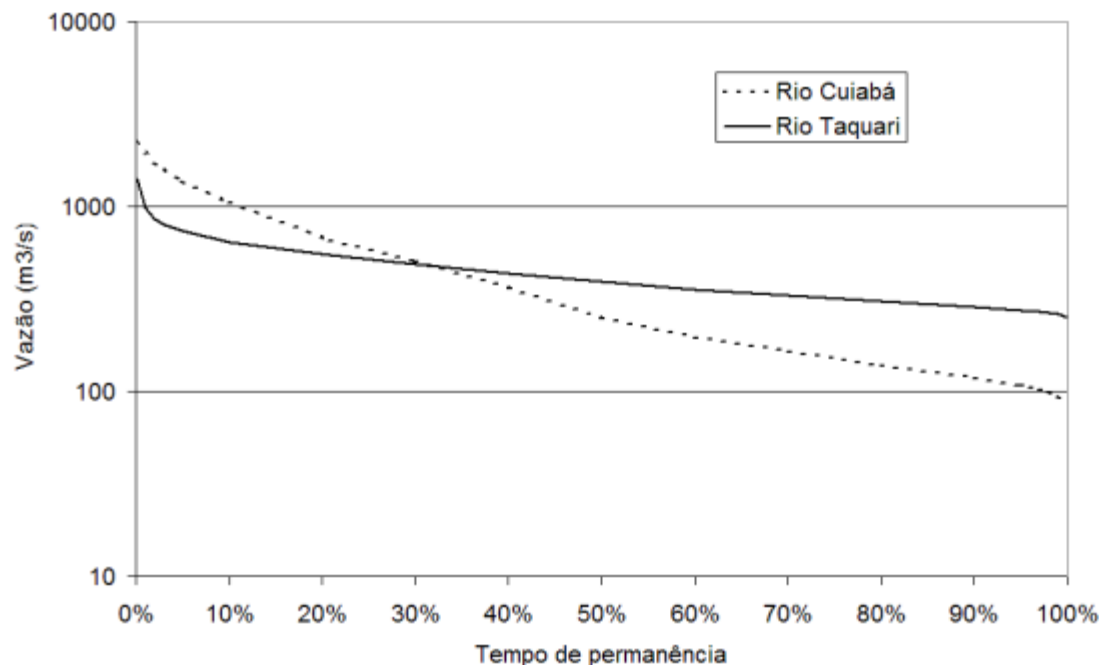


Curva de permanência

1. Útil para avaliar o comportamento de rios e para avaliar o efeito de modificações como desmatamento, reflorestamento, construção de reservatórios e extração de água para uso consuntivo
2. Exemplo: rios Cuiabá (MT) e Coxim (MS) – 1980 a 1984
3. Relevo e precipitação média anual semelhantes

	R. Cuiabá (MT)	R. Taquari (MS)
Área de drenagem	22.000 km ²	27.000 km ²
Vazão	438 m ³ /s	436 m ³ /s

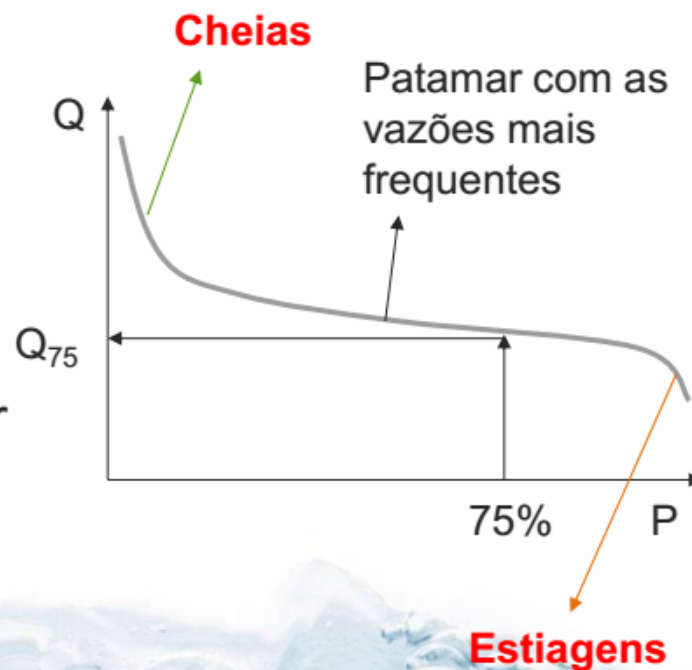
Curva de permanência



- Rio Cuiabá apresenta maior variabilidade de vazões, que se alternam rapidamente entre situações de alta e baixa vazão,
- Rio Taquari permanece mais tempo com vazões próximas à média (bacia do Taquari favorece a infiltração da água no solo)

Análise da curva de permanência

- A vazão de 75% da curva de permanência significa que 75% do tempo as vazões são maiores ou iguais a Q_{75} .
- O período das grandes estiagens geralmente ocorre para probabilidade superior a 95%.
- Esta curva é utilizada para avaliar a distribuição do comportamento da vazão ao longo do tempo e não para valores extremos.



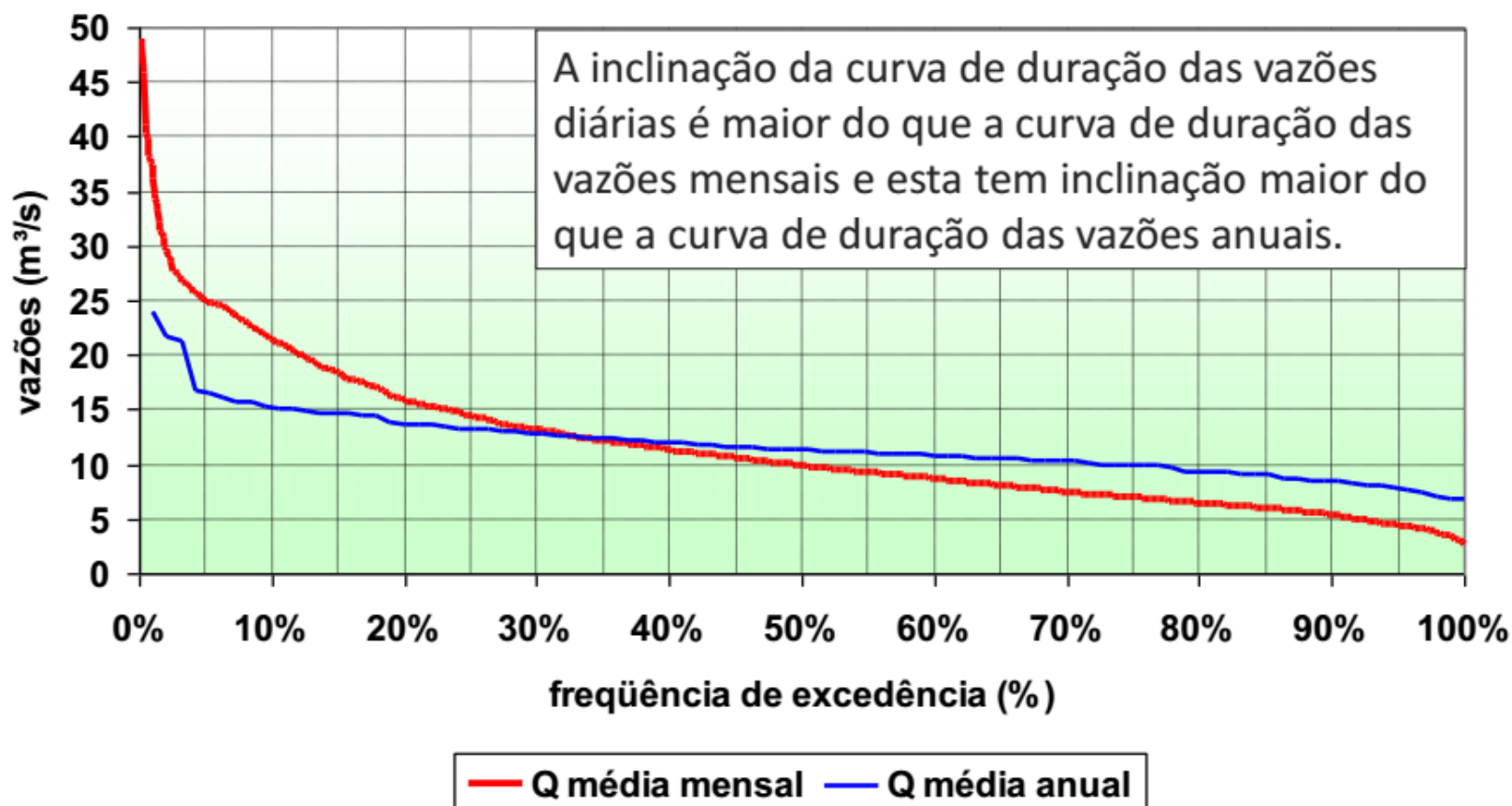


Valores característicos

- Q_{95} : vazão de 95%, utilizada como estimador da energia firme.
- Q_{50} : mediana, significa que 50% dos valores estão acima (ou abaixo) deste valor, mas geralmente é menor que a vazão média.
- A curva de permanência é utilizada para avaliação econômica de PCH, a navegação de um rio, as condições de variabilidade ambiental de um rio, entre outras aplicações.

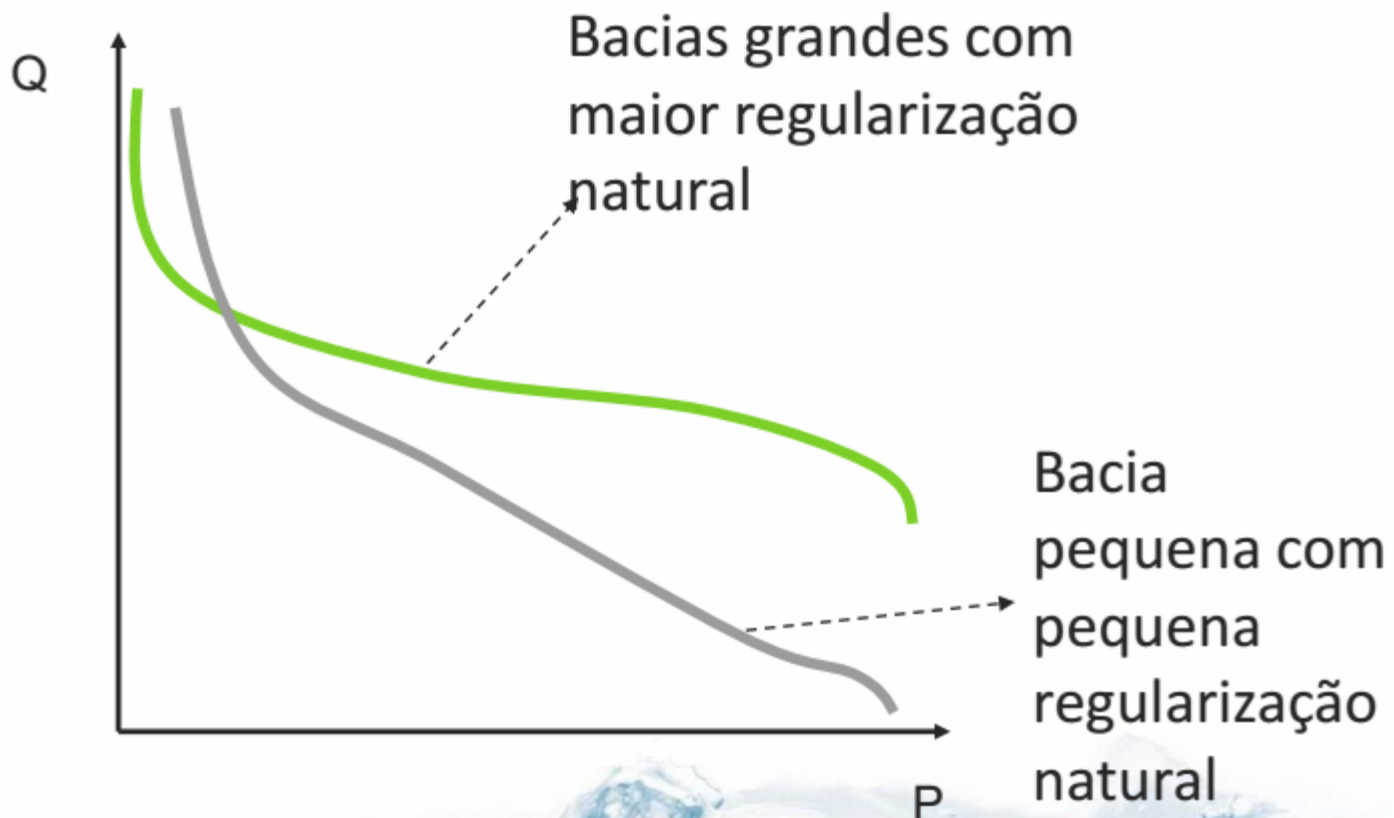
Análise da curva de permanência

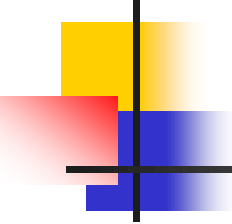
Curva de Permanência - Vazões Guarapiranga



Análise da curva de permanência

Variação da Forma com as características da bacia





Bibliografia

- CHAVEZ, J.D.R. **Escoamento superficial**. Apostila da Disciplina LOB1216 – Hidrologia e Hidráulica Aplicadas. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Lorena, 2016.
- PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blucher, 1976.