

---

# Processos Hidrológicos

CST 318 - SERE 456  
Tema 6 - Hidrometria e Vazão  
ANO 2017

Laura De Simone Borma  
Camilo Daleles Rennó  
<http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/>

# Resumo da aula

---

- São apresentados diversos métodos para a medição de vazão em cursos d'água naturais: volumétrico, colorimétrico, calhas e vertedores, ultrassom e por medida da velocidade
- Formas de medida com molinetes: a vau, sobre pontes, com barco fixo ou em movimento e em teleféricos
- Fontes de incertezas
- Cuidados para melhor precisão nos resultados
- Conceito de curva-chave
- Validade e aplicação prática

# Hidrometria

---

## □ Hidrometria

- Ramo da Hidrologia - base experimental
- Responsável pela coleta e fornecimento dos dados - monitoramento hidrológico
- Hidrometrista - deve entender e optar pelos métodos apropriados para medida do fenômeno em questão - variações no espaço e no tempo
- Consideração de que a vazão é reflexo de um processo produzido em uma área maior e não somente naquele ponto de medida no rio - conceito de área de contribuição
- Foco no estudo da **precipitação** e da **vazão**, áreas em que a Hidrometria mais se desenvolveu
  - padronização e consolidação dos métodos de medição;
  - Construção de séries históricas
- Variáveis hidrológicas convencionalmente medidas para série histórica:
  - Precipitação
  - Níveis d'água,
  - Vazão

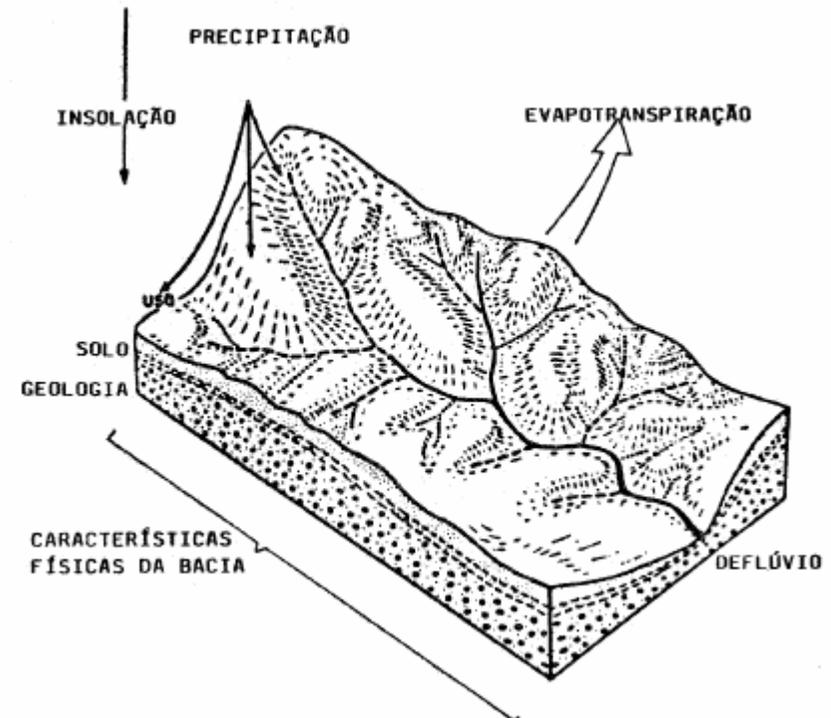
# Alguns conceitos

## □ Deflúvio

- altura total de água que passa, em determinado período, pela seção transversal de um curso d' água - Ex.: deflúvio anual, mensal, semanal, diário, etc.
- Reflete a quantidade de água produzida por uma bacia
- Expresso em:
  - mm de altura de água
  - $1 \text{ mm} = 1 \text{ litro/m}^2$

## □ Cota

- Altura de lâmina d' água tendo como referência um plano pré-estabelecido



# Alguns conceitos

## ❑ Descarga ou vazão

- ❑ Volume na unidade de tempo -  $m^3/s$ , litro/s

## ❑ Vazão

- ❑ Diária, mensal, anual

## ❑ Vazão específica ou vazão unitária

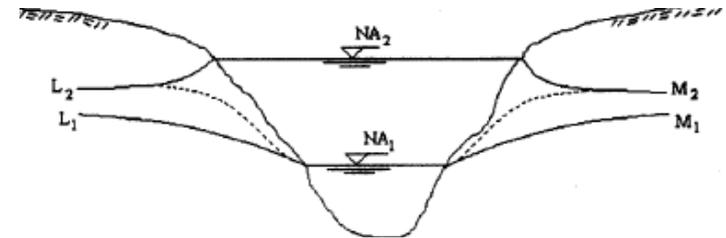
- ❑ vazão por unidade de área da bacia
- ❑  $q = Q/A$
- ❑ Expressa em:  $m^3/(s.km^2)$ ,  $l/(s.km^2)$
- ❑ Permite a comparação entre bacias, pois independe da área da bacia

## ❑ Produção hídrica ou rendimento hídrico

- ❑ o somatório da descarga total de uma bacia durante um determinado período

$$Q = P - ET$$

$$Q = Q_s + Q_b$$



# Vazão ou descarga

$$Q = \frac{V}{t} = v \cdot A$$

Onde:

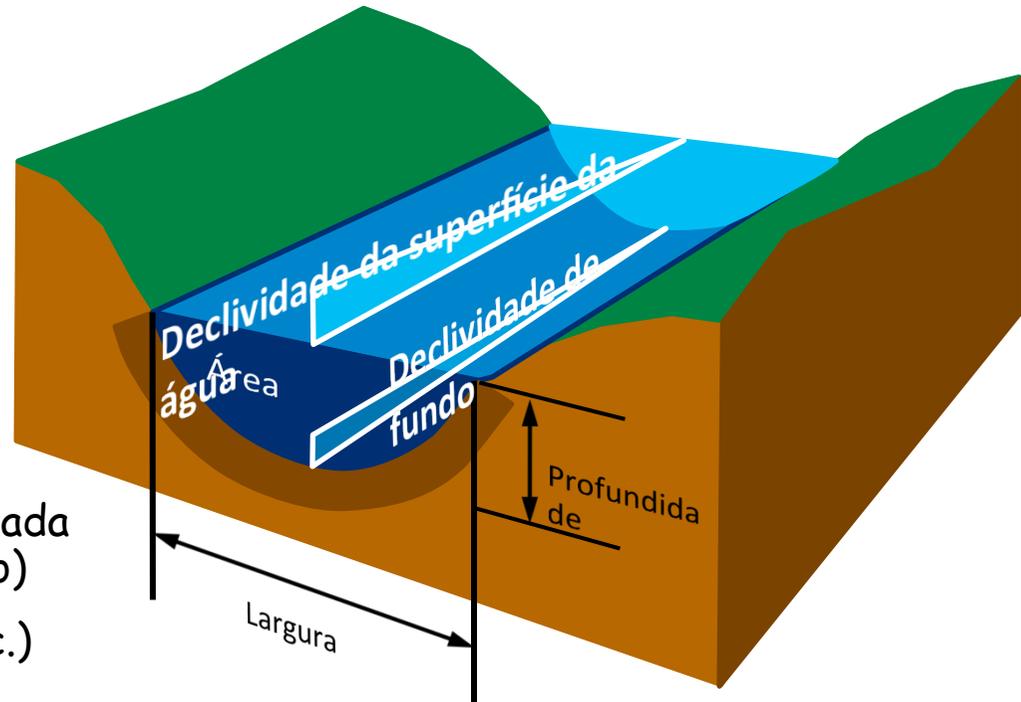
V - volume de água que atravessa uma dada seção transversal do rio (p.e. m<sup>3</sup> ou litro)

t - unidade de tempo (s, h, dia, mês, etc.)

v - velocidade do rio (p.e. m/s)

A - área da seção transversal (p.e. m<sup>2</sup>)

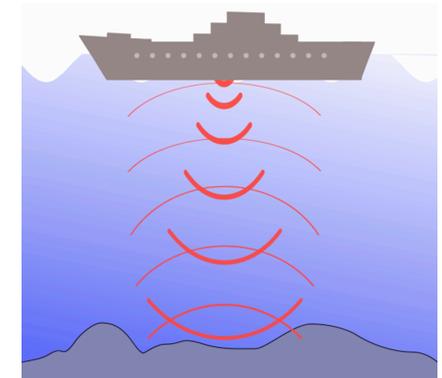
Q - vazão ou descarga (p.e. m<sup>3</sup>/s, L/s)



**Método de medida velocidade x área**  
Vantagem?

# Métodos velocidade - área

- ❑ Medidas feitas periodicamente em **postos fluviométricos** (determinadas seções dos cursos d' água) - **área A é determinada "uma única vez"**
- ❑ A medida da vazão se restringe, portanto, à medida da velocidade da correnteza naquele ponto
- ❑ **Medida da área da seção transversal**
  - ❑ **Batimetria (topografia do mundo submerso)**
    - ❑ Manual (rios rasos)
    - ❑ Ecobatímetros - baseia-se na medição do tempo decorrido entre a emissão do pulso sonoro e a recepção do mesmo sinal após ser refletido
- ❑ **Medida da velocidade**
  - ❑ Flutuadores
  - ❑ Molinetes hidrométricos
  - ❑ ADCP
  - ❑ Por processos químicos - traçadores
  - ❑ Construção de estruturas para medição: calhas e vertedores
- ❑ Curva chave



# Métodos velocidade - área

---

## ❑ Flutuadores

- Idéia central - jogar um objeto leve e bem visível, na corrente
- Medir distância percorrida e tempo
- Medir área da seção transversal
- Simples e rápido, porém fornece resultados incertos

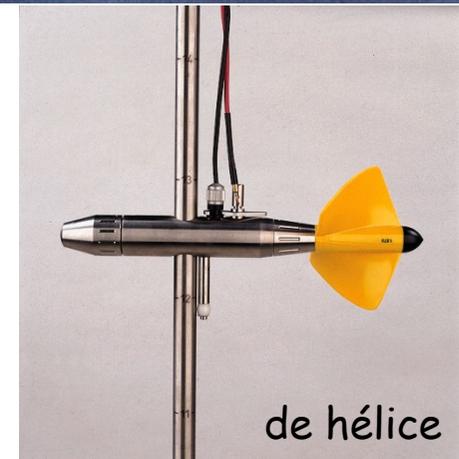


# Molinetes (ou correntômetros)

- Pequena hélice que, acoplada a um eixo que gira no sentido contrário ao do fluxo, manda sinais elétricos a um contador de rotações (conta giros)
- Conta giros: envia o sinal a cada número  $n$  de voltas (5, 10, etc.) por unidade de tempo
- A velocidade do fluxo é dada por:

$$V = an + b$$

- Onde
  - $n$  é o número de voltas
  - $a$  e  $b$  são características do aparelho



# Uso do molinete

---

- Medição a vau
- Sobre ponte
- Com teleférico
- Com barco fixo
- Com barco móvel



lastro

# Medição a vau

- ❑ Cursos d' água de pouca profundidade ( $< 1,20\text{m}$ )
- ❑ O correntômetro é fixado a uma barra
- ❑ Mantém-se uma distância mínima do leito ( $> 20\text{ cm}$ )



# Sobre ponte

- ❑ Facilita, em alguns casos, a medição da velocidade
- ❑ Pilares apoiados no leito alteram a velocidade
- ❑ Determinação da geometria da seção é complicada
- ❑ Escolher uma seção menos influenciada



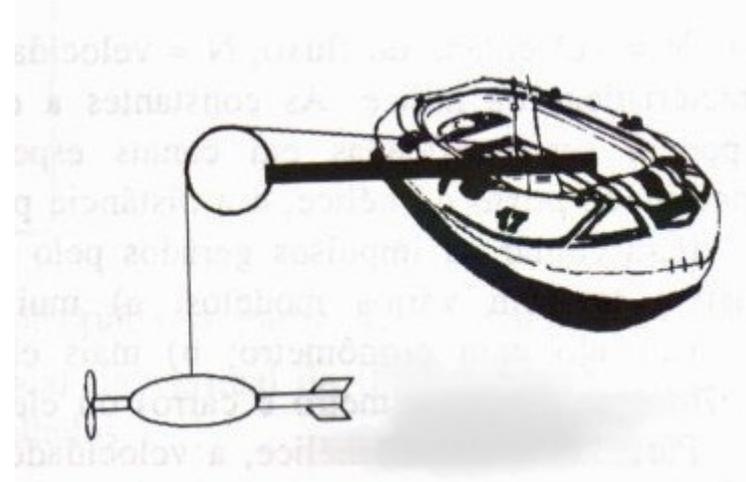
# Com teleférico

- ❑ Usado em rios não muito largos
- ❑ Necessidade de fixação dos cabos nas margens



# Com barco

- ❑ Barco fixo nas margens
- ❑ Barco móvel - o barco se movimenta com velocidade constante de uma margem a outra



# Métodos velocidade - área

---

## Problemas:

- A velocidade do rio é a mesma ao longo de toda a seção transversal?
- Em que ponto da seção transversal deveremos medir?
- Como determinar a área da seção transversal

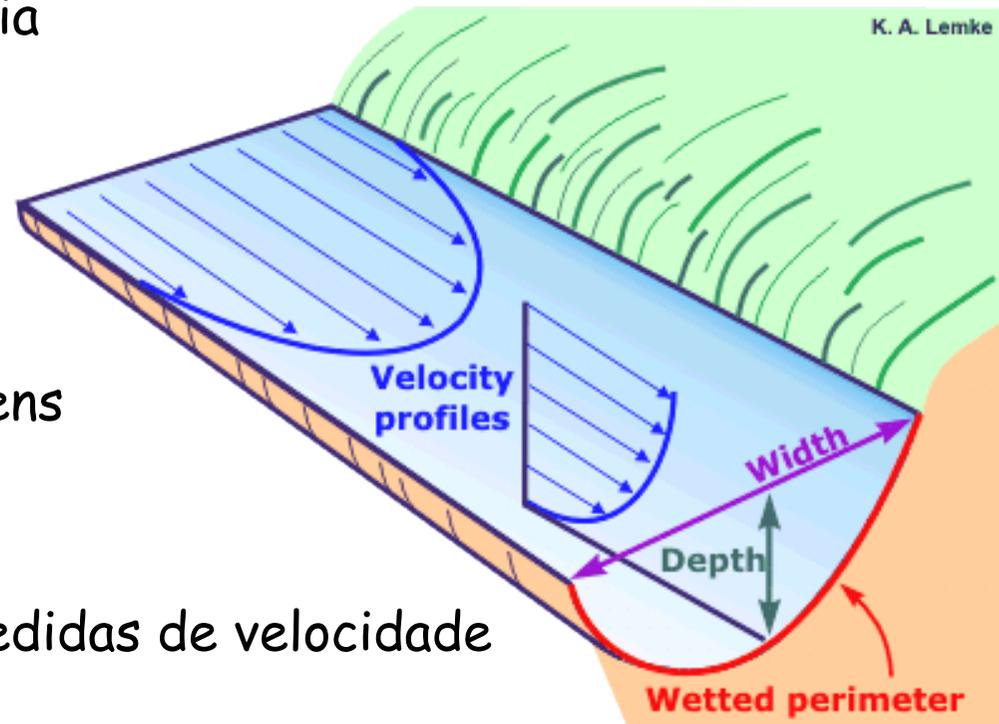
# Velocidade do escoamento

É o resultado de

- **Força da gravidade** - decorrente da diferença de cota entre dois pontos dentro do rio
- **Força de resistência** - atrito nas paredes do canal (rugosidade) e turbulência

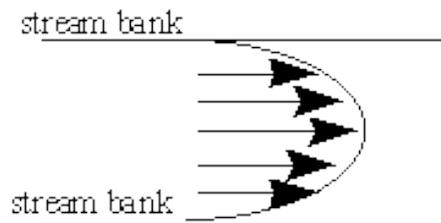
A velocidade varia:

- Com a distância ao leito
  - Com a distância às margens
  - No tempo e espaço
- Deve ser considerado nas medidas de velocidade

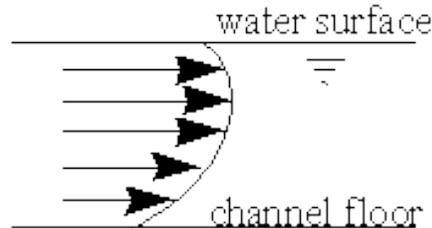


# Método velocidade - área

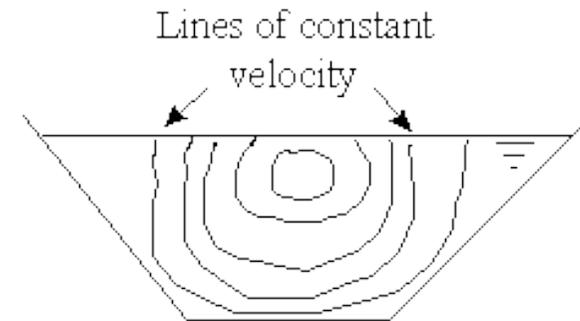
Aonde medir a velocidade, se ela varia na horizontal e na vertical?



Velocity Profile  
Plan View



Velocity Profile  
Profile View



Velocity Profile  
Cross-Sectional View

- Idealmente deve-se medir em um número suficiente de pontos verticais e horizontais de maneira a permitir uma boa representação da distribuição de velocidades da seção
- necessário medir em várias verticais e em vários pontos ao longo de cada vertical - mas o que significa várias?

# Método velocidade - área

Baseado em experiências, são sugeridas profundidades e número ideal de verticais.

Tabela 6.3: Número e posição de pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio (Santos et al. 2001).

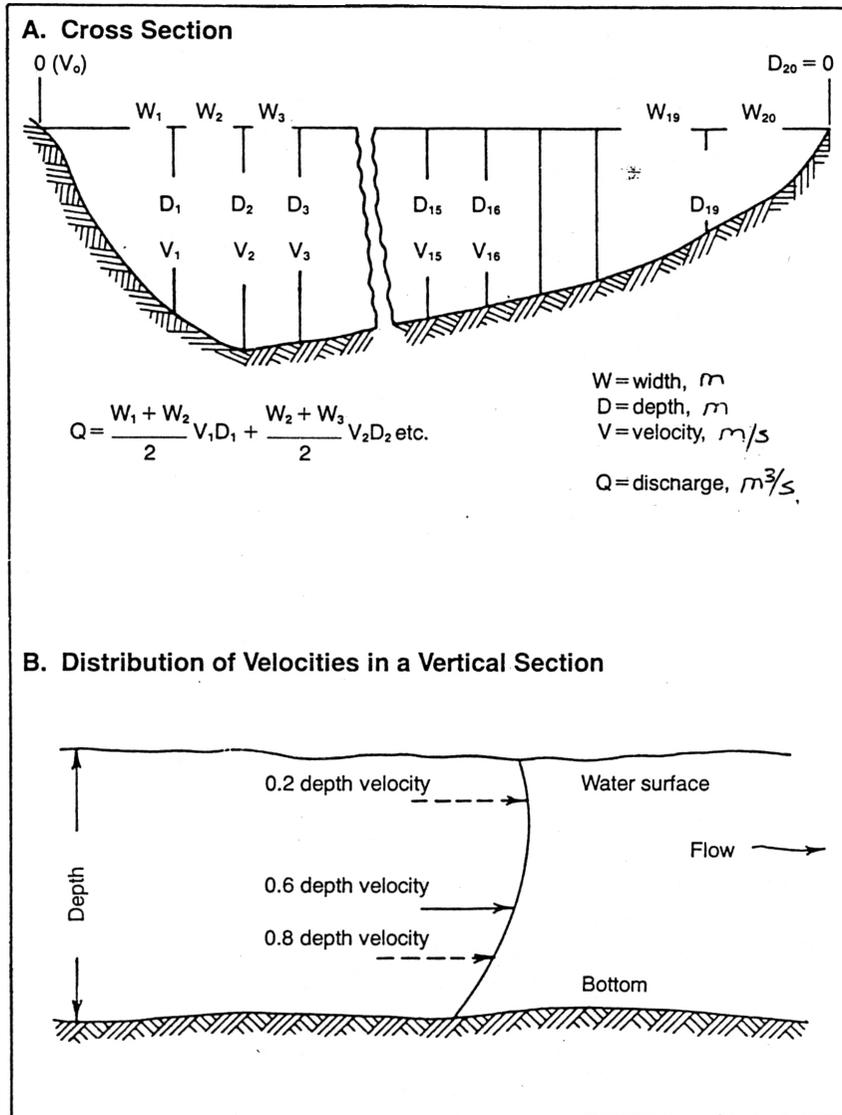
Profundidade (m)	Número de pontos	Posição dos pontos
0,15 a 0,60	1	0,6 p
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 p
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8 p
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p
> 4,00	6	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 p e F

Tabela 6. 4: Distância recomendada entre verticais, de acordo com a largura do rio (Santos et al., 2001).

Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)
< 3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1,0
15 a 30	2,0
30 a 50	3,0
50 a 80	4,0
80 a 150	6,0
150 a 250	8,0
> 250	12,0

**Entretanto, isto torna o processo extremamente vagaroso**

# Velocidade média na vertical - USGS

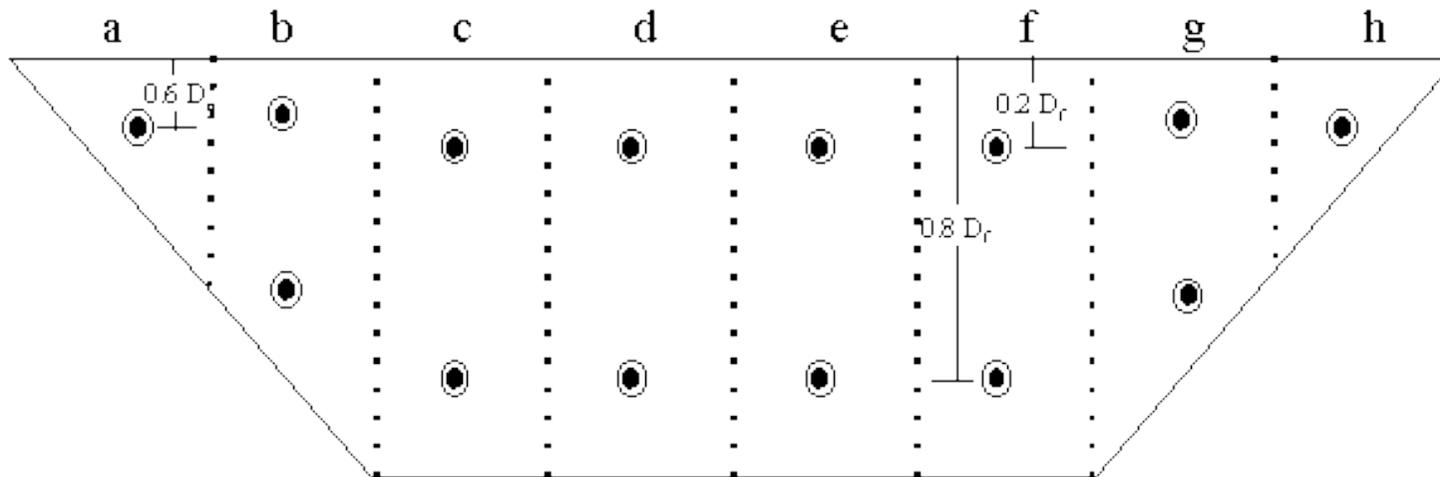


• Se a profundidade da vertical for **menor** do que 0,75 m → a velocidade média ocorre a 6/10 (0,6D) da profundidade total.

• Se a profundidade da vertical for **maior** do que 0,75 m → a velocidade deve ser medida a 2/10 (0,2D) e 8/10 (0,8D), e a média dos dois pontos é considerada a velocidade média da vertical.

# Método velocidade - área

Portanto, em uma seção, a distribuição de medições do molinete ficaria:

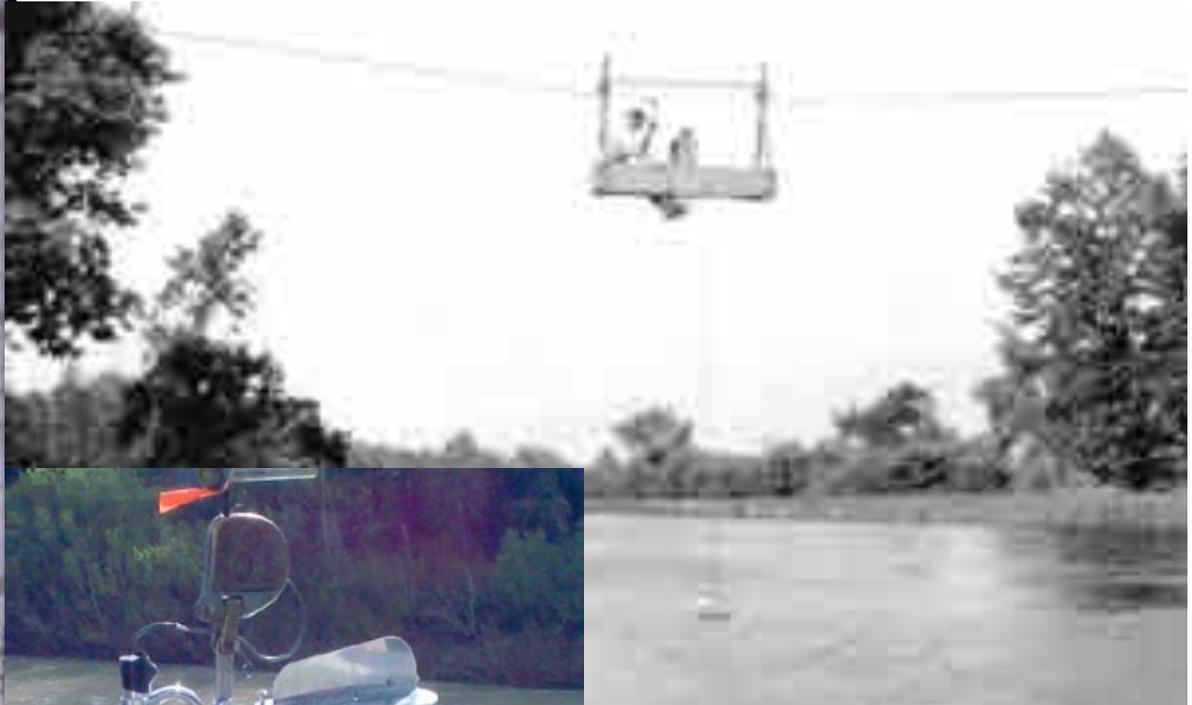


● point of velocity measurement

$D_a$  = depth of subdivision a

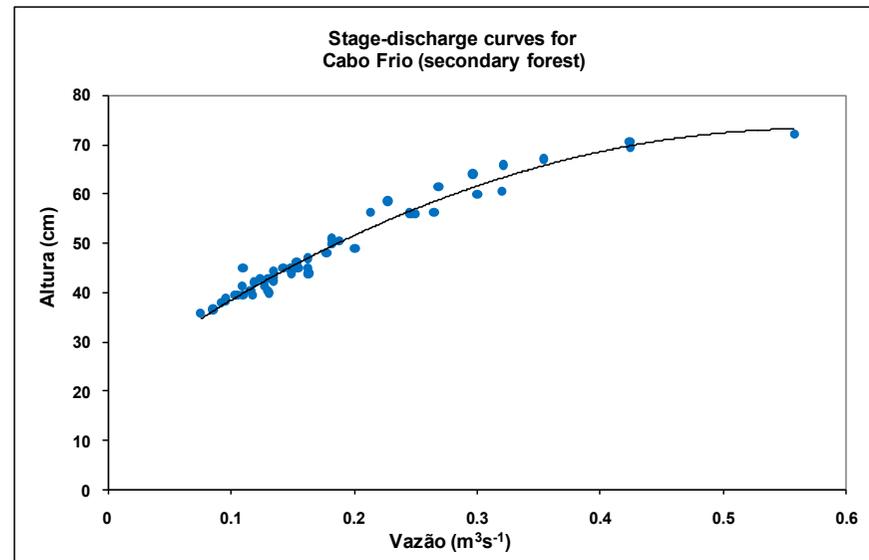
$D_f$  = depth of subdivision f

# Medir vazão em alguns rios não é simples



# 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 para cada seção do rio
- ❑ **A curva chave se justifica porque é muito mais fácil medir o nível do rio do que sua vazão**



# Medição do nível do rio (cota)

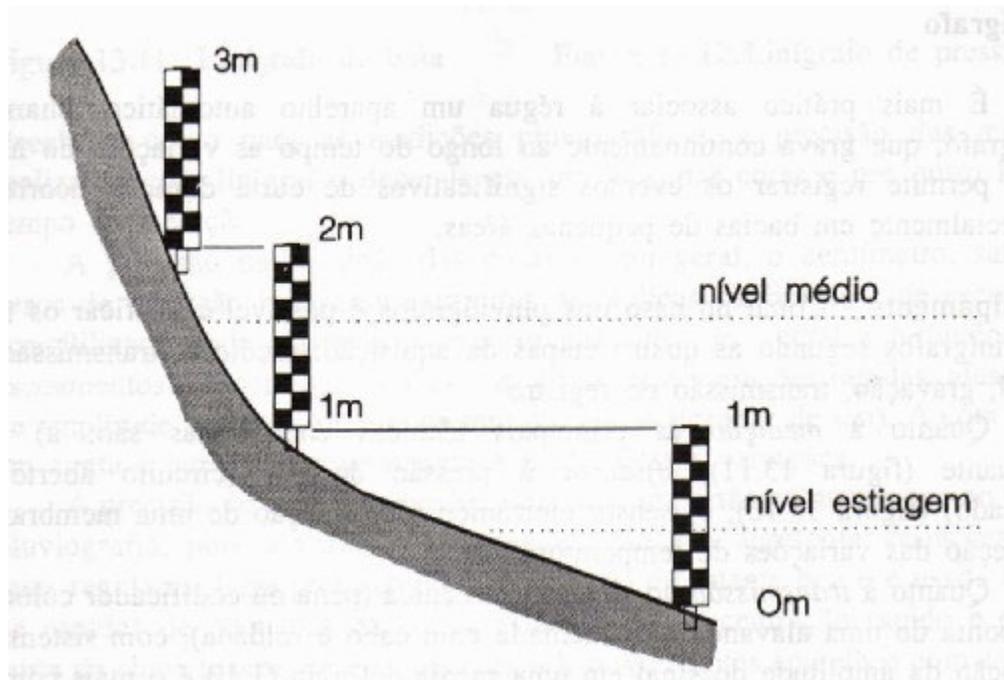
A medida da cota pode ser feita usando:

- Escalas graduadas, instaladas em estruturas como pontes, beiras de rio, etc.
- Sensores, instalados em estações hidrológicas automáticas.



# Escalas graduadas

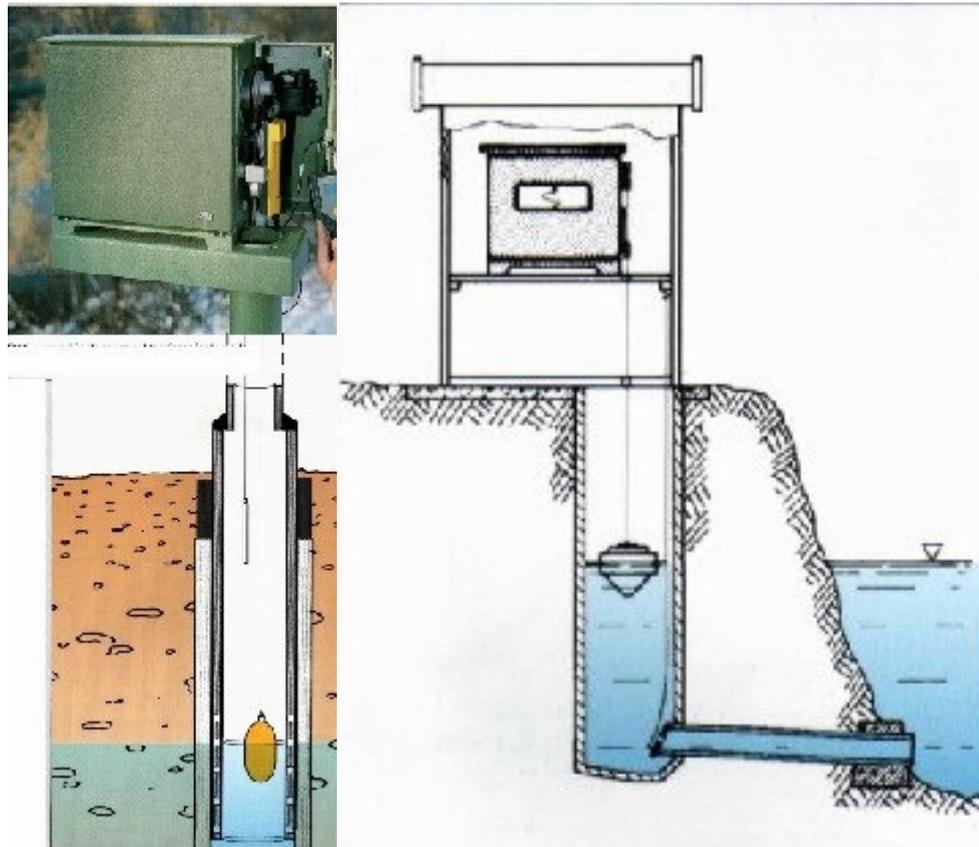
- ❑ Escalas graduadas, réguas ou limnímetros
- ❑ Elementos verticais de 1m graduados em cm
- ❑ Aço inoxidável ou madeira
- ❑ O observador faz leitura das cotas diariamente



Ref.: Porto et al. (2003)

# Limnógrafo

- ❑ grava as variações de nível continuamente no tempo
- ❑ Permite registrar eventos significativos, de curta duração, ocorrendo essencialmente em pequenas bacias

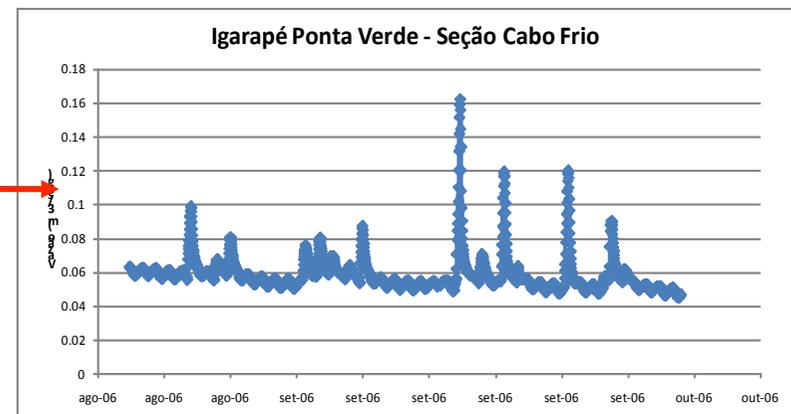
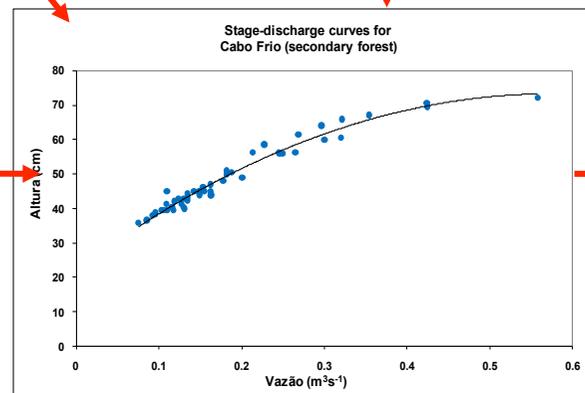
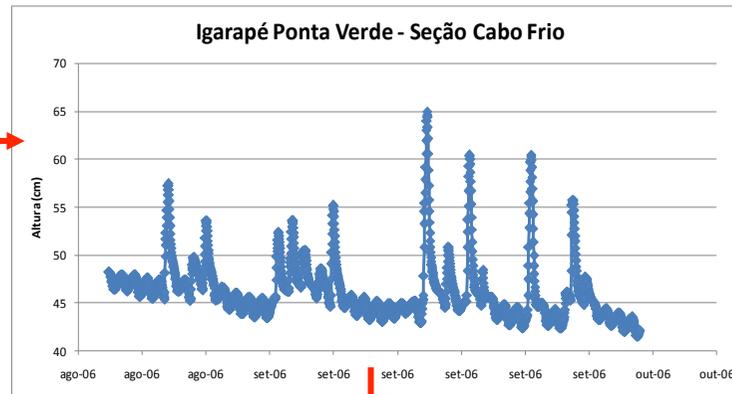


Limnógrafo de bóia

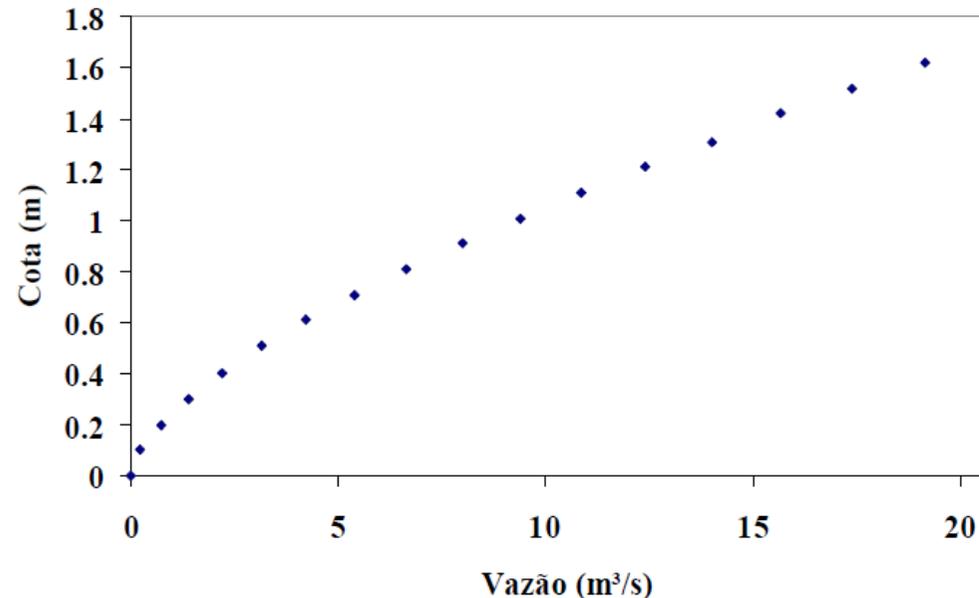
Ref.: Porto et al. (2003)

# Curva-chave

Se conhecermos a variação de nível do rio ao longo do tempo, a curva chave nos permite obter a série de vazões.

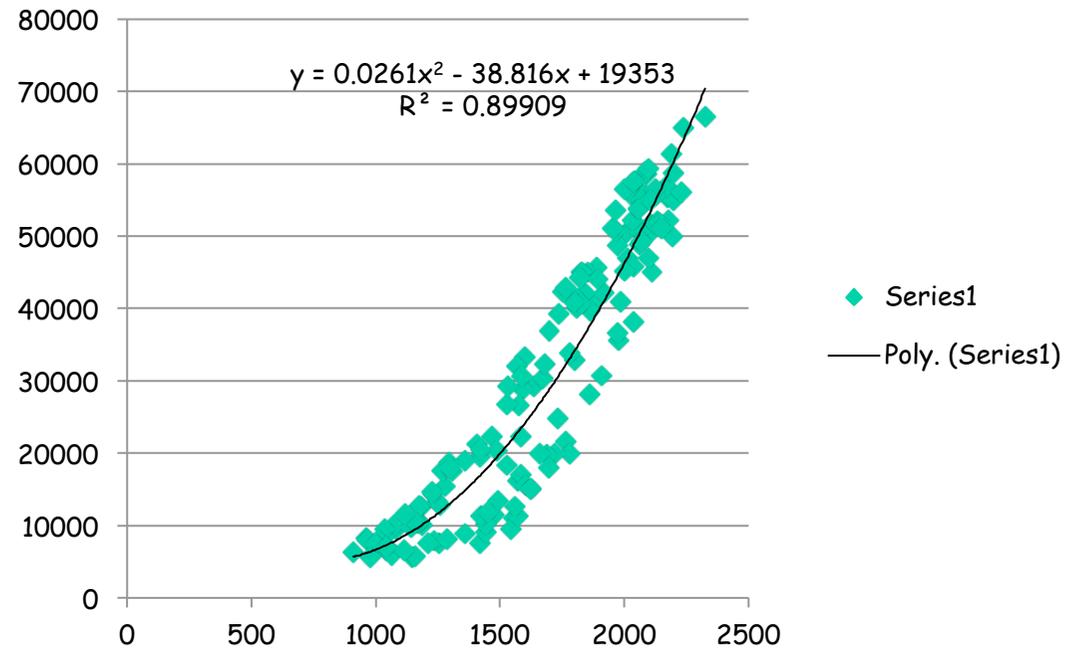


# Traçado da curva chave



- ❑ 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

# Traçado da 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

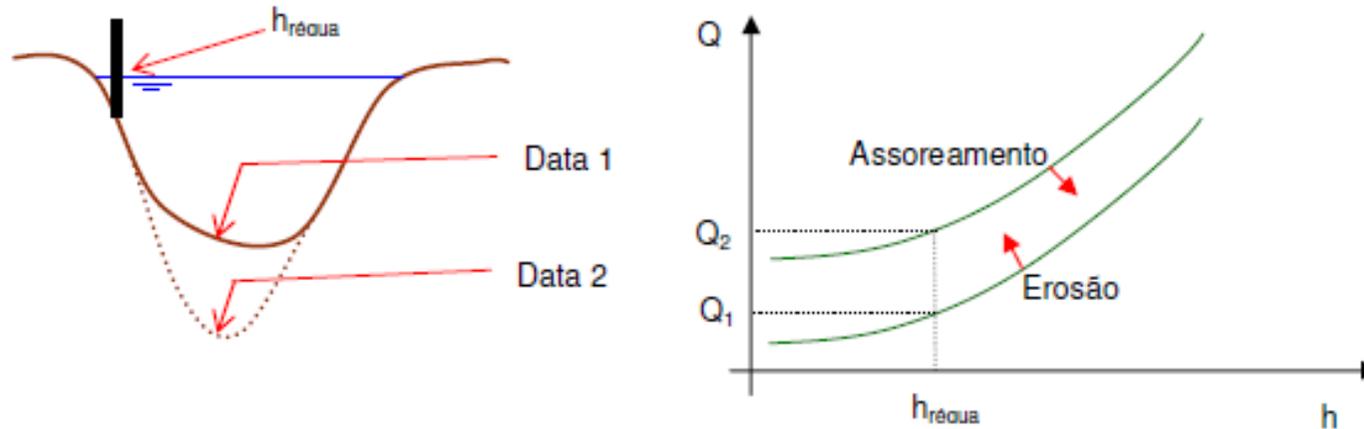


Figura 32 – Alteração da seção ao longo do tempo e conseqüente reflexo na curva cota-descarga.

# Extrapolação da curva-chave

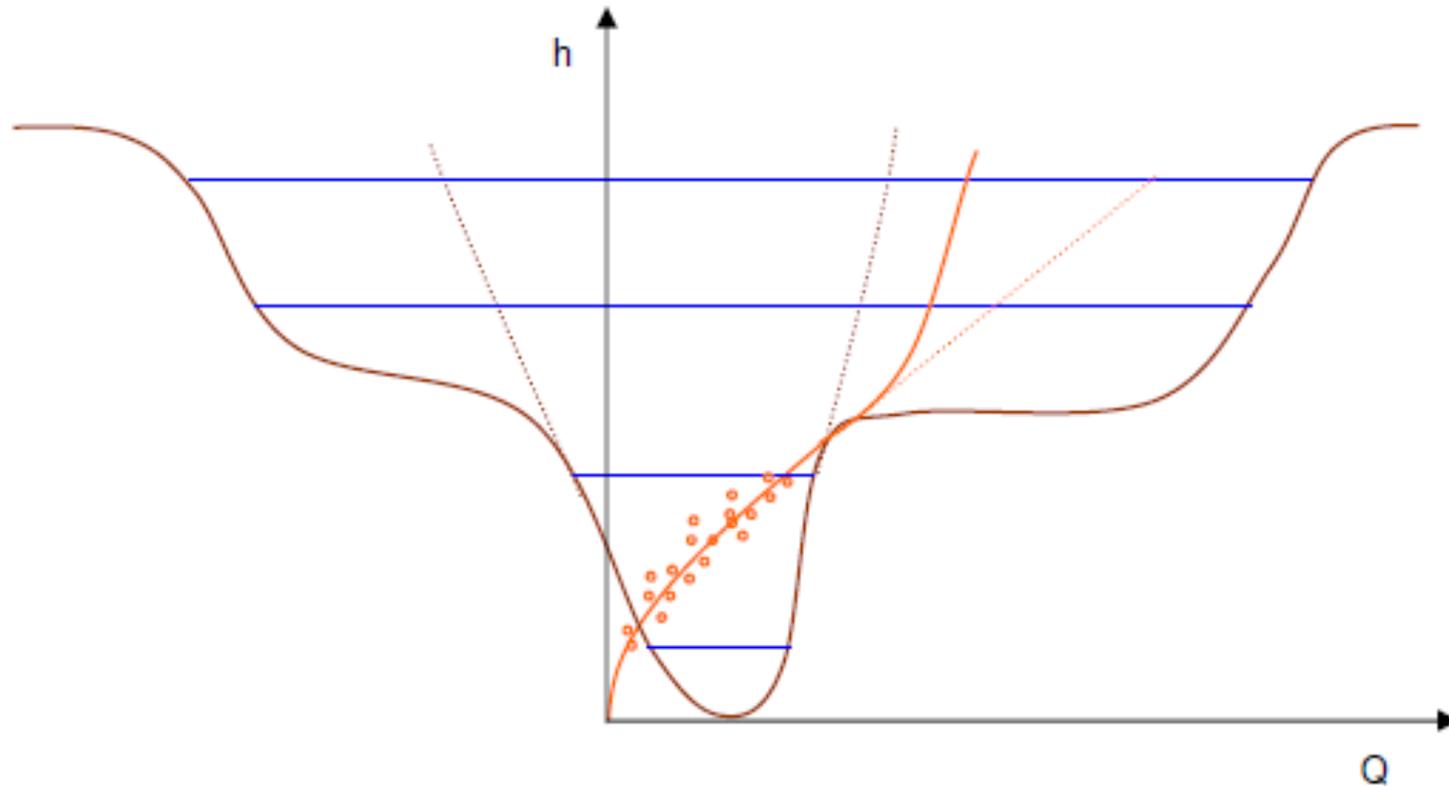


Figura 33 – Extrapolação equivocada da curva-chave (.....) e comportamento real (\_\_\_).

# Seção para controle

---

- ❑ **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

# Obras hidráulicas

## Calhas e vertedores

- ❑ Paredes, diques ou aberturas (estruturas hidráulicas), de geometria definida, através das quais a água do rio escoar
- ❑ Obrigam a água a passar por uma “situação” na qual as variáveis envolvidas na determinação da vazão (velocidade, altura de água, regime, etc.) fique mais confiável
- ❑ Fornecem diretamente a vazão, a partir da leitura da cota
- ❑ Possuem a sua própria curva chave



calhas



vertedores

# Calhas

- Possuem dimensões padronizadas  
A **vazão** é determinada diretamente pelo **nível d'água registrado**
- Princípio - a vazão que passa pela calha é a mesma que passa em outra seção do rio
- Pode-se determinar a *curva-chave* em outros pontos do rio medindo-se a vazão na calha e as cotas na seção transversal selecionada
- Estreitamento da seção: mudança do regime fluvial para o regime torrencial

$$Q = kH^n$$



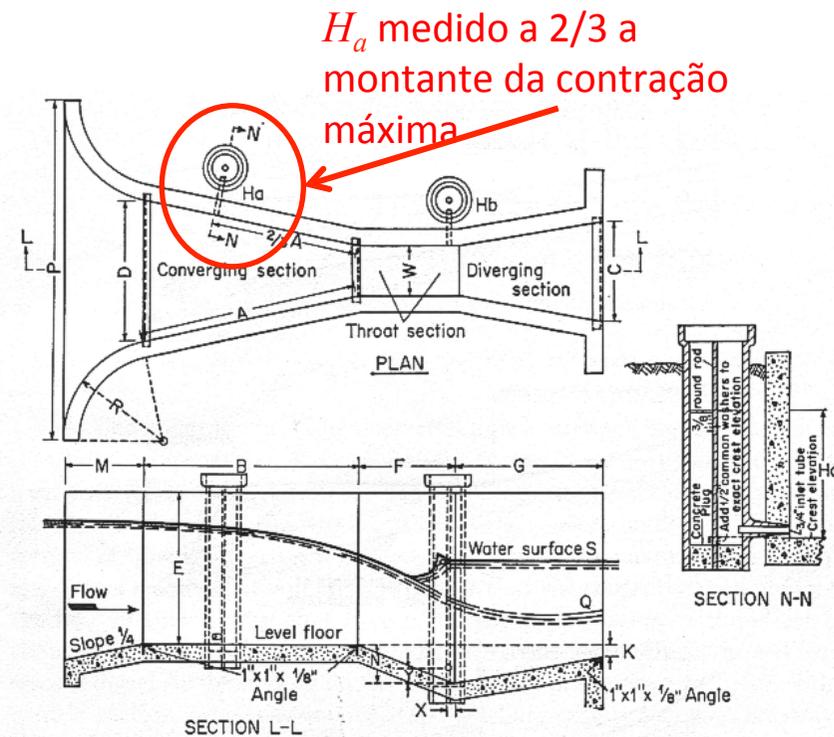
**Calha Parshall**

# Calhas

- Equação definida para estimativa de vazão, do tipo

$$Q = CWH_a^n$$

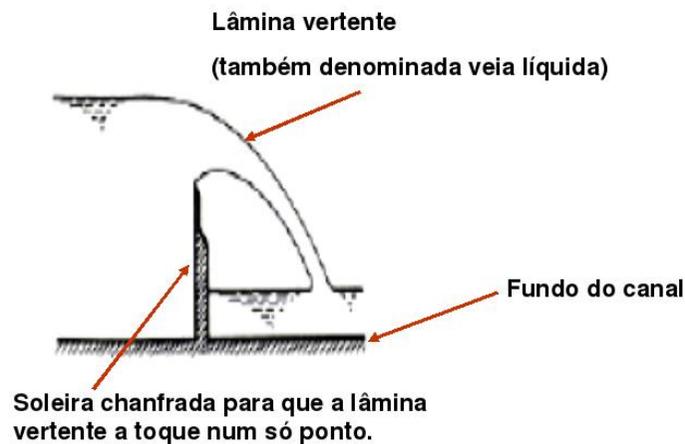
- $W$  a largura da calha e
- $H_a$  a carga hidráulica no meio da contração;
- $C$  e  $n$  coeficientes que dependem da dimensão da calha



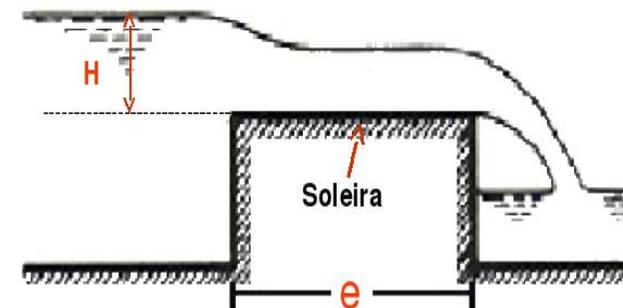
Não interferem no escoamento, mas são limitadas a pequenos canais

# Vertedores

- ❑ Usam o mesmo princípio de medição que as calhas - determinação da vazão a partir do nível da água (medido a uma certa distância do ponto de instalação da calha)
- ❑ Servem para pequenos cursos de água e apresentam grande precisão
- ❑ Custos elevados de construção
- ❑ Soleira espessa e soleira delgada
  - ❑ **Soleira delgada** - placa fina que intercepta transversalmente o curso d' água (triangular, retangular, trapezoidal, etc.)
  - ❑ **Soleira espessa** - elevação plana do fundo do canal ou leito do rio



Soleira delgada



$$e > 0,66H$$

Soleira espessa

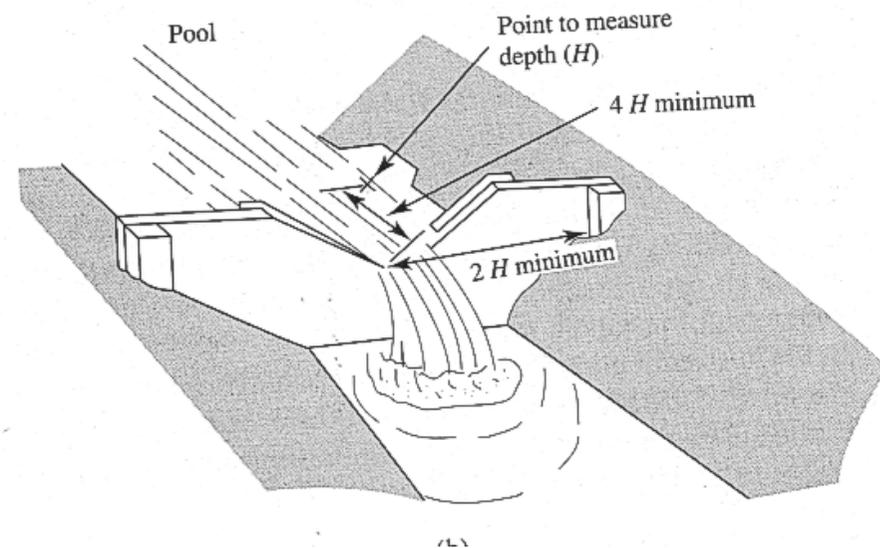
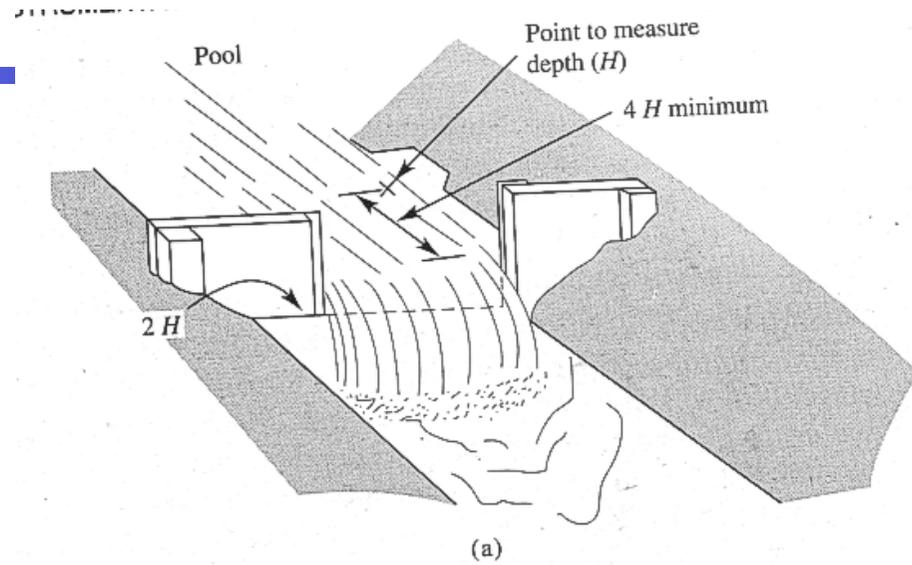
# Vertedores



Seção simples

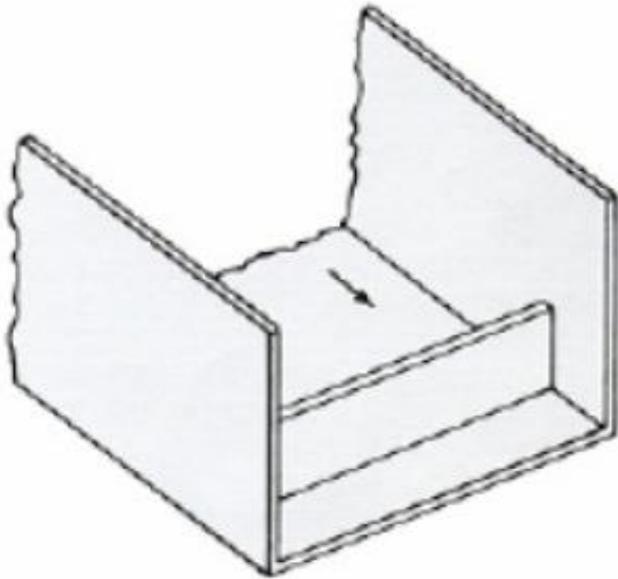


Seção composta

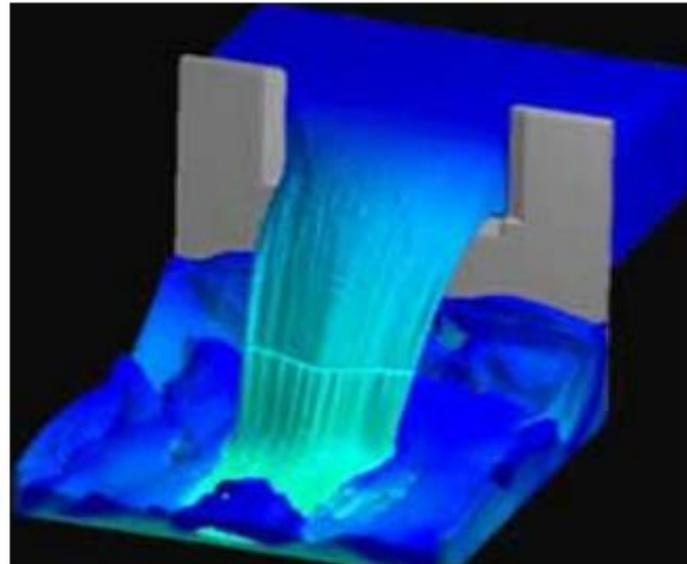


# Vertedores

---



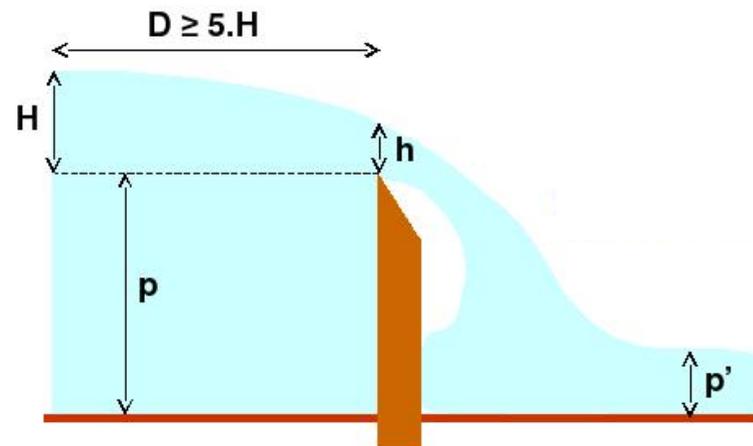
**Vertedor sem  
contrações laterais**



**Vertedor retangular com  
duas contrações laterais**

# Vertedores

- ❑ A descarga através dos vertedores depende fundamentalmente de  $H$ , medido em um ponto do rio sem influencia do vertedor
- ❑  $H$  - diferença entre a cota do rio e a crista do vertedor.



# Algumas equações de descarga

a) Vertedor retangular com contração:

$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,2H) \cdot H^{1,5}$$

b) Vertedor triangular de 90 graus:

$$Q = 1,420 \cdot H^{2,5}$$

c) Vertedor triangular de 120 graus:

$$Q = 2,302 \cdot H^{2,449}$$

d) Vertedor triangular de 135 graus:

$$Q = 3,187 \cdot H^{2,47}$$

e) Vertedor triangular de 90 graus truncado:

$$Q = 1,420 \cdot H^{2,5} \quad \text{quando } H \leq H_b; \text{ e}$$

$$Q = 1,32 \cdot [H^{2,47} - (H - H_b)^{2,47}] \quad \text{quando } H > H_b.$$

f) Vertedor triangular de 120 graus truncado:

$$Q = 2,302 \cdot H^{2,449} \quad \text{quando } H \leq H_b; \text{ e}$$

$$Q = 2,302 \cdot [H^{2,449} - (H - H_b)^{2,449}] \quad \text{quando } H > H_b.$$

g) Vertedor trapezoidal (tipo Cipoletti):

$$Q = 1,86 \cdot L \cdot H^{1,5}$$

h) Vertedor trapezoidal de 30 graus:

$$Q = 1,86 \cdot L \cdot H^{1,5} + 0,56 \cdot H^{2,47}$$

# Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)



Efeito Doppler: mudança na frequência de uma onda sonora causada pelo movimento relativo entre o aparelho transmissor de som (transdutor) e o objeto (material em suspensão na água)

*Partícula que se aproxima*: frequência maior que a emitida

Pe.: sirene de ambulância

*Partícula que se afasta*: frequência menor que a emitida

# ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

- ❑ Método direto
- ❑ Mede a velocidade de fluxo a partir da velocidade das partículas em suspensão
- ❑ Transmite ondas de som na água e recebe o reflexo (eco) proveniente do fundo e das partículas suspensas na água (ecobatímetro)
- ❑ Mede a velocidade da vertical de uma só vez (não é pontual como os molinetes)

Ex. Submarino robô Autosub6000

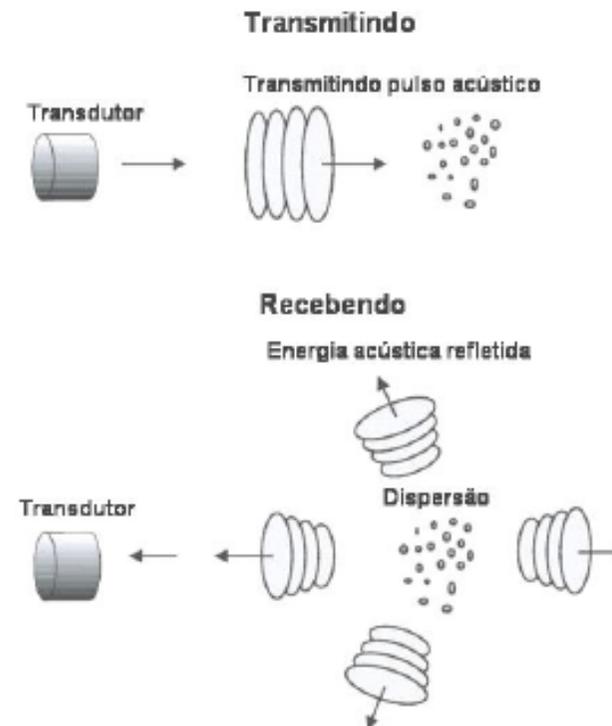
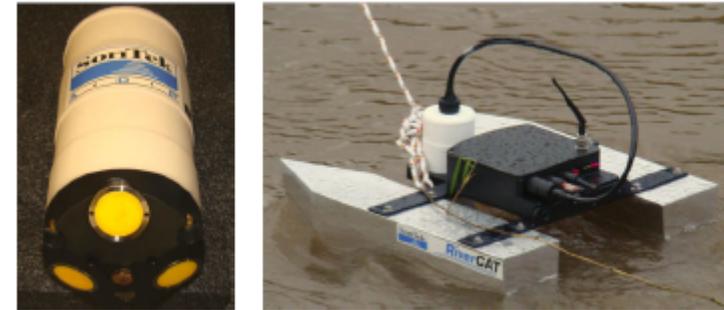


Figura 9.6. Transmissão e dispersão de um pulso acústico (Simpson, 2001).

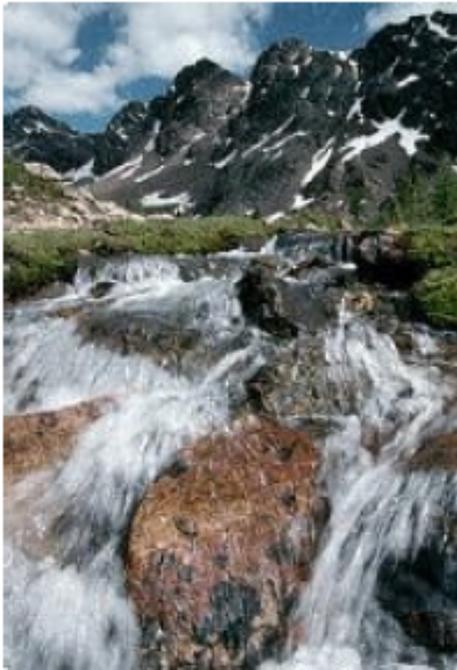
# Medindo vazões com ADCP

O ADCP permite fazer medições em locais remotos e de difícil acesso; pode ser instalado em barcos e voadeiras.



# Traçadores (corantes)

- ❑ Determinação da velocidade baseada no deslocamento do traçador
- ❑ É um método aproximado
- ❑ Utilizado em: escoamentos com velocidades altas, muita turbulência, leito irregular, zonas de risco de transporte de sólidos (trancos de árvores) ou cachoeiras



# Traçadores (corantes)

- ❑ Baseia-se na diluição de um produto químico (ex. corante) de concentração conhecida aplicado continuamente em uma determinada seção do rio
- ❑ Numa seção a jusante, mede-se a concentração desse produto
- ❑ O escoamento deve ser suficientemente turbulento para promover total diluição

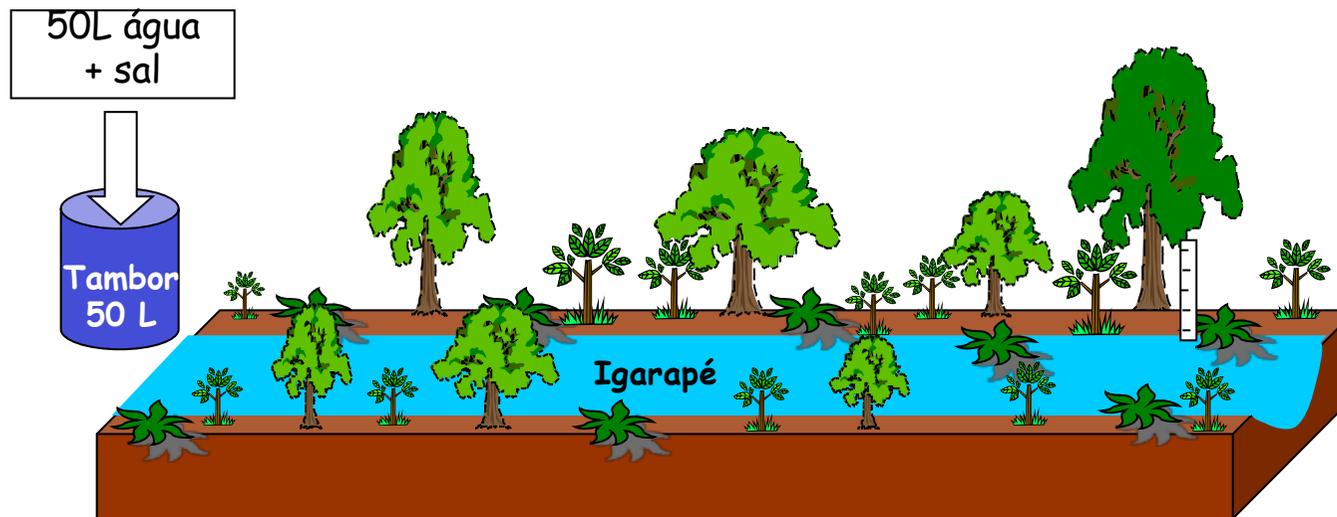


- ❑ O cálculo baseia-se no princípio de que a vazão de um fluido é dada pelo volume de fluido transportado na unidade de tempo:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} (m^3 / s); V = \text{volume}$$

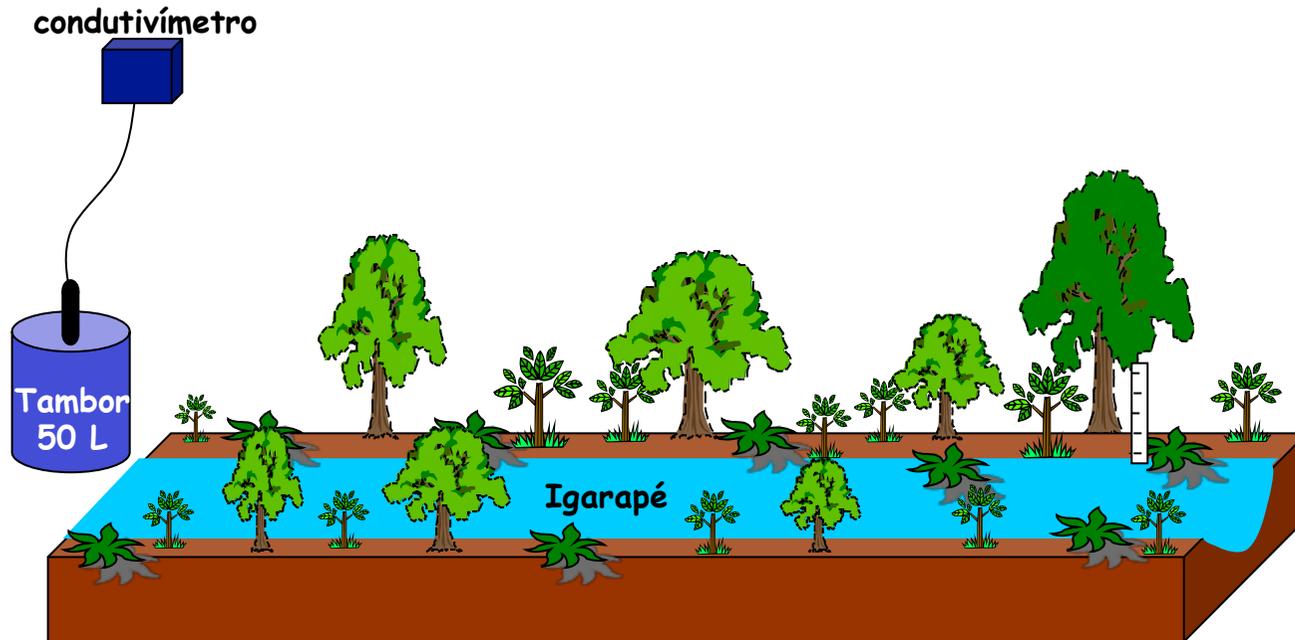
# Método da diluição de um volume conhecido usando sal

1. Adiciona-se um traçador a uma massa conhecida de água



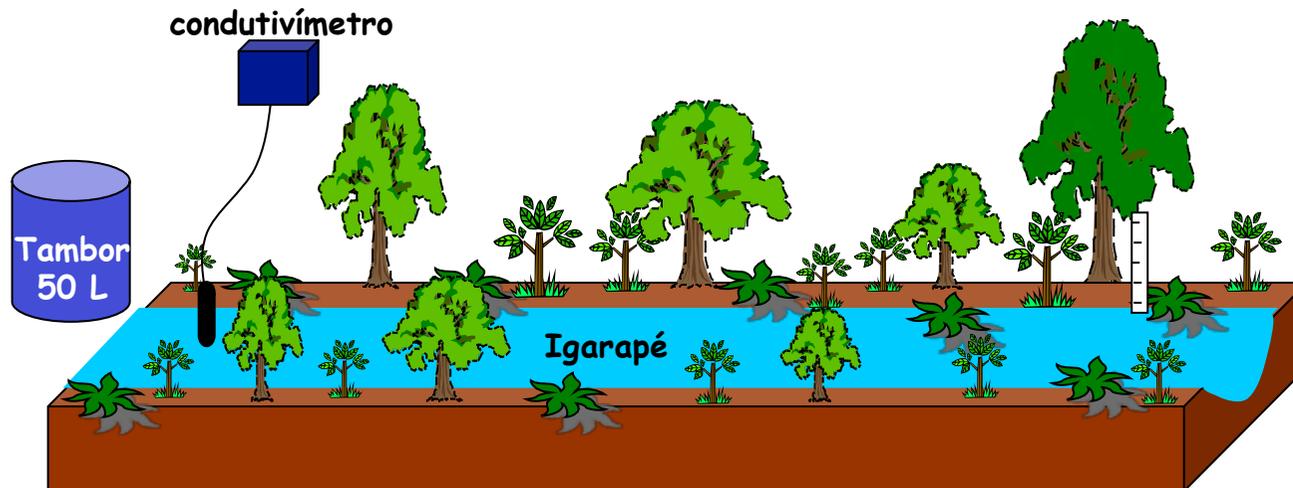
# Método da diluição de um volume conhecido usando sal

## 2. Mede-se a condutividade elétrica da mistura



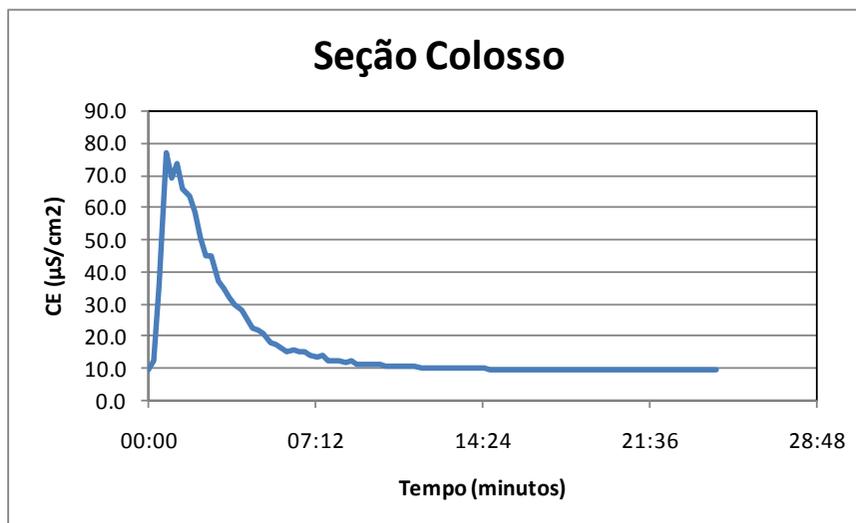
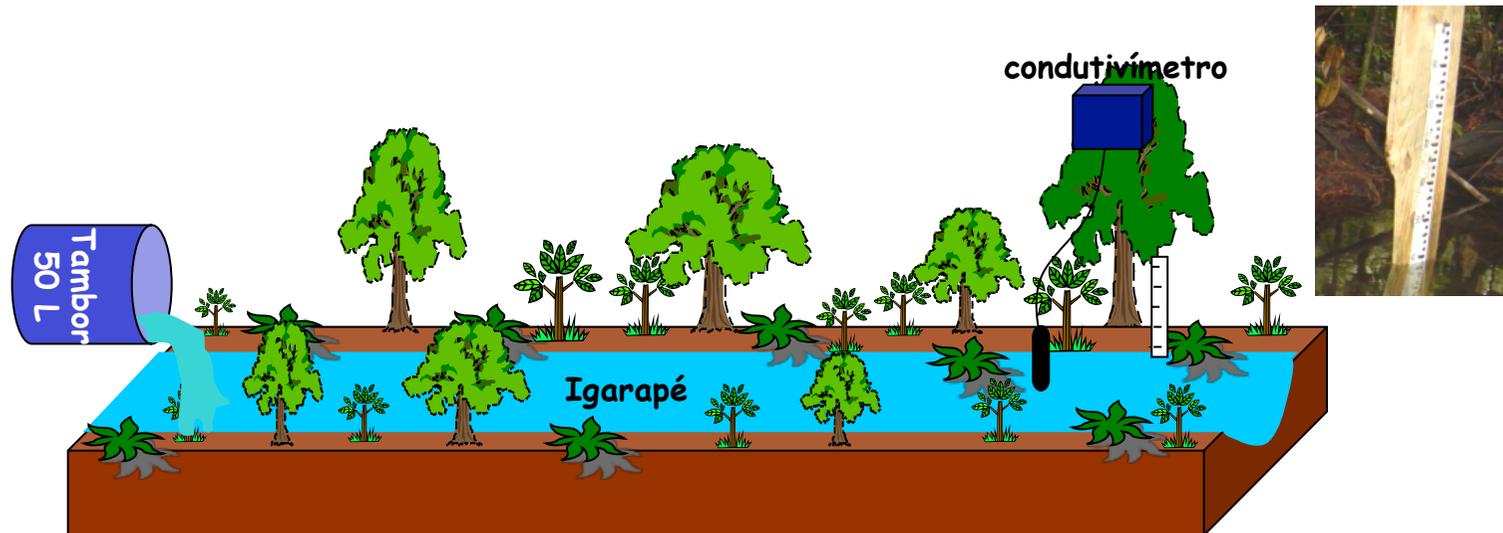
# Método da diluição de um volume conhecido usando sal

## 3. Mede-se a condutividade elétrica inicial da água



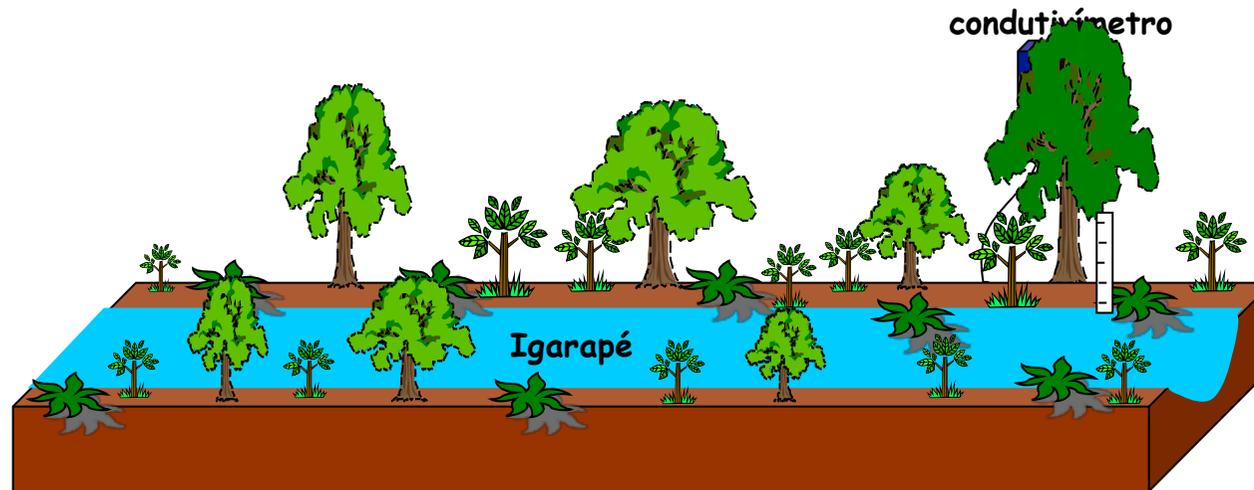
# Método da diluição de um volume conhecido usando sal

## 4. Registra-se a passagem do traçador na seção de controle



# Método da diluição de um volume conhecido usando sal

5. Calcula-se a vazão pelo princípio de conservação da massa



$$Q = \frac{(C_i - C_b)V_i}{\int_0^{\infty} (C(t) - C_b) dt}$$

$$Q = \frac{V}{\Delta t} (m^3 / s); V = \text{volume}$$

Onde:  $Q$  = Vazão ( $m^3/s$ );

$C_i$  = Concentração do sal na solução adicionada;

$C_b$  = Concentração na água do Igarapé antes de adicionar a solução;

$C(t)$  = Concentração no tempo ( $t$ ) após adicionada a solução;

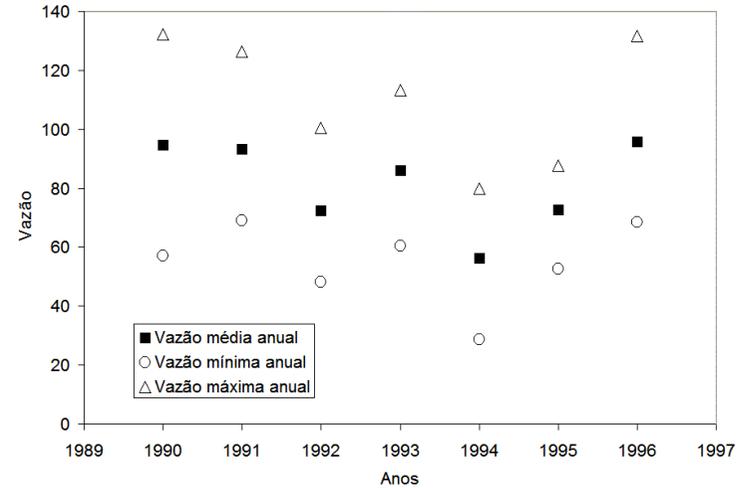
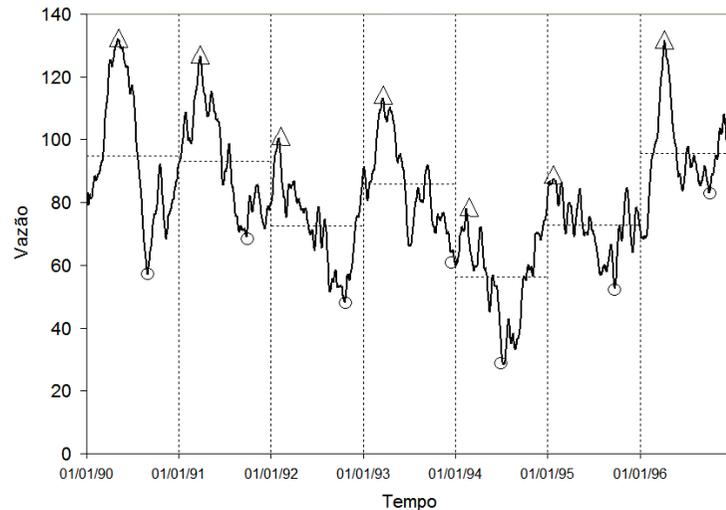
$V_i$  = Volume adicionado ( $m^3$ ).

# Séries históricas

---

- ❑ 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
- ❑ Redes de medidas: podem ser feitas pelo Estado, para estabelecer uma rede hidrométrica básica ou por empresas que tenham interesse particular em determinadas informações: p.e. geração de energia, saneamento, indústria
- ❑ Tratamento das séries históricas

# Séries temporais



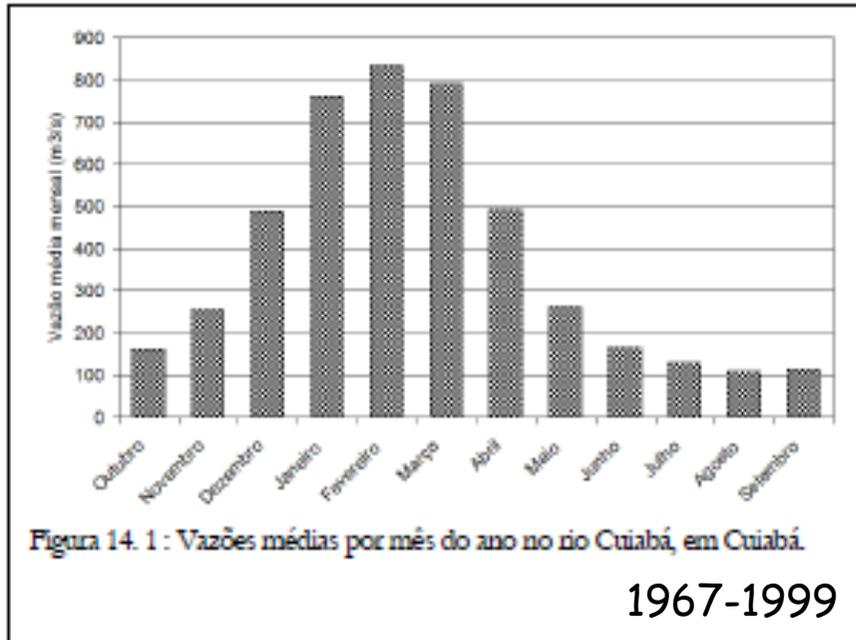
Fonte: W. Collischonn

**Vazões mínimas:** navegação, capacidade de recebimento de efluentes urbanos e industriais e estimativas de necessidade de irrigação;

**Vazões médias:** aplicáveis a dimensionamentos de sistemas de abastecimento de água e usinas hidrelétricas

**Vazões máximas:** base para dimensionamento de sistemas de drenagem, previsão de enchentes, etc.

# Vazão média



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

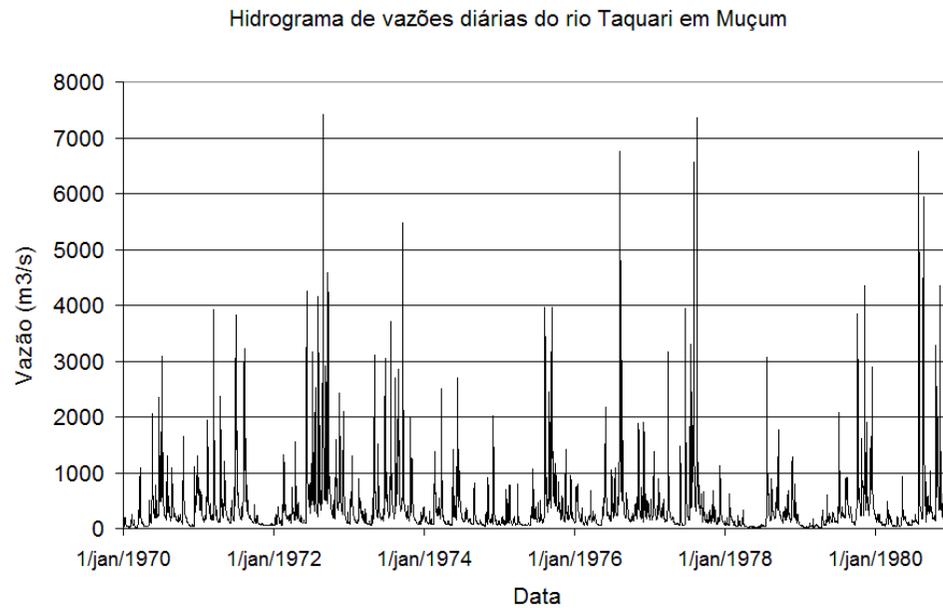
- ❑ Média de toda a série de vazões ou precipitações registradas
- ❑ Importante na avaliação da **avaliação da sazonalidade** de uma bacia

# Curva de permanência

---

- ❑ Histograma de frequências acumuladas relativas às vazões de um rio em determinado local - hidrograma organizado do maior para o menor
- ❑ Uma das análises estatísticas mais simples e mais importantes na hidrologia
- ❑ Análise dos dados de vazão, tipo:
  - ❑ O rio tem uma vazão aproximadamente constante ou extremamente variável entre os extremos máximo e mínimo?
  - ❑ Qual é a porcentagem de tempo em que o rio apresenta vazões em uma determinada faixa?
  - ❑ Qual é a porcentagem de tempo em que um rio tem vazão suficiente para atender a uma determinada demanda?
- ❑ **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



Curva de permanência de vazões do rio Taquari em Muçum

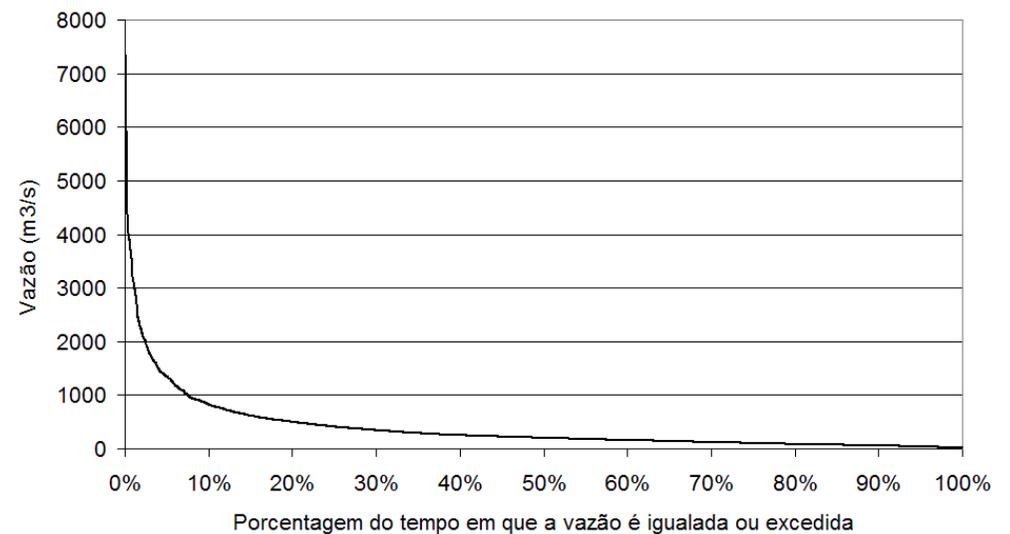
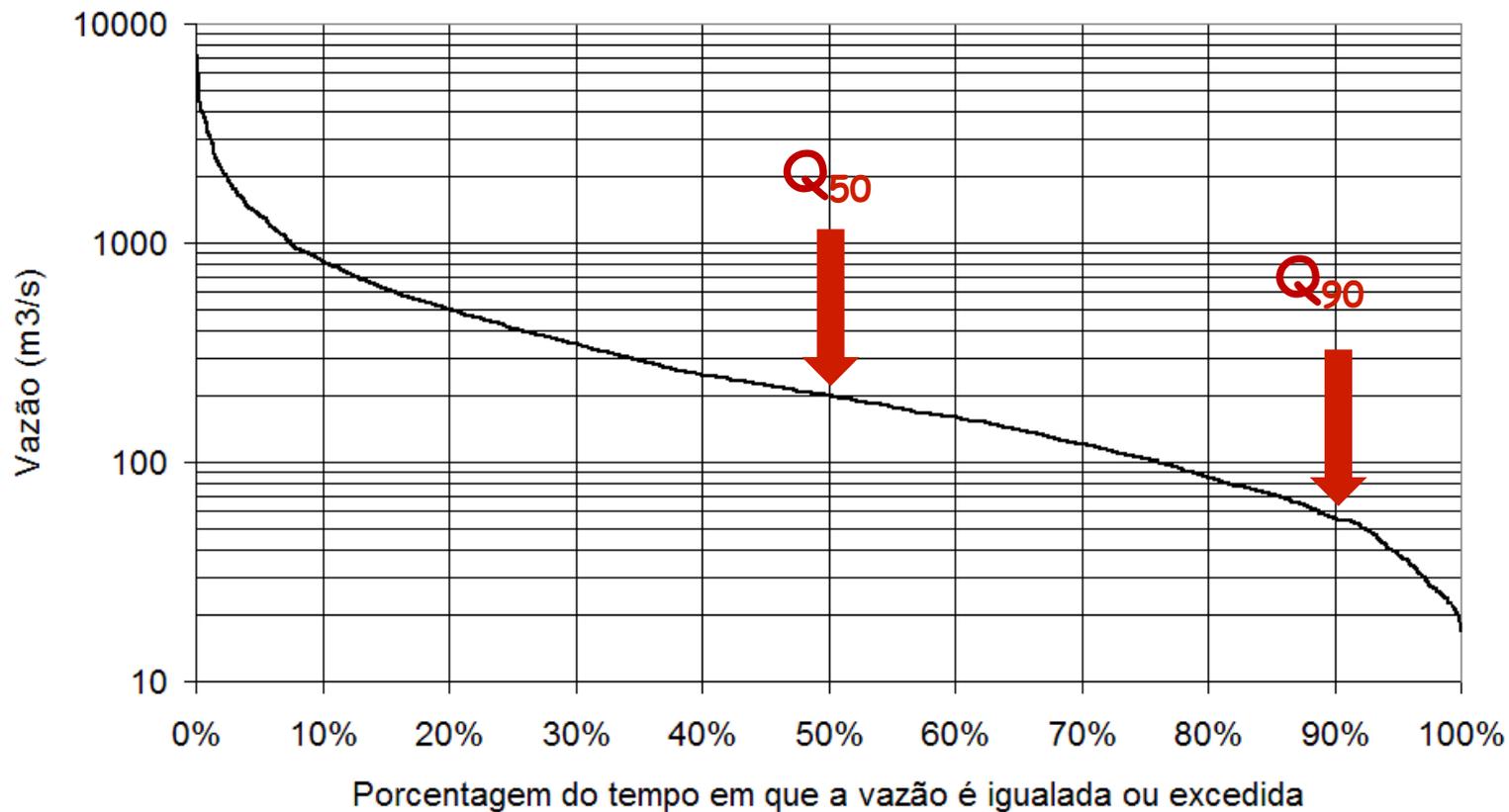


Figura 14. 2: Hidrograma de vazões diárias do rio Taquari em Muçum (RS) e a curva de permanência correspondente

# Curva de permanência

Curva de permanência de vazões do rio Taquari em Muçum



Q<sub>90</sub> - referência na Legislação de meio Ambiente e de Recursos Hídricos

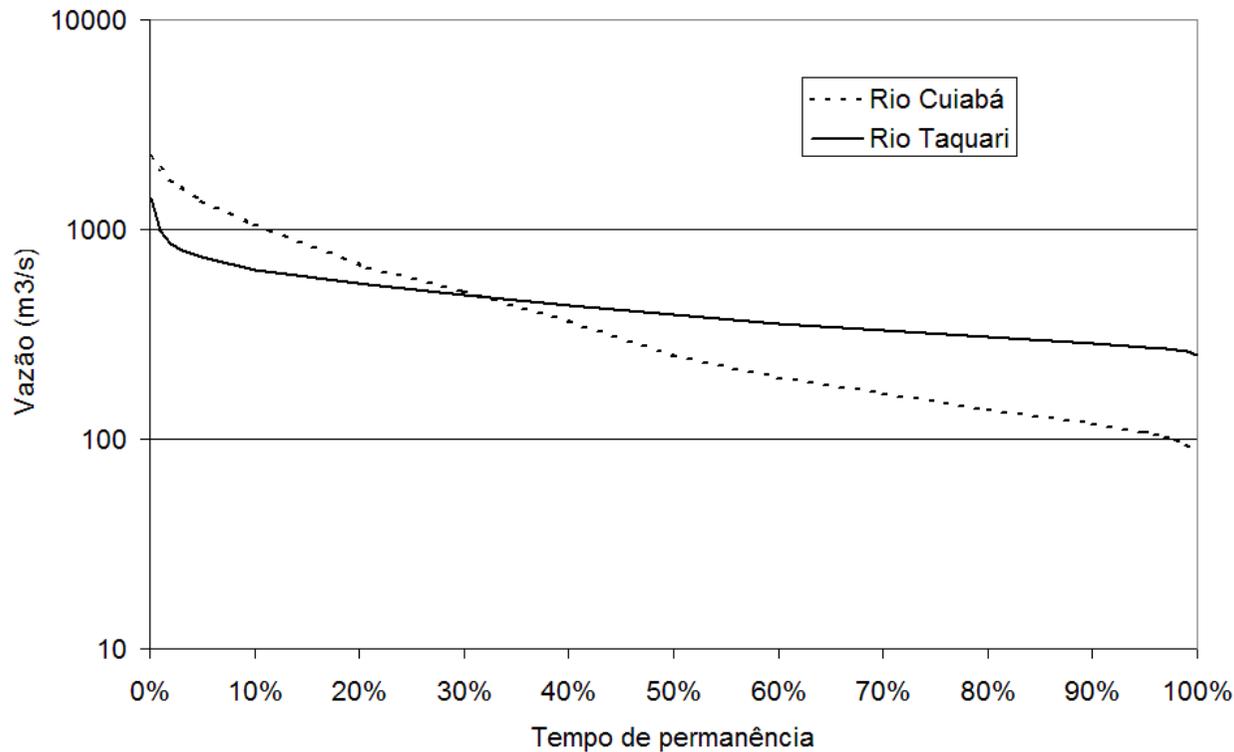
Q<sub>95</sub> - vazão que assegura a geração de energia em hidrelétricas

# Curva de permanência

- ❑ 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 consumtivo
- ❑ Exemplo: rios Cuiabá (MT) e Coxim (MS) - 1980 a 1984
- ❑ Relevo e precipitação média anual semelhantes

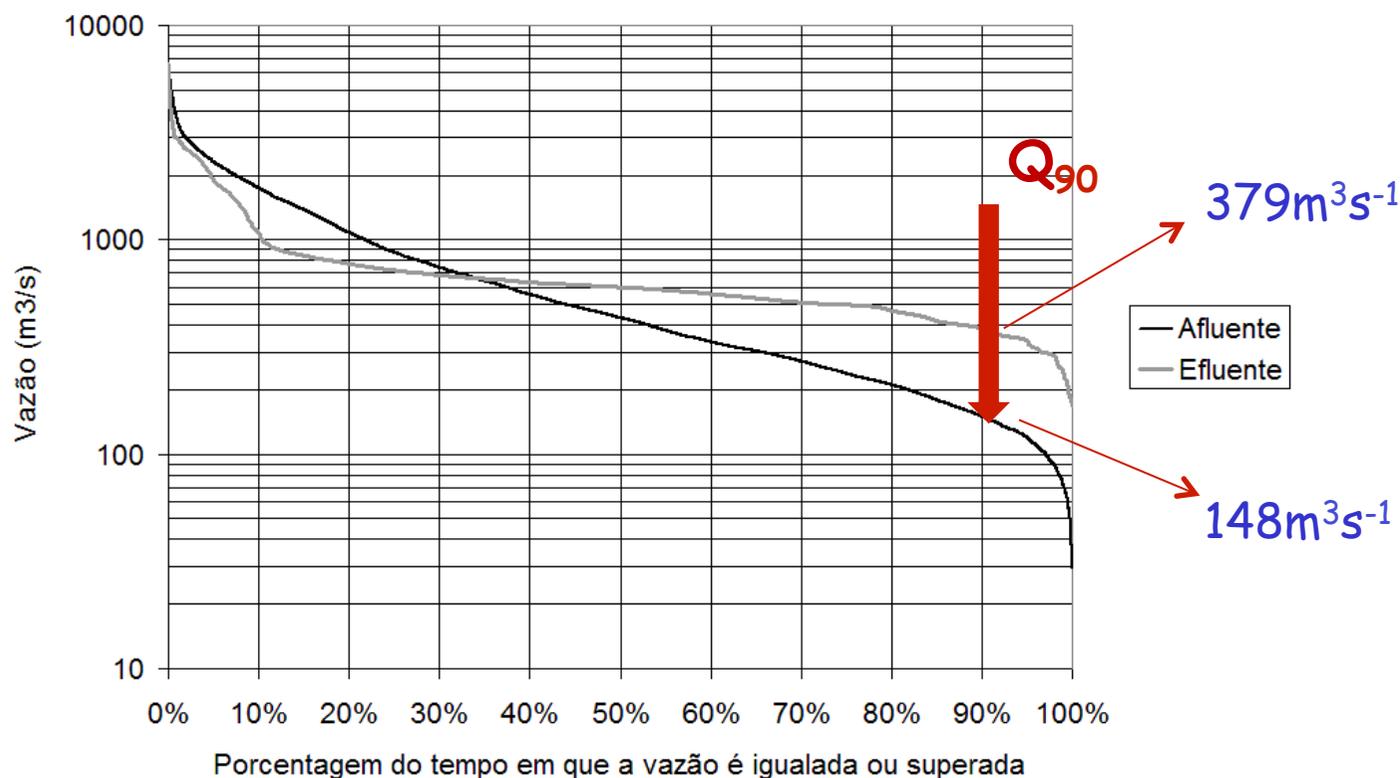
	R. Cuiabá (MT)	R. Taquari (MS)
Área de drenagem	22.000 km <sup>2</sup>	27.000 km <sup>2</sup>
Vazão	438 m <sup>3</sup> /s	436 m <sup>3</sup> /s

# 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)

# Curva de permanência



- ❑ Curva de permanência de entrada (afluente) e saída (efluente) do reservatório de Três Marias, no rio São Francisco (MG)
- ❑ Reservatório retém grande parte das vazões altas que ocorrem durante o verão, aumentando a disponibilidade de água durante a estiagem ⇒ a regularização da vazão torna a curva de permanência mais horizontal

## Exercício

- Uma usina hidrelétrica foi construída no rio Correntoso, conforme o arranjo da figura abaixo. Observe que a água do rio é desviada em uma curva, sendo que a vazão turbinada segue o caminho A enquanto o restante da vazão do rio (se houver) segue o caminho B, pela curva. A usina foi dimensionada para turbinar a vazão exatamente igual à  $Q_{95}$ . Por questões ambientais o IBAMA está exigindo que seja mantida uma vazão não inferior a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  na curva do rio que fica entre a barragem e a usina. Considerando que para manter a vazão ambiental na curva do rio é necessário, por vezes, interromper a geração de energia elétrica, isto é, a manutenção da vazão ambiental tem prioridade sobre a geração de energia, qual é a porcentagem de tempo em que a usina vai operar nessas novas condições, considerando válida a curva de permanência da figura que segue?

