

8 – Hidrometria

- Medir vazão

Hidrometria

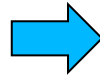
8

Importância das medidas:

Método Científico (Descartes, 1637)

“A única forma de validar uma teoria científica é o confronto entre previsões teóricas e resultados experimentais.”

Sem Observações



Meras Especulações

Diminuir Riscos

Maior quantidade de observações → Prognósticos mais seguros

Medição de vazão



$$Vazão = \frac{Volume}{Tempo}$$

$Vazão = \text{velocidade} \times \text{seção transversal}$

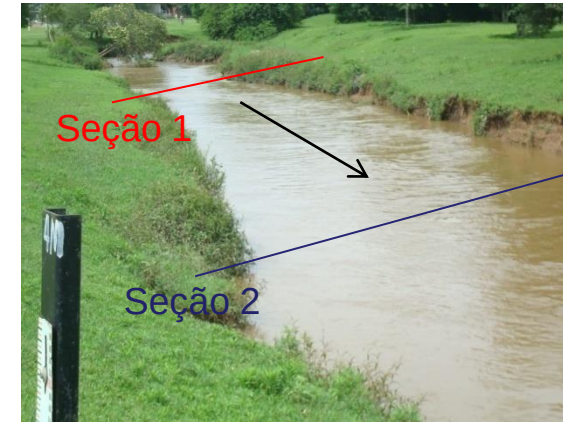
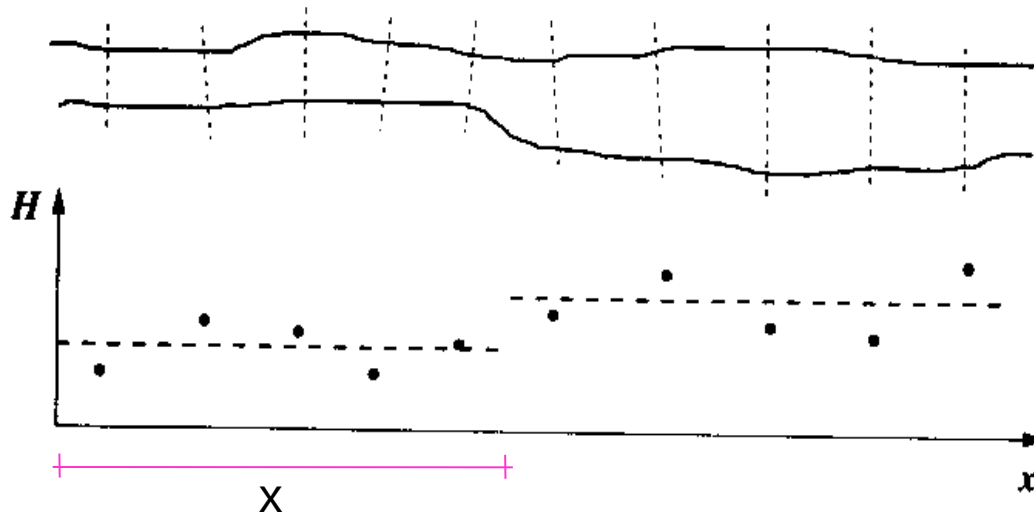
Medida da Velocidade - Flutuadores

Estimativa do trecho: (efetivo para sistemas rasos)

Largura do trecho varia menos que a profundidade



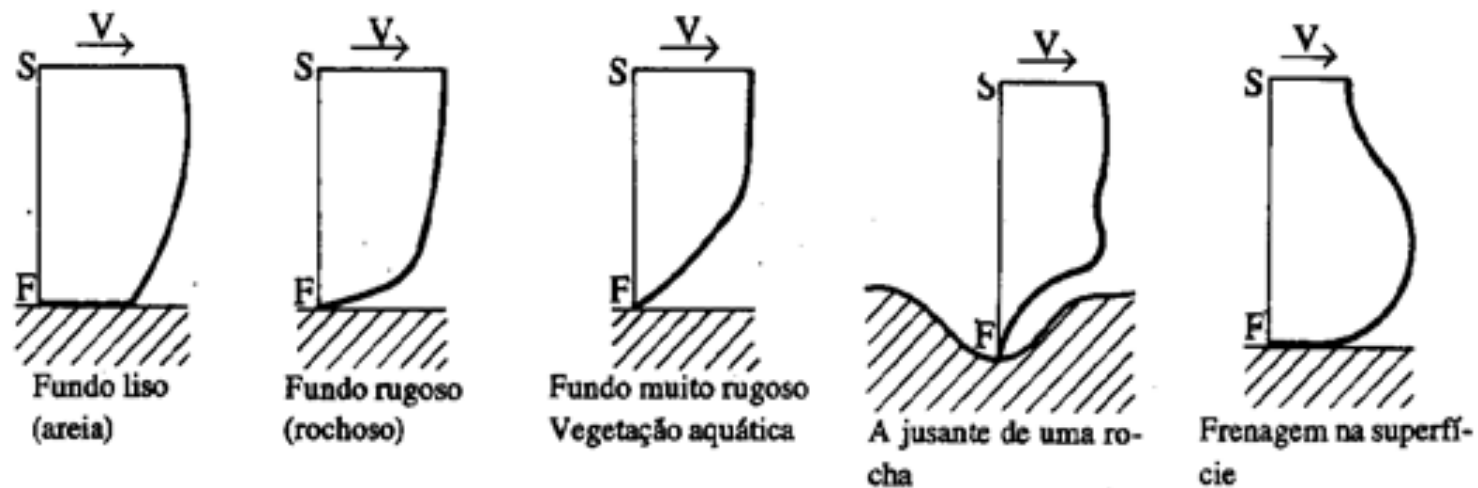
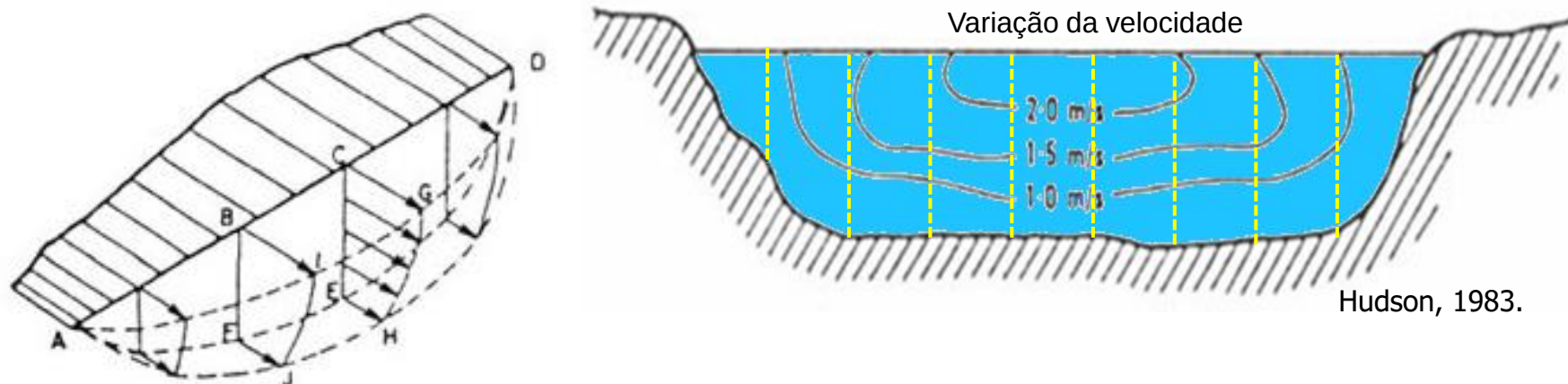
Largura do trecho $\approx$ constante L



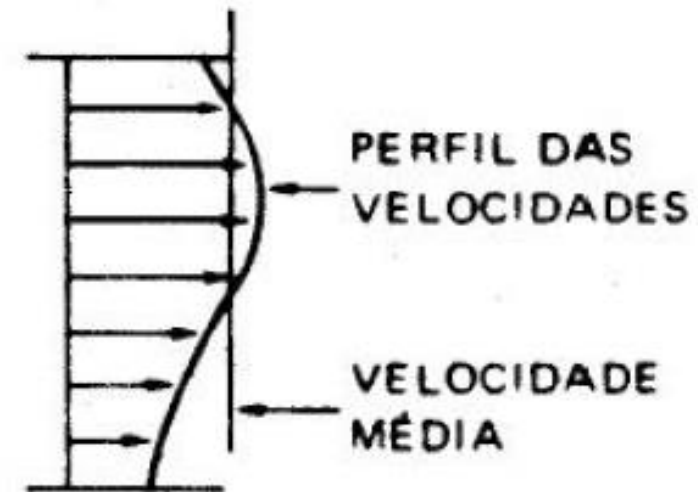
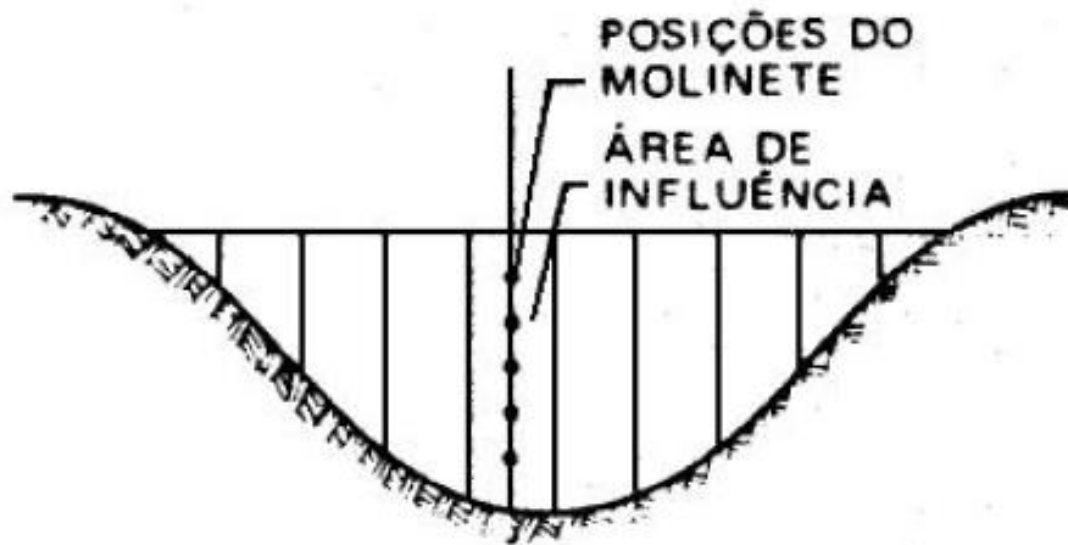
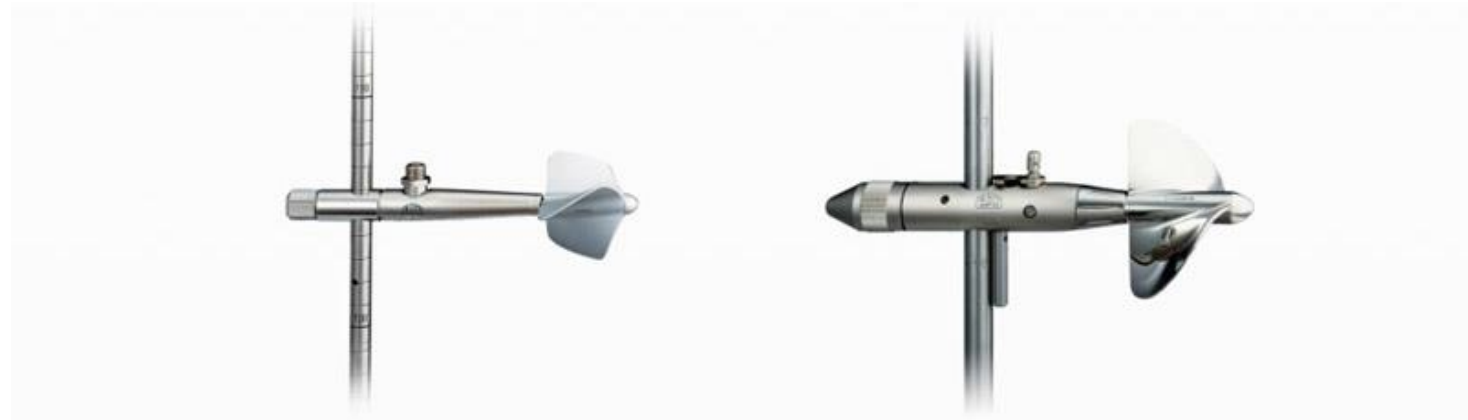
Tempo de percurso:
Flutuador ou traçador
(tempo para atravessar o trecho)

Velocidade média: $U = \frac{x}{t_p}$

Velocidade na seção transversal

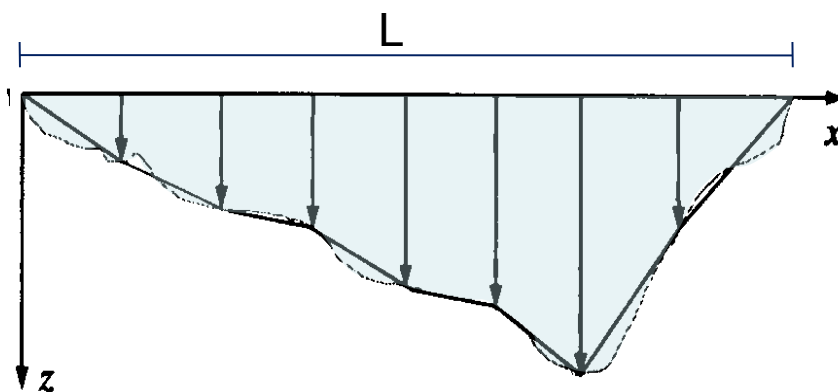


Medição da velocidade com molinete



Geometria

Estimativa pontual:

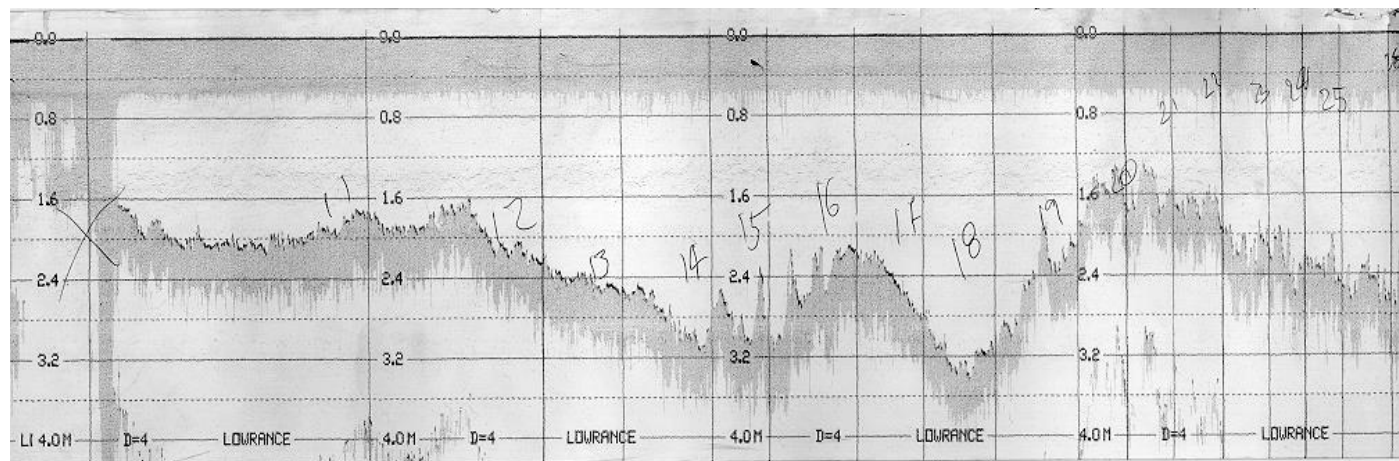


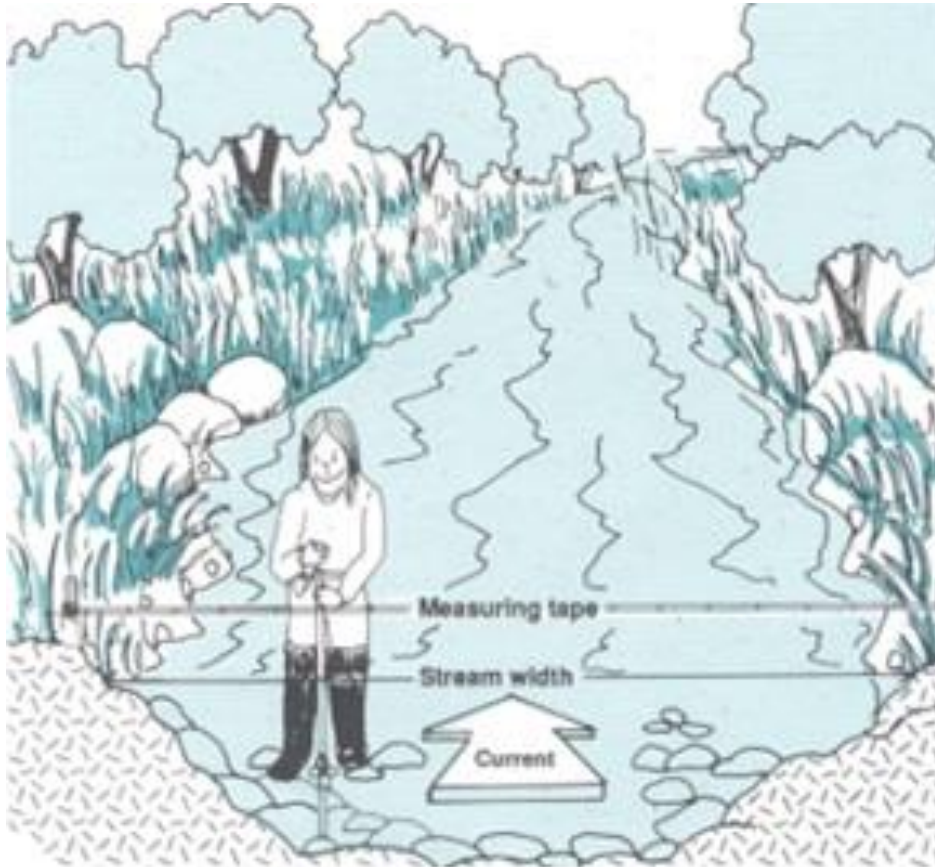
Área:

$$A = \int_0^L z(x) dx$$

Profundidade média:

$$H = \frac{A}{L}$$





<http://www.dep.wv.gov/WWE/getinvolved/sos/Pages/SOPflow.aspx>

Medida da velocidade - Molinete



8



<http://www.fao.org/docrep/t0848e/t0848e-09.htm>



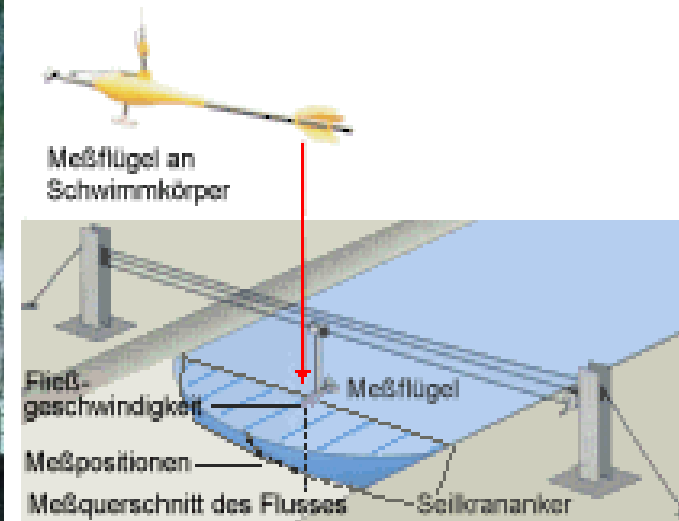
<http://www.hydro.tuwien.ac.at/print/forschung/projekte/der-loehnersbach/verbindung-zur-lehre-exkursionen.html>



UNESP Ilha Solteira



<http://www.geologyeducation.com/hydrology/>



http://www.hnd.bayern.de/wir/wir_datenerfassung.htm



Estimativa pontual:

Medição com molinete hidrométrico:

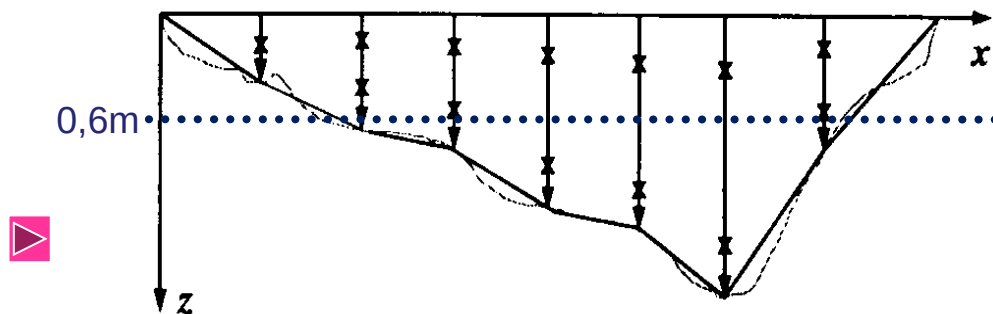
Medição em um número significativo de verticais (ver tabela).

A velocidade média em cada vertical pode ser medida de várias formas (ver tabela).

A mais comum:

$h(x) > 0,6m$: média das velocidades medidas a 20% e 80% da profundidade.

$h(x) < 0,6m$: velocidade medida a 60% da profundidade.



$\bar{u}$ Velocidade média na vertical

Seção transversal:

Vazão:

$$Q = \int_0^L \bar{u}(x) z(x) dx$$

Velocidade média:

$$U = \frac{Q}{A}$$

Tabela 1: Distância recomendada entre verticais

Largura de via (m)	Distância entre verticais (m)
$\leq 3,00$	0,30
3,00–6,00	0,50
6,00–15,00	1,00
15,00–50,00	2,00
50,00–80,00	4,00
80,00–150,00	6,00
150,00–250,00	8,00
$\geq 250,00$	12,00

Fonte: Paigot, 1948



Tabela 2: Cálculo da velocidade média na vertical (método detalhado)

Nº de pontos	Posição na vertical (*) em relação à prof. 'h'	Cálculo da velocidade média na vertical	Profundidade (m)
1	0,6h	$\bar{V} = V_{0,6}$	0,15–0,6
2	0,2e0,8h	$\bar{V} = (V_{0,2} + V_{0,8}) / 2$	0,6–1,2
3	0,2; 0,6e0,8h	$\bar{V} = (V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8}) / 4$	1,2–2,0
4	0,2; 0,4; 0,6e0,8h	$\bar{V} = (V_{0,2} + 2V_{0,4} + 2V_{0,6} + V_{0,8}) / 6$	2,0–4,0
5	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8heF	$V = [V_S + 2(V_{0,2} + V_{0,4} + V_{0,6} + V_{0,8}) + V_F] / 10$	>4,0

(*) S—superfície; F—fundo

Fonte: DRAE, 1977

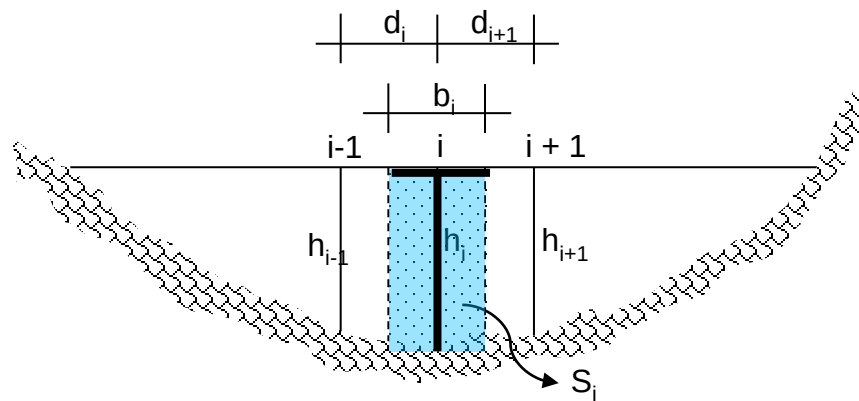


Cálculo da vazão na seção do rio

$$Q = \sum q_i = \sum v_i S_i$$

S_i – elemento de área da seção transversal
 q_i –vazão parcial no elemento de área i
 v_i - velocidade média da água no elemento de área S_i

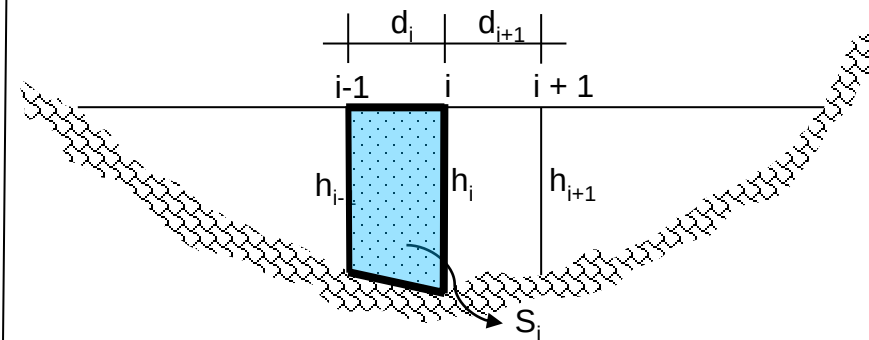
Método da meia seção



Elemento de área: Retângulo = $b_i h_i$

Velocidade: média na vertical i

Método da seção média



Elemento de área: Trapézio = $(h_i + h_{i-1}) d_i / 2$

Velocidade: média das velocidades nas verticais i e $i-1$

Exercício 1

8

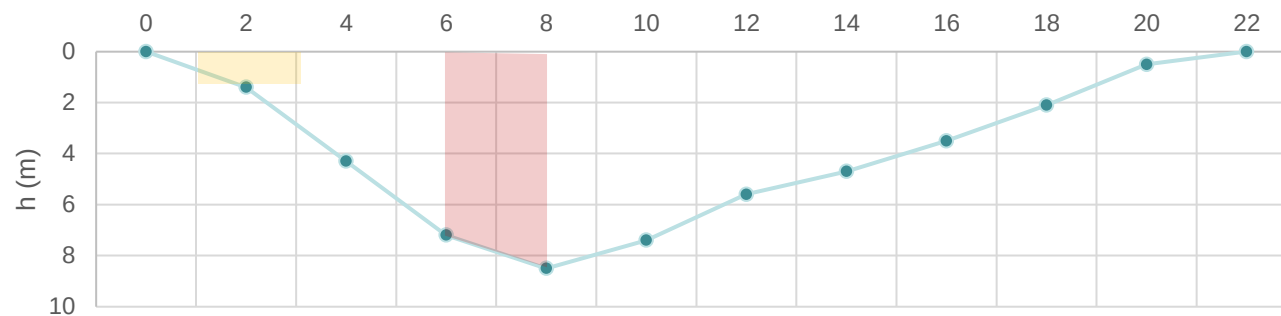
O quadro apresenta os valores da batimetria da seção transversal de um rio e das velocidades medidas a 60% da profundidade ($V_{0,6}$) ou 20% ($V_{0,2}$) e a 80% da profundidade ($V_{0,8}$).

- a) Desenhe a seção transversal.
- b) Calcule a vazão, velocidade média e área (pelos métodos da seção média e da meia seção)

DISTÂNCIA (m)	0=ME	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22=MD
PROFUNDIDADE (m)	-	1,4	4,3	7,2	8,5	7,4	5,6	4,7	3,5	2,1	0,5	-
$V_{0,2}$ (m/s)	-	1,5	1,9	2,6	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1	1,8		-
$V_{0,6}$ (m/s)											1,0	
$V_{0,8}$ (m/s)	-	1,0	1,2	1,8	2,0	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1		-

Solução

8



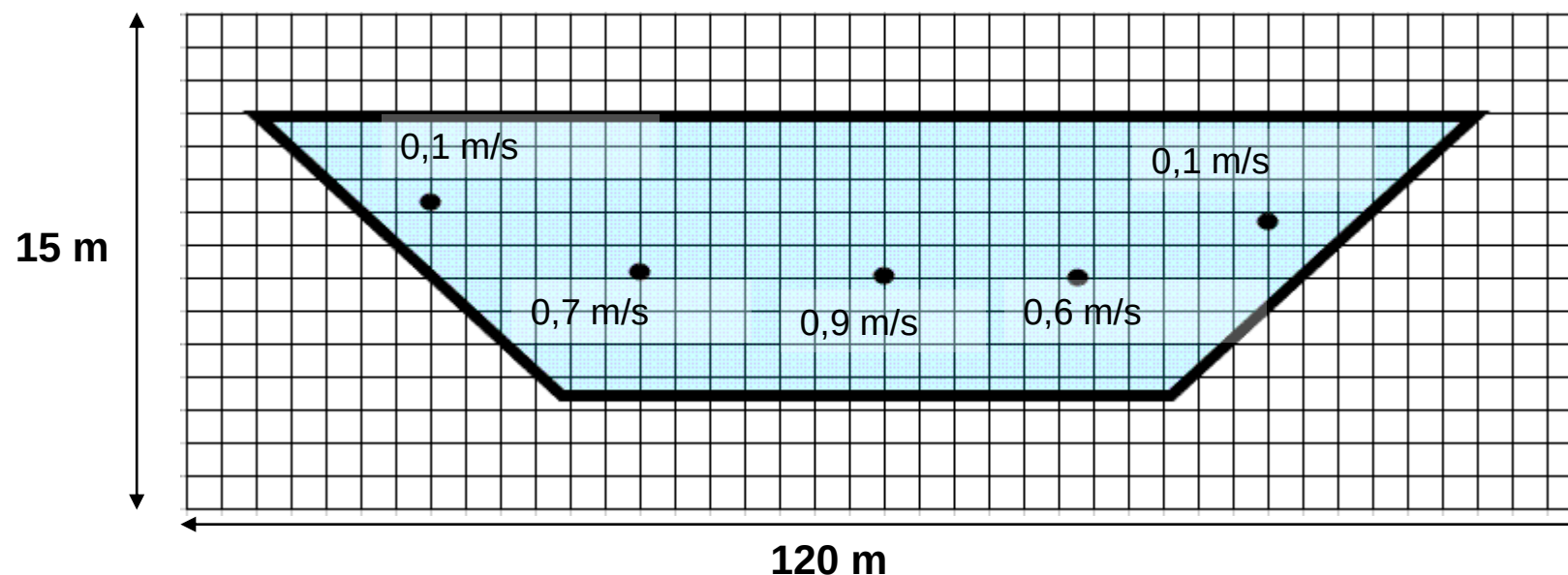
	ME											MD		
DISTÂNCIA (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
PROFUNDIDADE (m)	0	1.4	4.3	7.2	8.5	7.4	5.6	4.7	3.5	2.1	0.5	0		
$V_{0,2}$ (m/s)	-	1.5	1.9	2.6	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1	1.8		-		
$V_{0,6}$ (m/s)											1			
$V_{0,8}$ (m/s)	-	1	1.2	1.8	2	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1		-		

Método da meia seção	v-vertical	0	1.25	1.55	2.2	2.45	2.3	2.1	1.9	1.7	1.45	1	0	
	área(meia seção)		2.8	8.6	14.4	17	14.8	11.2	9.4	7	4.2	1		
	dQ		3.5	13.33	31.68	41.65	34.04	23.52	17.86	11.9	6.09	1		
														184.57=Q 2.05=v
Método da seção média	v(média da seção)		0.625	1.4	1.875	2.325	2.375	2.2	2	1.8	1.575	1.225	0.5	
	área(média da seção)													
	dQ		1.4	5.7	11.5	15.7	15.9	13	10.3	8.2	5.6	2.6	0.5	
			0.875	7.98	21.5625	36.5025	37.7625	28.6	20.6	14.76	8.82	3.185	0.25	
														89.9=A 180.65=Q 2.01=V

Exercício 2

[IPH/UFRGS]

Foi realizada a medição de vazão em um rio conforme o desenho abaixo, onde cada quadrado tem 3 metros na horizontal e 1 metro na vertical. Foi realizada apenas uma medição de velocidade por vertical com os valores observados indicados no desenho.

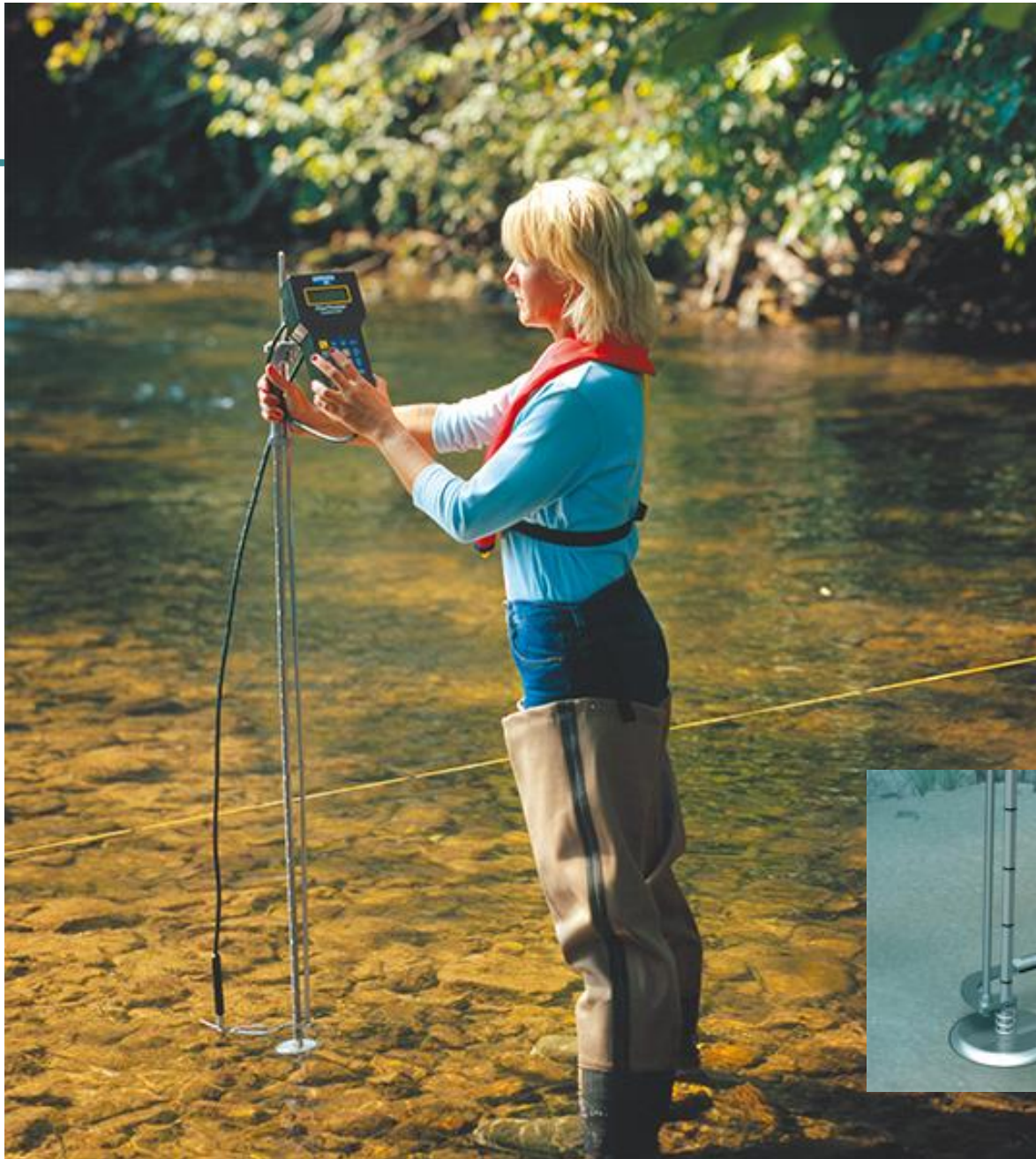


- O método simplificado, com apenas 1 medição por vertical, é adequado para este rio?
- O número de verticais é suficiente de acordo com as recomendações?
- Qual é a vazão medida?

Medição da velocidade com ADV

Acoustic Doppler Velocimeter







e) ADCP

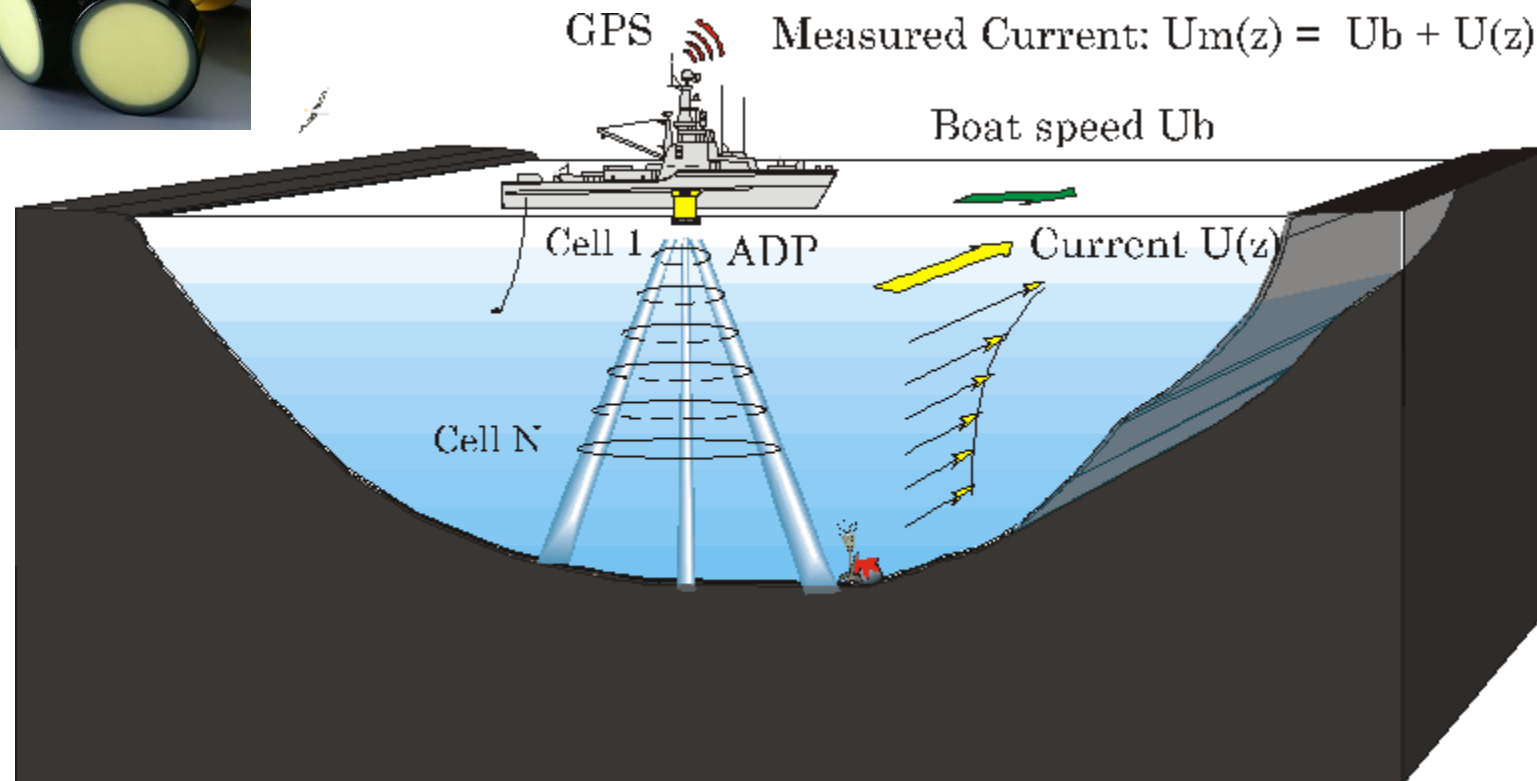
Acoustic Doppler Current Profilers

Para águas rasas



Para águas profundas



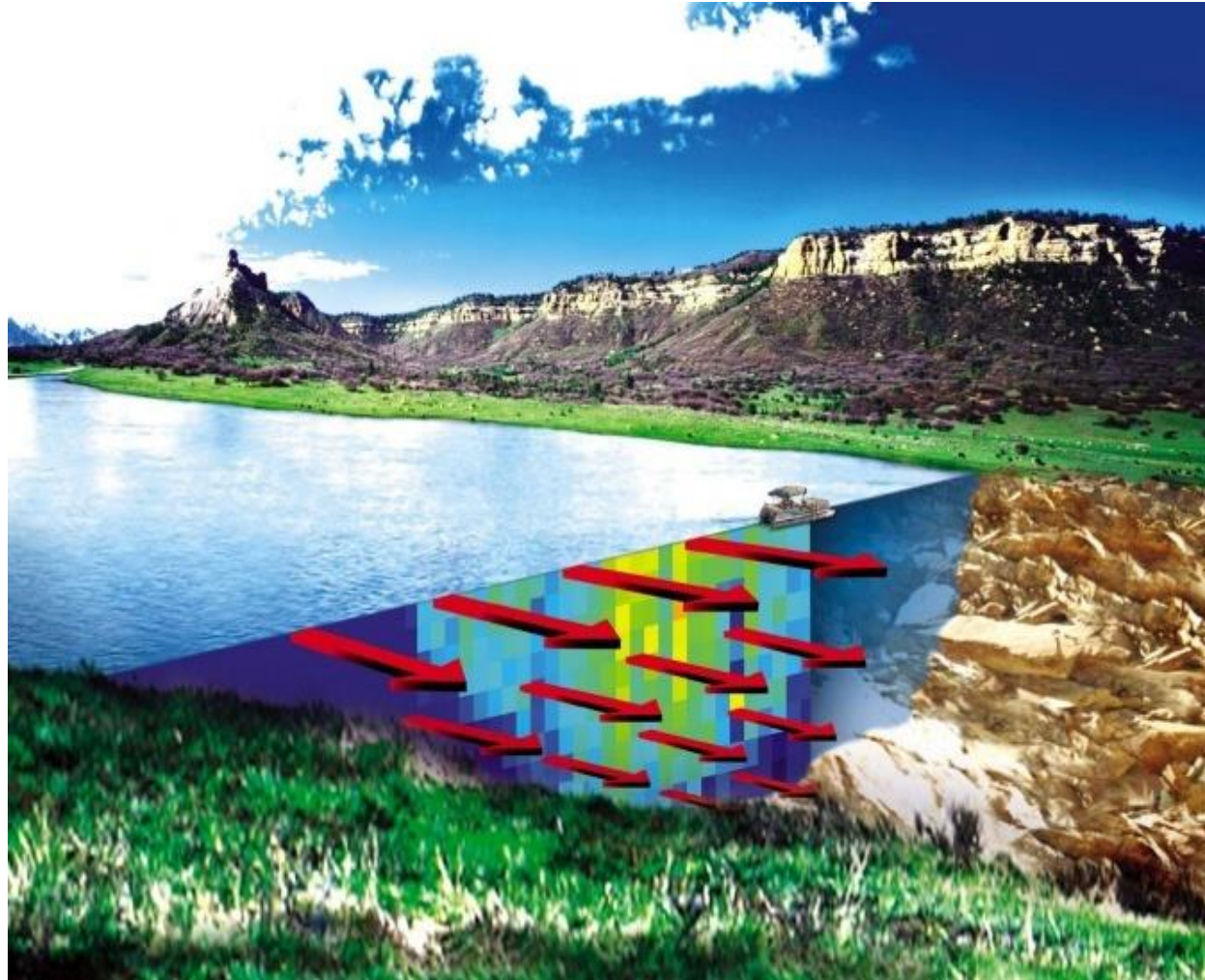




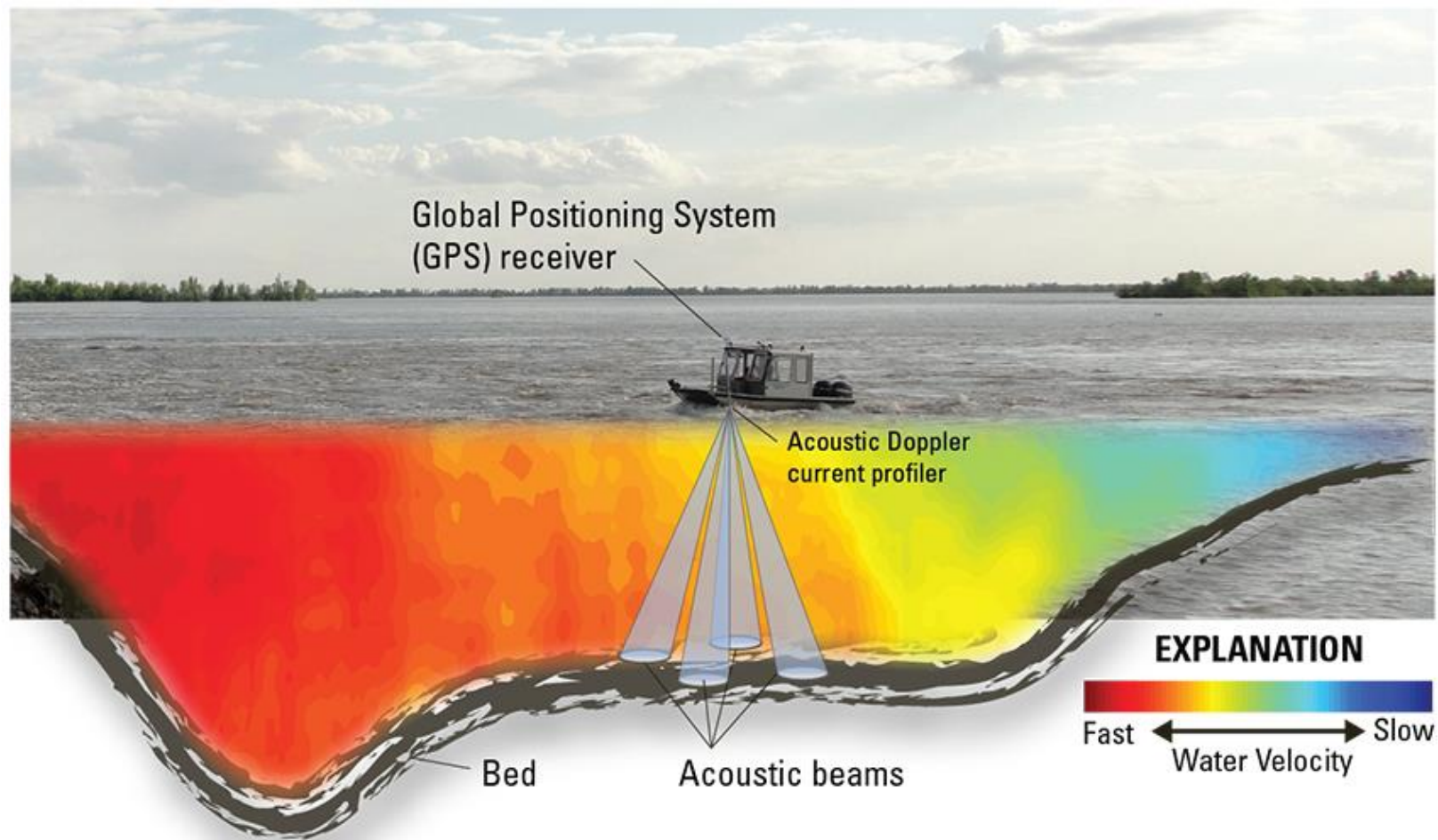


ADCP

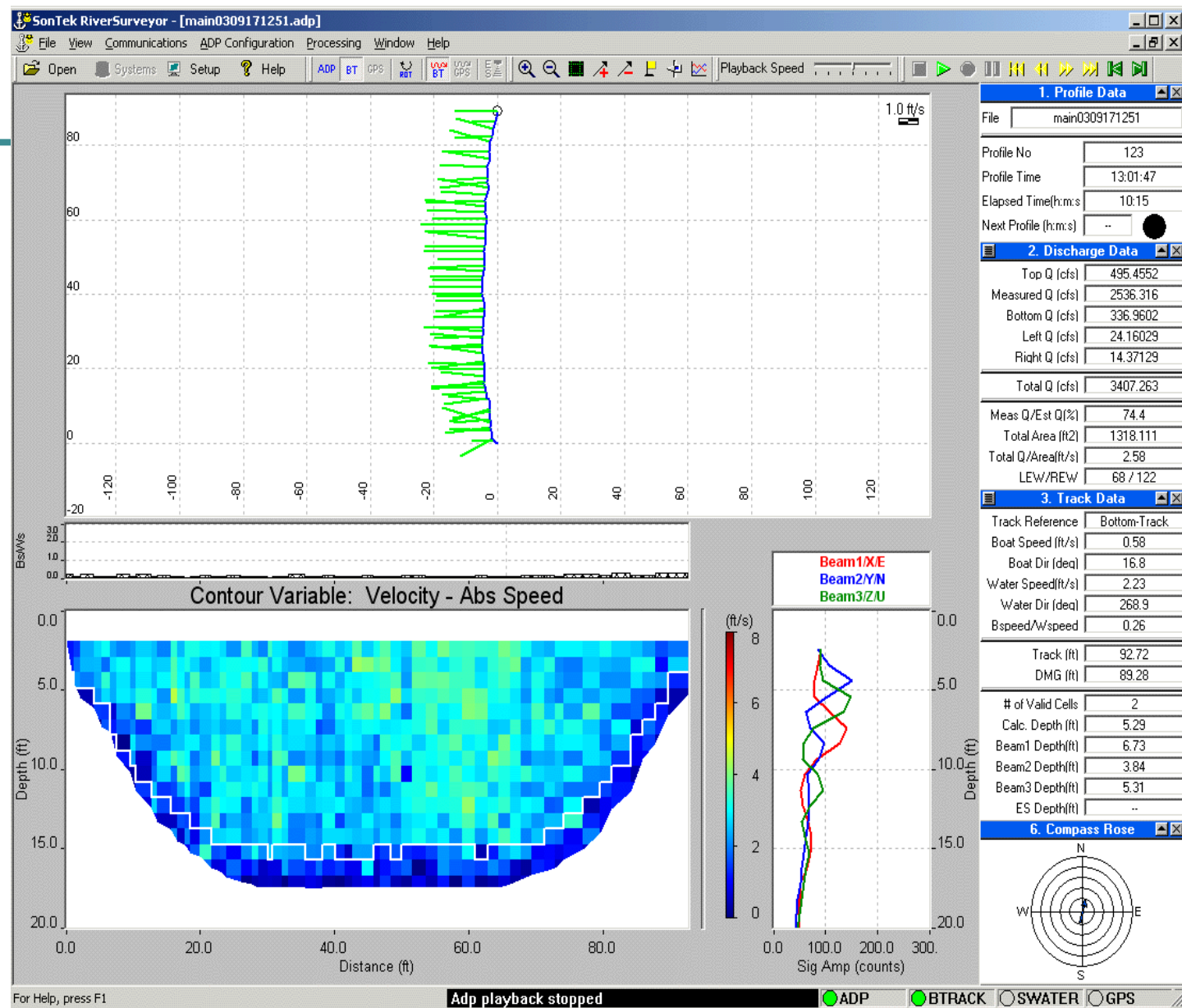
8



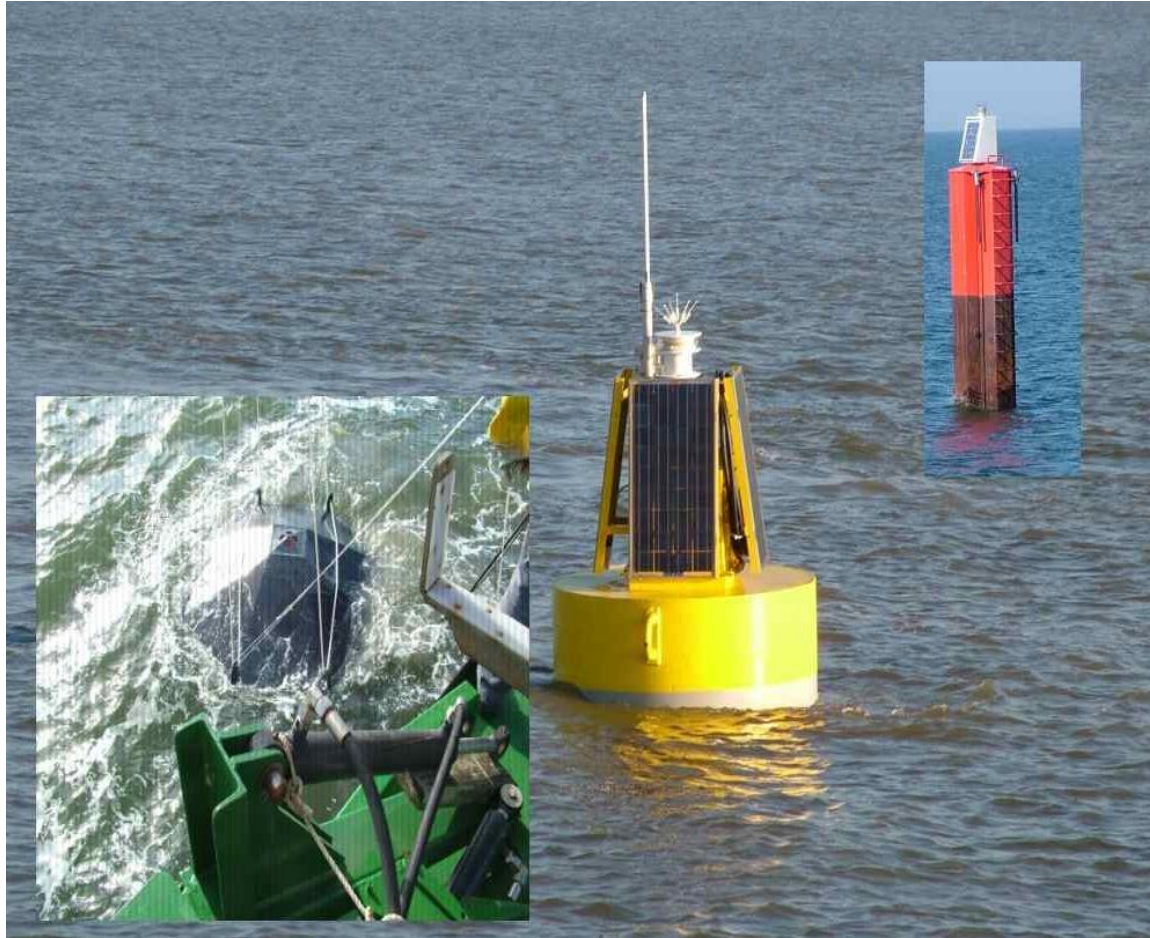
<http://www.sontek.com/product/rsadp/rsvec.jpg>



<http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/analyzing-and-visualizing-flows-in-rivers-and-lakes-with-matlab.html?requestedDomain=www.mathworks.com>



ADCP on line



http://www.jebo-elektronik.de/ADCP_Online.html

Vertedores



PLATE 26

A non-standard weir in Java on a stream carrying a very heavy bed load

Hudson, 1983.

Measuring streamflow with sharp-crested weirs

(a) 90° V-notch weir

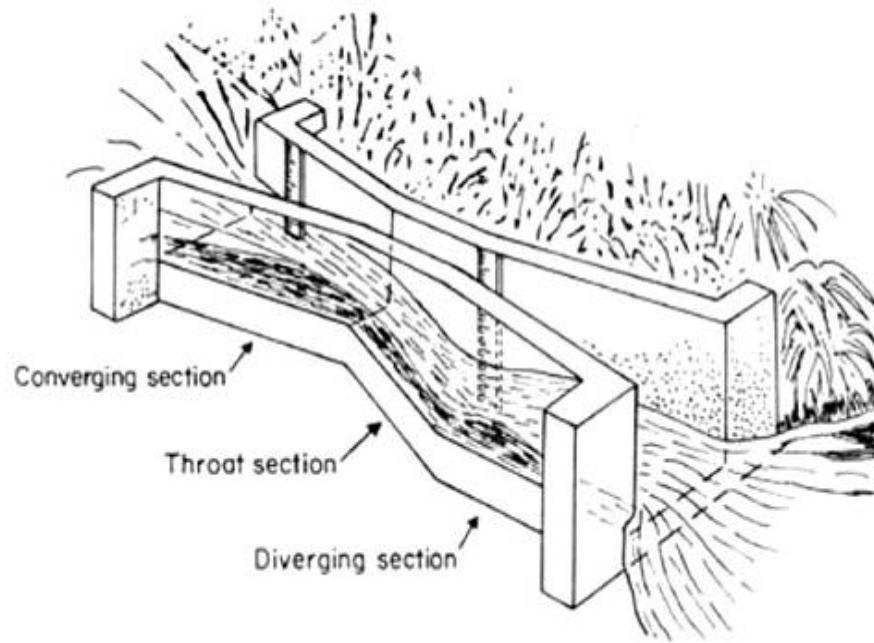


(b) rectangular notch weir

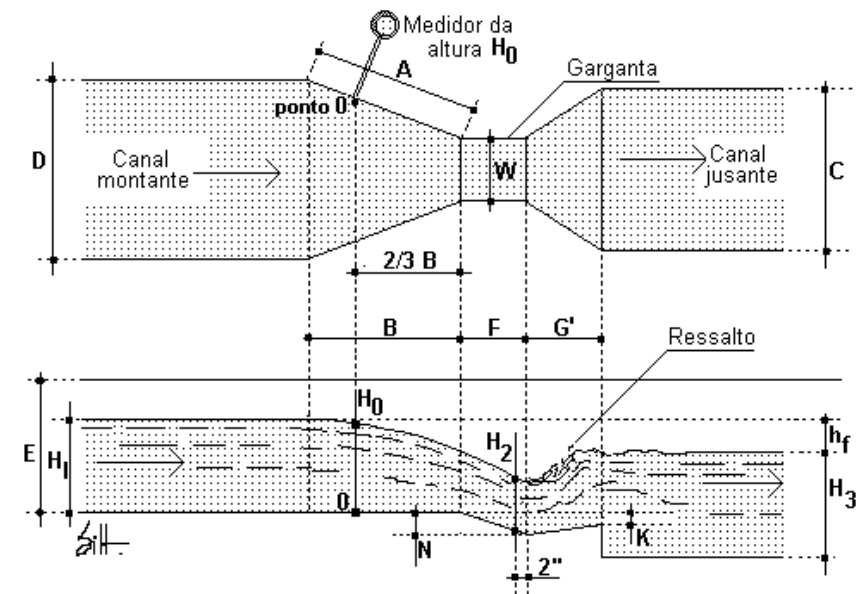


Calha Parshall

A Parshall flume (redrawn from Scott and Houston 1959)



Hudson, 1983.



ESQUEMA DE UMA CALHA PARSHALL CONVENCIONAL

Carlos Fernandes em:
<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/PARSHALL.html>



PLATE 27

A Parshall flume with free outfall and one level recorder

Hudson, 1983.

Resumindo - Medição de Vazão

Diversos métodos e formas:

- Método volumétrico
- Vertedores
- Calha Parshall
- Método da área e velocidade
 - Molinete
 - Futuadores
- Método químico
- ADCP

Vazões pequenas

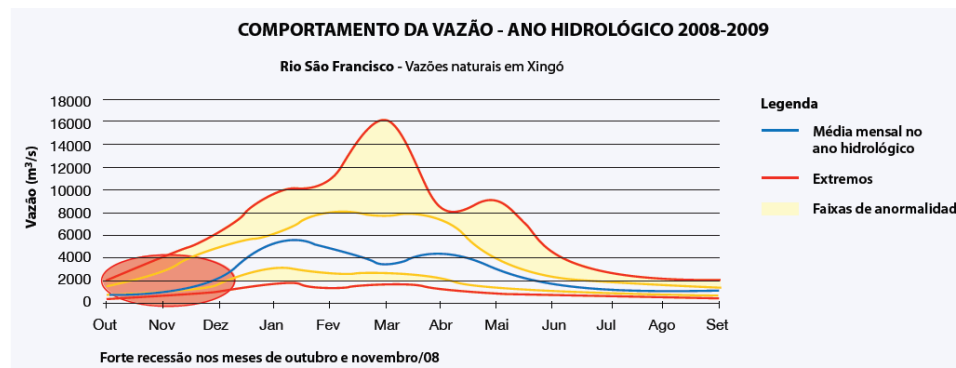


Figura 3– Efeito das chuvas nas vazões naturais em Xingó (rio São Francisco).



NÍVEL

8.2 – Nível limnimétrico

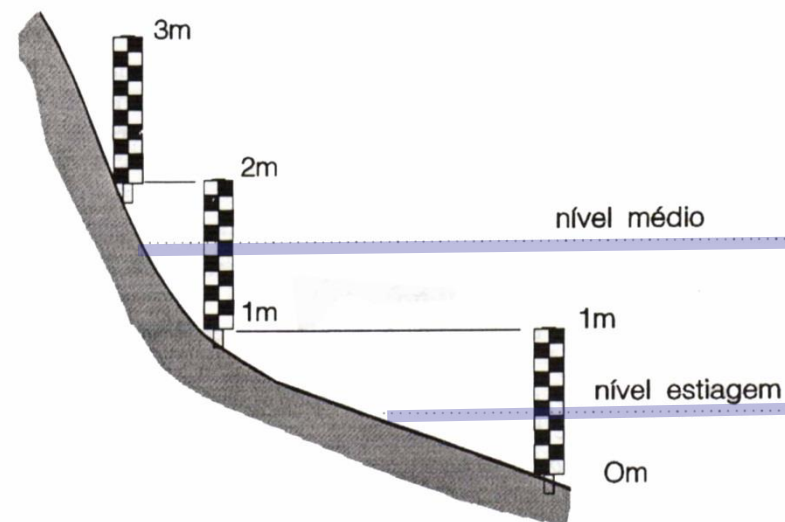


<http://www.agsolve.com.br/produtos.php?cat=55>

Réguas Limnimétricas

Leituras:
7h e 17h

Marco de referência









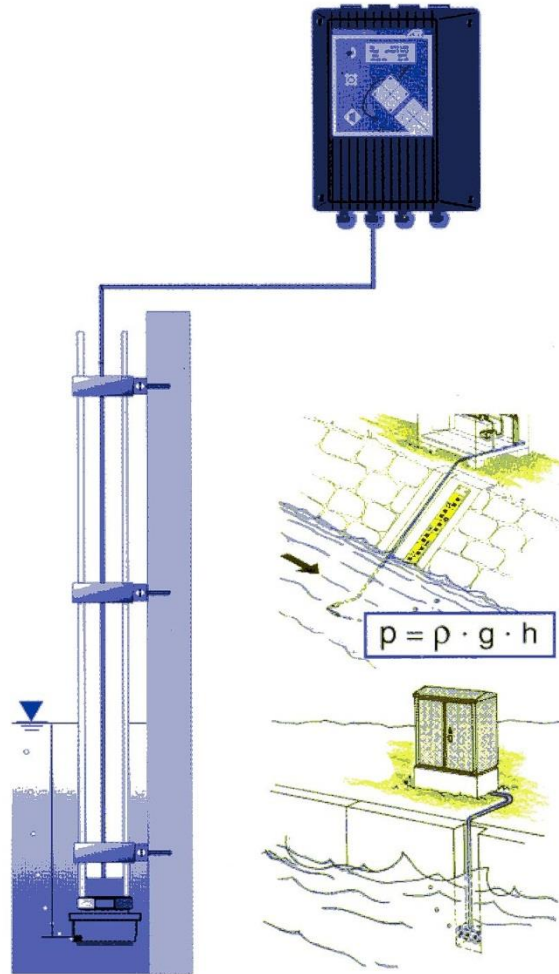
Linígrafo de bóia com registro em papel

<http://www.ambidados.com/blog/index.php/2011/03/maregrafos-e-ondografos/>



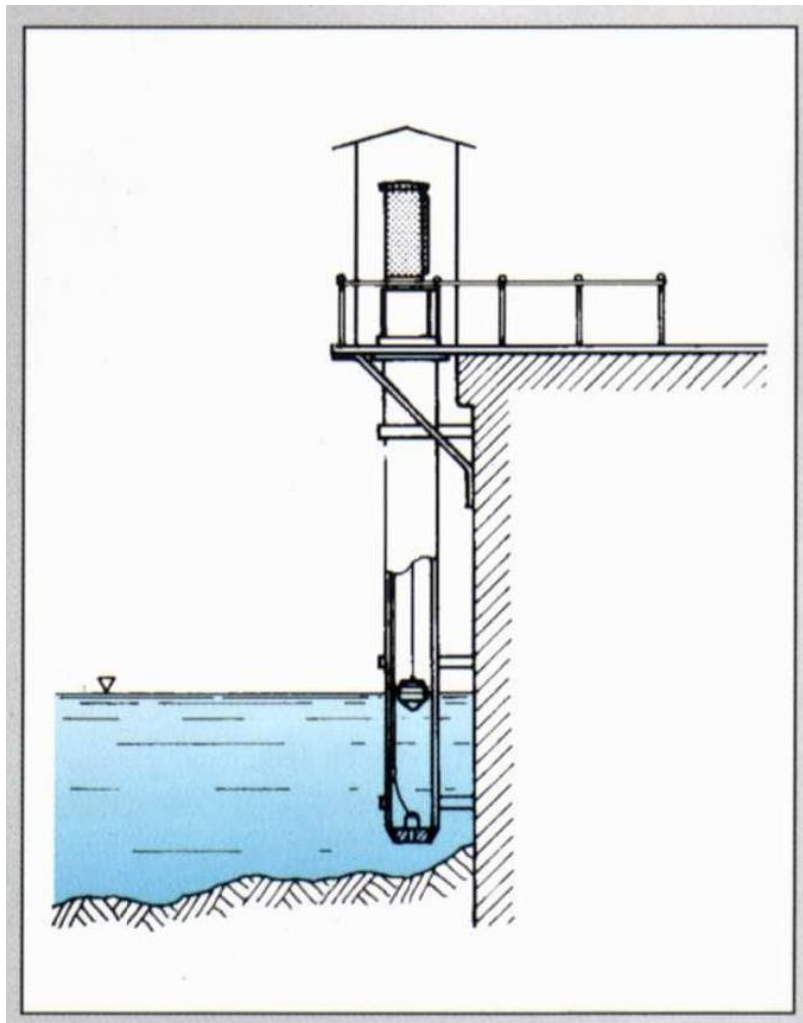
Transdutor de pressão com datalogger interno para medição de nível e temperatura da água.

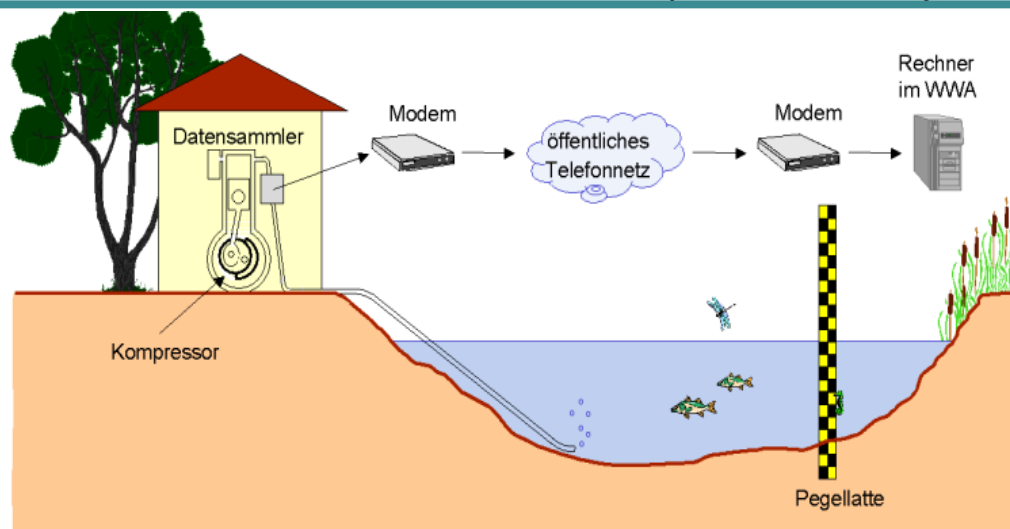
http://www.agsolve.com.br/prduto_detalhe.php?cod=975



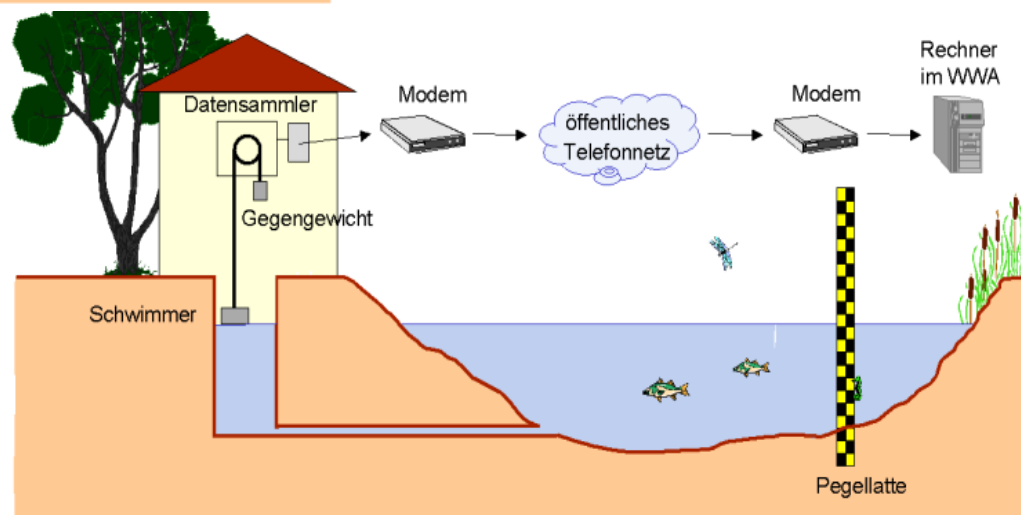
<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/PT/GF0153PT.HTM>

Limnógrafo de bóia com tubulão Instalado no curso de água





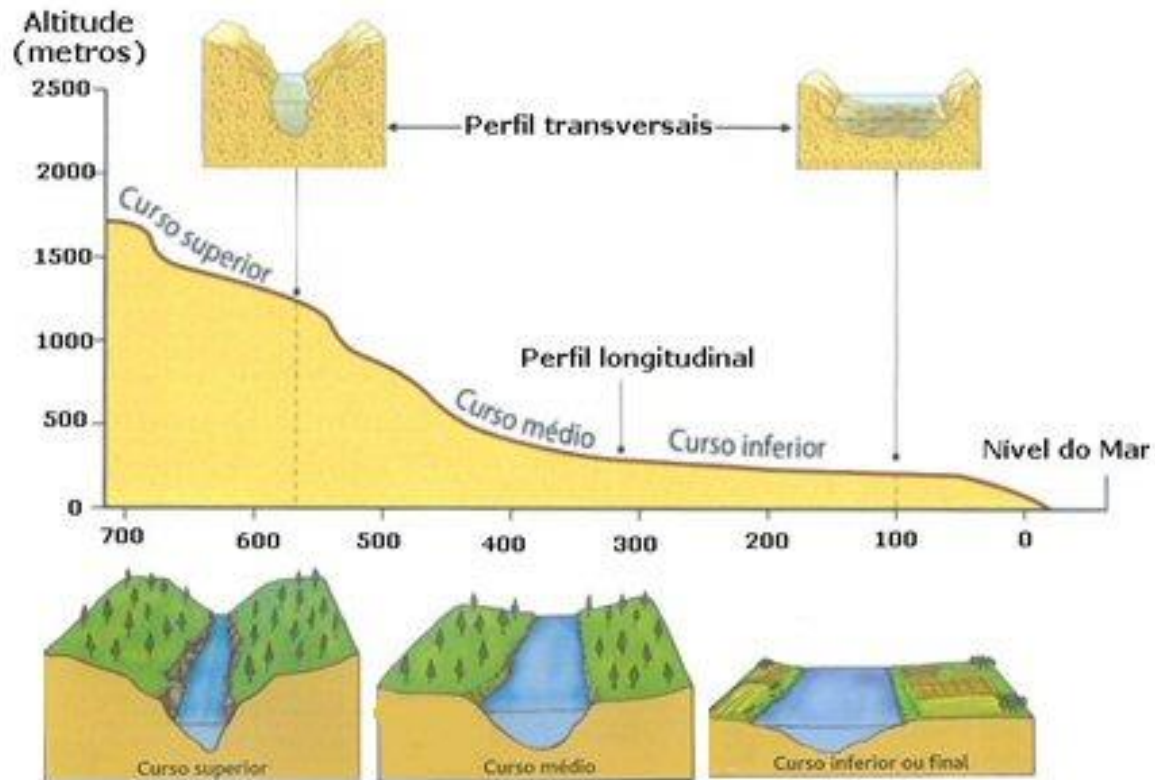
Limnógrafo eletrônico com sensor de pressão



Limnógrafo de bóia com tubulão instalado na margem do curso de água

SEÇÃO TRANSVERSAL

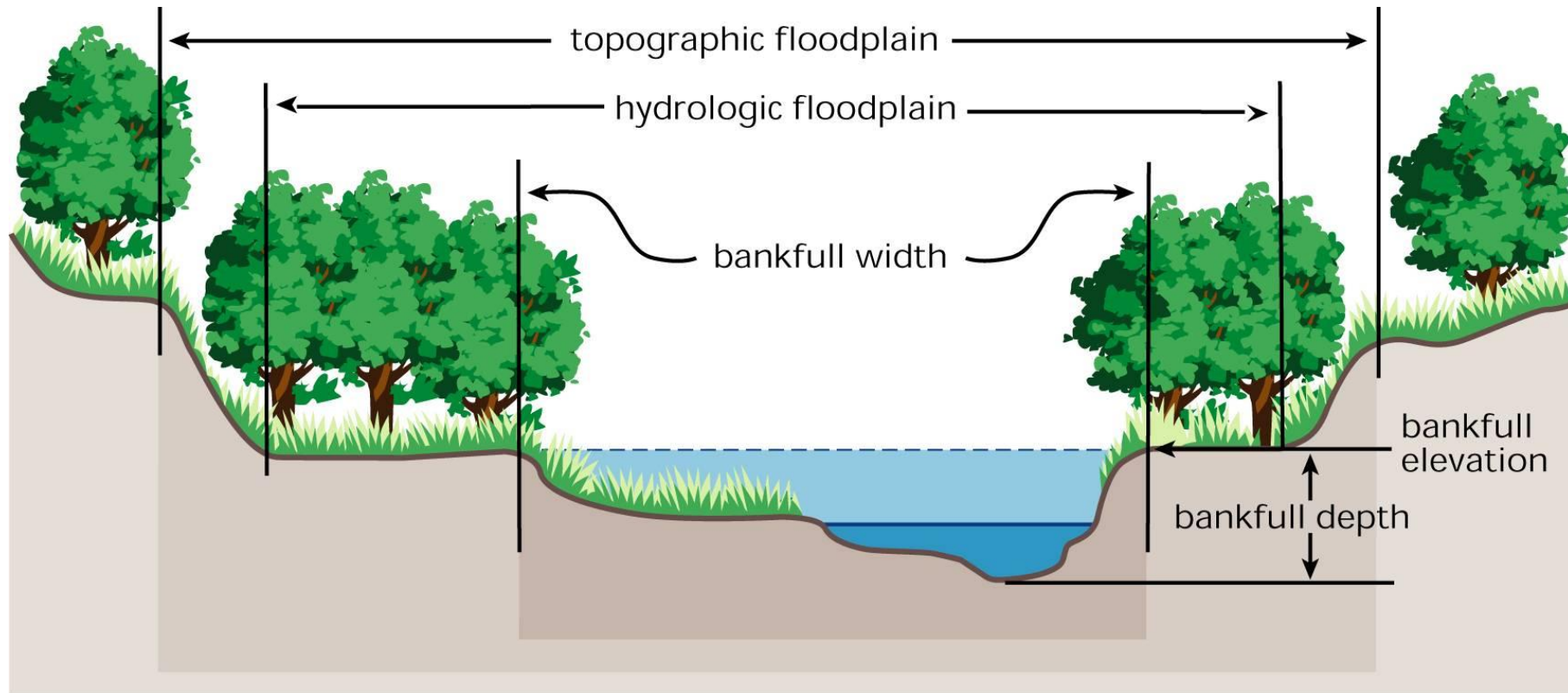
Seção transversal

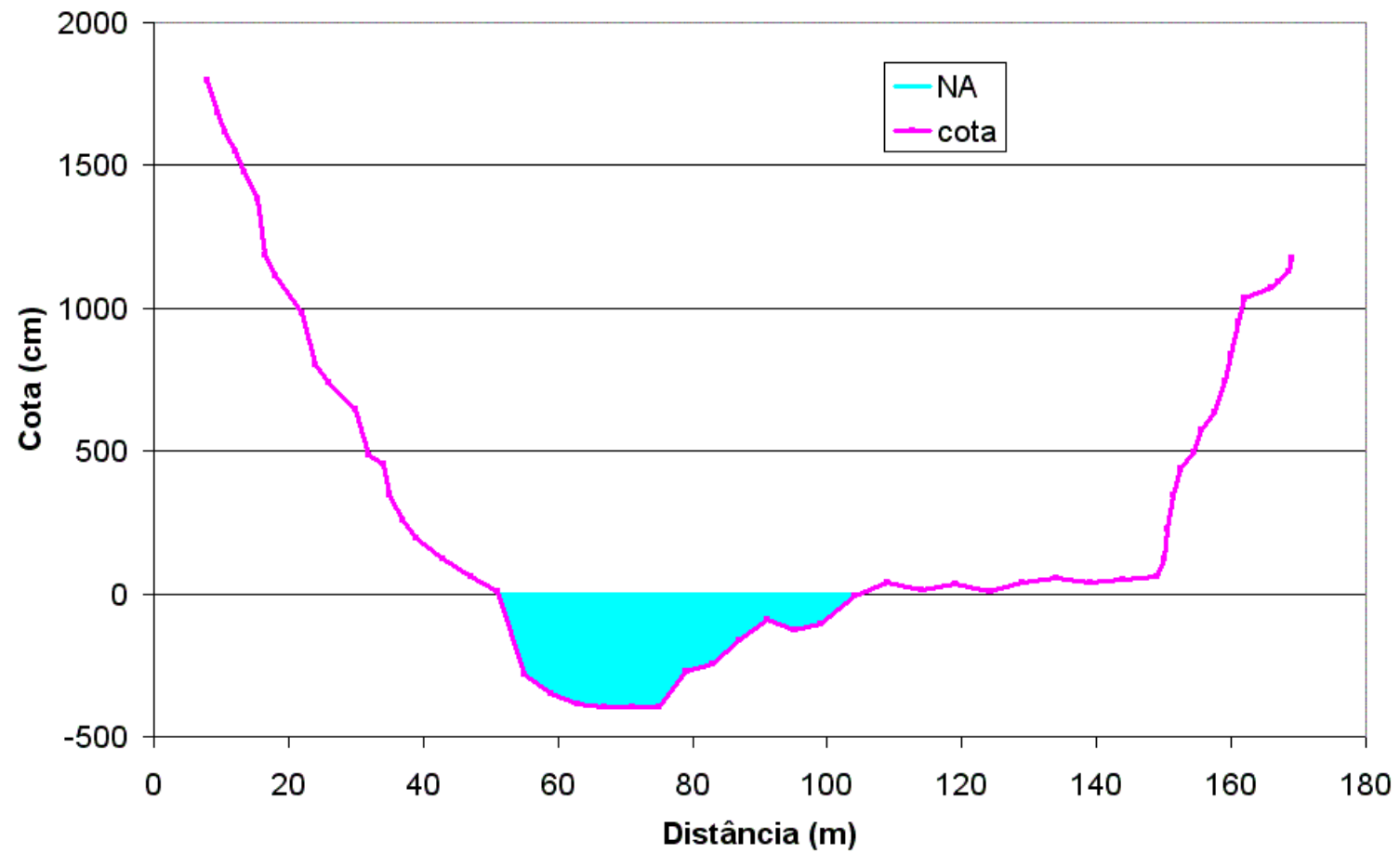


<http://www.colegiomascodagama.pt/ciencias3c/onze/geologia1.1.html>

Seção transversal

8





Relação entre a descarga medida e a leitura simultânea de régua

CURVA DE DESCARGA (CURVA-CHAVE)

8.4 - Curva de descarga ou Curva-Chave

Pinto et al. 1976

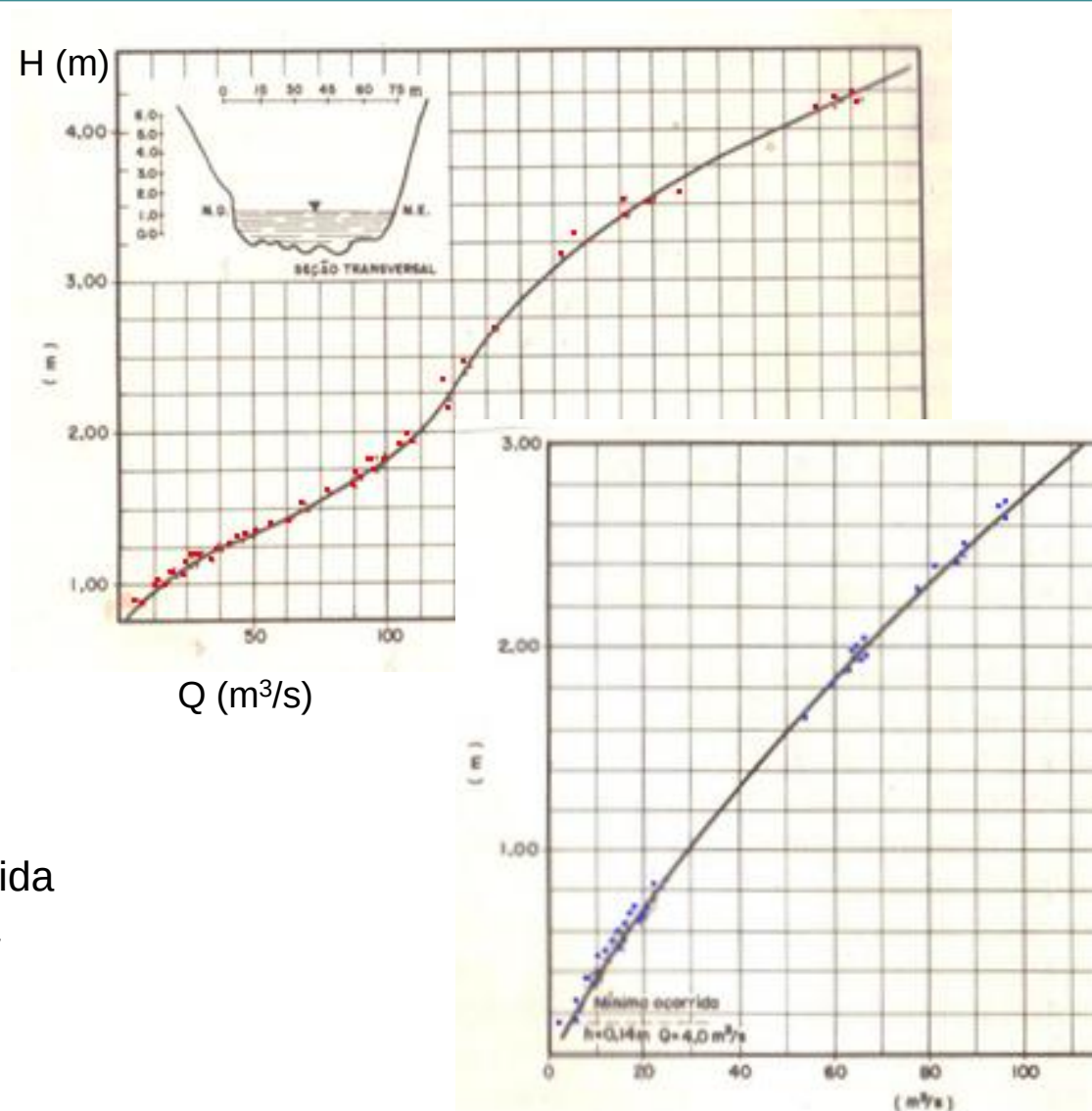
8

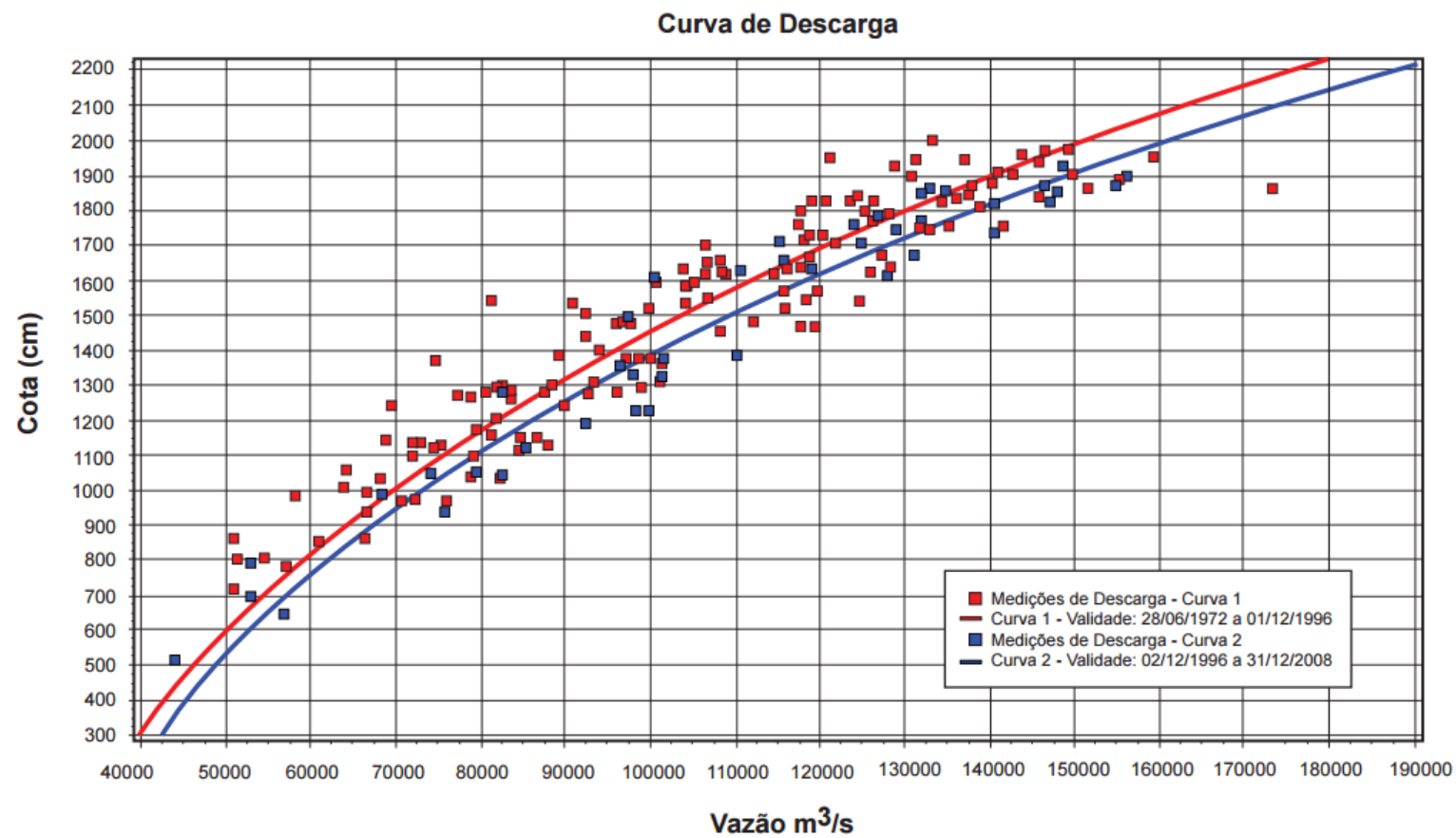


Curva-chave:

Relação entre a descarga medida
e a leitura simultânea de régua

$Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H \text{ (m)}$





Fonte: ANA (2009)

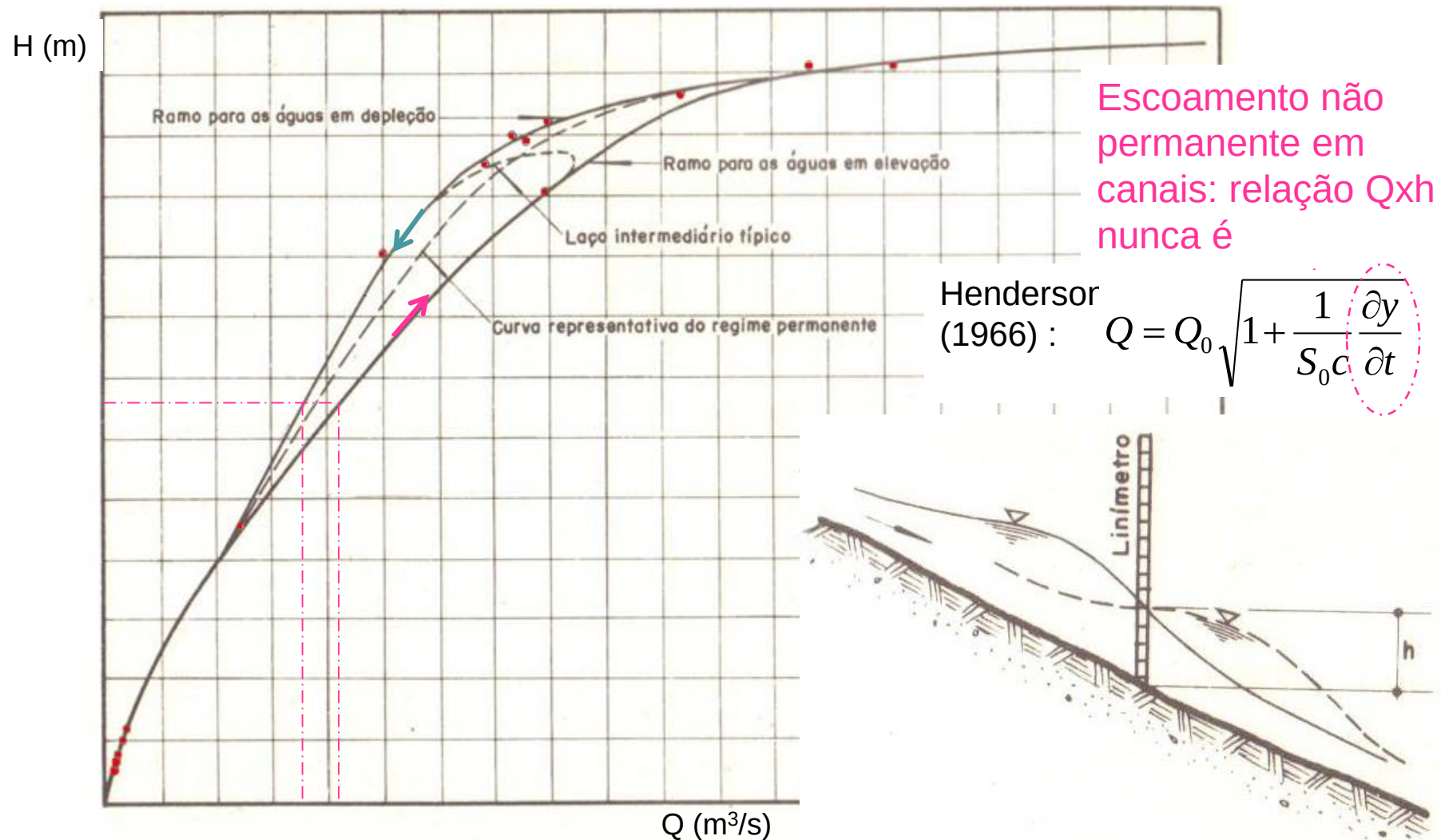


Figura 10-7. Representação de uma curva de descarga em laço

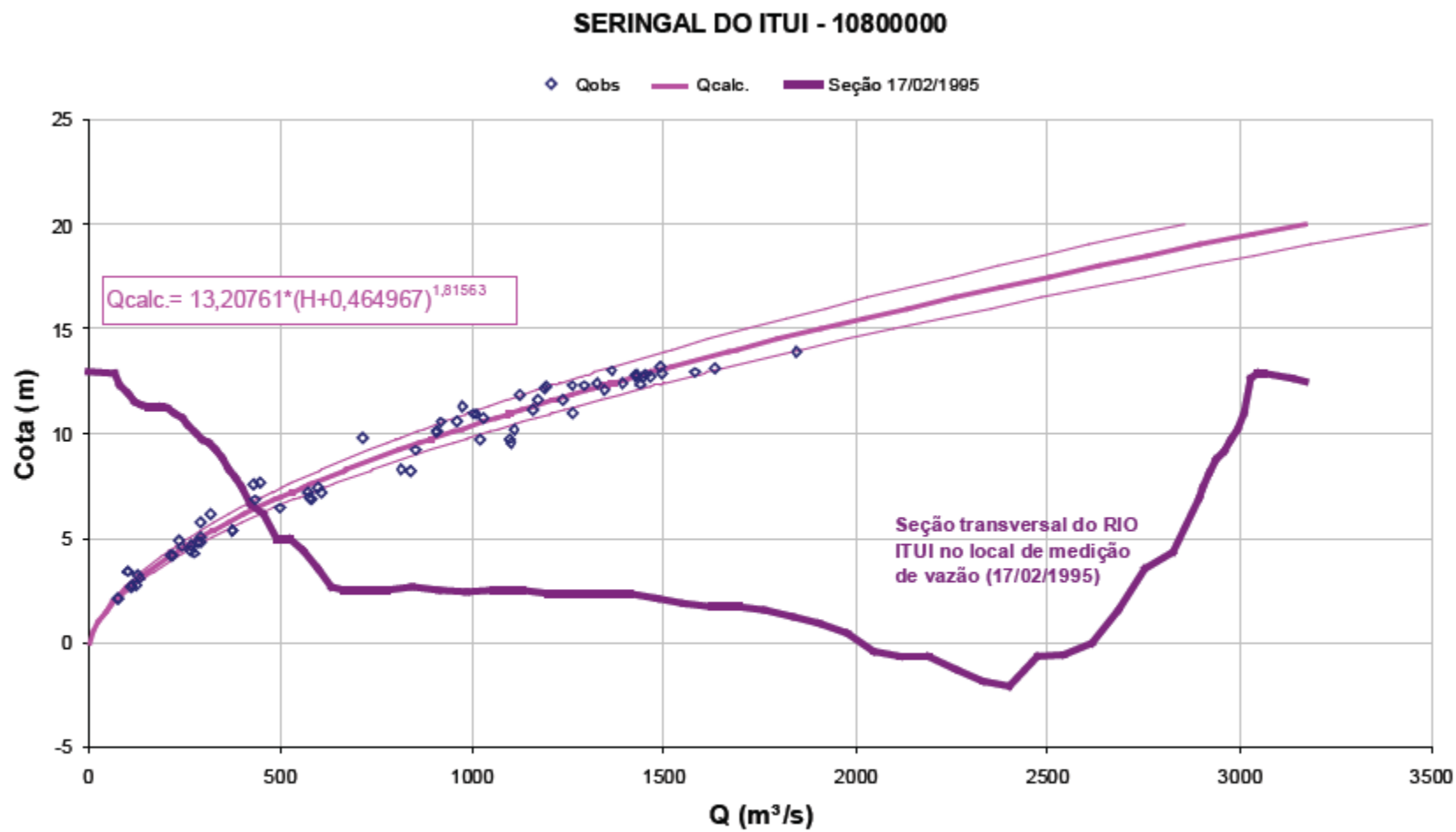


Figura 27
Curva de descarga de controle único

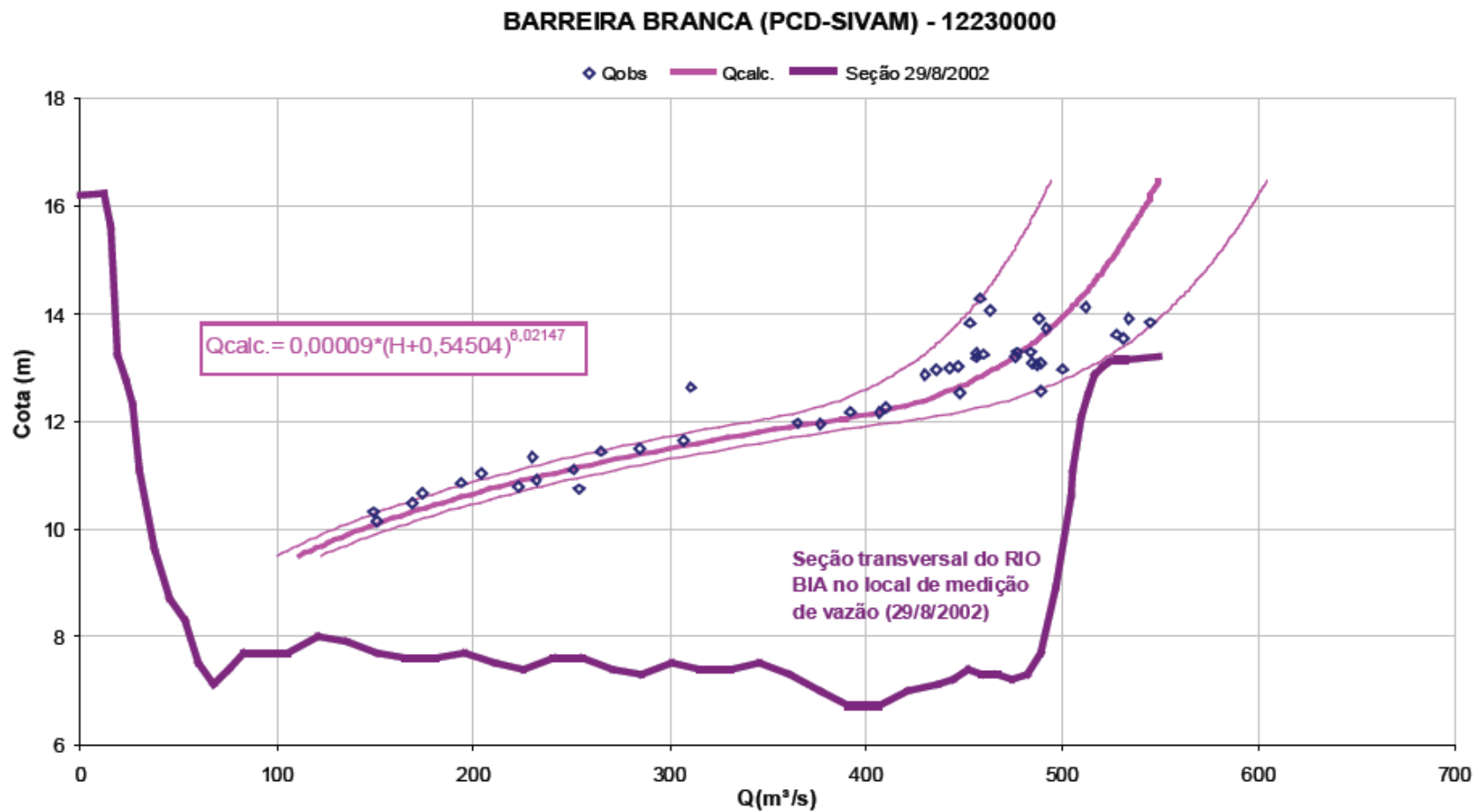


Figura 28

Curva de descarga com mudança de controle.

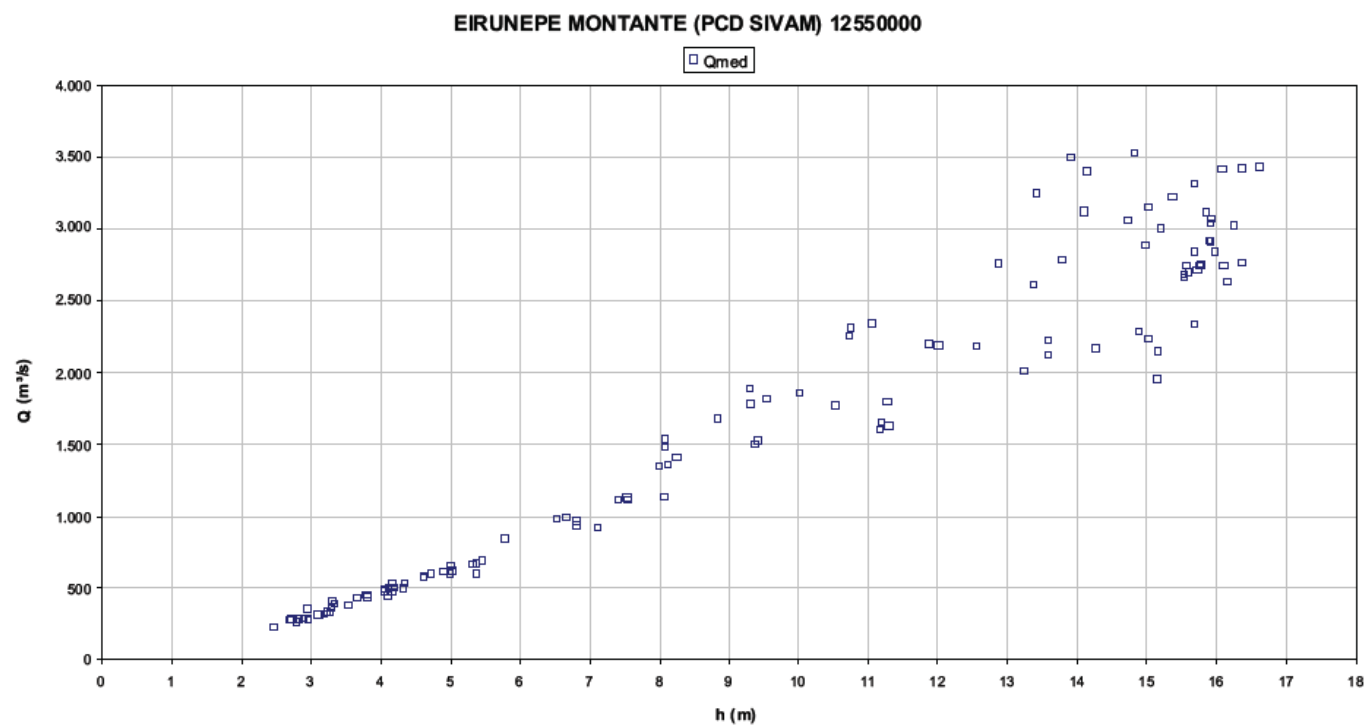
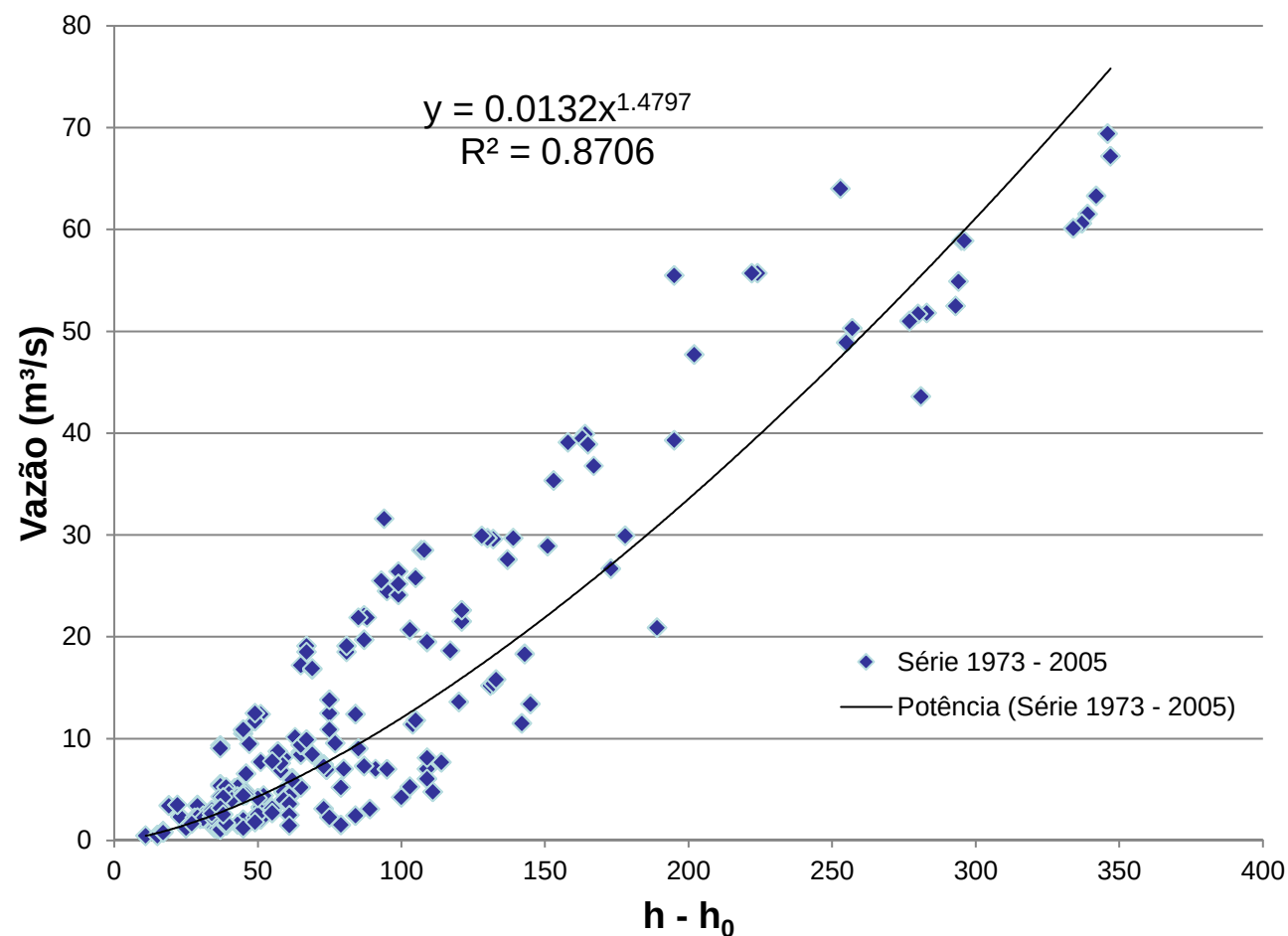


Figura 29
Medições de descarga indicando curva de descarga em laço.

**Estação: PONTE BR-277**

Estação:
65009000
Rio Iguaçu
(São José dos
Pinhais)
 $A = 625,53 \text{ km}^2$

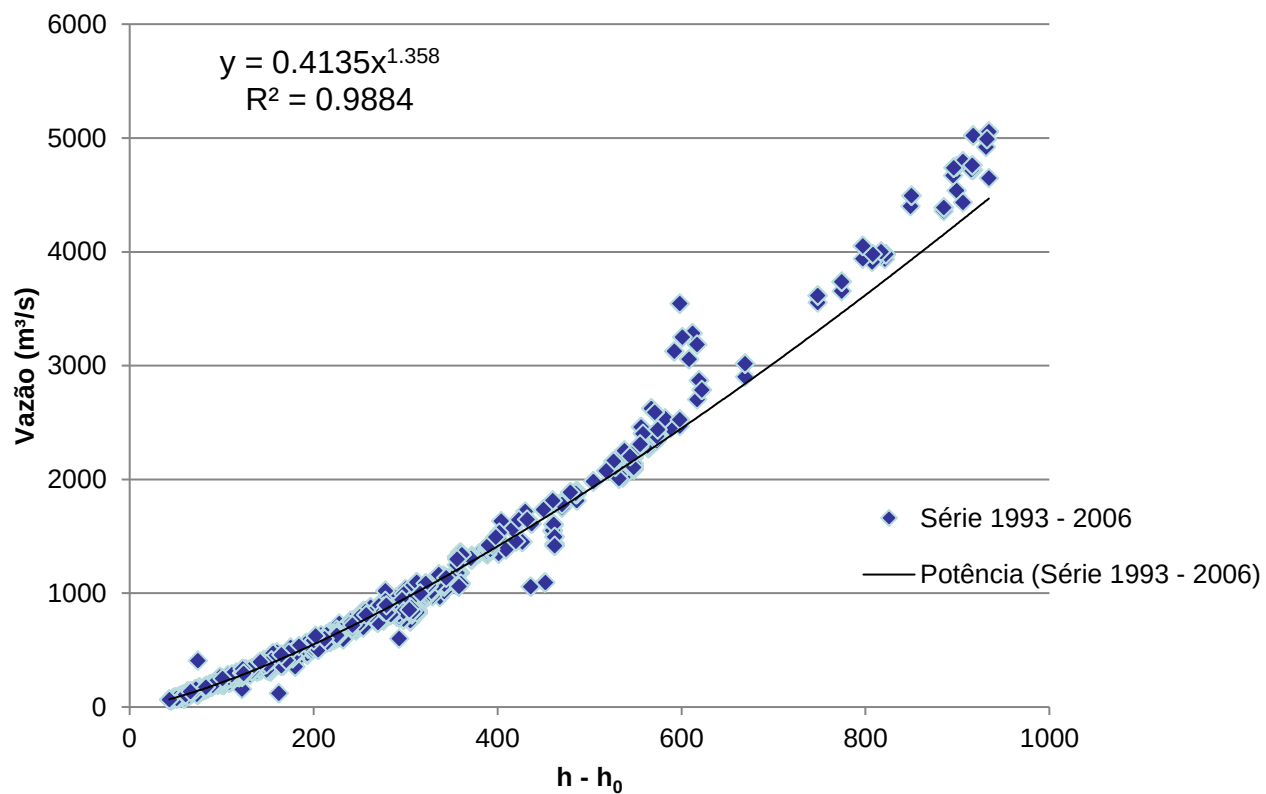
Número amostral:
 $n = 558$

$h_0 = 35$

Fonte dos dados:
Hidroweb - ANA



Estação: União da Vitória

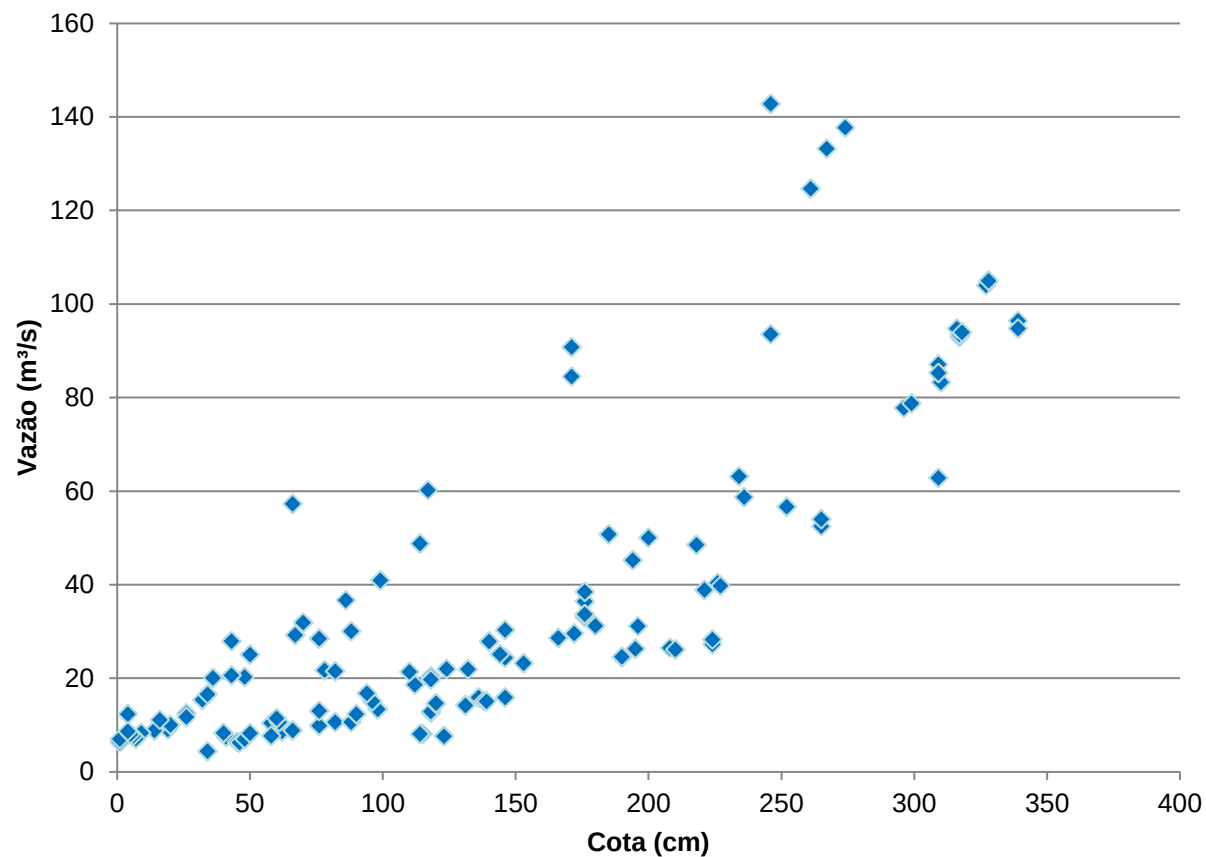


Estação:
65310000
Rio Iguaçu
(União da Vitória)
A = 24211 km²

Número amostral:
n = 2286

$h_0 = 96$

Fonte dos dados:
Hidroweb - ANA

**Estação: PONTE UMBARAZINHO**

Estação:
65017006
Rio Iguaçu
(São José dos
Pinhais)
 $A = 1330 \text{ km}^2$

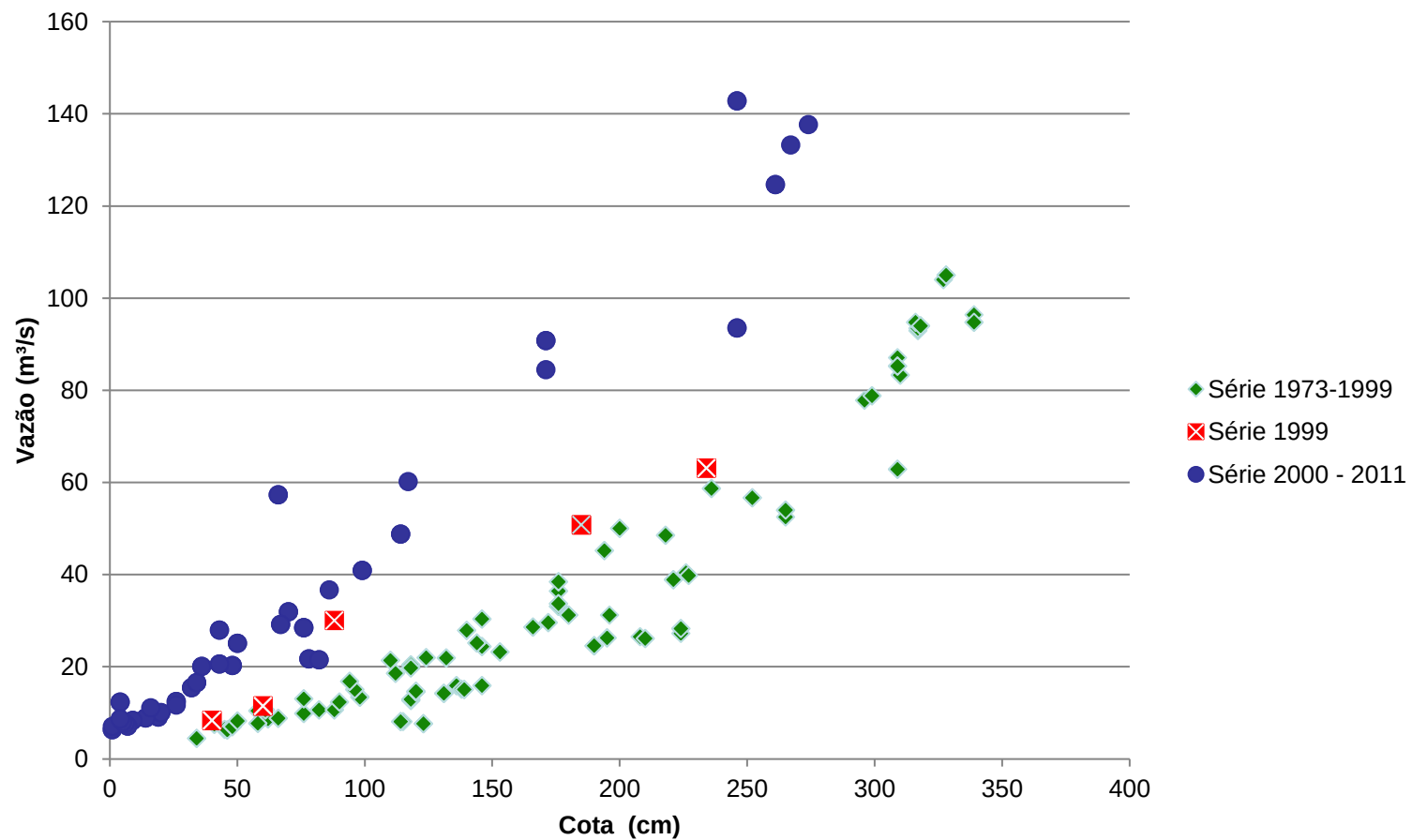
◆ Série 1973 - 2011

Número amostral:
 $n = 224$

Fonte dos dados:
Hidroweb - ANA

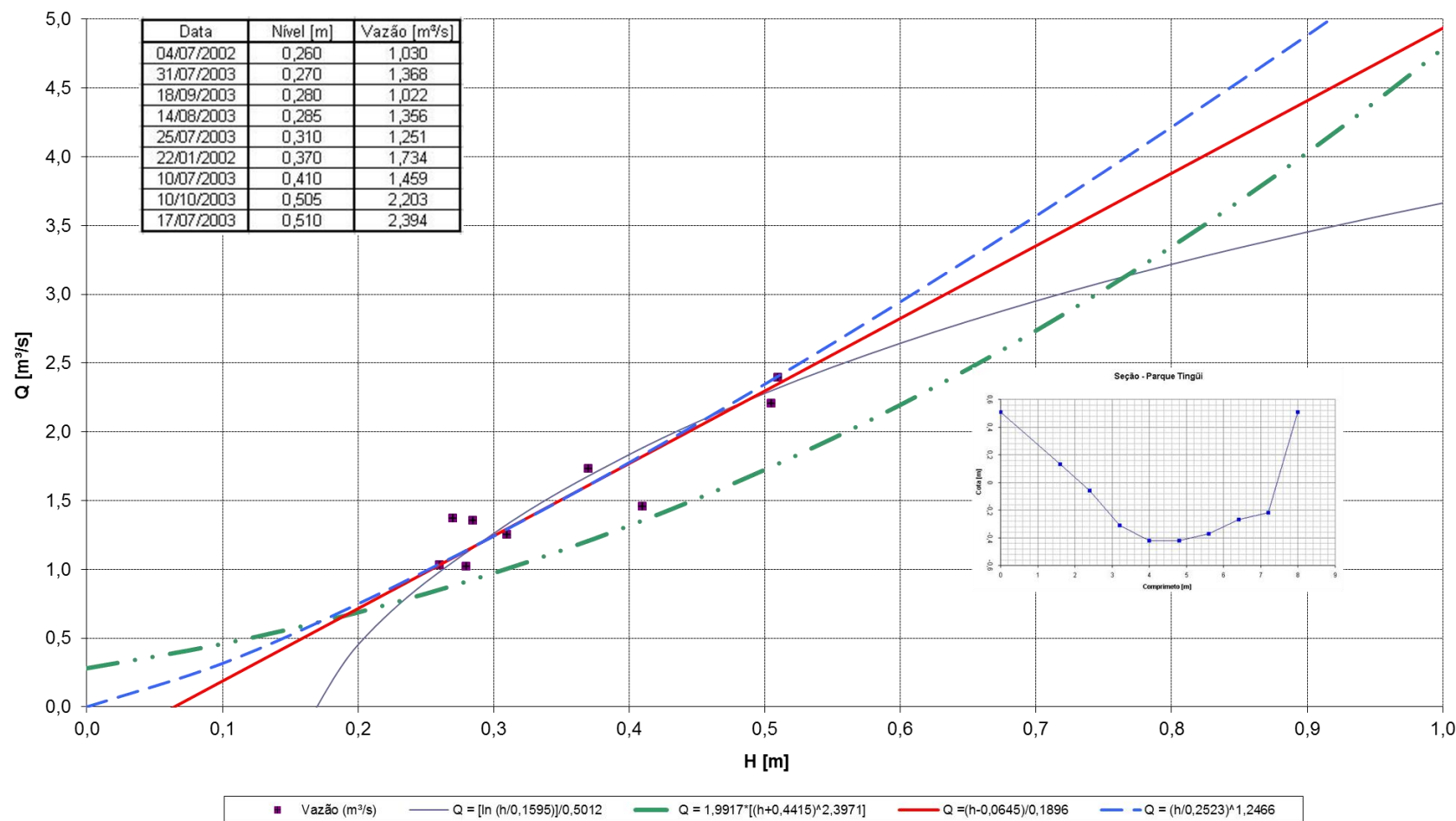


Estação: PONTE UMBARAZINHO





Curvas Chave - Tingüi



LOCAL

- Leitos bem definidos
- Seções transversais constantes
- Declividade forte > 1°/∞

ANÁLISE

Controle, condições do canal, influência de alterações artificiais (reservatórios a montante), modificações no leito do rio (dragagens, retificações), existência de pontes ou bueiros, etc

MEDIÇÃO

- Leituras de nível continuamente
 - Medições de vazão discretas
- Dispõe-se geralmente de poucas medidas em leituras altas, quando ocorrem as cheias.

TRAÇADO

- Plotar os pares (convenção de cores por ano)
- Análise de consistência dos dados
- Ajuste da curva aos dados
- Extrapolação

Ver material da Prof. Miriam e demais no site

Traçado e extrapolação das curvas de descarga unívocas

- Definir uma curva contínua e monotonicamente crescente que se ajuste melhor ao conjunto dos pontos medidos
 - Plotar dados em um gráfico de grandes dimensões (50x100cm), escalas di-log, identificando o período dos dados (legenda diferente para cada ano)
 - Ajuste intuitivo, em geral com concavidade voltada para cima (escala aritmética) e para baixo (escala logarítmica)
 - ** Ajuste pelo método dos mínimos quadrados a uma equação do tipo:
$$Q = k (H - H_0)^n \quad \text{ou} \quad Q = aH^2 + bH - c$$

Onde: Q – vazão
H – cota do nível da água correspondente a vazão Q
H₀ - cota do nível da água correspondente a vazão nula
k, n, a, b, c – parâmetros constantes do local
- Extrapolar a curva em ambos extremos (inferior e superior)
 - Mais usado no Brasil:
 - Extrapolação inferior: Método de Stevens (baseia-se na expressão de Chézy – escoamento permanente em canais)
 - Extrapolação superior: Extrapolação Logarítmica

Aplicável em rios com seção transversal regular e com um único controle.

- Plotar os pares medidos (Q, H) em papel di-log
- Ajustar o trecho a extrapolar a partir da equação da reta:

$$\text{Log}(Q) = \log(k) + n \log(H-H_0)$$

Se constatar graficamente um alinhamento dos pontos $\rightarrow H_0=0$

Se o conjunto de pontos de medição apresentar uma curvatura $\rightarrow$ Buscar valor de H_0 que retifica a curva (por tentativa)

Se a convexidade da curva for orientada para as vazões $\rightarrow H_0>0$

Ao contrário $\rightarrow H_0<0$

Aplicação adequada em rios largos, onde o raio hidráulico pode ser considerado igual à profundidade média do escoamento.

O método apresenta:
a fórmula de Chézy separada nos fatores geométrico e de declividade:

$$Q = c.A.R_H^{1/2}.I^{1/2}$$

$$\underbrace{Q.A^{-1}.R_H^{-1/2}}_{\text{Fatores geométricos}} = \underbrace{c.I^{1/2}}_{\text{Fator de declividade}}$$

Nos limites da aplicação da fórmula de Chézy, os dois termos da equação variam muito pouco, podendo ser considerados constantes.

Então:

$Q = f(A.R_H^{1/2})$ pode ser representada por uma **reta que passa pela origem**.

$$Q = \alpha (A.R_H^{1/2})$$

Essa reta, traçada a partir das medições disponíveis, pode ser prolongada até o valor do fator geométrico correspondente à cota máxima observada

Exercício

A seção de um rio apresenta as características geométricas na Tabela 1. E na Tabela 2 são dadas as medições diretas efetuadas entre $h=0,5\text{m}$ e $h=2,0\text{m}$, o que permitiu definir uma curva-chave. Extrapolar a curva pelo método de Stevens. Quais as vazões que corresponderiam para $h=3\text{m}$ e 4m ?

Tabela 1 – Características geométricas da seção transversal

h (m)	Área (m^2)	Perímetro P_m (m)
0	0	0
1	105	106
2	215	110
3	330	120
4	460	128

Tabela 2 – Medições de vazão

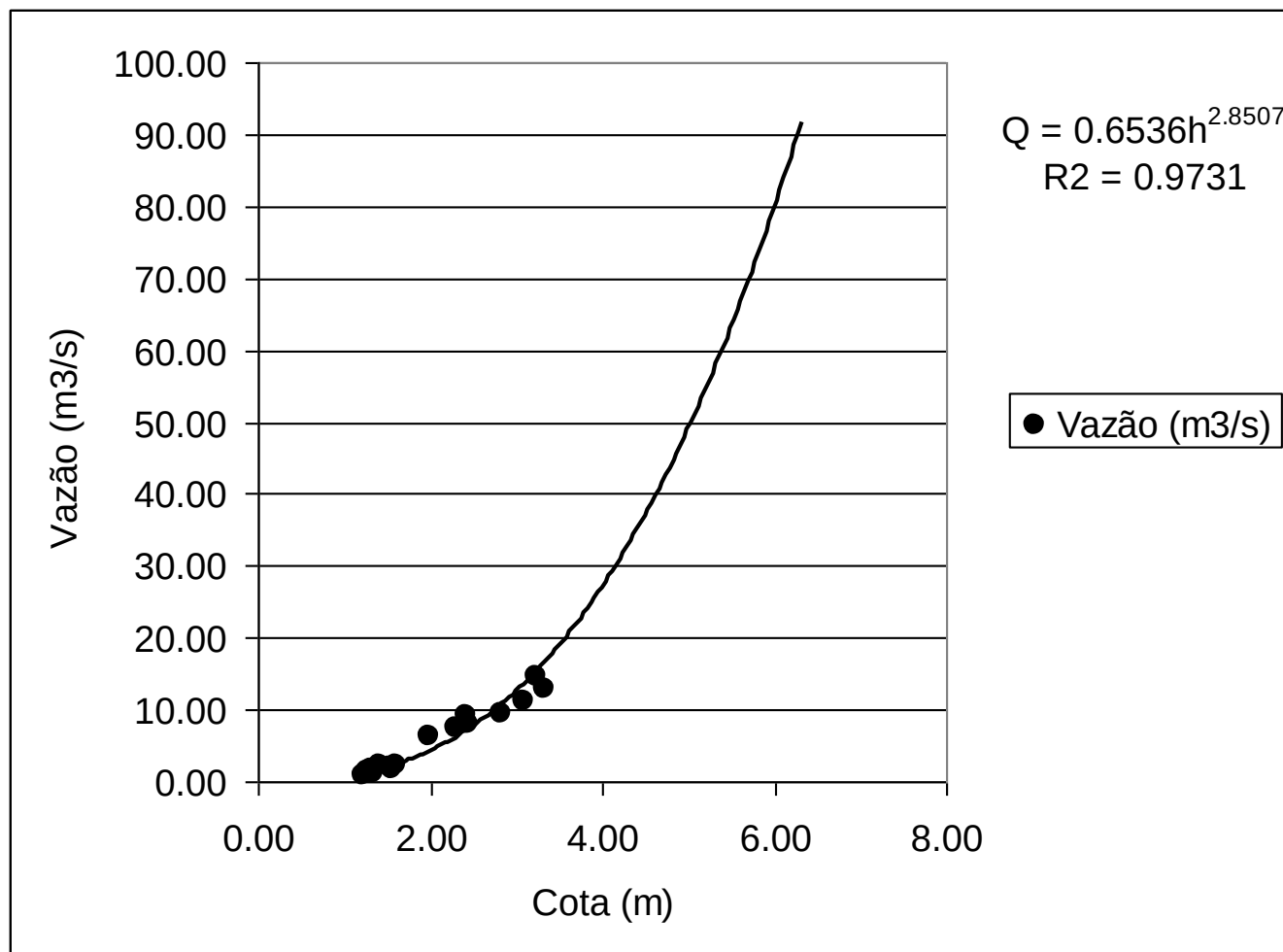
h (m)	Q (m^3/s)
0,5	35
1,0	80
1,5	130
2,0	200

Exercício

Cota (m)	Vazão (m3/s)
1.98	3.11
1.28	0.37
1.33	0.63
2.41	6.12
2.82	6.28
1.55	0.93
5.21	42.18
3.23	15.58
1.60	1.08
1.42	1.00
4.10	22.80
3.32	10.32
1.54	1.10
1.32	0.38
1.22	0.22
2.45	6.60
4.99	32.91
2.07	2.63
1.91	3.40
1.39	0.87
1.32	0.41
1.70	2.16
4.43	30.77
5.56	34.31
1.30	0.45
2.87	6.20
1.87	2.33
2.09	3.46
2.20	2.85
1.40	0.84
1.81	2.87

- Durante 3 anos foram realizadas medições de vazão em um pequeno arroio, com os resultados resumidos na tabela abaixo. Defina uma curva chave do tipo $Q = a(h-h_0)^b$ ou do tipo $Q = a + bh + ch^2$ para estes dados.
- Qual é a vazão que corresponde a $h = 4$ m ?

Fonte: IPH/UFRGS – Disciplina IPH 01027



Um relatório técnico é apresentado a você com a seguinte curva chave do rio das Lontras, no planalto do RS, num local em que a área da bacia é de 2500 km². Critique a curva-chave.

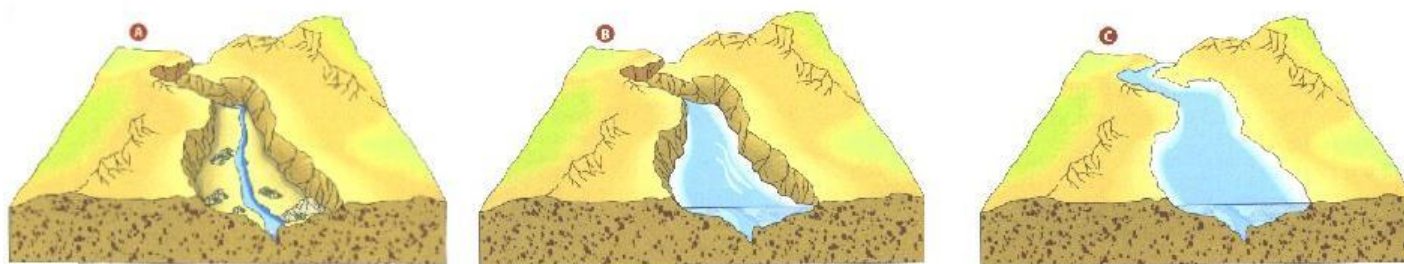
Questionário

- Ler Prof. Miriam; Eletrobras (2000) p.38-40; 46-47 e ANA (2009) cap.4, p. 35-37
- **Questionário:**
 1. O que é uma estação fluviométrica?
 2. O que é uma curva-chave (também chamada de curva de descarga líquida)? Quais características do local estão representadas nesse gráfico?
 3. Cite alguns exemplos da importância das medições fluviométricas e da construção da curva-chave.
 4. Explique a curva-chave unívoca e em laço. A curva-chave pode apresentar pontos de inflexão? Quando?
 5. Itemize em no máximo 5 etapas para o traçado da curva-chave, com descrição sucinta das mesmas.
 6. O que significa „extrapolar“? Por que é uma etapa importante a extrapolação da curva-chave? Quais os métodos mais usados para extrapolar uma curva-chave?
 7. Existe a curva de descarga de „controle único“ e com „controle variável“. Explique o que é controle, controle único e controle variável.
 8. Critique a curva-chave do slide 55

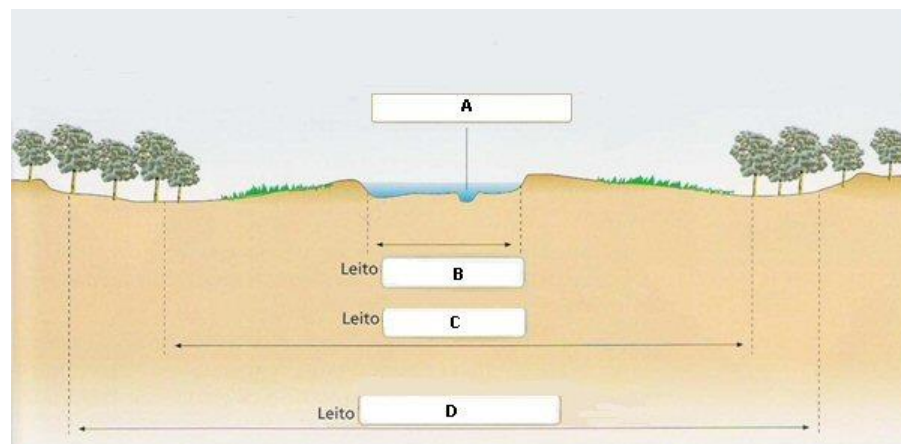
Referências bibliográficas

- [Ref.1] Santos et al. Hidrometria Aplicada.
- [Ref.2] Pinto et al. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.
- [Ref.3] N. W. Hudson. 1983. Field measurement of soil erosion and runoff. In:
<http://www.fao.org/docrep/t0848e/t0848e-09.htm>
- [Ref.4] Eletrobras, 2000. Diretrizes para Estudo e Projetos de PCHs.
- [Ref.5] ANA, 2009. Medição de descarga líquida em grandes rios. Manual técnico.

Leito e planície de inundação

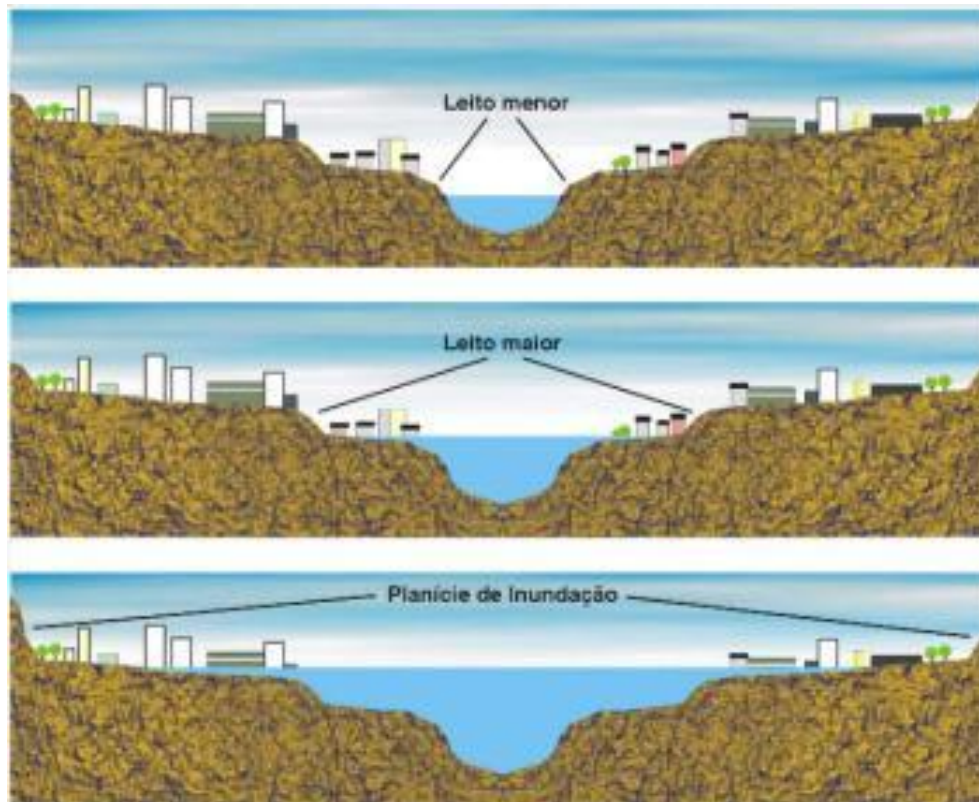


Hidrometri
a
Curva-
chave



Leitos maior e menor – Planície de inundação

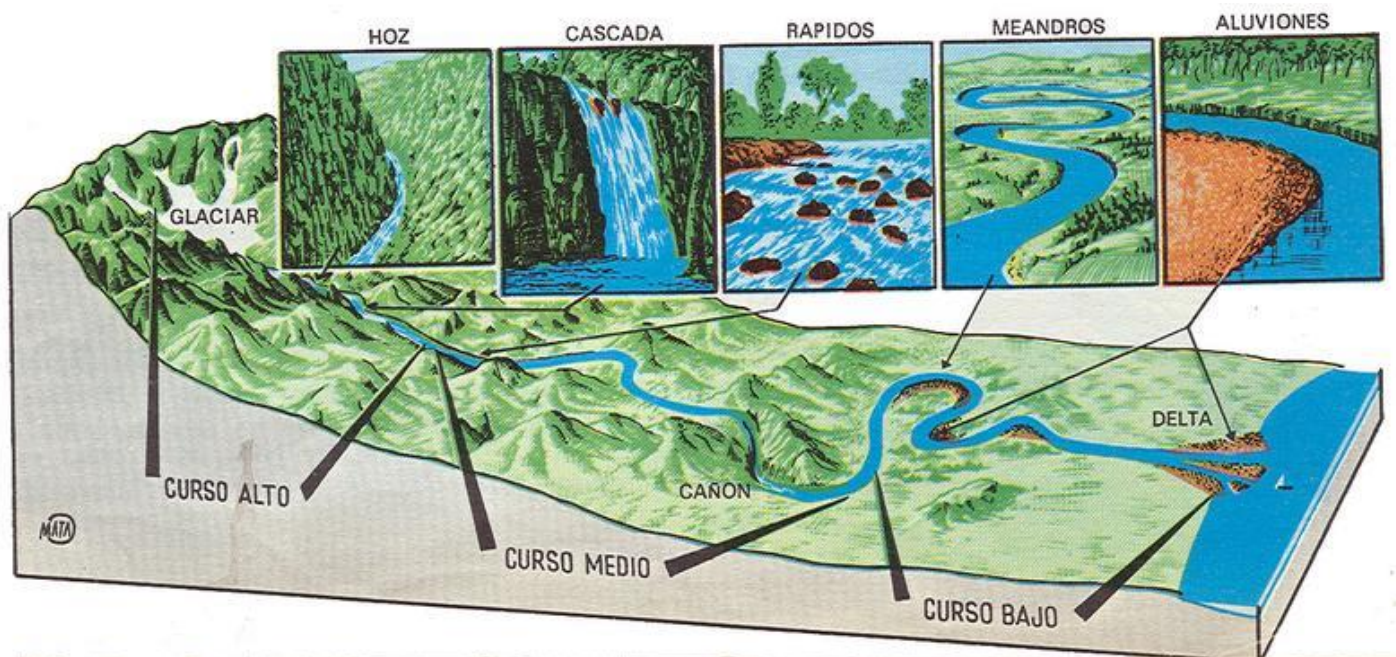
Hidrometri
a
Curva-
chave

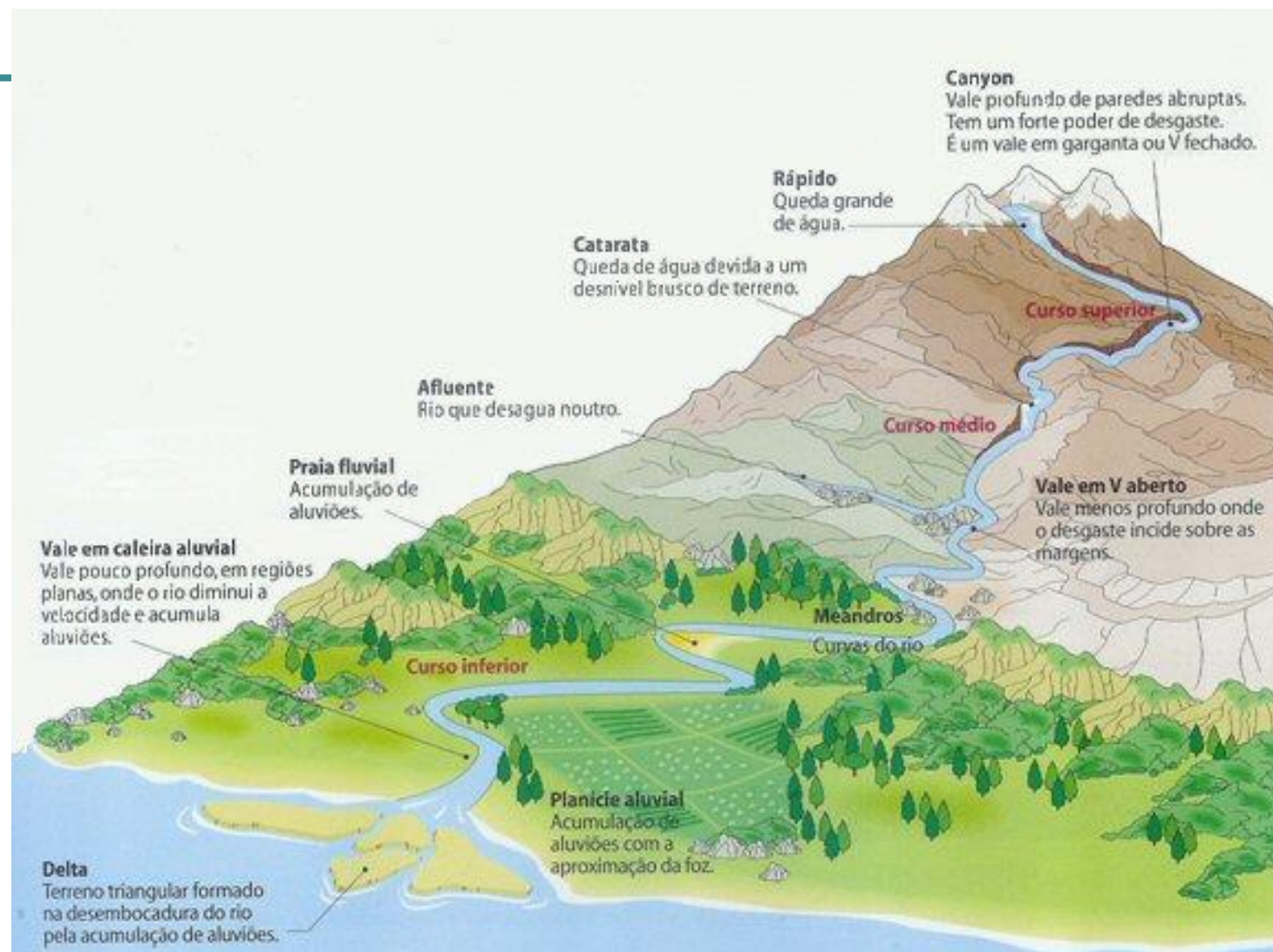


<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAnd4AJ/aula-00-principais-estruturas-hidraulicas?part=2>

Hidrometria
Curva-chave

Erosão,
mudança da
seção





Obras hidráulicas



http://cnpgeb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/CastelodoBode.htm

- CABra - Catchments Attributes for Brazil
 - Bacia que fizeram delimitação
 - Qual ANA-ID?
- Acessem a Hidroweb/ANA – [Acesso](#)
 - Baixar os dados