



**POLITÉCNICA**

# **ESTIMACIÓN DE VARIABLES HIDRÁULICAS. AFORO DE CAUDALES**



**JOSÉ CARLOS ROBREDO SÁNCHEZ**  
*PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD*  
*UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*  
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL*  
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

# Cálculo hidráulico

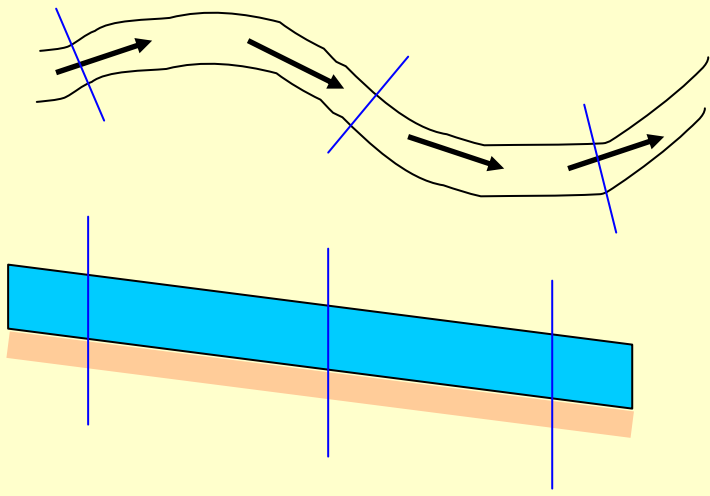
## *Variables a determinar*

- Niveles de agua.
- Velocidades.
- Capacidad de arrastre y transporte.

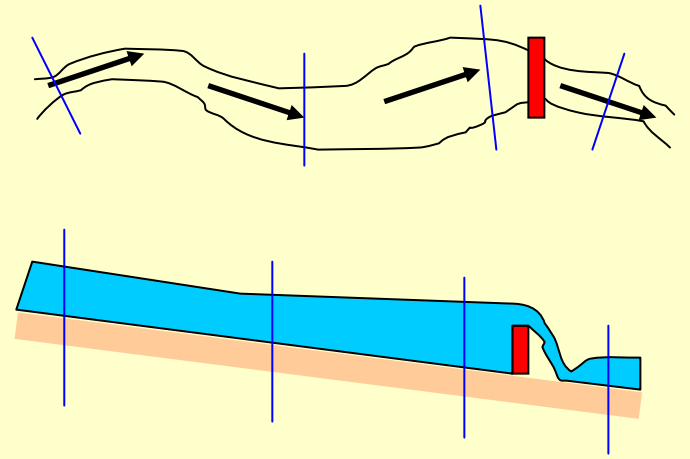
## *Hipótesis de partida*

- Movimiento permanente y uniforme.
- Movimiento permanente no uniforme
- Movimiento variable
- Movimiento bidimensional ...

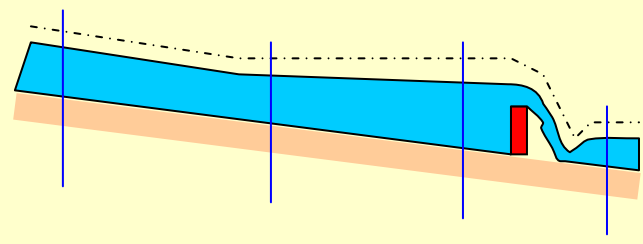
# Movimiento permanente y uniforme



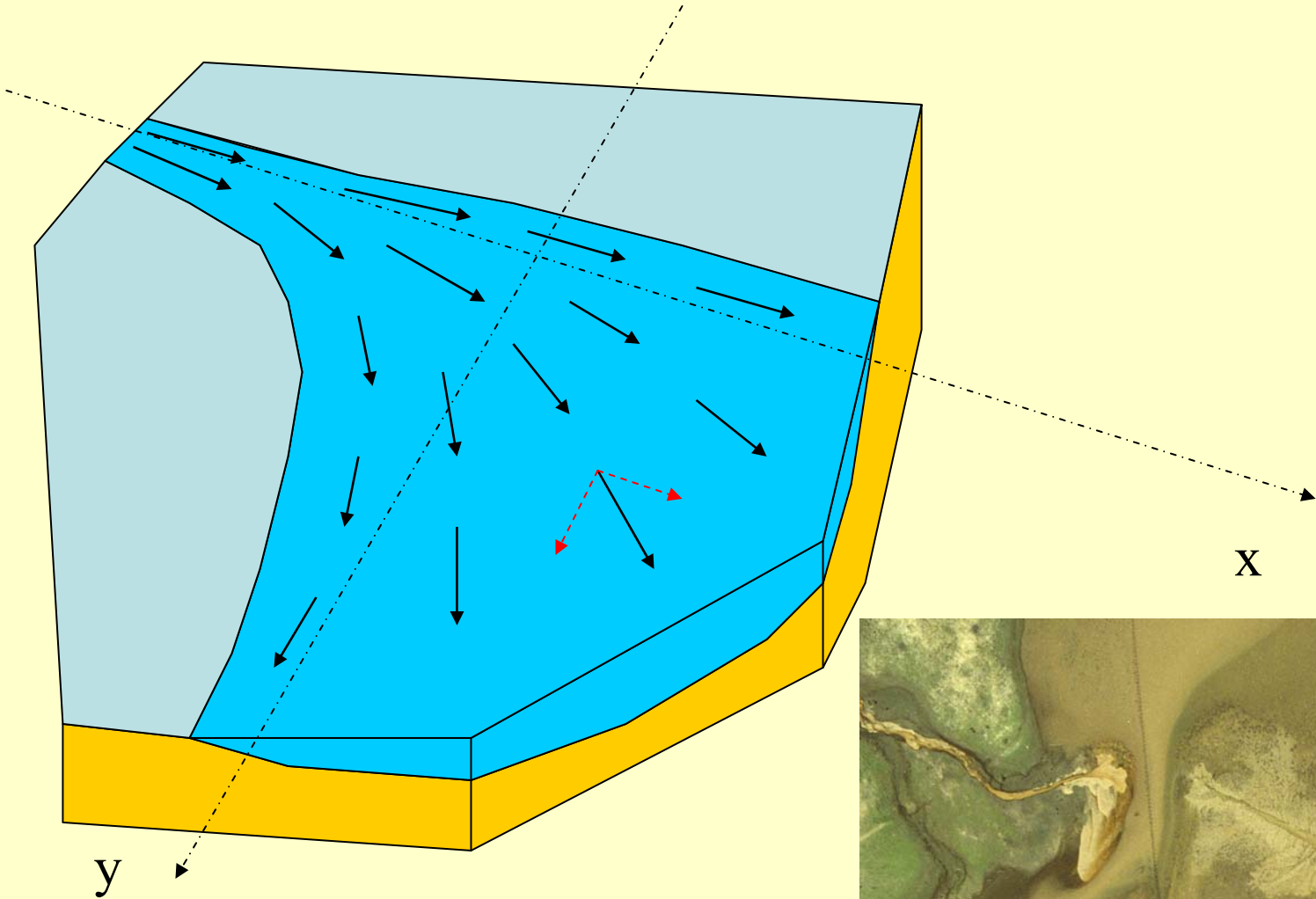
# Movimiento permanente no uniforme



# Movimiento variable

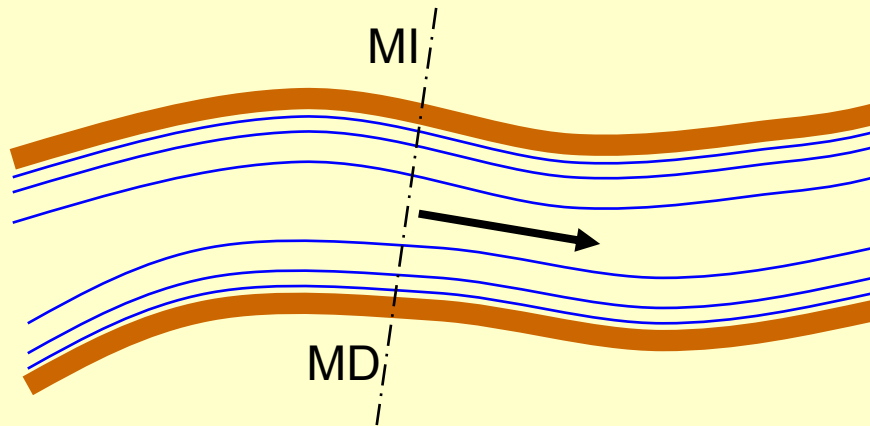


# Movimiento bidimensional



(conos de deyección)

# AFORO MEDIANTE MEDICION DE LA VELOCIDAD Y DE LA SECCION MOJADA

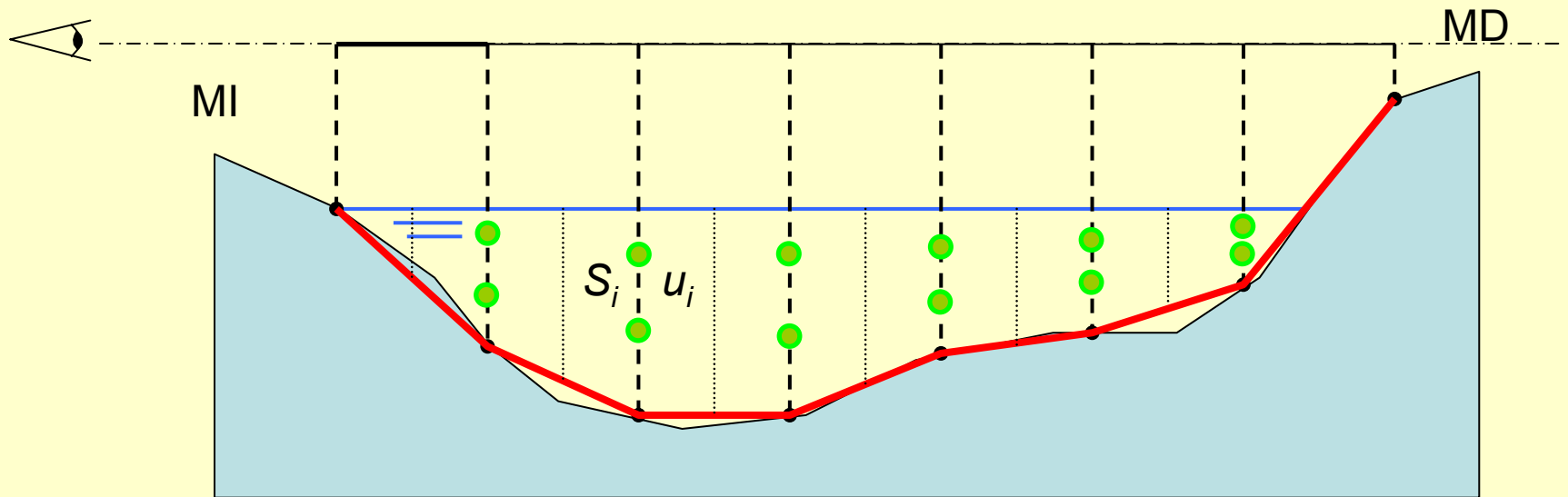


$$\bar{u} = u_{0.6}$$

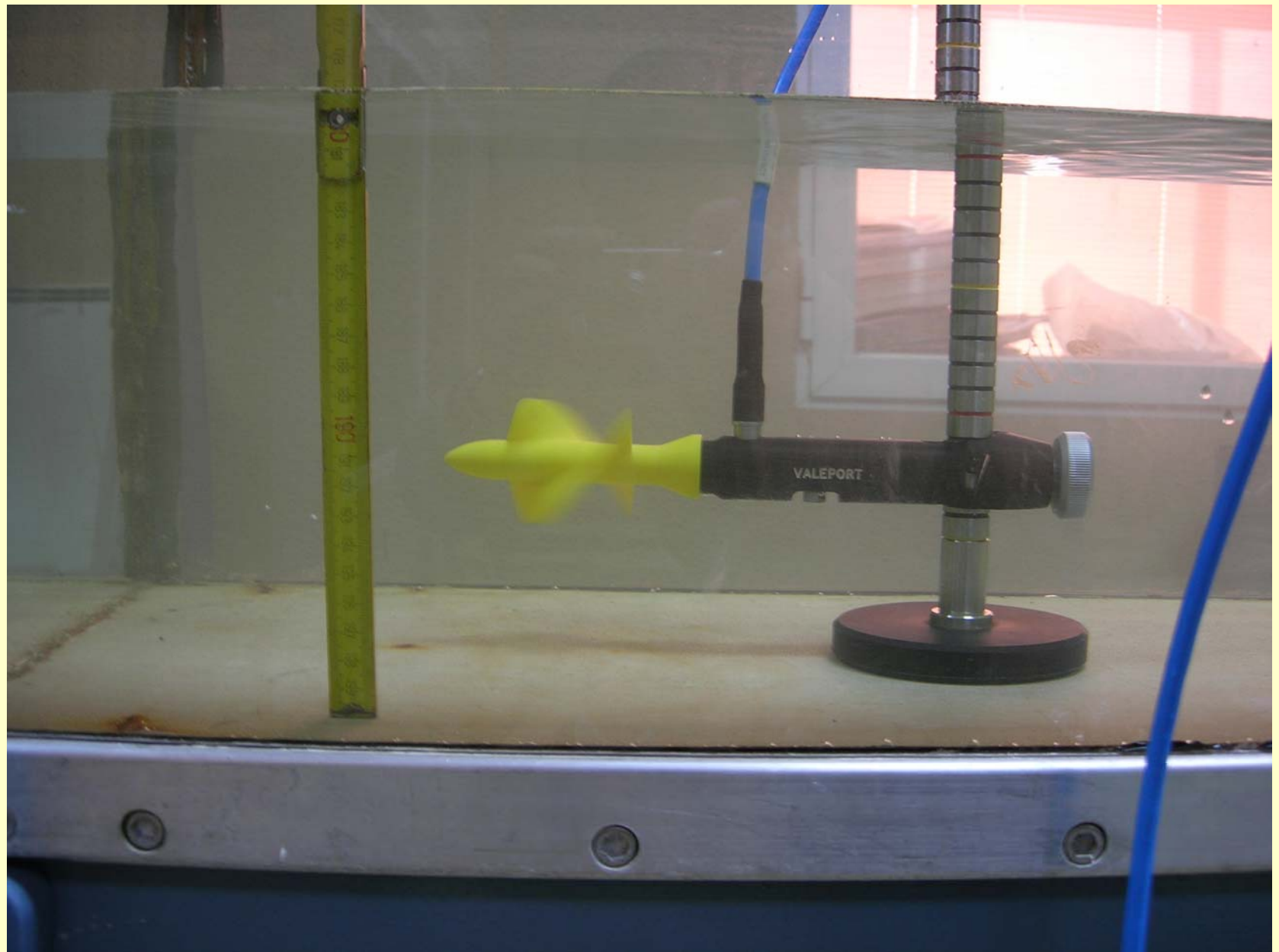
$$\bar{u} = \frac{(u_{0.2} + u_{0.8})}{2}$$

$$\bar{u} = \frac{(u_{0.2} + 2 \cdot u_{0.6} + u_{0.8})}{4}$$

$$\bar{u} = 0.85 \cdot u_{\text{sup.}}$$



$$q = \sum q_i = \sum S_i \cdot \bar{u}_i$$





PULSES

BFM 0012A-LCD  
FLOW METER CONTROL UNIT  
VALEPORT, DARTMOUTH, U.K.  
TEL 44(0)1803 834031 TLX 42669

SECONDS

PULSES

SECONDS

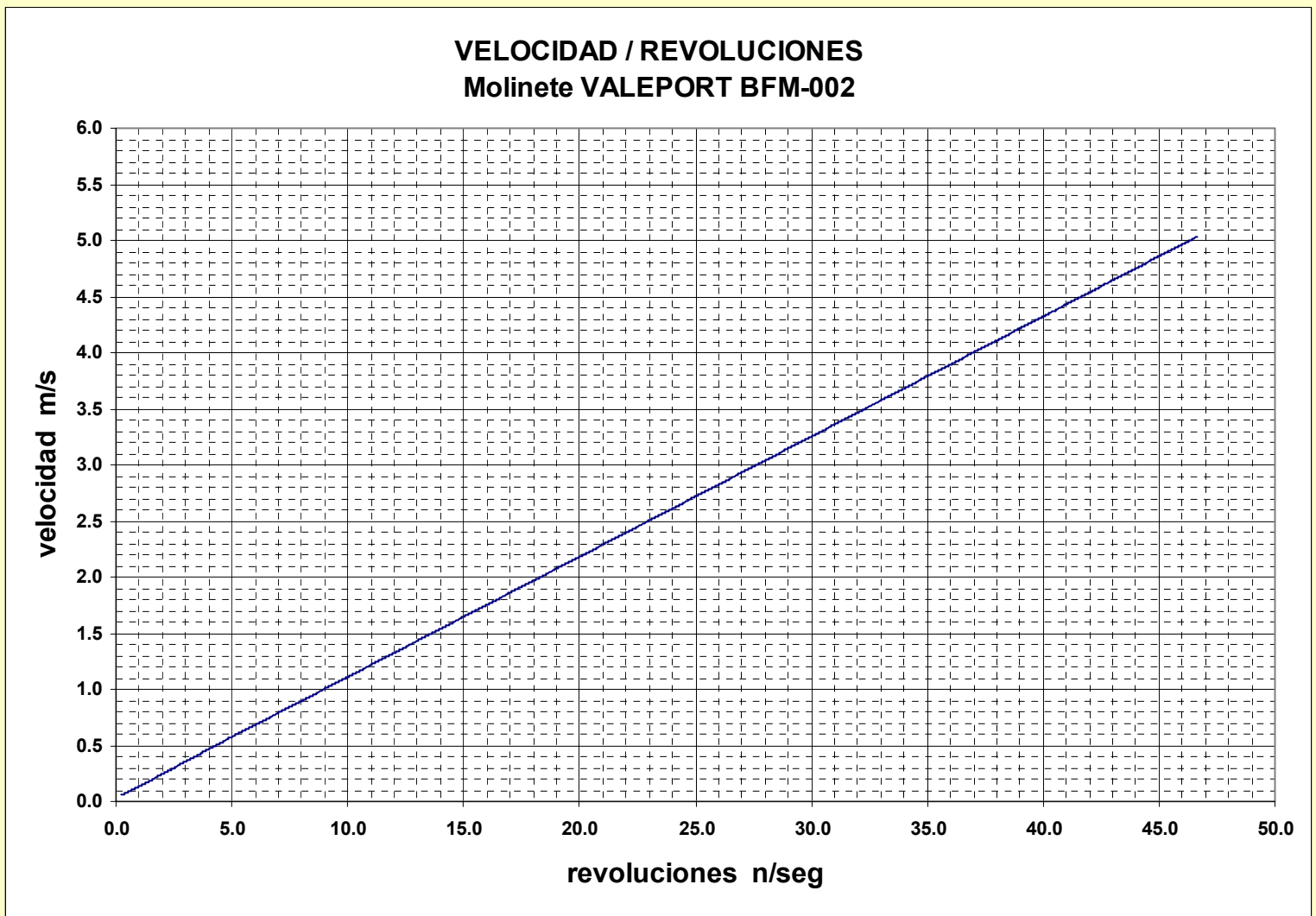
5 10 50 100 200 INF

START

STOP

OFF  
ON

Rev/seg (n)	Velocidad (m/seg)
0.26-0.97	$V = 0.034 + 0.0991 \cdot n$
0.97-4.71	$V = 0.023 + 0.1105 \cdot n$
4.71- (*)	$V = 0.039 + 0.1071 \cdot n$





SECCIÓN

Fecha

Punto de referencia de cotas

Lectura en la mira del pto. ref. (A)

Fórmula Molinete

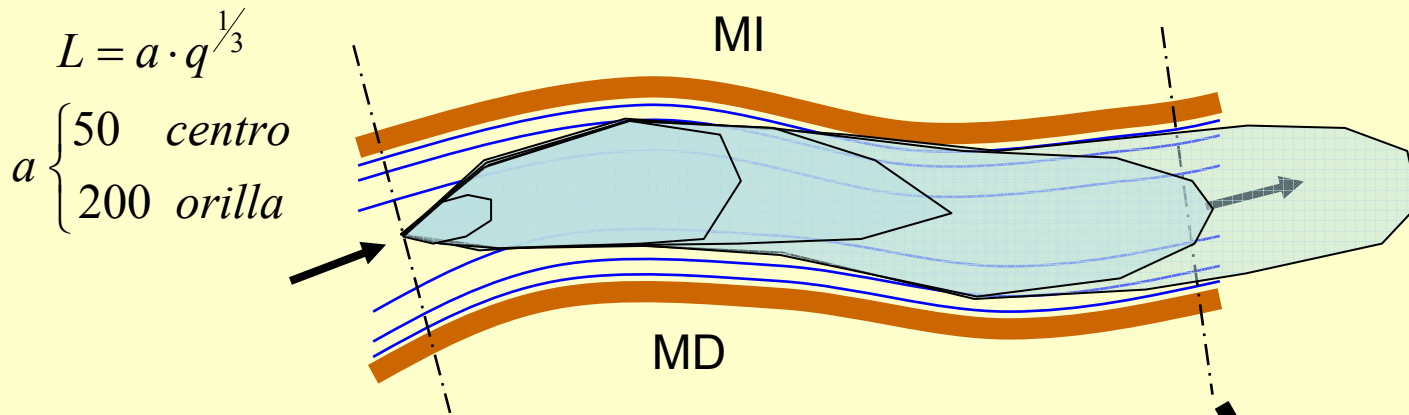

Punto	Distancia	Lectura en la mira (B)	cota (A - B)	Calado	Lecturas de velocidad									Velocidad media (m/s)	Sección (m <sup>2</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
					revoluc.	tiempo	velocidad	revoluc.	tiempo	velocidad	revoluc.	tiempo	velocidad			

CAUDAL  
LECTURA EN LA ESCALA

OBSERVACIONES:



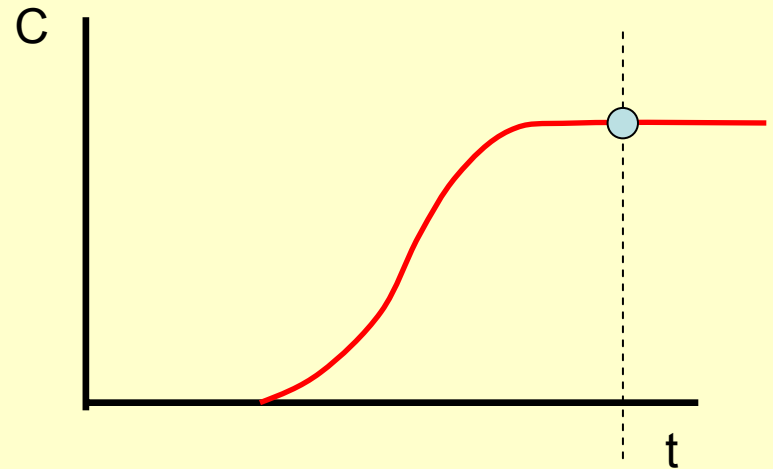
# AFORO MEDIANTE TRAZADORES: INYECCIÓN CONTINUA



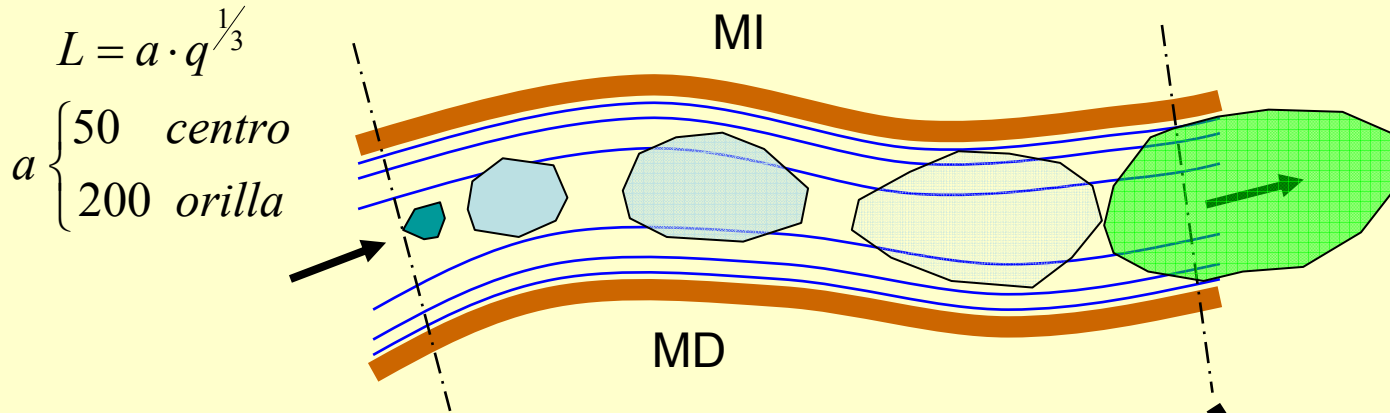
$$q \cdot C_0 + q^* \cdot C_1 = (q + q^*) \cdot C_2$$

$$q = q^* \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_0 - C_2} = q^* \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \approx q^* \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

- $q^*$ , caudal de trazador inyectado  
 $q$ , caudal de cauce  
 $C_1$ , concentración en caudal inyectado  
 $C_2$ , concentración en la sección de medida  
 $C_0$ , concentración natural en el río



# AFORO MEDIANTE TRAZADORES: INTEGRACIÓN



$$P = C_1 \cdot V = \int_0^T C_2(t) \cdot \left( q + \frac{V}{T} \right) \cdot dt$$

$$P = \left( q + \frac{V}{T} \right) \cdot \int_0^T C_2(t) \cdot dt \approx q \cdot \int_0^T C_2(t) \cdot dt$$

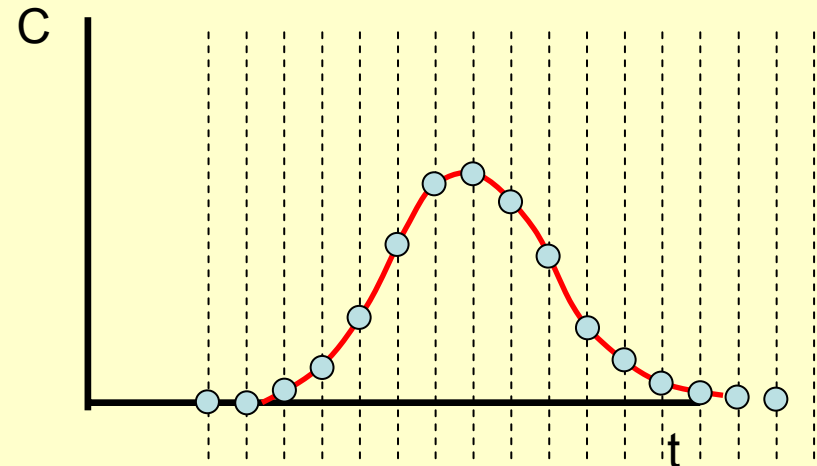
$$q = \frac{P}{\int_0^T C_2(t) \cdot dt} \approx \frac{P}{\sum_1^n (C_{2i} \cdot \Delta t)} = \frac{P}{\Delta t \cdot \sum_1^n C_{2i}}$$

V, volumen de trazador vertido

q, caudal de cauce

$C_1$ , concentración del volumen vertido

$C_2$ , concentración en la sección de medida

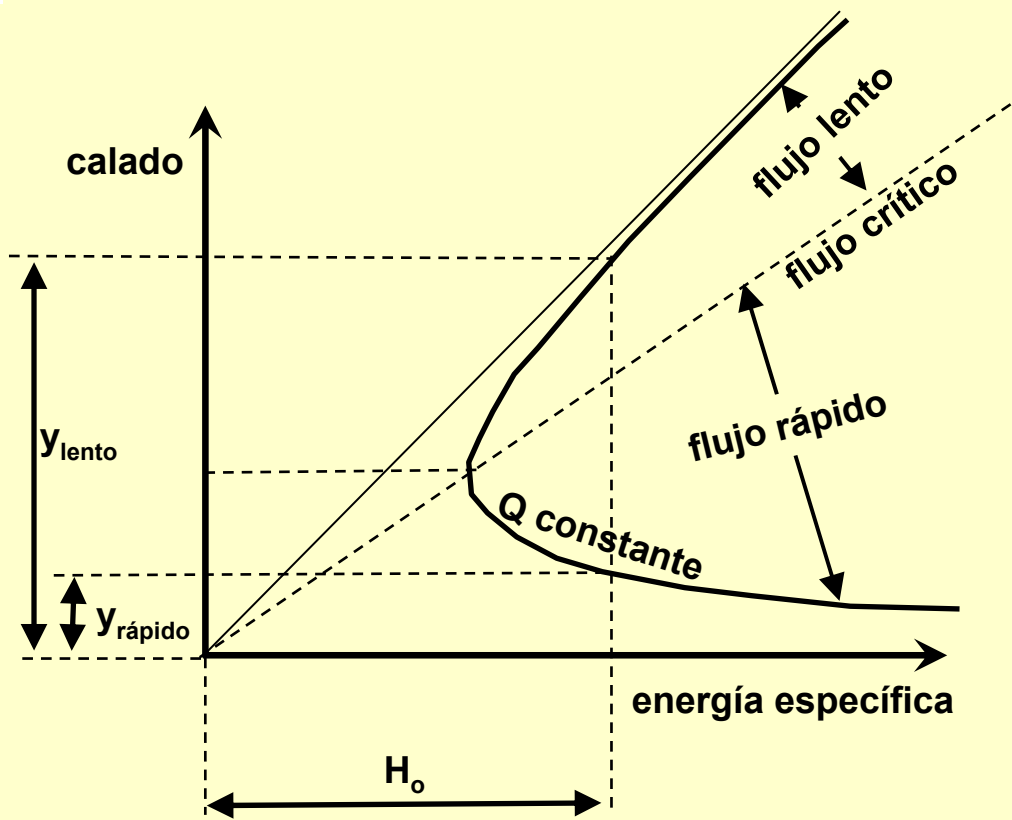


Para la estimación de la velocidad del flujo utilizaremos básicamente la fórmula de Manning:

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot j^{1/2}}{n} \quad ; \quad R = \frac{S}{\chi}$$

$$q = S \cdot v$$

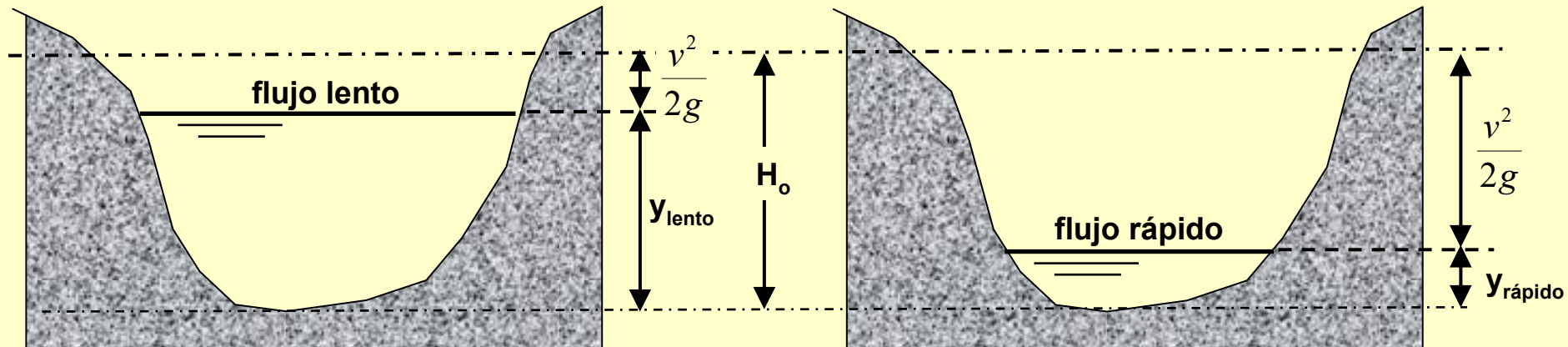
$v$  (m/s) ;  $R$  (m) ;  $j$  (tanto por uno) ;  $S$  (m<sup>2</sup>) ;  $\chi$  (m) ;  $q$  (m<sup>3</sup>/s)



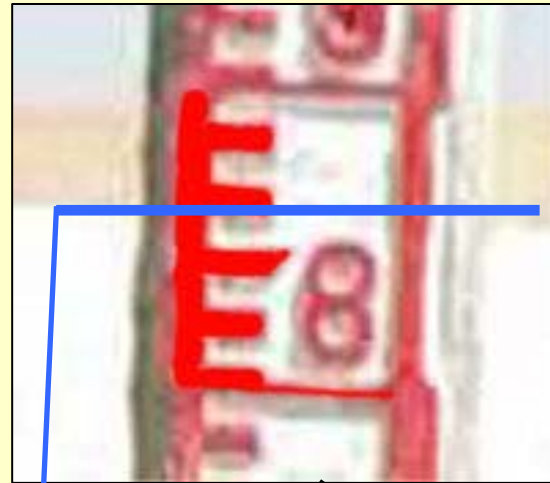
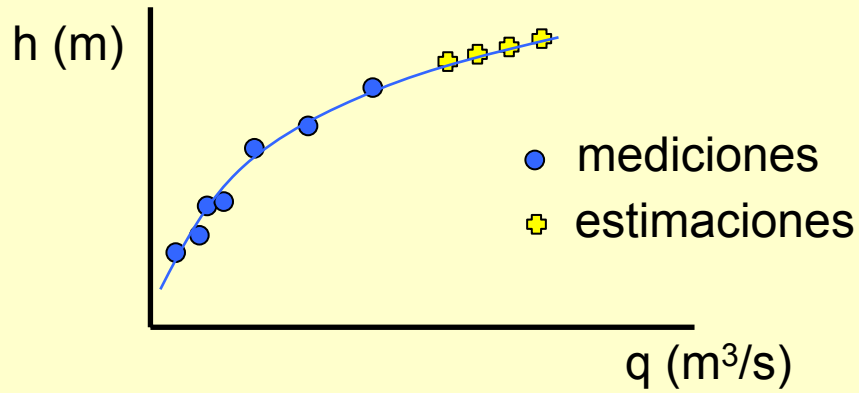
$$F = \frac{u}{\sqrt{g \cdot y}}$$

RÉGIMEN **RÁPIDO** (SUPRACRÍTICO)  
 $F > 1$

RÉGIMEN **LENTO** (SUBCRÍTICO)  
 $F < 1$



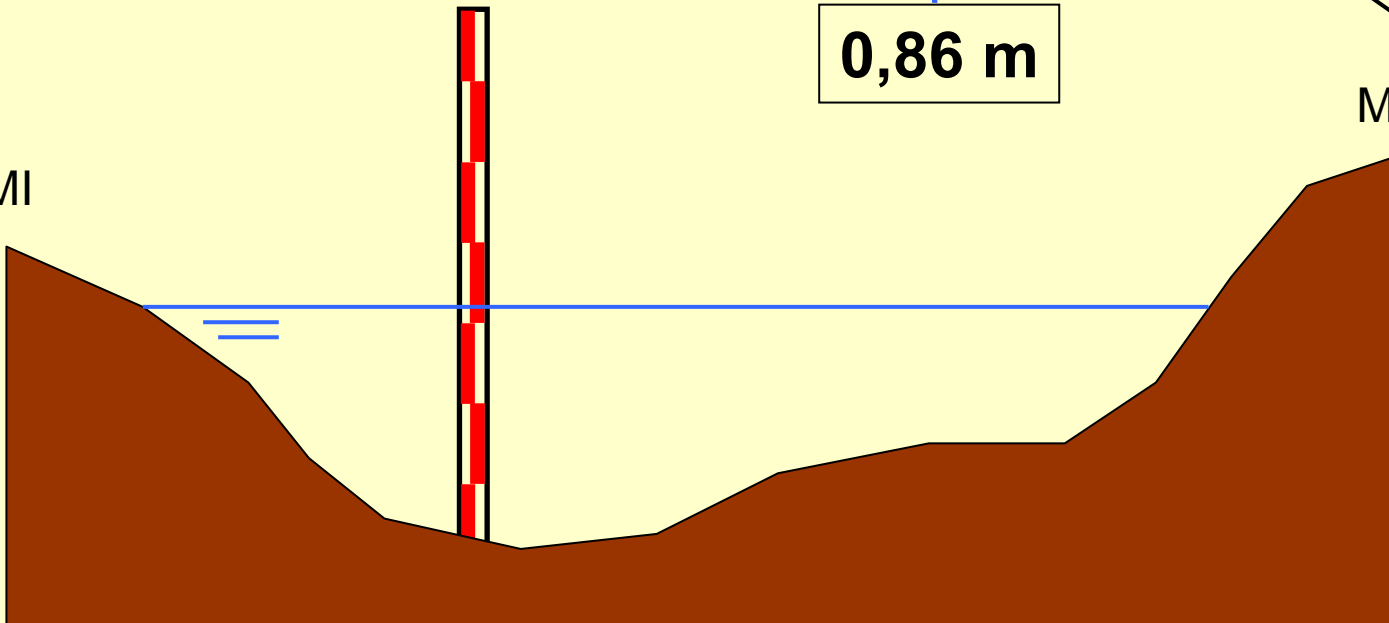
# CURVA DE GASTO

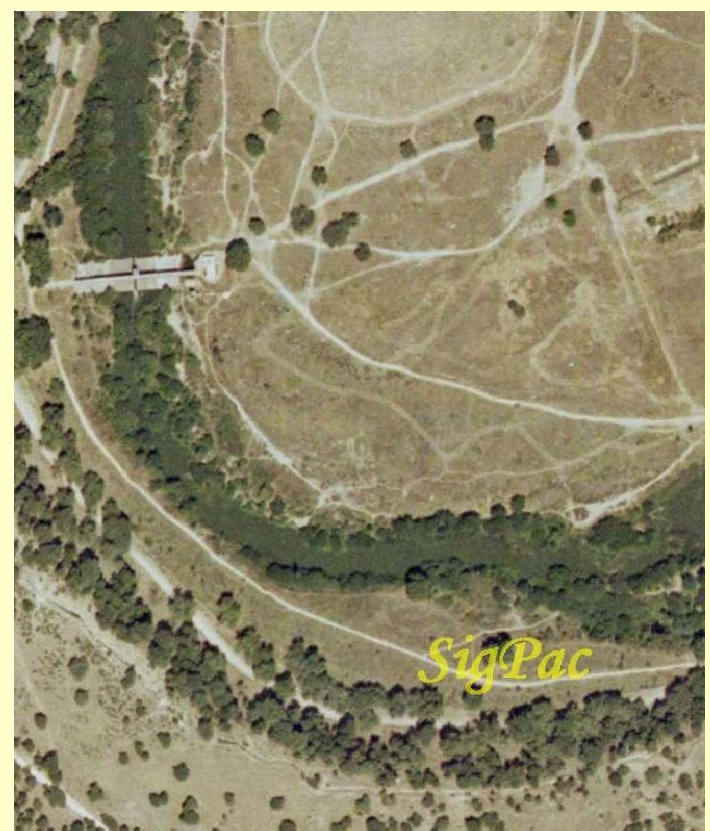


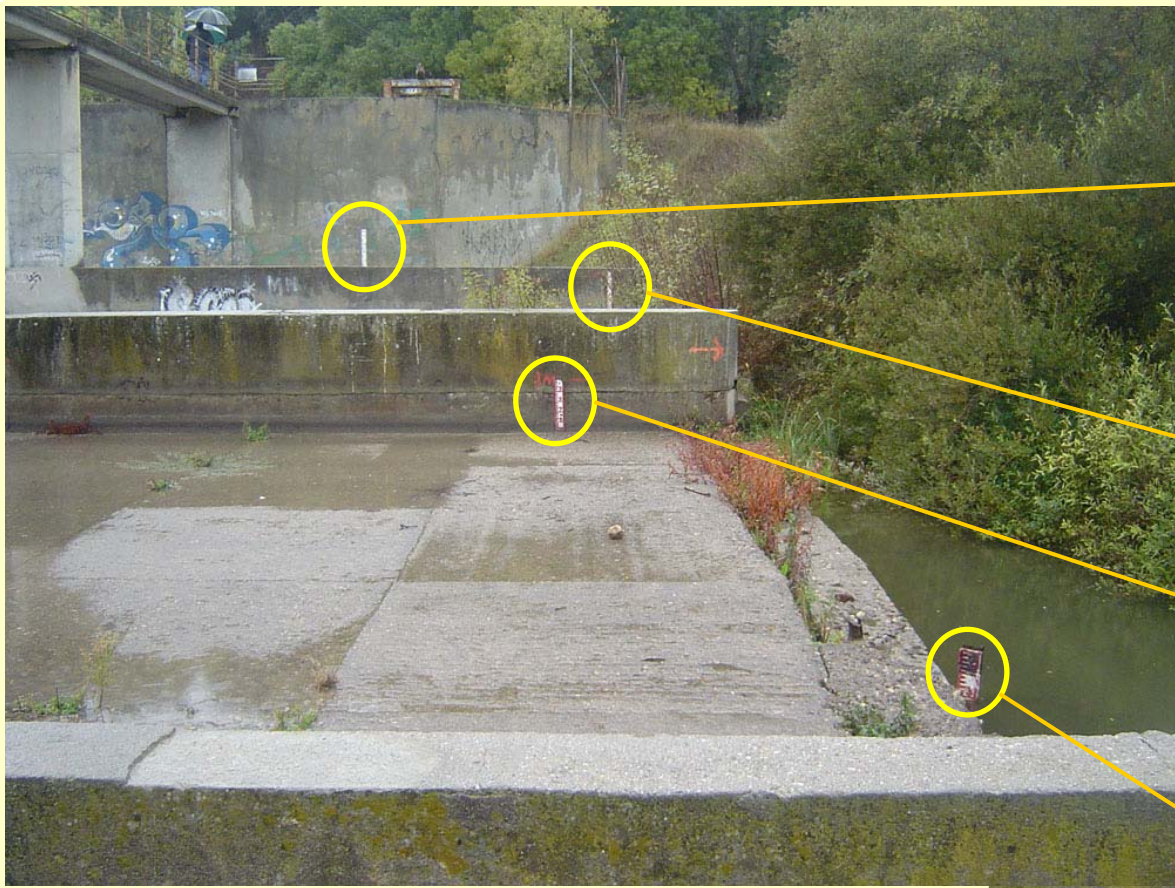
**0,86 m**

MI

MD







3 m



2 m



1 m



0.5 m



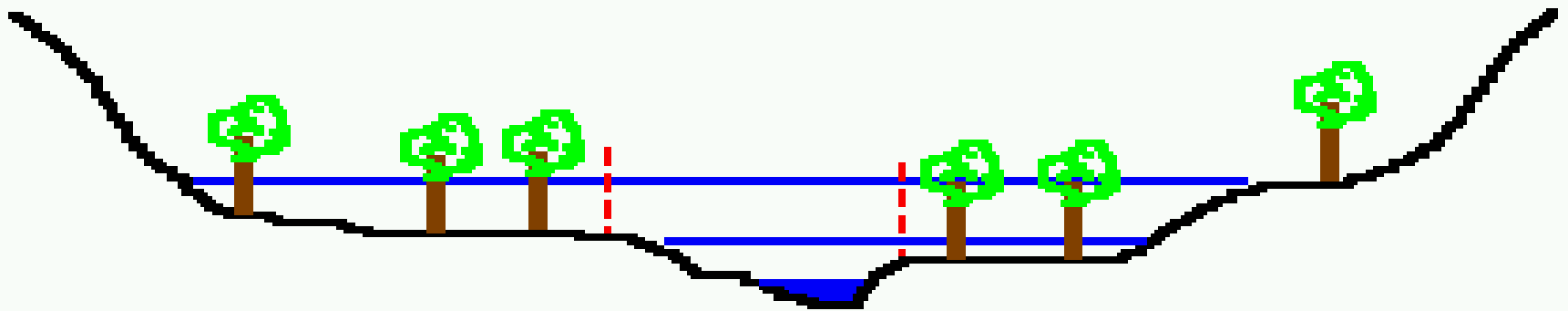


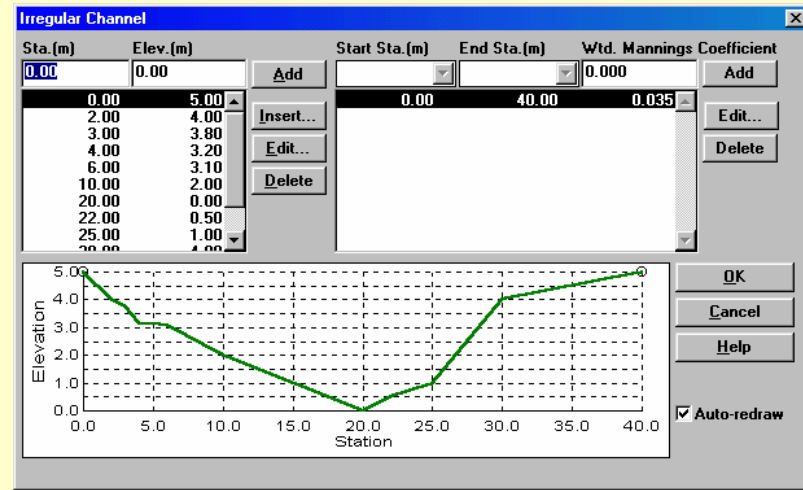
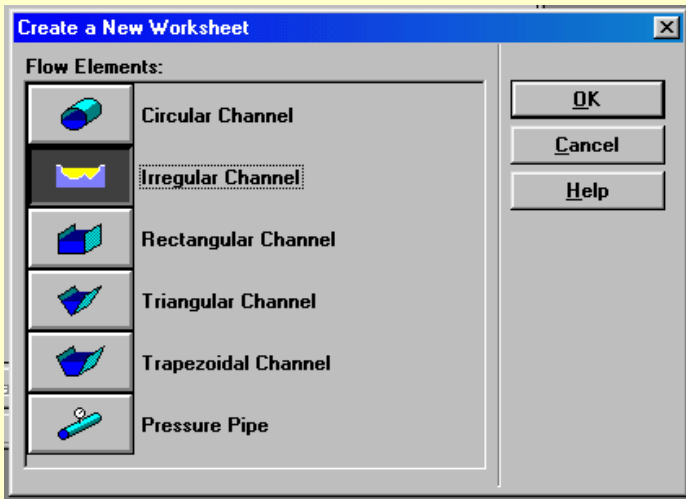
# Cálculo hidráulico mediante la utilización de software específico

## Datos necesarios:

- Un **caudal de cálculo**, que normalmente se ha obtenido previamente con un modelo hidrológico.
- Una **topografía detallada** del tramo de cauce a analizar. Esta información puede simplificarse si suponemos que se cumplen las condiciones de movimiento permanente y uniforme. Normalmente esta información será difícil de extraer de la cartografía disponible, por lo que generalmente hay que obtenerla con *topografía clásica directamente sobre el terreno*.
- Información sobre la **rugosidad y características del material** que constituye el lecho del cauce, sobre todo si queremos realizar estudios relativos a los efectos torrenciales de los caudales líquidos circulantes.

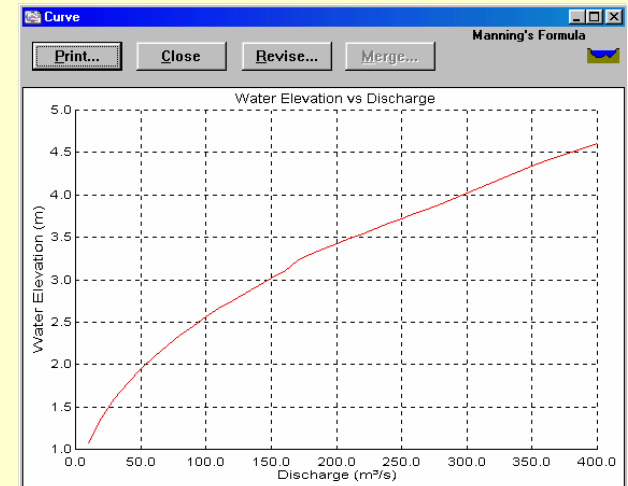
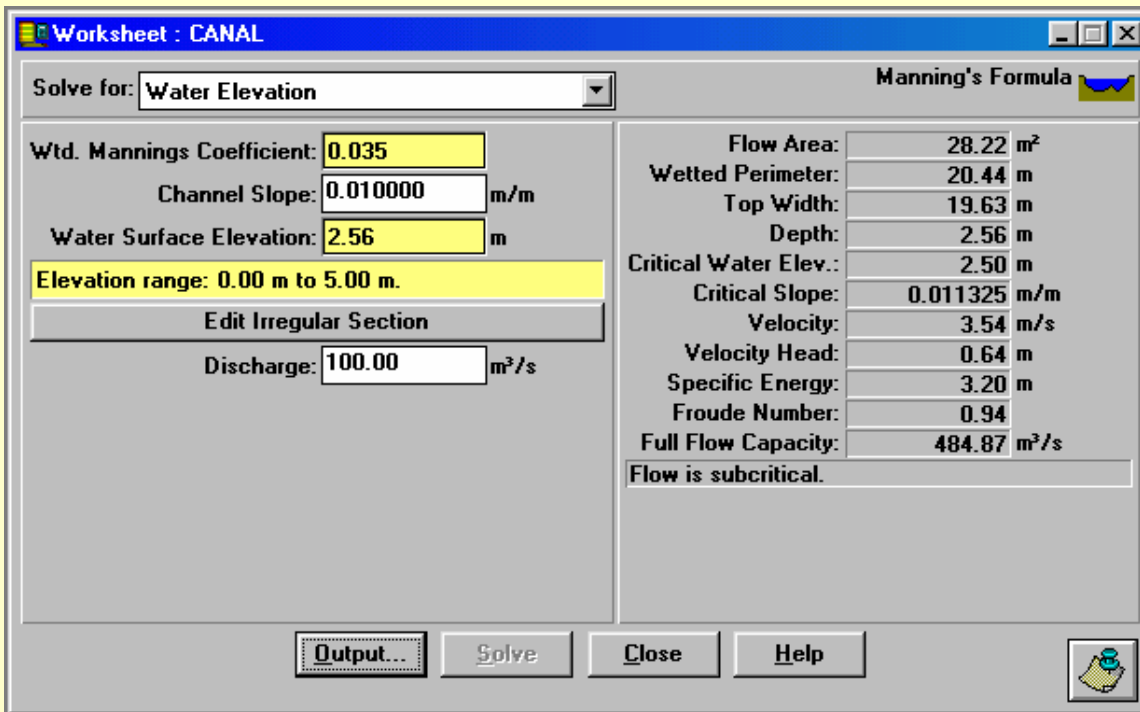
# Definición de las secciones





# MOVIMIENTO PERMANENTE Y UNIFORME

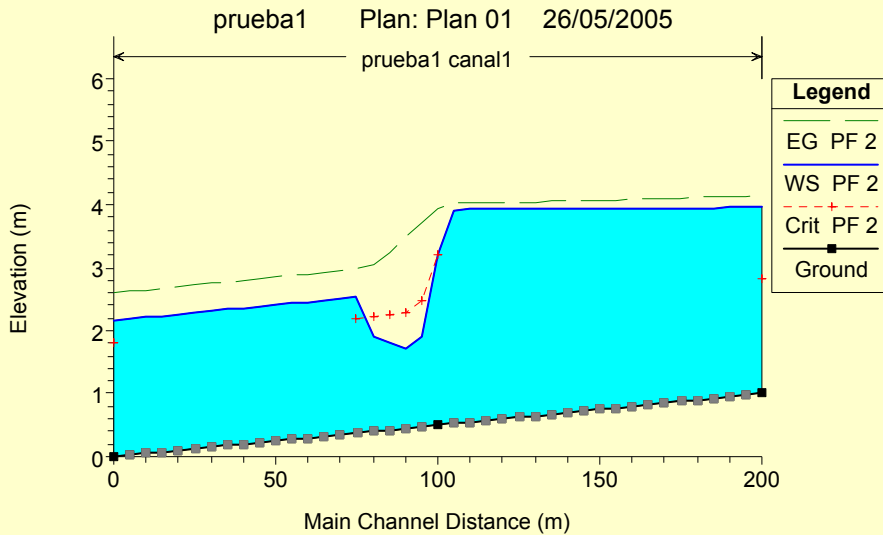
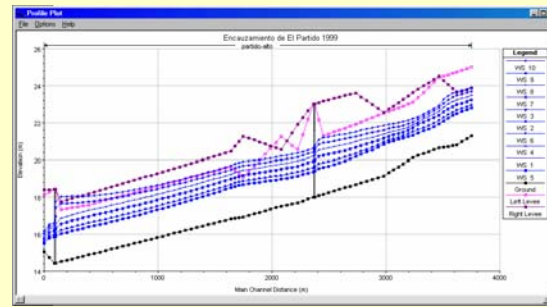
# FLOW MASTER (CAUDAL3)



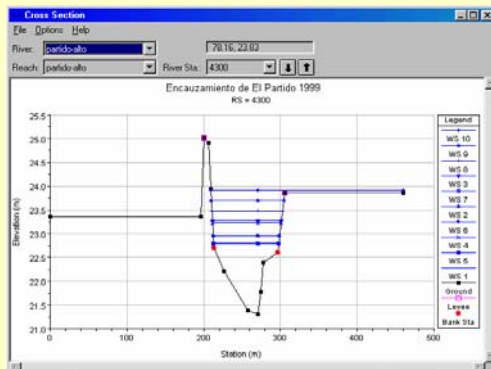
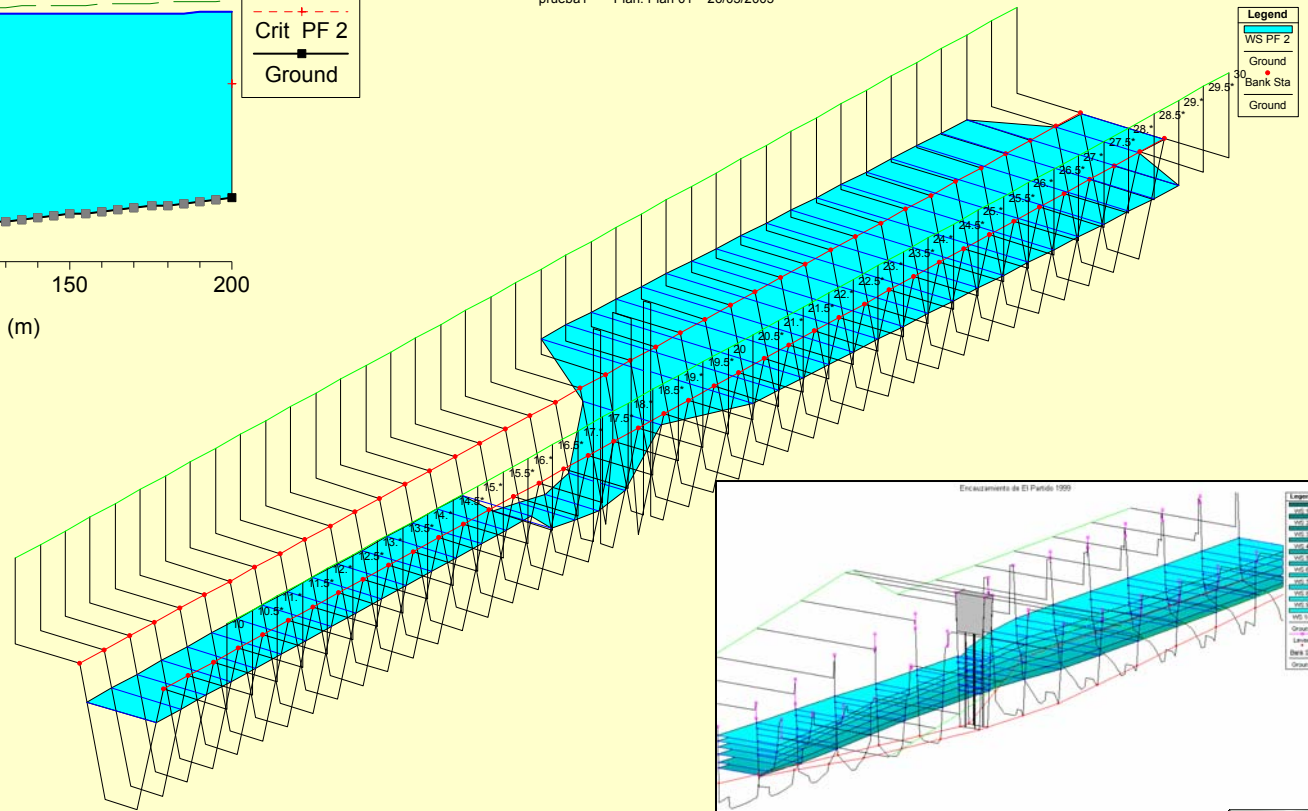
# HEC-RAS

## MOVIMIENTO PERMANENTE NO UNIFORME

## MOVIMIENTO VARIABLE

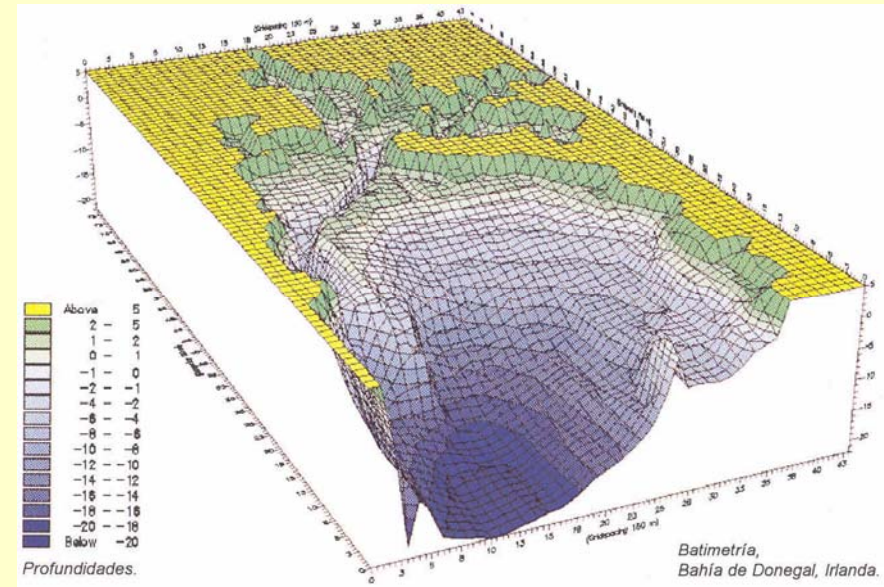


prueba1 Plan: Plan 01 26/05/2005

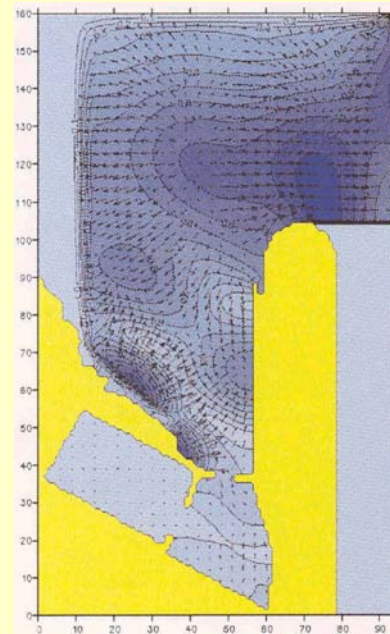
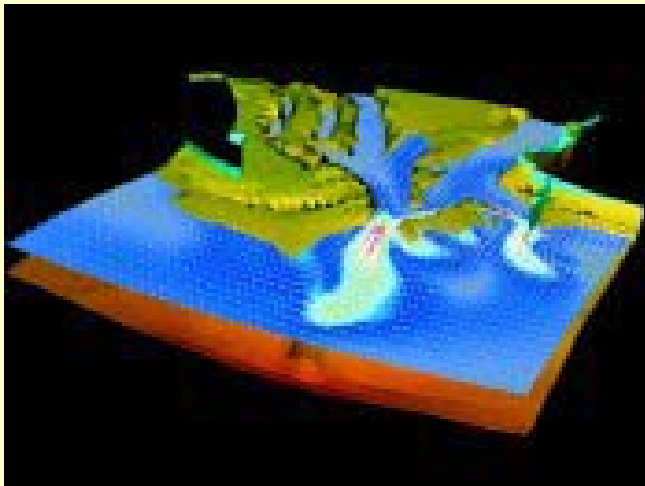


# MOVIMIENTO BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL

## DHI MIKE 21



## DELFT 3D



Resonancia en el Puerto de Sands,  
Las Islas Faroe.

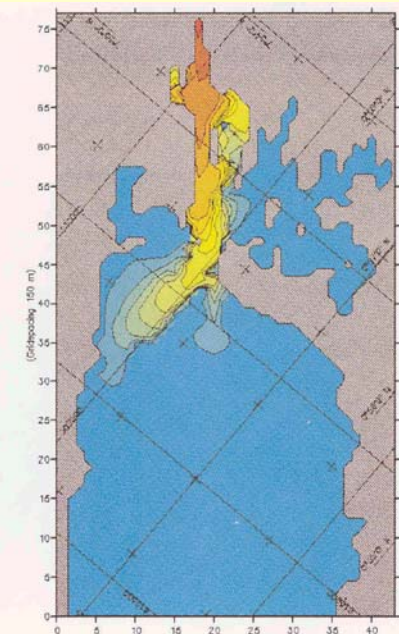
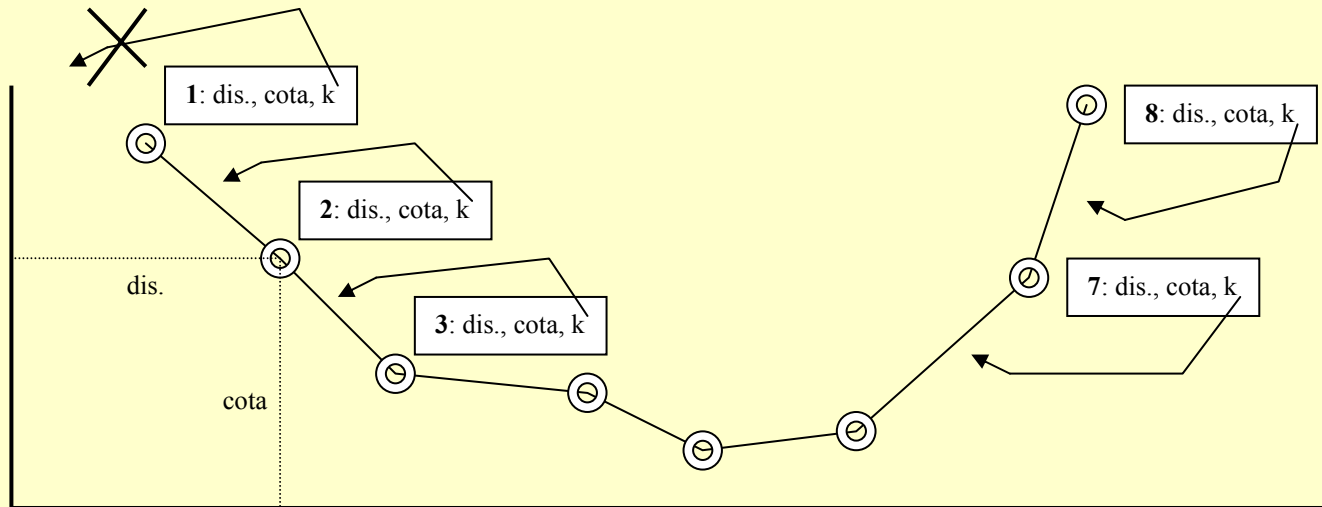


Gráfico de concentración de bacterias coliformes,  
Bahía de Donegal, Irlanda.

**Básicamente podemos distinguir tres orientaciones de cálculo:**

- **Variables hidráulicas** (niveles de agua, velocidades, etc.) en la *situación actual y después de las obras* diseñadas de corrección, para distintos valores de caudal.
- **Calibración** de parámetros en función de datos conocidos.
- Obtención de **curvas de gasto** (relaciones entre el caudal circulante y las distintas variables hidráulicas) para utilizarlas posteriormente en diversas aplicaciones entre las que estaría la simulación en tiempo real de dichas variables en los *sistemas de alerta*.

# CÁLCULO DE SECCIONES EN EL PROGRAMA CAUDAL3



**DATOS DE LA SECCIÓN:**

**PENDIENTE  $j$**  (pendiente del tramo de cauce donde esté ubicada la sección)

**RUGOSIDAD (Manning)  $n$**  (valor de referencia para los distintos tramos)

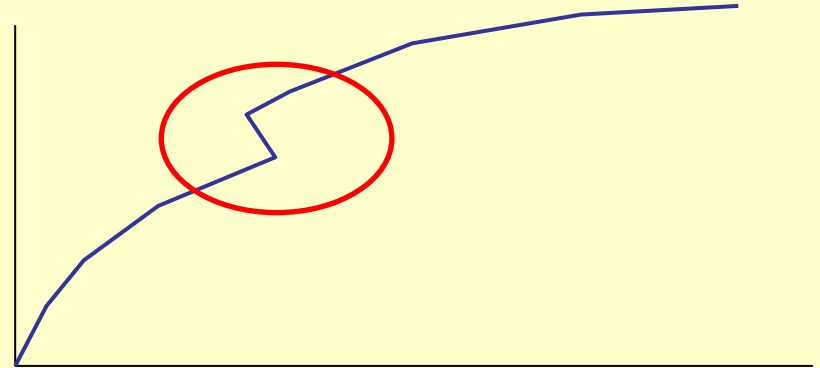
Para cada tramo de la sección:  $n_i = k_i \cdot n$

**NÚMERO DE PUNTOS**

Número de puntos que definen la sección

***Distancia, cota y coeficiente multiplicador*** del número de Manning de cada punto.

Problema que puede aparecer en la curva de gasto cuando se utiliza la totalidad de la sección mojada, como unidad de cálculo, para valorar la magnitud del caudal si se utiliza la expresión de Manning para estimar la velocidad media de la sección.



El problema se evita descomponiendo el cálculo del caudal, estimándolo como suma de caudales parciales por tramos de sección.

