



ESCUELA DE VERANO CENTRO EULA-CHILE



# MODELACIÓN AMBIENTAL: MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

## Preparación de las campañas de terreno para la modelación de la calidad del agua superficial

Ing. Patrick Debels  
pdebels@udec.cl  
VVOB, Flandes, Bélgica

# **OBJETIVOS DE LAS CAMPAÑAS DE TERRENO:**

**□ obtener los datos requeridos para:**

**✓ construir el modelo**

**✓ calibrar el modelo**

**✓ validar el modelo**

**✓ aplicar el modelo**

## **OBJETIVOS DE LAS CAMPAÑAS DE TERRENO:**

- ❑ obtener los datos requeridos para:**
  - ✓ la modelación de la hidrodinámica del sistema**
  - ✓ la modelación del transporte de contaminantes**
  - ✓ la modelación de los parámetros de calidad del agua**

## PROBLEMAS PRÁCTICOS

□ VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS DATOS

□ VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS DATOS

e.g.

CAUDAL =  $F(T, X)$


TEMPERATURA =  $F(T, X, Y, Z)$

OXIGENO DISUELTO =  $F(T, X, Y, Z)$

....

# ¿COMO CARACTERIZAR TODO LO ANTERIOR?

 **SIMPLIFICACIÓN DE LA REALIDAD**

 **CONSIDERAR SOLO AQUELLOS PROCESOS DE MAYOR  
RELEVANCIA PARA LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL  
PROYECTO**

....

# **PASOS A SEGUIR....**

**1./ definir los objetivos del estudio (QUÉ – POR QUÉ – DONDE – CUANDO)**

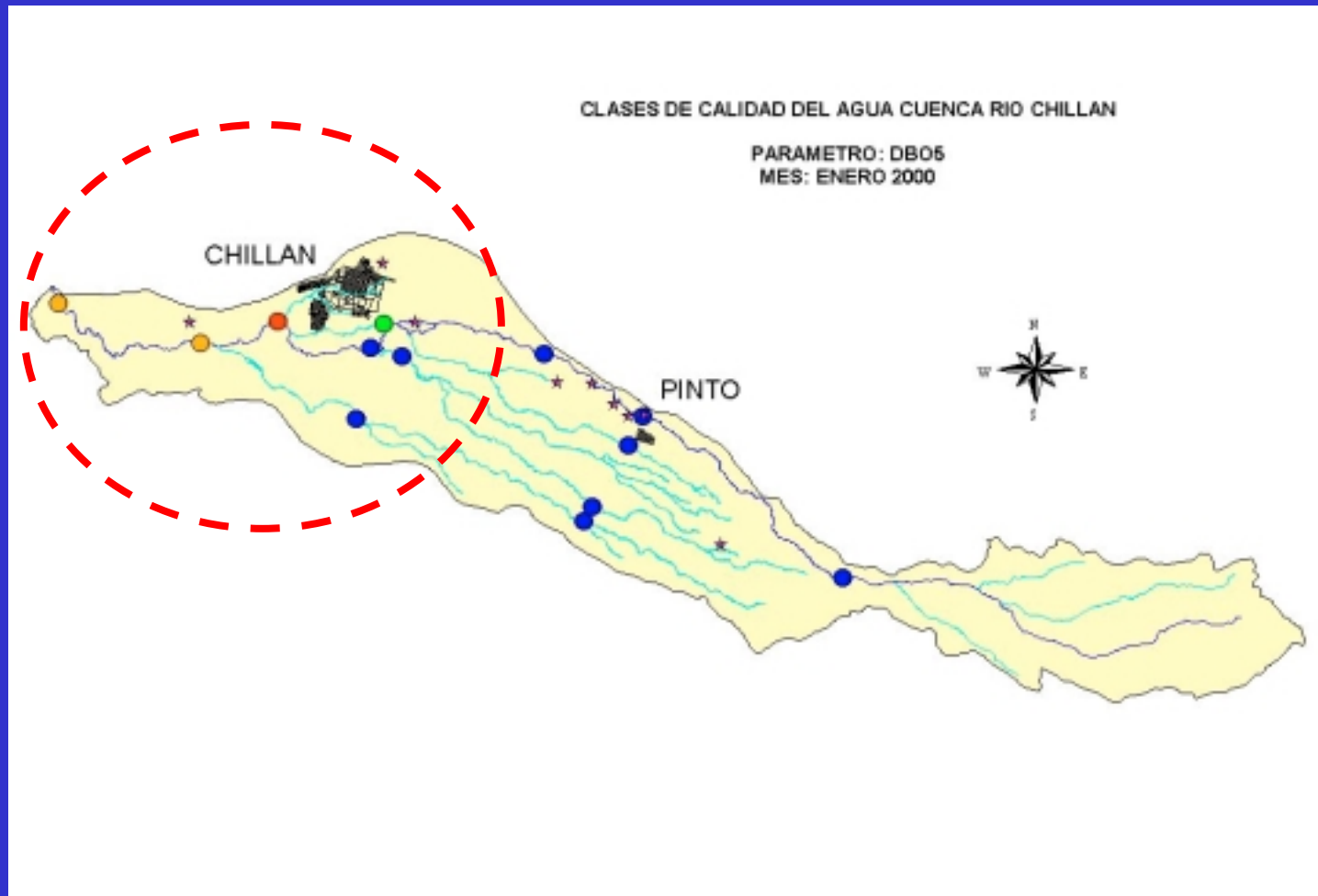
**2./ identificar el área de estudio**

**3./ delimitar el área de mayor interés dentro del área de estudio:**

- ✓ mediante un muestreo preliminar, se determina el área de mayor interés
- ✓ en base a la información anterior, se define el inicio y el fin del sistema a modelar
- ✓ se opta por (a) modelar los tributarios, o  
(b) considerar los tributarios como un aporte puntual

# EJEMPLO:

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE UN MUESTREO PRELIMINAR PARA DEFINIR EL ÁREA DE APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO



## **PASOS A SEGUIR....**

**4./ delimitar el período de interés para la aplicación del modelo**

→ ¿para qué condiciones hidrológicas/climatológicas queremos modelar?

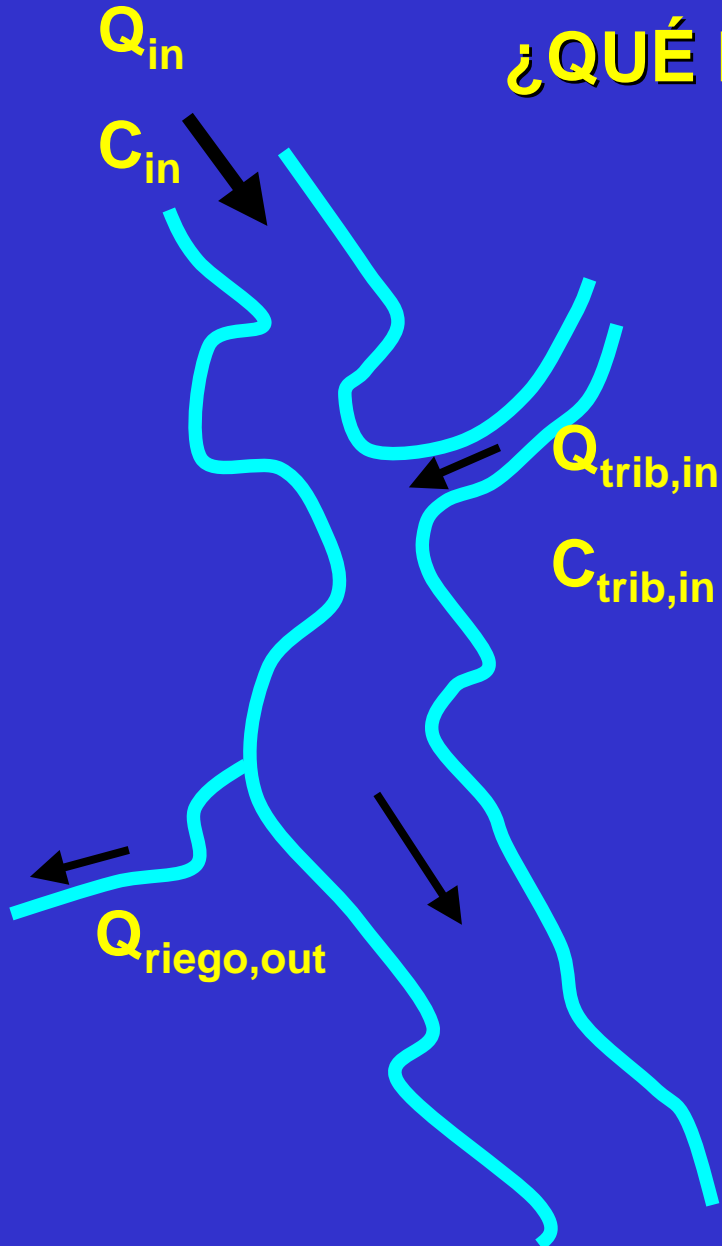
**5./ identificar los parámetros a modelar**

**6./ ¿complejidad de la conceptualización?**

→ ¿modelación 1D – 2D – 3D?



# ¿QUÉ DATOS OBTENER?



- ✓ caudal y concentración al inicio del sistema
- ✓ caudal y concentración tributarios
- ✓ caudal y concentración descargas puntuales
- ✓ caudal y concentración aportes difusos
- ✓ caudal extracciones p/ riego
- ✓ caudal extracciones p/ agua potable
- ✓ caudal extracciones p/ recreación
- ✓ caudal extracciones p/ procesos industriales
- ✓ caudal infiltraciones

✓ .... puntos intermedios => calibración, validación

=> determinación cinética

# UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

- ✓ inicio del sistema
  - ✓ tributarios
  - ✓ descargas
- ✓ puntos intermedios

(-> criterio del usuario + disponibilidad de recursos; sospecha de existencia de importantes fuentes difusas en determinados sectores de la cuenca....)

# UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

utilizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener información acerca de la posibilidad de la existencia de áreas con importantes aportes difusos a la red hídrica

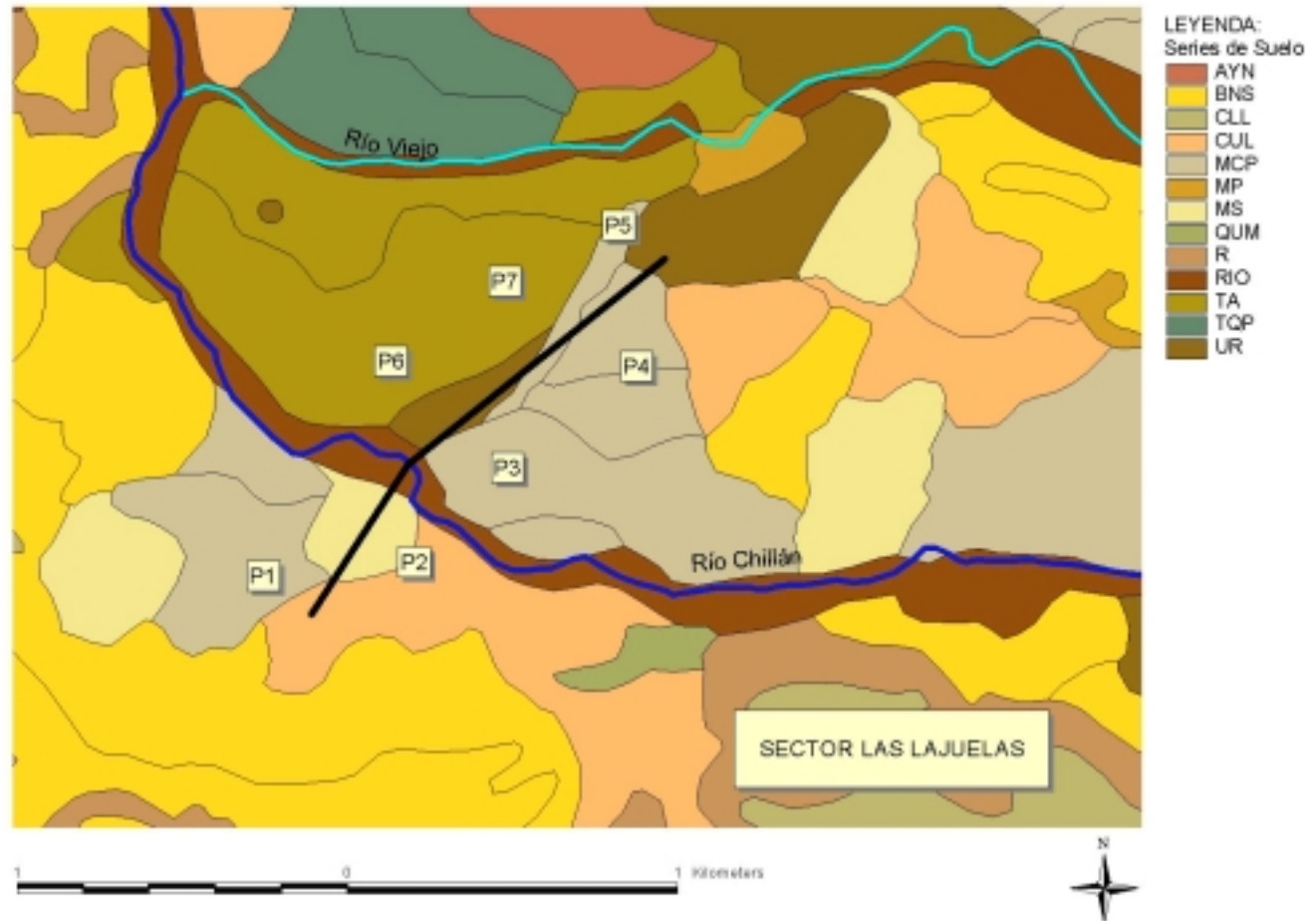


Mapas de uso del suelo pueden ayudar en identificar áreas con posibilidad de contaminación difusa

# UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

utilizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener información acerca de la posibilidad de la existencia de áreas con importantes aportes difusas a la red hídrica

Mapas de series de suelo pueden ayudar en identificar áreas con alta interacción entre el río y las aguas subterráneas



# ¿COMO ABARCAR EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE CAUDAL Y/O PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN UN DETERMINADO PUNTO?

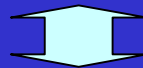
## Caudal:

instalación de un limnógrafo (con data-logger)

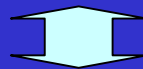
## Calidad del agua:

a.) instalación de un muestreador automático

b.) instalación de un instrumento electrónico con data-logger (e.g. temperatura, O.D., pH, Conductividad,...)



c.) integración de muestras tomadas en diferentes horas para sacar un valor promedio



d.) no considerar la variabilidad temporal

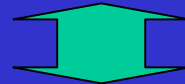
# ¿COMO ABARCAR EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE CAUDAL Y/O PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN UN DETERMINADO PUNTO?

Muestreo (semi-)continuo

vs

Muestras instantáneas (puntuales)

Muestras integradas

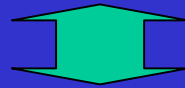


## Consideraciones:

- ✓ Costos del muestreo
- ✓ Conocimiento previo sobre el funcionamiento del sistema: qué tan importante son las fluctuaciones en el tiempo
- ✓ Objetivos del estudio

# ¿COMO ABARCAR EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE CAUDAL Y/O PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN UN DETERMINADO PUNTO?

Muestras instantáneas (puntuales)



❑ seguir la masa de agua

→ ¿duración muestreo?

→ ¿velocidad de avance?

❑ registrar parámetros básicos tales como: hora / temperatura / pH / conductividad / O.D.

# **DIFERENTES MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES EN RÍOS NATURALES**



**Correntómetro:  
modelo para  
corrientes fuertes**

**Fluorímetro:  
medición de  
caudal  
mediante la  
inyección de  
trazadores**



**Correntómetro:  
modelos para  
caudales bajos**



**Medición instantánea del caudal:  
métodos 'clásicos'**

✓ Elegir una sección transversal con flujo (velocidad) significativo, pero preferentemente sin turbulencia

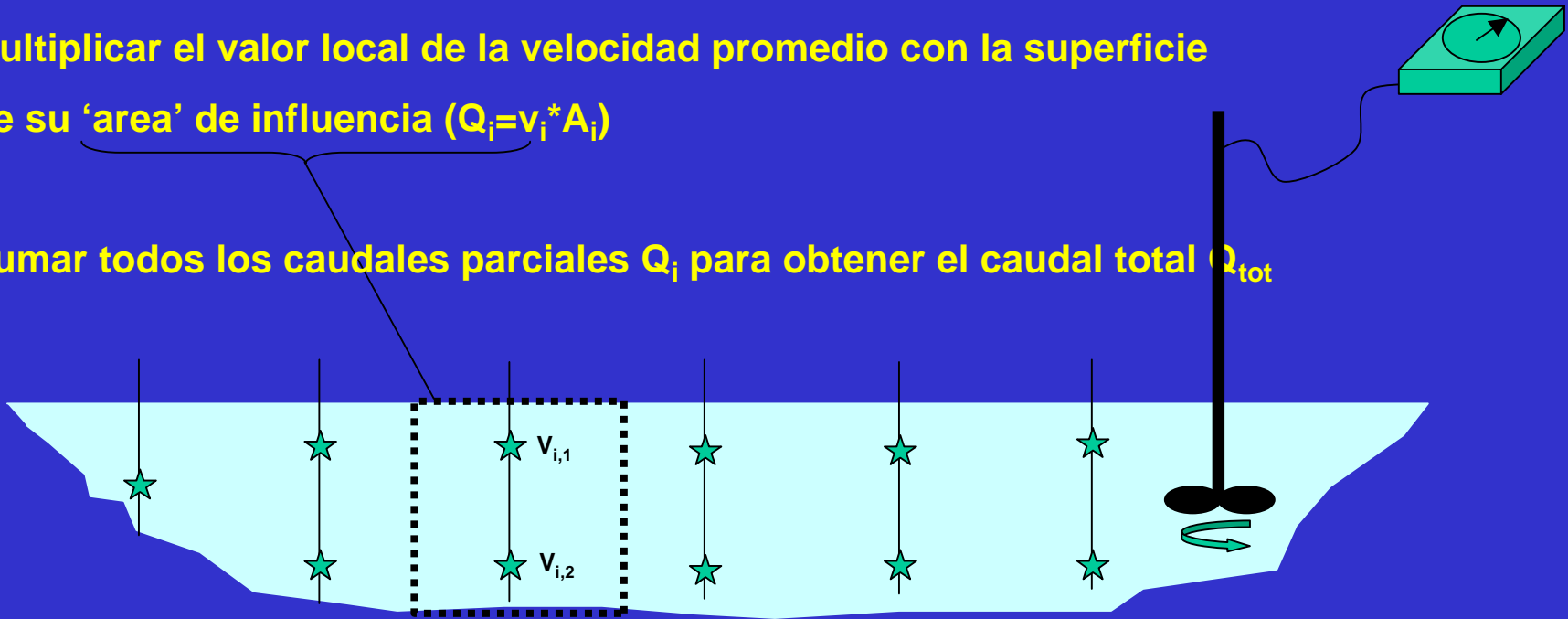
✓ Realizar mediciones de la velocidad de flujo en diferentes puntos de la sección transversal

En el caso de una profundidad local  $P < 61$  cm  $\Leftrightarrow$  realizar la medición a 60% desde la superficie

En el caso de una profundidad local  $P > 61$  cm  $\Leftrightarrow$  realizar 2 mediciones ( $0.2P$  y  $0.8P$ ) y promediar

✓ Multiplicar el valor local de la velocidad promedio con la superficie de su 'area' de influencia ( $Q_i = v_i \cdot A_i$ )

✓ Sumar todos los caudales parciales  $Q_i$  para obtener el caudal total  $Q_{tot}$



**Medición instantánea del caudal  
con correntómetro ('molinete'): PASOS A SEGUIR**

## American Sigma PVM Portable Velocity Meter



### Product Specifications

This lightweight (3 lb.), rugged field unit uses a Doppler velocity sensor to measure bi-directional velocity up to +10 feet/second. It features true-time averaging for higher accuracy in turbulent flows.

The PVM, as well as all American Sigma products, is backed by American Sigma Care, a host of support services including a 24 Hour Help Line, Pronto Parts, 30 Day Quibble Free Return Policy and No Fault Warranty. American Sigma Care guarantees you the best after sales support anywhere.

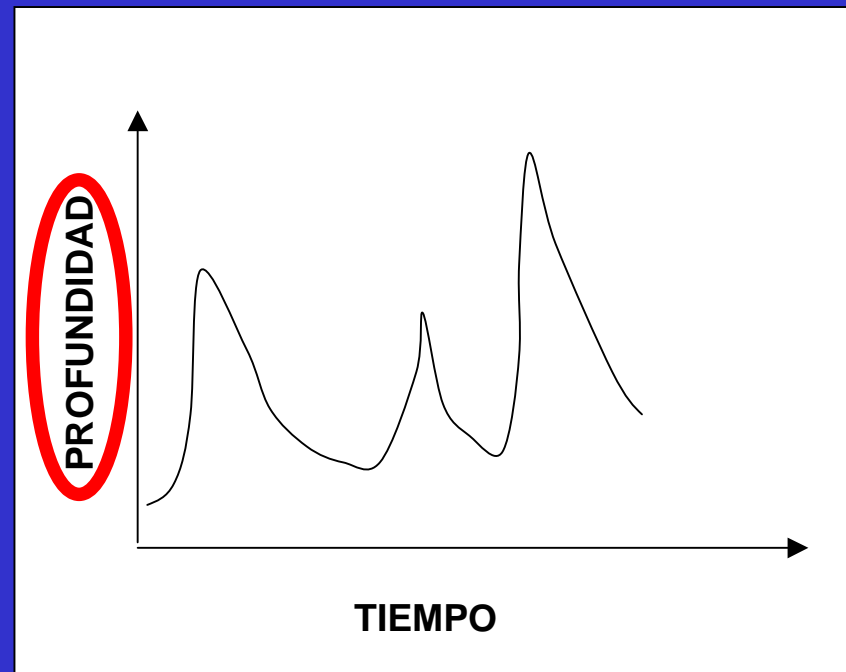
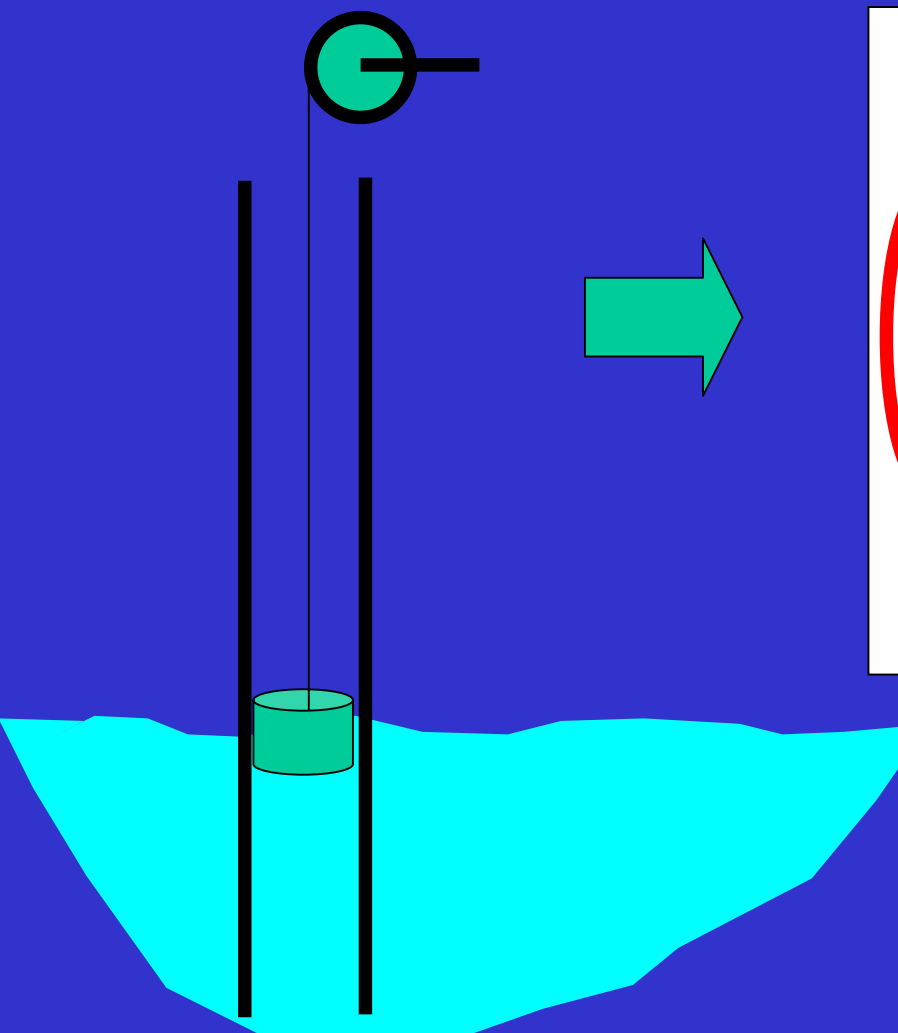
- Doppler Technology for fluid point velocity or time average velocity.
- Digital circuitry samples velocity 15 times per second.
- Computes forward and reverse flow.
- 12-hour battery life.

Ideal for:

- Checking and Calibrating Primary Devices.
- Spot Measurements in Sanitary Sewers, Streams, Irrigation and other channels.
- Verifying accuracy of flow meters.




**Medición instantánea del caudal:  
...la nueva generación**



**monitoreo permanente del nivel del agua (y caudal)  
en un punto determinado – LIMNIGRAFO – modelo  
tradicional**

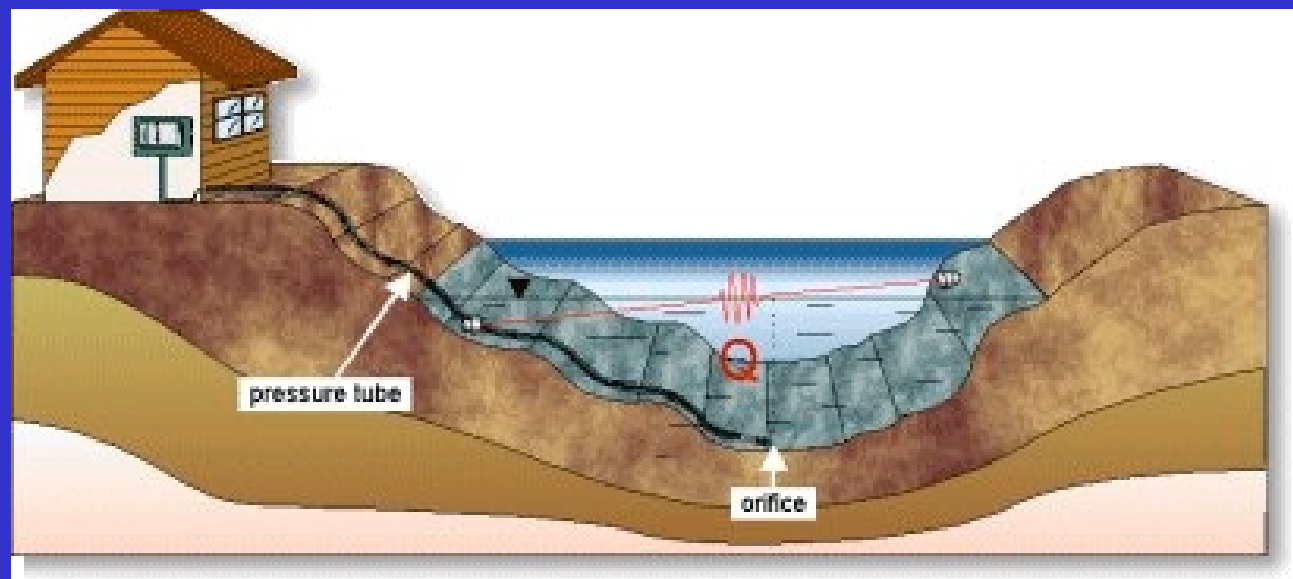
## Model 980 Flow Meter Series



Product Specifications 

The 980 Flow Meter is available with one of the depth/velocity measurement technologies:

- Ultrasonic Sensor
- Velocity Sensor
- Area Velocity/Submerged Sensor



**monitoreo permanente del nivel del agua (y caudal)  
en un punto determinado – nuevas tecnologías**

## LIMNIGRAFO:

(+) se obtiene valores para un determinado punto, en cada instante (especificar intervalo de tiempo  $\Leftrightarrow$  instrumento realiza/registra 1 medición por cada intervalo de tiempo)

(+) no requiere de la presencia de personal en terreno para realizar las mediciones

(-) se obtienen valores sólo para el punto donde está instalado el instrumento

(-) se requiere de una calibración periódica para transformar los valores registrados de altura (nivel del agua) en caudal

## MEDICIÓN INSTANTÁNEA CON CORRENTÓMETRO:

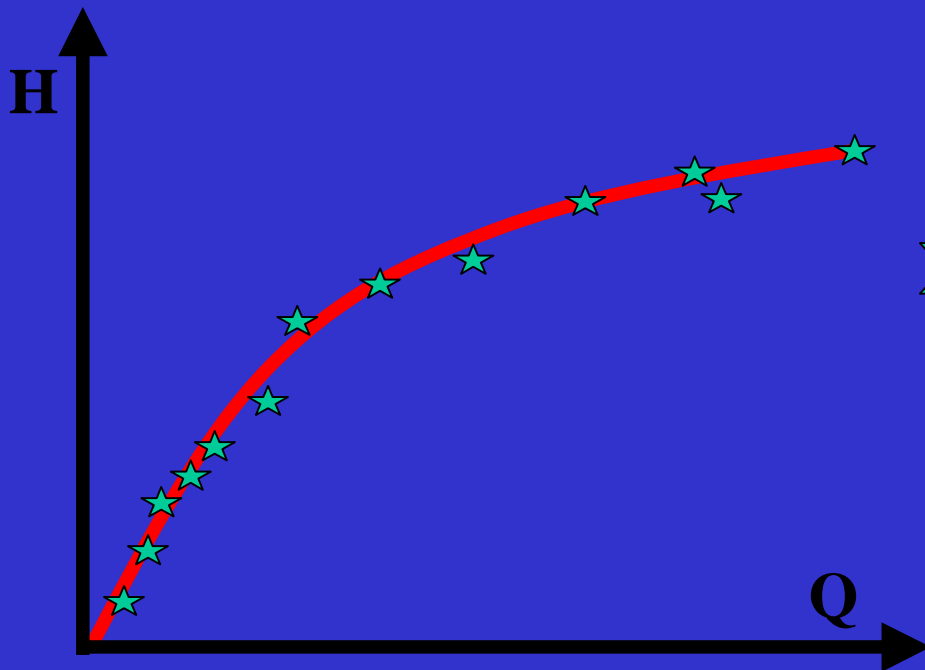
(+) en un mismo día, se pueden realizar mediciones en diferentes puntos de una red hídrica

(+) entrega valores de velocidad, que pueden ser transformados fácilmente en valores de caudal, una vez conocida la superficie ocupada por el agua en la sección transversal

(-) sólo entrega valor de caudal para el instante en que se está realizando la medición – requiere de la presencia en terreno de personal para la realización de la medición; realización de la medición = tediosa

## CALIBRACIÓN DEL LIMNIGRAFO:

Se trata de mediciones de caudal efectuadas con correntómetro para diferentes niveles de agua (caudal). Simultáneamente se registra el valor del nivel del agua, y se establece la relación entre Q y H. En base a los datos experimentales, se determinan los coeficientes a y b de la siguiente ecuación, lo que permitirá transformar las series de tiempo de H, registradas por el limnigrafo, en series de tiempo de Q



$$H = aQ^b$$



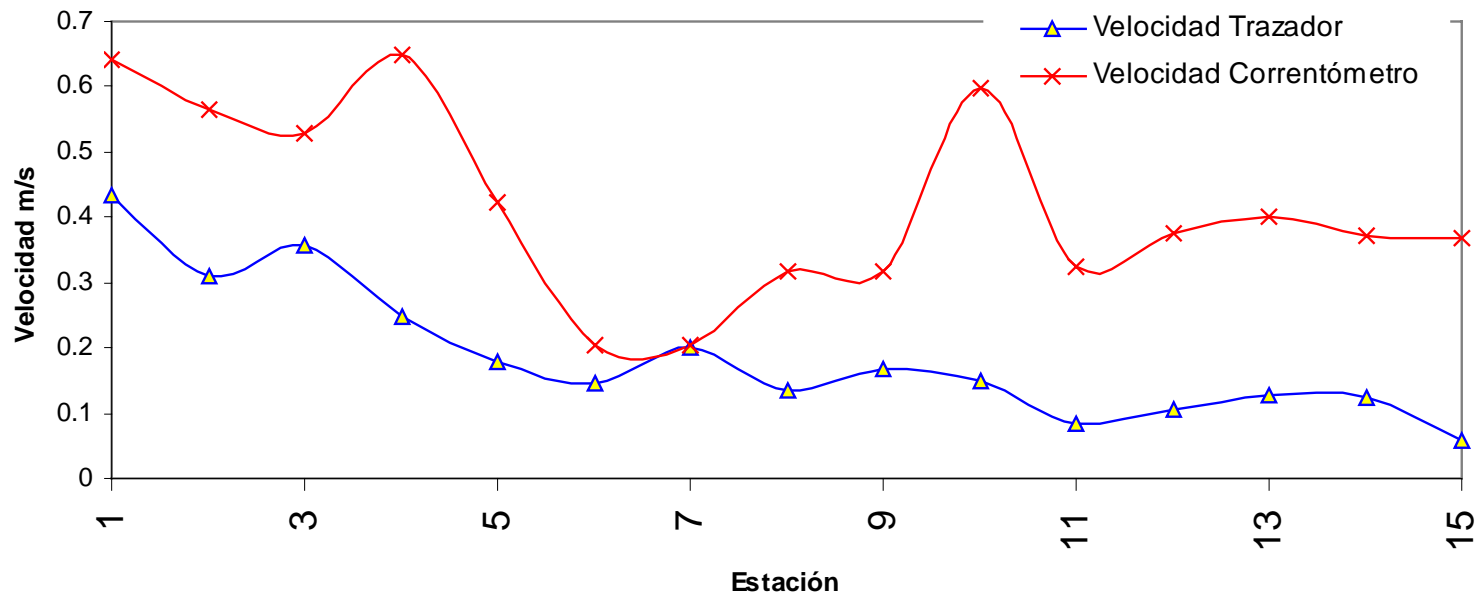
# OBSERVACIÓN

**MEDICIONES DE VELOCIDAD CON CORRENTÓMETRO Y/O LIMNÍGRAFO:**

**¡VALORES LOCALES DE VELOCIDAD!**

**=> PUEDE HABER MUCHA VARIABILIDAD ESPACIAL EN LOS VALORES DE VELOCIDAD**

**Comparación de velocidades medidas por medio del uso de Rhodamina Wt 20% y Correntómetro**

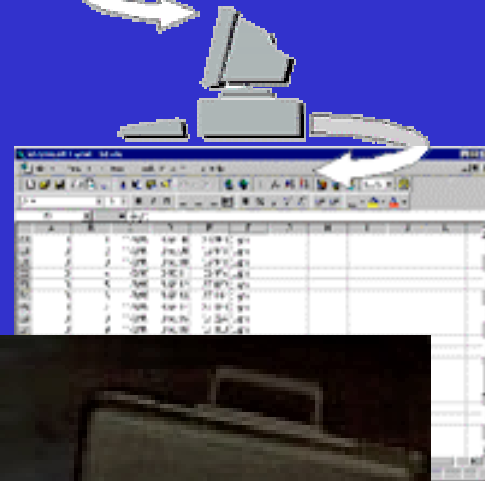




muestreador automático programable, con 24 frascos



fluorímetro,  
para estudios  
con trazadores  
y/o clorofila



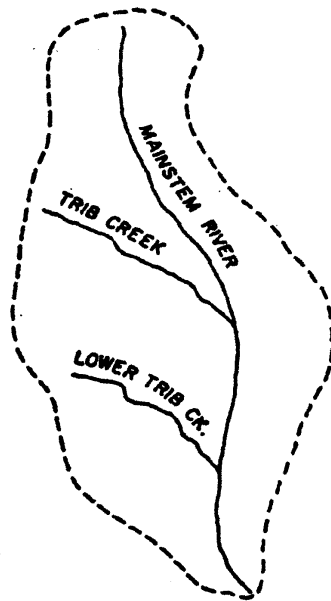
oxigenómetro  
(O.D.) con  
impresora  
interna para el  
registro de la  
variabilidad  
temporal

# MUESTREO DE LA CALIDAD DEL AGUA: MÉTODOS PARA CAPTURAR LA VARIABILIDAD EN EL TIEMPO DE LOS PARÁMETROS

# **IMPORTANCIA DE LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL Y LA VELOCIDAD DEL FLUJO PARA LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA**

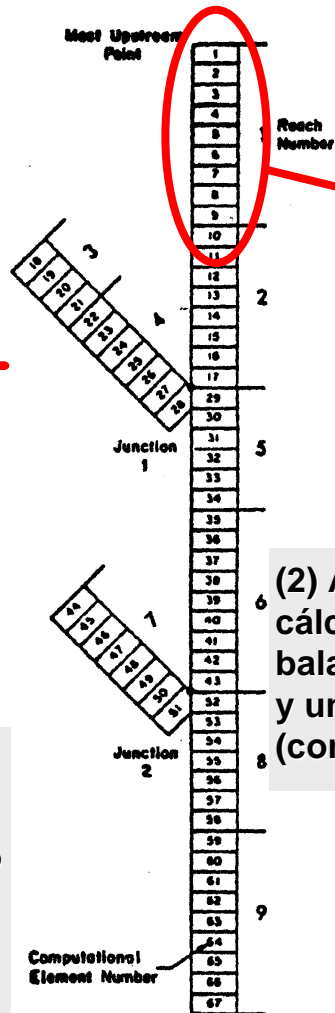
**EL MODELO QUAL2E (USEPA)**

# QUAL2E:

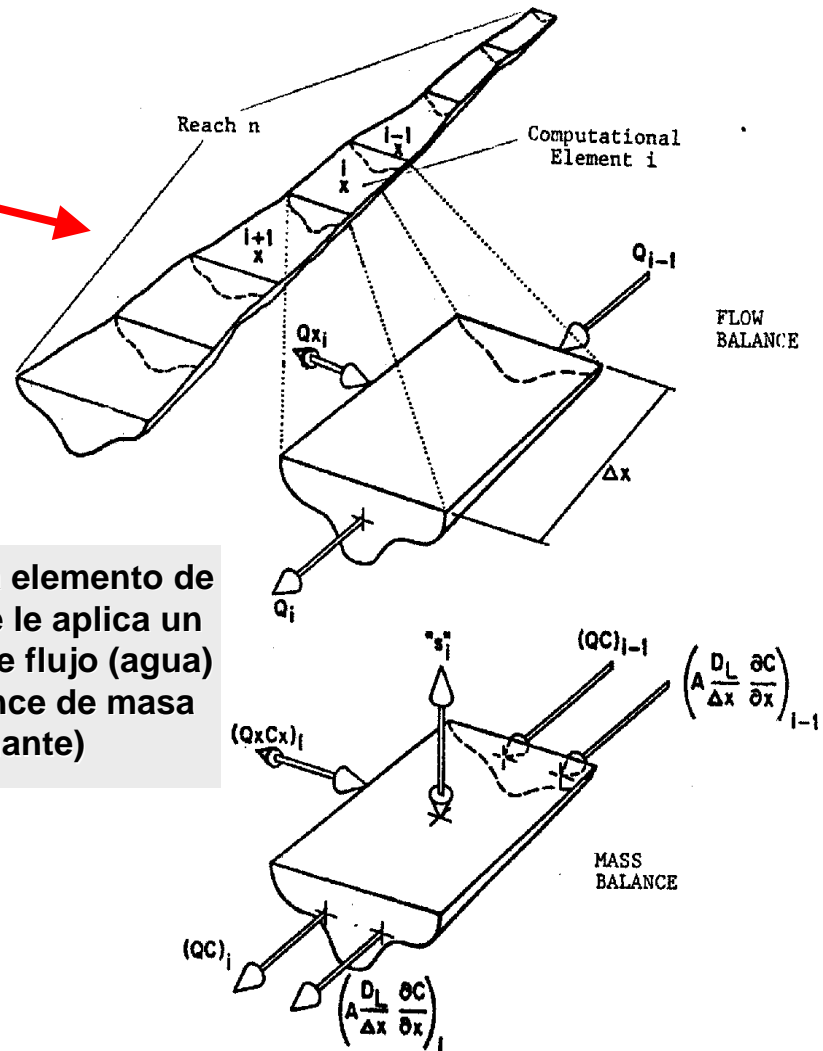


## Ejemplo:

(1) En QUAL2E un sistema hídrico es conceptualizado mediante elementos de cálculo, agrupados en tramos de características morfológicas homogéneas



(2) A cada elemento de cálculo se le aplica un balance de flujo (agua) y un balance de masa (contaminante)

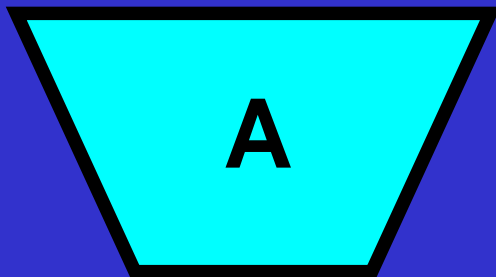
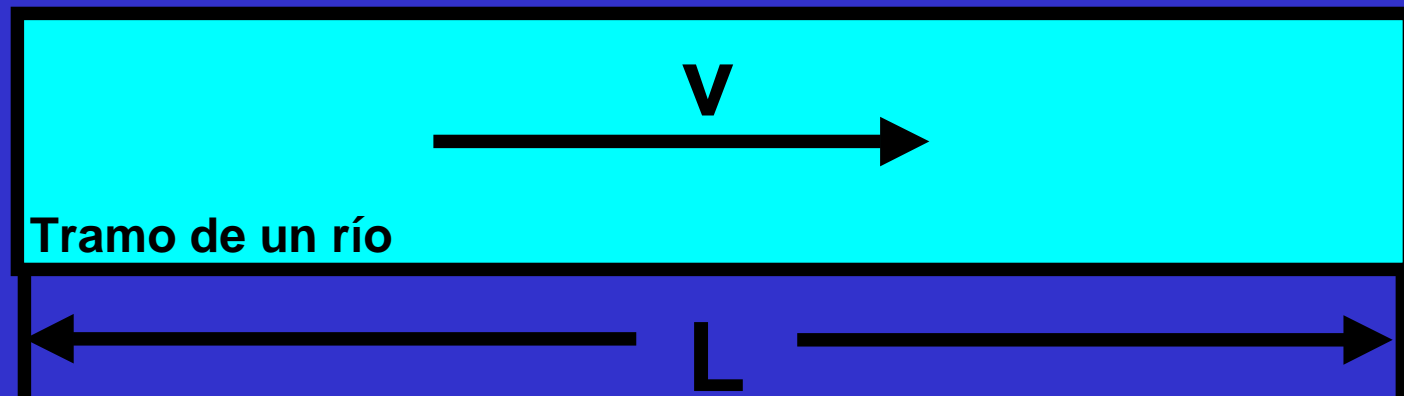


# IMPORTANCIA DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO PARA LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE QUAL2E

Para la modelación de parámetros de calidad del agua 'biodegradables' (DBO, coliformes), la estimación de la velocidad del agua -y por ende de los tiempos de residencia de los contaminantes en un determinado sector del río- es de gran importancia, ya que esto influye directamente en el grado de autodepuración que se puede lograr en el sector

%autodepuración = función(tiempo)

# CAUDAL, VELOCIDAD DEL AGUA Y TIEMPO DE VIAJE



Sección  
Transversal

$$V = Q/A_{\text{sección mojada}}$$

$$L = v.t \Leftrightarrow t = L/v$$

# QUAL2E:

- ☐ el tiempo de permanencia de contaminantes en un determinado sector del río = función de la velocidad del agua en el sector
- ☐ cálculo del tiempo de residencia/velocidad de flujo en QUAL2E, en base a valores de caudal:
  - 1./ en base a la definición de relaciones Q-v para los diferentes tramos del río*
  - 2./ en base al uso de la ecuación de Manning, en combinación con parámetros morfológicos definidos para los diferentes tramos del río*

## 2.4 HYDRAULIC CHARACTERISTICS

QUAL2E assumes that the stream hydraulic regime is steady-state; i.e.,  $\partial Q/\partial t = 0$ , therefore, the hydrologic balance for a computational element can be written simply as (see Figure II-1):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = (Q_x) - (Q_y) \quad \text{II-6}$$

where  $(Q_x)$  is the sum of the external inflows and/or withdrawals to that element.

### 2.4.1 Discharge Coefficients

Once equation II-6 has been solved for  $Q$ , the other hydraulic characteristics of the stream segments can be determined by equations of the form:

$$\bar{u} = aQ^b \quad \text{II-7}$$

$$A_x = Q/\bar{u} \quad \text{II-8}$$

and

$$d = aQ^b \quad \text{II-9}$$

where  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  and  $\beta$  are empirical constants, and  $d$  is the stream depth. These constants usually can be determined from stage-discharge rating curves.



## 2.4.2 Trapezoidal Cross Sections

Alternatively, if the cross-sectional properties of the stream segment are available as a function of the depth  $d$ ,  $u$  can be obtained as a function of discharge by the trial and error solution of Mannings equation:

$$Q = \frac{1.486}{n} A_x R_x^{2/3} S_e^{1/2} \quad 11-10$$

where

$A_x$  = cross-section area of the channel or canal,  $\text{ft}^2$

$R_x$  = mean effective hydraulic radius,  $\text{ft}$

$n$  = Manning roughness factor (usual range 0.010 to 0.10)

$S_e$  = slope of the energy grade line (dimensionless)

$Q$  = discharge,  $\text{ft}^3/\text{sec}$

The value for  $\bar{u}$  is then determined from equation 11-8.

# CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA EN QUAL2E

## PROBLEMAS PRÁCTICOS:

- ❑ METODO 1: relación  $Q-H$  /  $v-Q$ : ¿sección representativa para todo el tramo de estudio?
- ❑ METODO 2: definición de la geometría del canal: ríos naturales = morfología muy heterogénea – ¿como determinar una sección transversal representativa para todo un tramo de estudio?
- ❑ Aplicación de la ecuación de Manning: se requiere de:
  - ✓ Coeficiente  $n$  de rugosidad
  - ✓  $R$  o radio hidráulico
  - ✓  $S$  o pendiente del eje longitudinal del canal  
(pendiente local  $\neq$  pendiente promedio de todo un tramo de estudio)

1./

Relación Q-H y Q-v:

$$H = aQ^b$$

$$v = cQ^d$$

$v$  = velocidad promedio en la sección (trapezoidal) [m/s]

$Q$  = caudal [m<sup>3</sup>/s]

$H$  = altura del agua en la sección transversal [m]

$a, b, c, d$  = coeficientes empíricas

2./

Ecuación de Manning:

$$v = (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

$v$  = velocidad del agua [m/s]

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning [s/m<sup>1/3</sup>]

$R$  = radio hidráulico =  $A/P$  [m]

$A$  = area transversal [m<sup>2</sup>]

$P$  = perímetro mojado [m]

$S$  = pendiente del eje del río [m/m]

# ¿CÓMO CUANTIFICAR LAS VARIABLES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING?

## □ Radio Hidráulico:

- mediciones en terreno ( $\Rightarrow$  valor local)
- ¿sección transversal representativa?

## □ Pendiente del eje longitudinal del río:

- mediciones en terreno ( $\Rightarrow$  valor local)
- estimaciones en base a datos cartográficos  
(requiere de cartografía de alta calidad)

# ¿CÓMO CUANTIFICAR LAS VARIABLES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING?

□ Manning's n: coeficiente de rugosidad

- valores de literatura: tablas y fotografías
- mediciones en terreno ( $\Rightarrow$  valor local)

# ¿CÓMO CUANTIFICAR LAS VARIABLES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING?

Ejemplos Manning n para  
ríos con diferentes  
características:

valores de literatura –  
tabla del manual del  
software QUAL2E  
(USEPA)

| TABLE II-1  |                        |
|---|------------------------|
| VALUES OF MANNING'S "n" ROUGHNESS COEFFICIENT   |                        |
| After Henderson (1966)  |                        |
| Artificial Channels   | n                      |
| Glass, plastic, machined metal  | 0.010                  |
| Dressed timber, joints flush  | 0.011                  |
| Sawn timber, joints uneven  | 0.014                  |
| Cement plaster  | 0.011                  |
| Concrete, steel troweled  | 0.012                  |
| Concrete, timber forms, unfinished  | 0.014                  |
| Untreated gunite  | 0.015-0.017            |
| Brickwork or dressed masonry  | 0.014                  |
| Rubble set in cement  | 0.017                  |
| Earth, smooth, no weeds   | 0.020                  |
| Earth, some stones, and weeds   | 0.025                  |
| Natural River Channels  | n                      |
| Clean and straight  | 0.025-0.030            |
| Winding with pools and shoals   | 0.033-0.040            |
| Very weedy, winding and overgrown   | 0.075-0.150            |
| Clean straight alluvial channels  | 0.031 d <sup>1/6</sup> |
| (d = D-75 size in ft.<br>= diameter that 75<br>percent of parti-<br>cles are smaller<br>than) |                        |

# ¿CÓMO CUANTIFICAR LAS VARIABLES PARA LA ECUACIÓN DE MANNING?

Ejemplo Manning n: valores de literatura – guía fotográfica del USGS, EE.UU.

| Manning's n-value | Stream   | Photo  |  |
|-------------------|--|--|--|
|                   |  | Photo 1  | Photo 2  |
| 0.024             | <a href="#"><u>Columbia River at Vernita, Washington</u></a> |   |   |
| 0.028             | <a href="#"><u>Clark Fork at St. Regis, Montana</u></a>      |  |  |

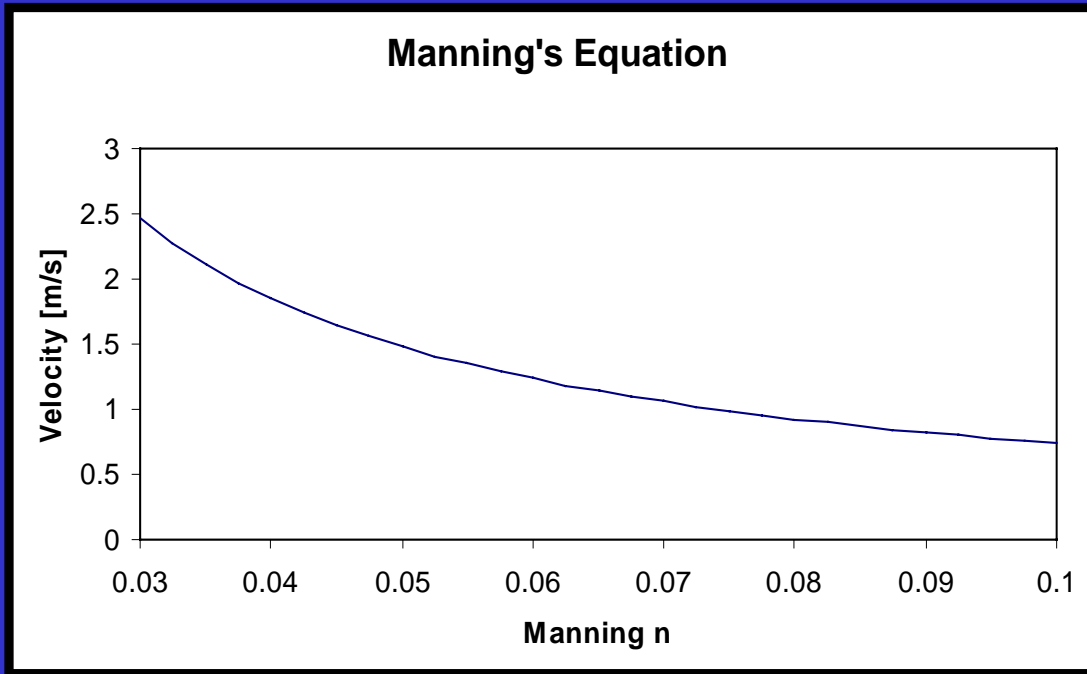


**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD  
DE LA ECUACIÓN DE MANNING**

**CONCLUSIONES PARA  
LAS CAMPAÑAS DE TERRENO  
PROYECTO RÍO CHILLAN**

**Caso 1: Sensibilidad hacia n  
todos los demás parámetros  
constantes**

$$v = (1/n).K$$



### RELACION n - v

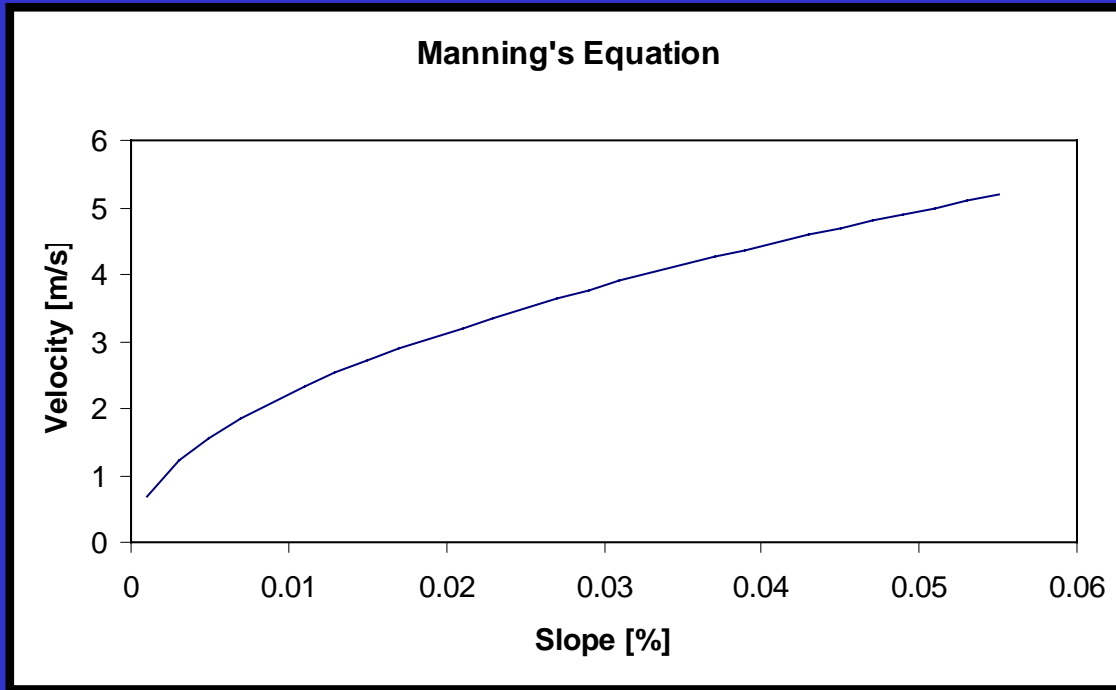
$$(k1.n).(k2.v) = K$$

entonces  
 $k1.k2 = 1$

o, para que v sube con 10%, n tiene que bajar con 9.1%  
para que v sube con 20%, n tiene que bajar con 16,7%  
para que v baja con 10%, n tiene que subir con 11%

**Caso 2: Sensibilidad hacia S  
todos los demás parámetros  
constantes**

$$v = S^{0.5} \cdot K$$



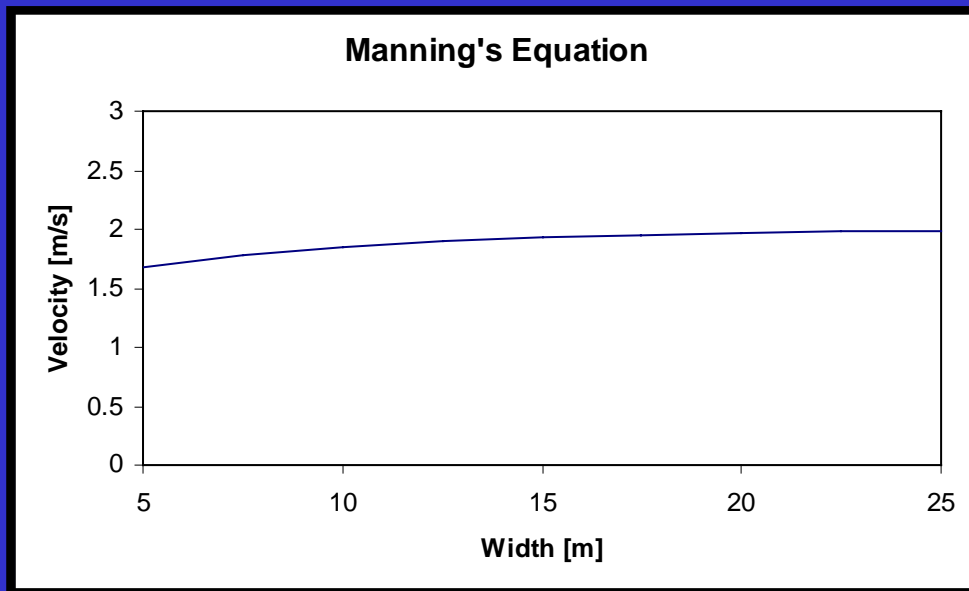
### RELACION S - v

$$(k_1 \cdot v)^2 / k_2 \cdot S = K$$

entonces

$$k_1^2 / k_2 = 1$$

o, para que v sube con 10%, S tiene que subir con 21%  
 para que v sube con 20%, S tiene que subir con 44%  
 para que v baja con 10%, S tiene que bajar con 19%



## SECCIÓN RECTANGULAR:

$$n = 0.04$$

$$S = 0.007 \text{ m/m}$$

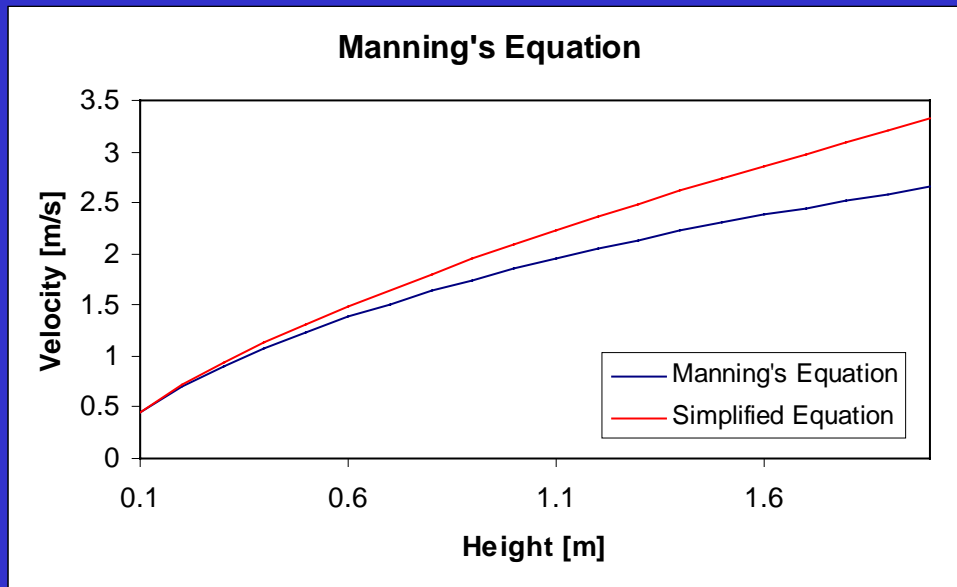
$$H = 1.0 \text{ m}$$

$$v = K.[(W*H)/(W+2H)]^{2/3}$$

|         | W - 10% | W + 10% |
|---------|---------|---------|
| for W = | deltav% | deltav% |
| 5       | -2.1    | 1.8     |
| 10      | -1.2    | 1       |
| 15      | -0.9    | 7.2     |
| 20      | -0.7    | 5.5     |

En general, en el caso  
del río Chillán:

$$W \gg H$$



## SECCIÓN RECTANGULAR:

$$n = 0.04$$

$$S = 0.007 \text{ m/m}$$

$$W = 10 \text{ m}$$

$$v = K \cdot [(W \cdot H) / (W + 2H)]^{2/3} \Rightarrow v \approx K \cdot H^{2/3}$$

|         | H - 10% | H + 10% |
|---------|---------|---------|
| for H = | deltav% | deltav% |
| 0.25    | -6.5    | 6.2     |
| 0.5     | -6.2    | 5.9     |
| 1       | -5.7    | 5.4     |
| 1.5     | -5.3    | 5       |

En general, en el caso  
del río Chillán:

$$W \gg H$$

# CONCLUSIONES

La ecuación de Manning parece ser muy sensible a:

- 1./ El coeficiente de Manning
- 2./ El nivel del agua
- 3./ La pendiente del eje del río

La ecuación de Manning parece ser poco sensible al ancho del río, cuando éste es mucho mayor que la profundidad (sección rectangular)

# CONCLUSIONES

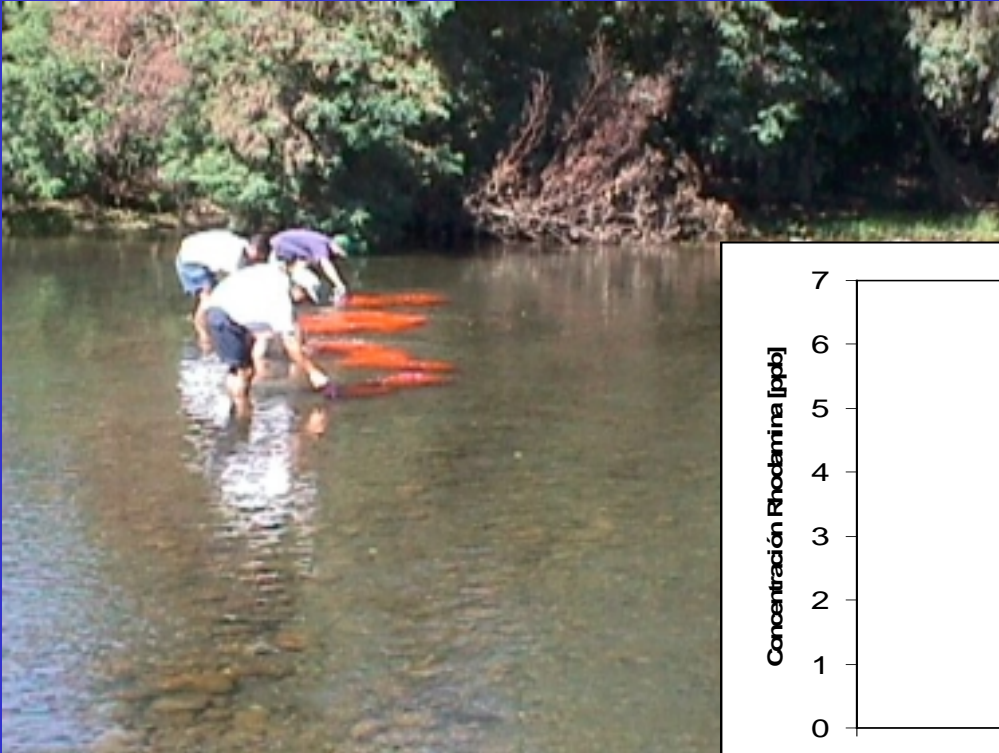
- Buena predicción de las velocidades de flujo mediante la ecuación de Manning requiere de buena información acerca de la magnitud de los diferentes parámetros en la ecuación (especialmente  $n$ ,  $S$  y la profundidad del agua)
- No siempre es fácil obtener valores  $n$ ,  $S$  y  $H$  que son representativos para todo el tramo de estudio al cual se aplicará la ecuación de Manning
- Se debe tener presente la consideración anterior, y sus posibles implicancias en la calidad de las predicciones del modelo matemático al interpretar sus resultados

# CONCLUSIONES

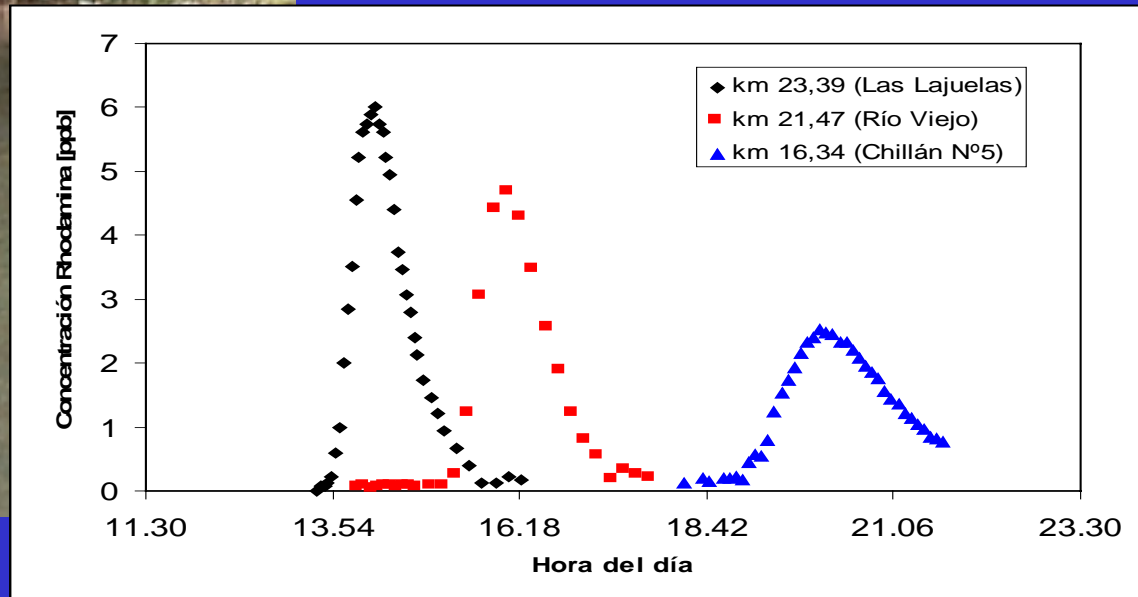
- En la literatura, se pueden encontrar valores del coeficiente de Manning para diferentes tipos de ríos.
- Sin embargo, se constató experimentalmente que el coeficiente de Manning, dentro de una misma sección transversal, es afectado por el nivel del agua
- Debido a la alta sensibilidad de la ecuación de Manning para dicho coeficiente, puede ser útil efectuar una serie de mediciones en terreno
- La calibración del modelo hidráulico (velocidad del agua y tiempos de viaje) puede ser mejorada sustancialmente utilizando datos de tiempo de viaje obtenidos en terreno, a través de experimentos con el trazador Rhodamina WT



# USO DEL TRAZADOR RODAMINA WT20% PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN RÍOS NATURALES



ver: experiencias prácticas en la modelación de la calidad del agua – caso de estudio Río Chillán (ing. W. Brevis, martes 29/01/02)



**Fig. 2** Dispersión de la pluma de Rhodamina. Cada curva indica el paso (concentración versus hora) de la pluma en cada una de las estaciones de muestreo. Resultados de la campaña de terreno del 18/11/00. Inyección en el sector El Diablo (km 27,99 desde Vista Bella),  $Q = 5,297 \text{ m}^3/\text{s}$ ; cantidad inyectada = 660 ml de una solución de 20%; **hora de inyección = 11h30**. Las distancias en km son medidas a lo largo del curso de agua, con la Estación Vista Bella como punto de referenci (km 0).

