

AFOROS



Edición 2024

Federico Vilaseca

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

fvilaseca@fing.edu.uy

INTRODUCCIÓN

Bibliografía

- ❖ Chow V.T.; Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1994), *Hidrología Aplicada*.
- ❖ Chow V.T (1994). *Hidráulica de canales abiertos*.
- ❖ U.S.B.R. (2001), *Water Measurement Manual* (<https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/>)
- ❖ Sauer, V.B. & Turnipseed, D.P. (2010). *Stage Measurement at Gaging Stations*. U.S.G.S. Techiques and Methods 3-A7 (<https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/tm3a7.pdf>)
- ❖ Turnipseed, D.P & Sauer, V.B. (2010). *Discharge Measurement at Gaging Stations*. U.S.G.S. Techiques and Methods 3-A8 (<https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/tm3a8.pdf>)
- ❖ Bentancor et al. (2018), *Tecnologías de medición y transmisión de datos en sistemas de riego por gravedad*, INIA FPTA -292. (<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11070/1/INIA-FPTA-66-292-Riego-Arroz-y-Pasturas.pdf>)

INTRODUCCIÓN

¿Qué es aforar?

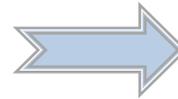
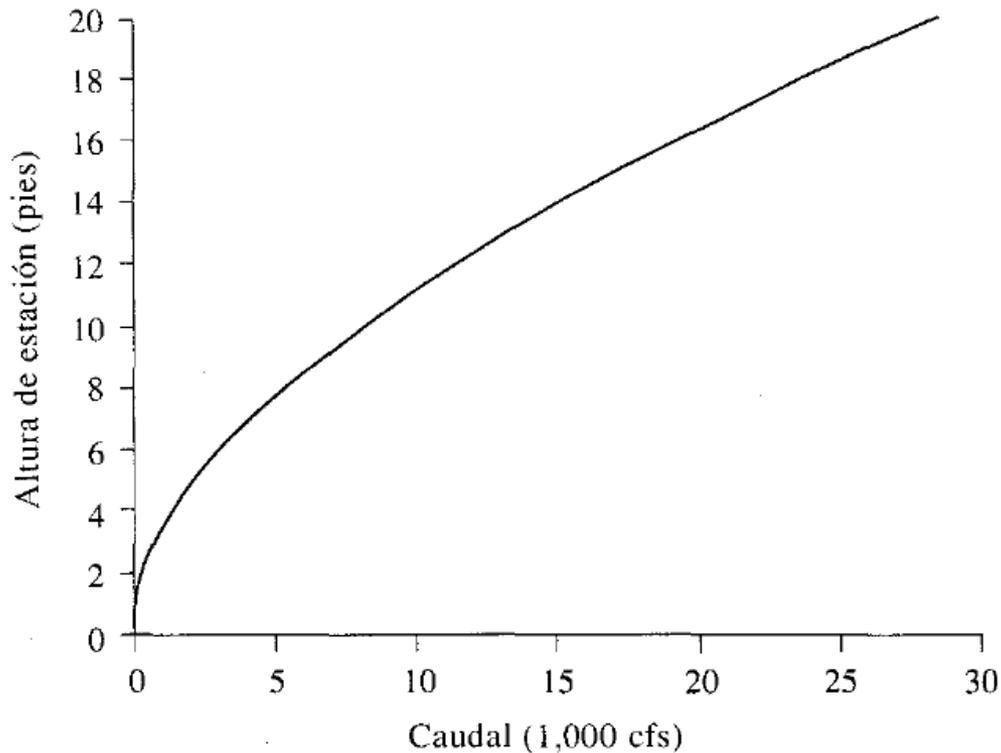
- ❖ Determinar, a través de mediciones, el caudal líquido que pasa por una sección dada en un cauce o canal.

¿Para qué aforar?

- ❖ Obtener información sobre los procesos hidrológicos de escorrentía superficial.
- ❖ Cuantificar volúmenes de agua disponibles para su adecuada gestión y distribución.
- ❖ Obtener datos de entrada a modelos de simulación hidrológica, para diseño, predicción, análisis y toma de decisiones.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de aforo tradicionales buscan determinar una curva que vincule el nivel del pelo de agua y el caudal circulante en una sección dada. ¿Por qué?



Para generar esta curva es necesario medir nivel y caudal

Figura extraída de Chow (1994).

CONTENIDOS

1) Medición de niveles

2) Medición de caudales

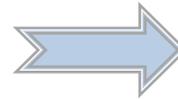
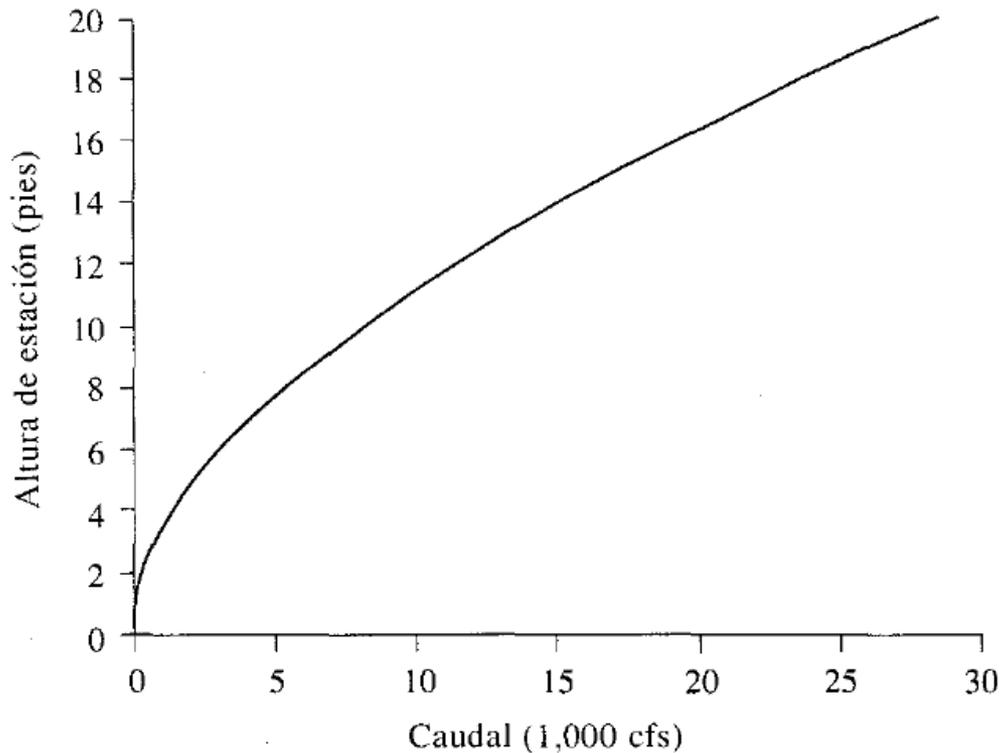
- A) Estructuras de control
- B) Correntómetros
- C) Perfiladores acústicos
- D) Trazadores

3) Curvas de aforo



INTRODUCCIÓN

Los métodos de aforo tradicionales buscan determinar una curva que vincule el nivel del pelo de agua y el caudal circulante en una sección dada. ¿Por qué?

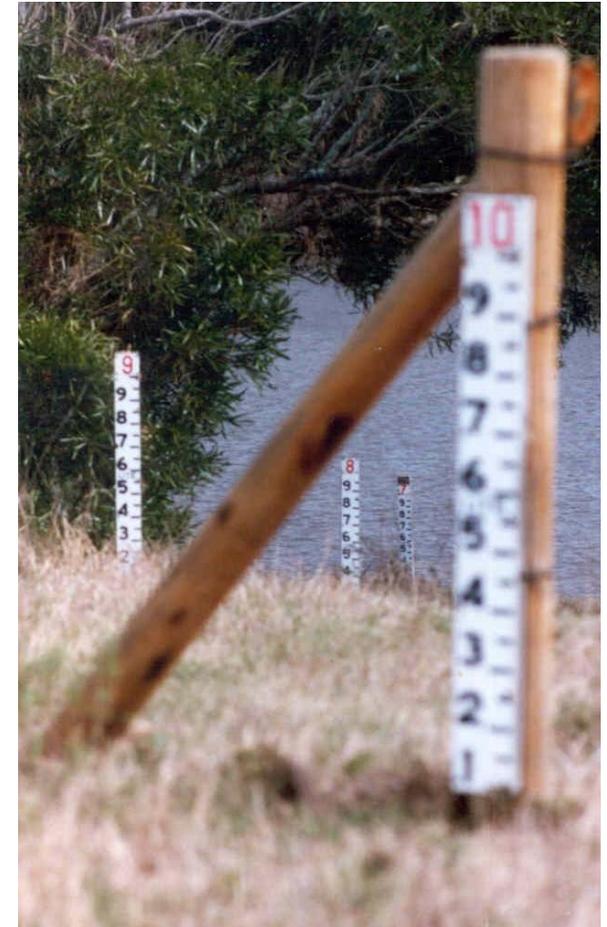


Para generar esta curva es necesario medir nivel y caudal

Figura extraída de Chow (1994).

MEDICIÓN DE NIVELES

Reglas



MEDICIÓN DE NIVELES

Reglas



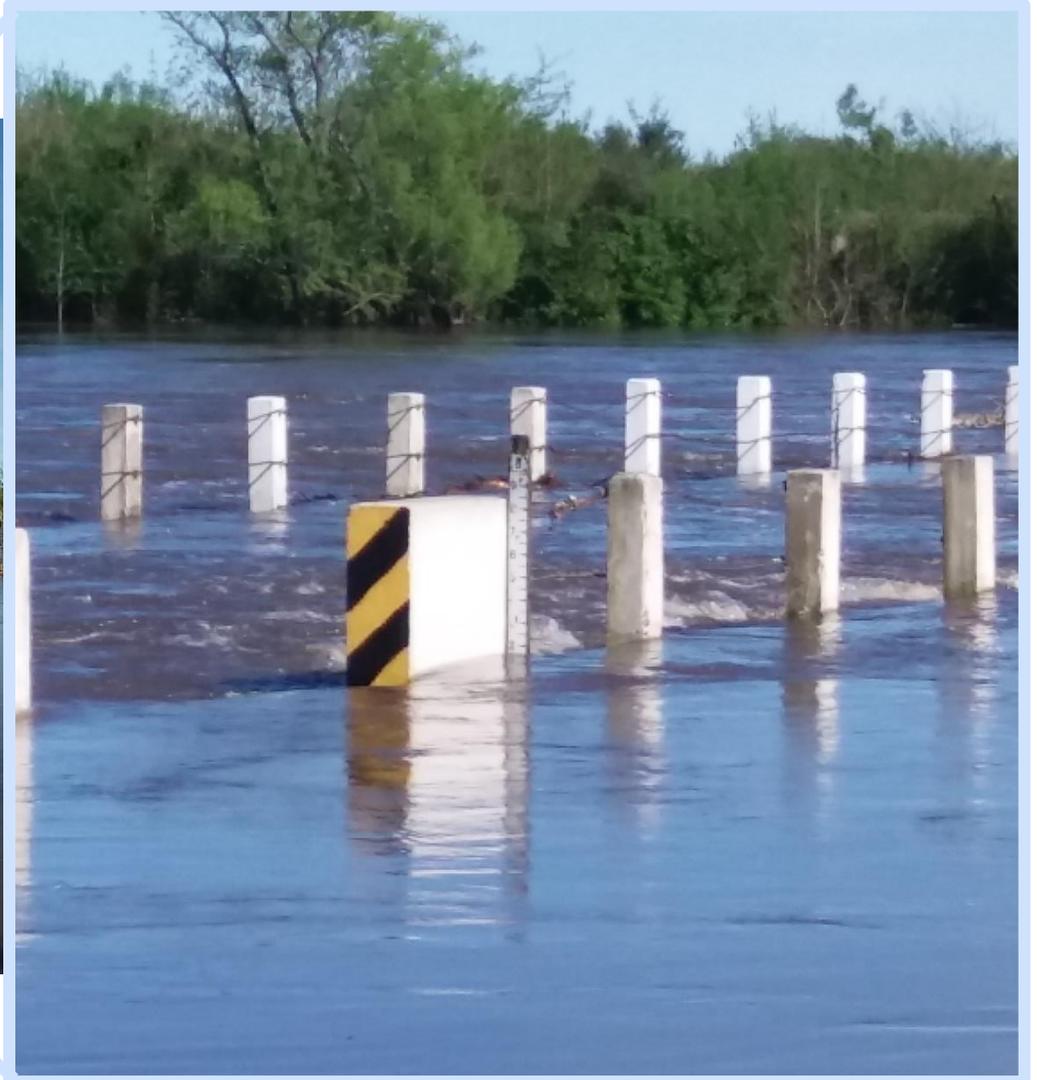
MEDICIÓN DE NIVELES

Reglas



MEDICIÓN DE NIVELES

Reglas



MEDICIÓN DE NIVELES

Sensores de presión sumergibles



* Imágenes extraídas del manual 3-A7 del USGS “Stage Measurement at Gaging Stations”

MEDICIÓN DE NIVELES

Sensores de presión sumergibles



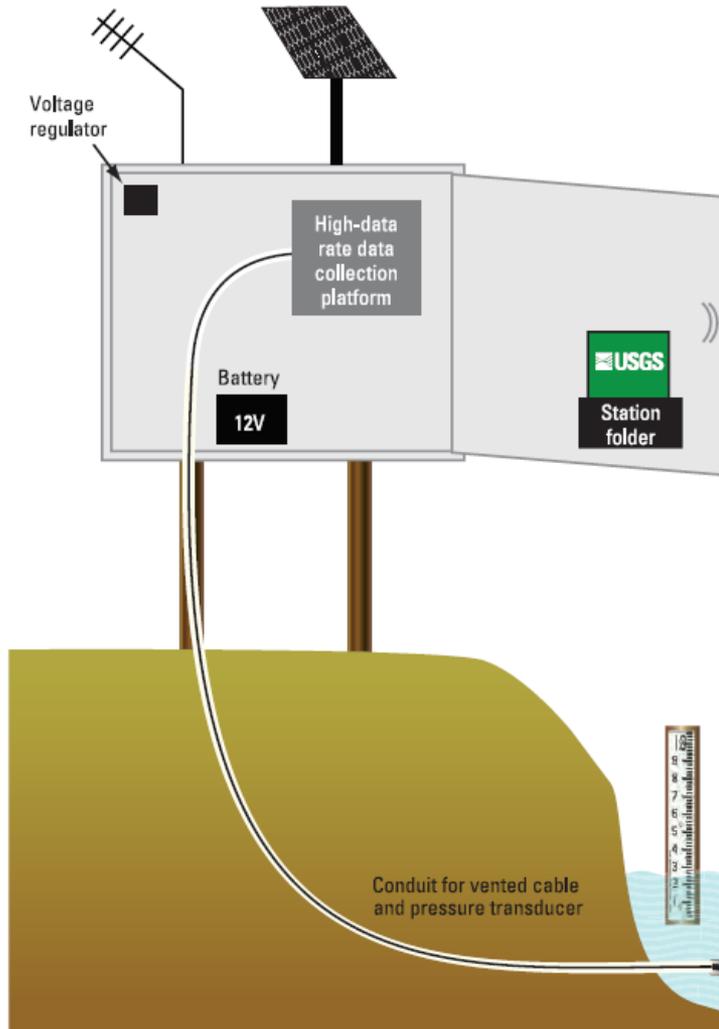
Cañada en Parque Salus



Arroyo Maldonado

MEDICIÓN DE NIVELES

Estaciones telemétricas



Río Daymán

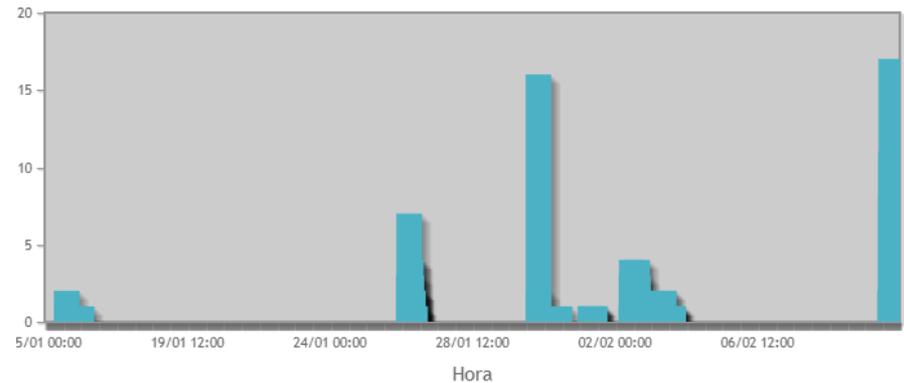
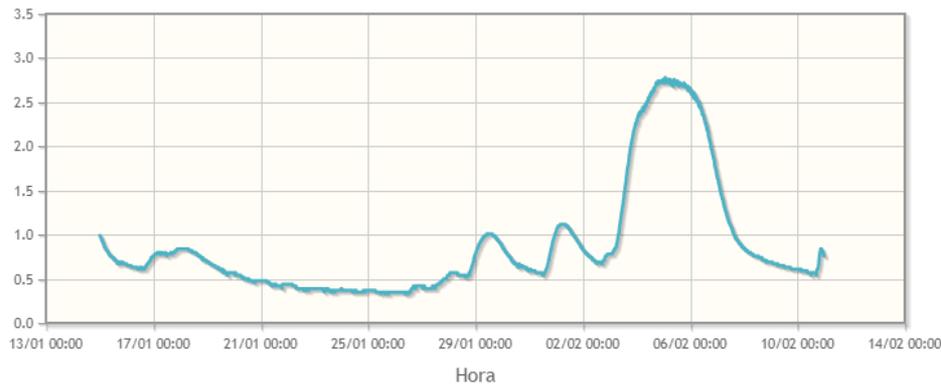
* Figura extraída del manual 3-A7 del USGS "Stage Measurement at Gaging Stations"

MEDICIÓN DE NIVELES

Estaciones telemétricas

Descarga de datos de nivel en Uruguay:

- ❖ <https://www.ambiente.gub.uy/SIH-JSF/paginas/sdh/consultaHDMCApublic.xhtml>
- ❖ https://www.saltogrande.org/mapa_estacion.php



MEDICIÓN DE NIVELES

Otros métodos

* Figuras extraídas del manual 3-A7 del USGS “Stage Measurement at Gaging Stations”



A



B

Medidor eléctrico



C



Radar



B

Flotador

MEDICIÓN DE CAUDALES

Criterios para selección de métodos de medición:

- ❖ Precisión requerida en la medida.
- ❖ Costo a corto, mediano y largo plazo.
- ❖ Rango de caudales que se quiere medir.
- ❖ Posibles efectos ambientales (inundabilidad, sedimentos, etc.).
- ❖ Condiciones o restricciones del sitio (accesibilidad, presencia de remansos, confluencias, estructuras, etc.)
- ❖ Frecuencia requerida de las mediciones.
- ❖ Aspectos constructivos (si aplica).
- ❖ Vandalismo.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición mediante estructuras de control

Estos métodos de aforo se basan en la instalación de estructuras interpuestas en el flujo, para generar una sección de control.

¿Qué es una sección de control?

Es una sección en la que existe una condición que determina **una relación única entre el caudal circulante y el tirante en la misma**. Por lo tanto, si se conoce el tirante se puede calcular el caudal.

¿Cómo hacemos para generar una sección de control?

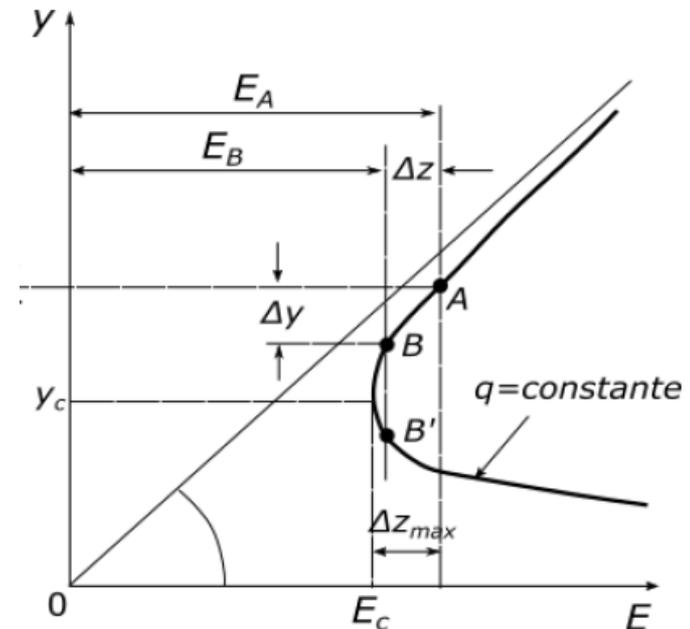
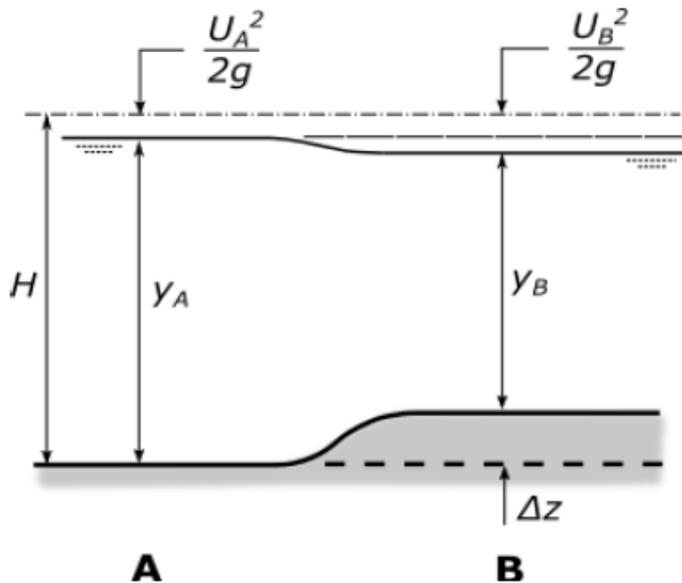
Imponiendo un tirante crítico mediante contracción lateral, sobreelevación del fondo o una caída libre.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

- ❖ ¿Cuál es la condición para que se genere una sección de control?
- ❖ ¿Qué altura debe tener el escalón para que eso pase?



MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

- ❖ ¿Cuál es la condición para que se genere una sección de control?

$$y_B = y_C \quad \Longrightarrow \quad E_B = E_C$$

- ❖ ¿Qué altura debe tener el escalón para que eso pase?

Por conservación de la carga: $H_A = H_B$

Energía específica: $E_A = y_A + U_A^2/2g$ (*carga respecto al fondo del canal*)

$$E_A = E_B + \Delta z$$

Entonces: $\Delta z > E_A - E_C \quad \Longrightarrow$ Condición para que se forme la sección de control

MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición mediante estructuras de control

Ejemplo: escalón interpuesto en el flujo

$$\Delta z > E_A - E_C \implies \text{Condición para que se forme la sección de control}$$

¿La sección de control se forma para todo el rango de caudales?

MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición mediante estructuras de control

- ❖ Las condiciones ideales que se plantean en el ejemplo del escalón no suelen cumplirse.
- ❖ La curva nivel vs. caudal se obtiene a partir de la combinación de desarrollos teóricos derivados de la mecánica de los fluidos y ensayos físicos de laboratorio.
- ❖ Entre los métodos más comunes se encuentran:
 - Vertederos de pared delgada
 - Vertederos de pared gruesa
 - Canales Parshall (o similar)
 - Orificios
 - Compuertas

MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada

La sección de control se genera a través de un vertido por encima de una placa delgada (espesor del entorno de 2 mm o menos).

Hay una relación entre el tirante en la zona de aproximación y el caudal vertido (Q vs. h), que depende de la geometría del vertedero. De esa forma se determina el caudal indirectamente a través de la medición de nivel.



MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada



MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada



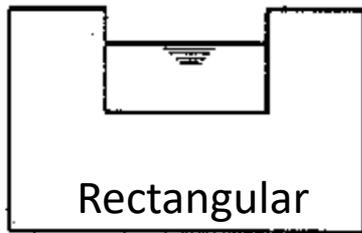
MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada

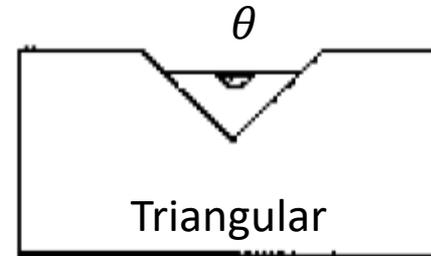


MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada



$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2}$$



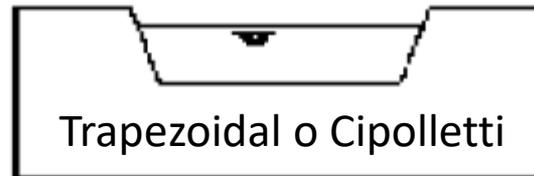
$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2}$$

Siendo:

- ❖ Q el caudal
- ❖ μ coeficiente de gasto empírico.
- ❖ b el ancho del vertedero (caso rectangular)
- ❖ h la altura sobre cota de vertido

MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada



MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada



Sección compuesta triangular + vertical

MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared delgada

- ❖ Útiles en canales artificiales o cauces pequeños.
- ❖ Rango de caudales acotado.
- ❖ Se genera un remanso considerable.
- ❖ Tener en cuenta retención de sedimentos.
- ❖ Alto costo inicial, pero bajo costo de mantenimiento.
- ❖ Método preciso si funciona correctamente.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared gruesa

Se extienden las formulaciones para el caso de pared delgada, agregando un coeficiente de descarga adicional ε .

Caso rectangular: $Q = \varepsilon C_e b h^{3/2}$

Caso triangular: $Q = \varepsilon C_e \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2}$

MEDICIÓN DE CAUDALES

Vertederos de pared gruesa



MEDICIÓN DE CAUDALES

Canales

En este caso no se impone un vertido sino una contracción lateral y/o elevación del fondo de modo de generar la sección de control sobre la estructura.



Canal Parshall

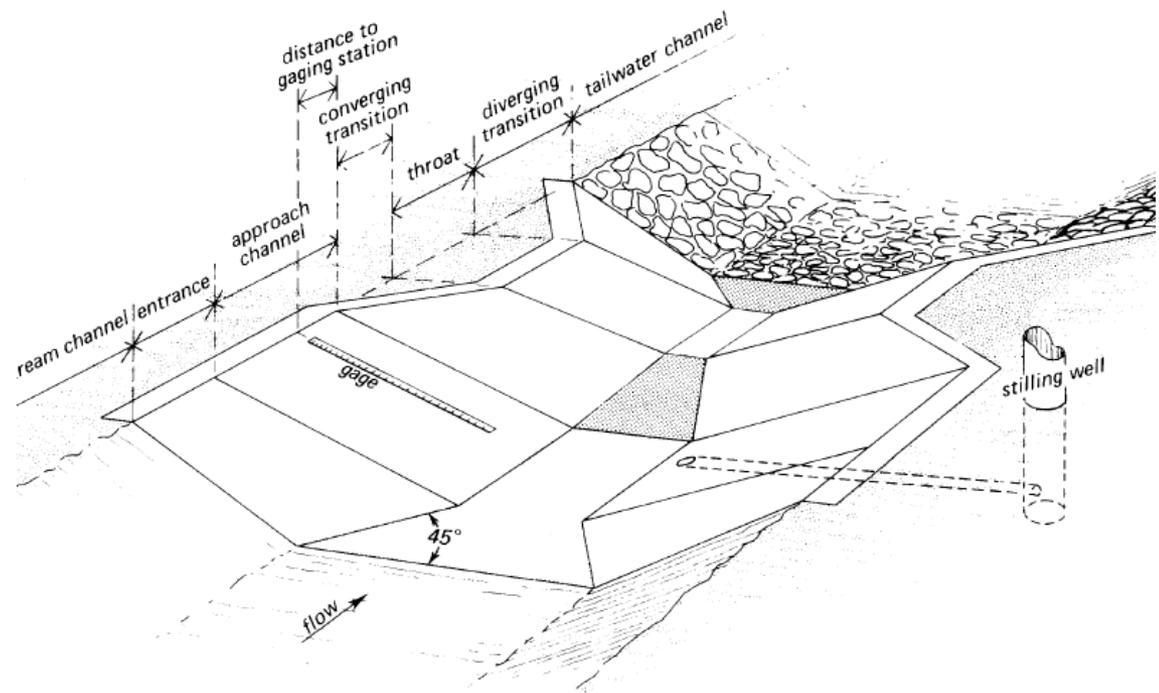


Figura extraída del manual del software WinFlume del USBR.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Canales



MEDICIÓN DE CAUDALES

Canales

- ❖ Aplicable a canales de mayor tamaño que los de pared delgada.
- ❖ Se generan remansos menores que con los de pared delgada.
- ❖ En general mayor costo constructivo.
- ❖ No generan tantos problemas de retención de sedimentos.
- ❖ De todas formas método no apto ante gran variabilidad de caudales.
- ❖ Flexibilidad de diseño para adecuarse a cada caso de estudio.
- ❖ Hay diseños predeterminados y ampliamente estudiados (Parshall).

MEDICIÓN DE CAUDALES

Canales



Fotografías
extraídas de
Bentancor et al.
(2018).

MEDICIÓN DE CAUDALES

Canales



MEDICIÓN DE CAUDALES

Métodos basados en medición de velocidades

Se basan en el principio de conservación de la masa, por el cual:

$$Q = V \cdot A$$

Siendo:

- Q el caudal
- V la velocidad media del agua en la sección
- A el área de flujo en la sección

Estos métodos requieren determinar:

1. La geometría de la sección transversal de flujo (relevamiento batimétrico)
2. La velocidad del agua en la sección

MEDICIÓN DE CAUDALES

Métodos basados en medición de velocidades

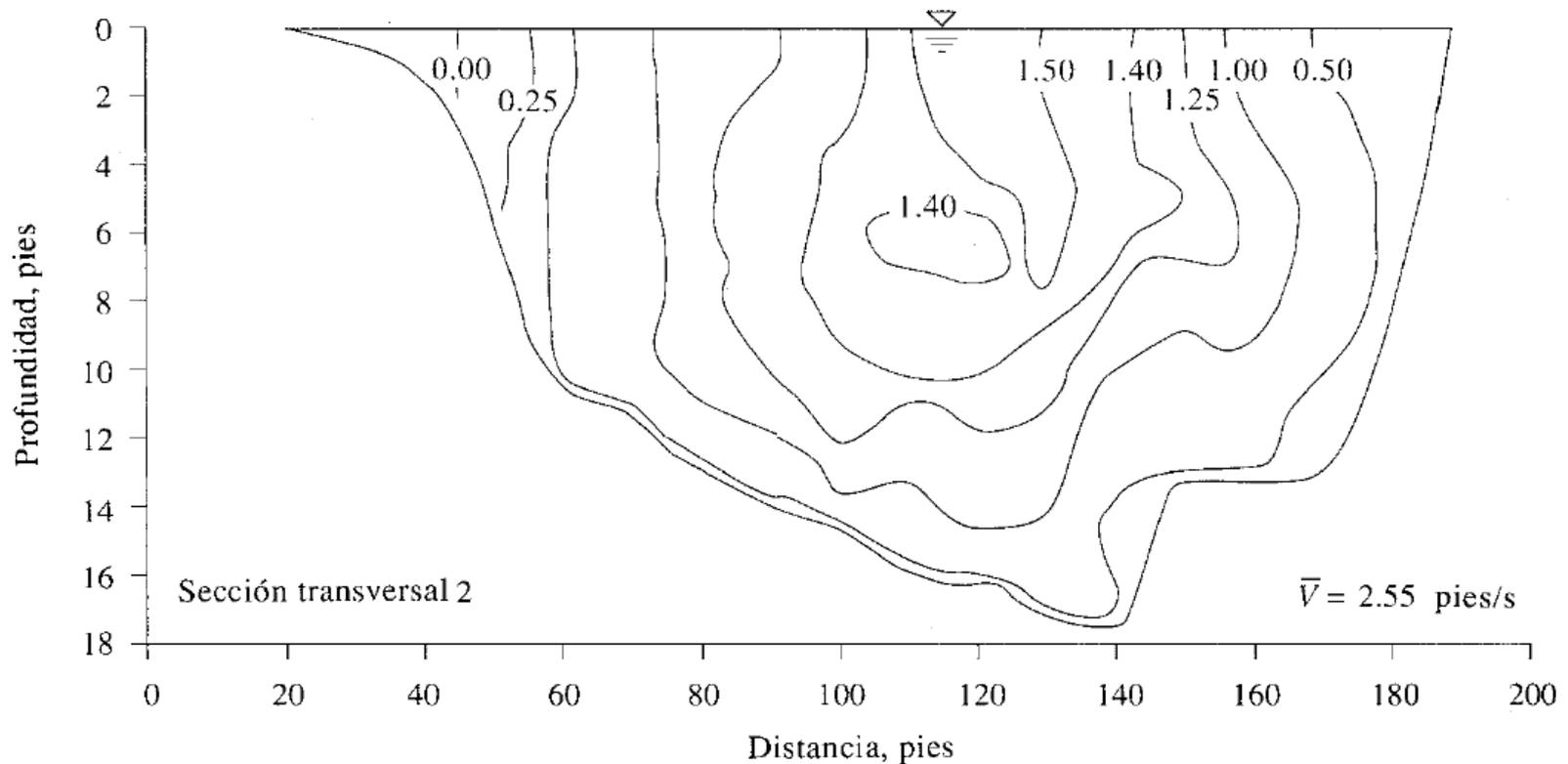
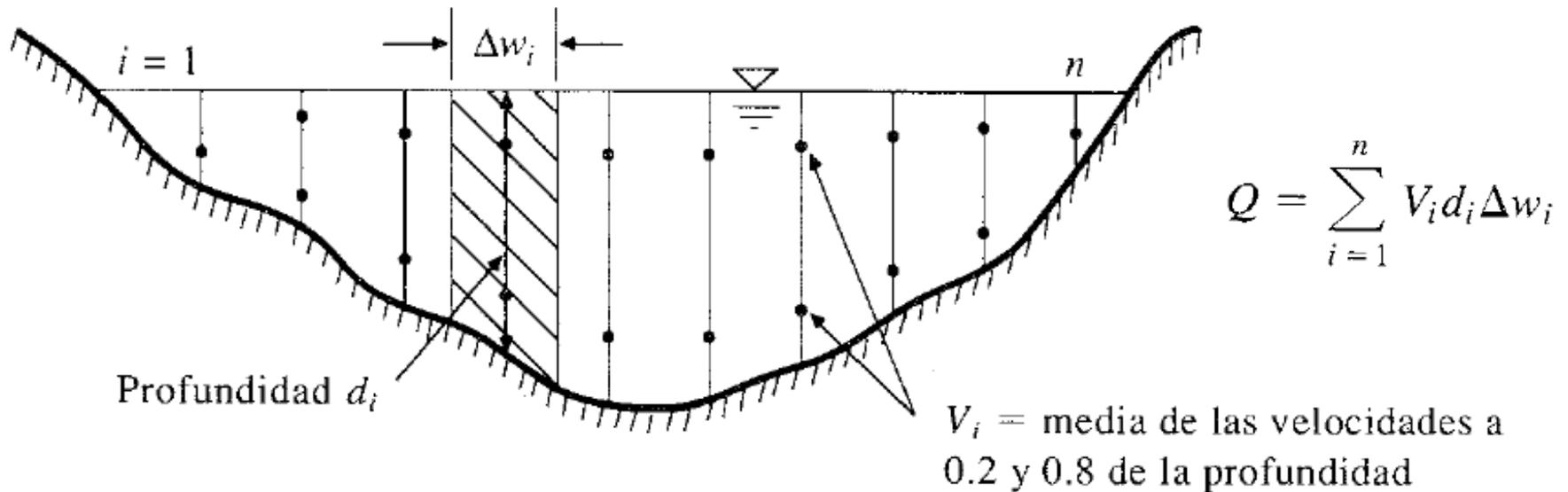


Figura extraída de Chow (1994).

MEDICIÓN DE CAUDALES

Métodos de medición puntual

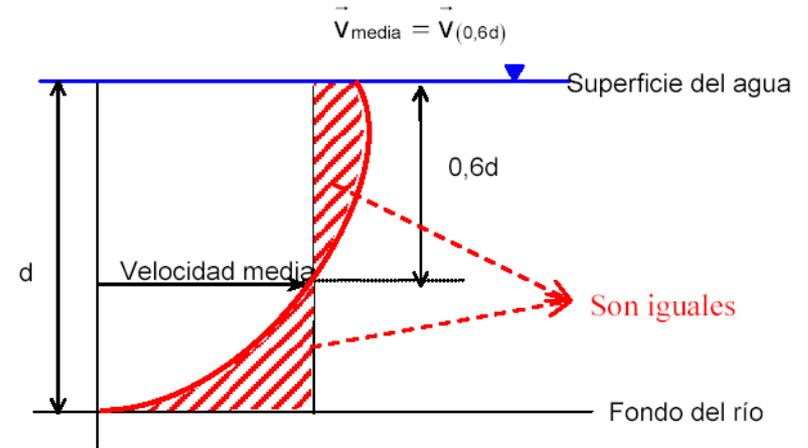
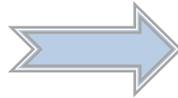
- ❖ Correntómetro de hélice.
- ❖ Correntómetro magnético
- ❖ Correntómetro acústico (ADV).



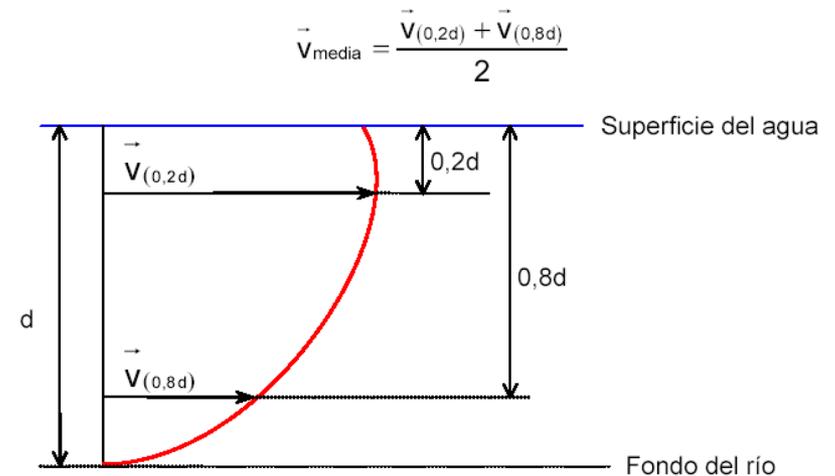
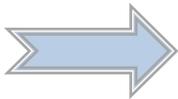
MEDICIÓN DE CAUDALES

Métodos de medición puntual

❖ Profundidad < 0.6 m

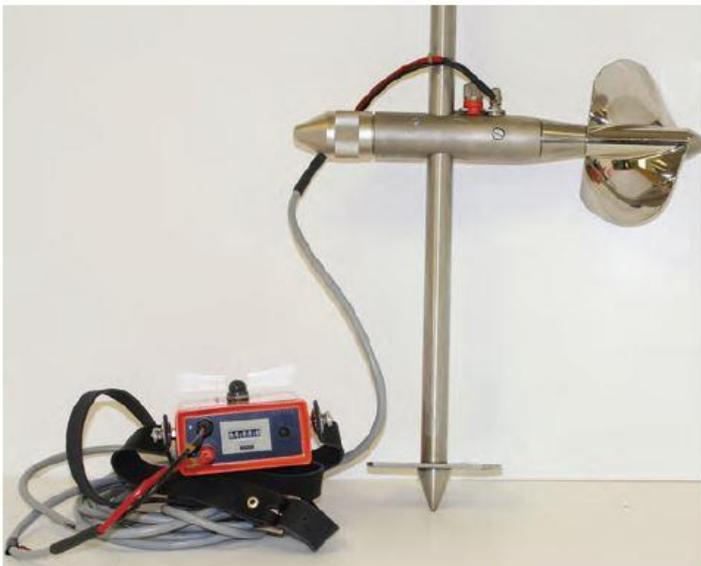


❖ Profundidad > 0.6 m



MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro de hélice



* Figuras extraídas del manual 3-A8 del USGS “Discharge Measurement at Gaging Stations”

MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro de hélice

- ❖ Se cuenta la cantidad de vueltas por segundo que denominaremos n
- ❖ La velocidad v es igual a $v = K_1 \times n + K_2$
- ❖ Las constantes K_1 y K_2 son provistas por el fabricante.



[VIDEO 1](#)

[VIDEO 2](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

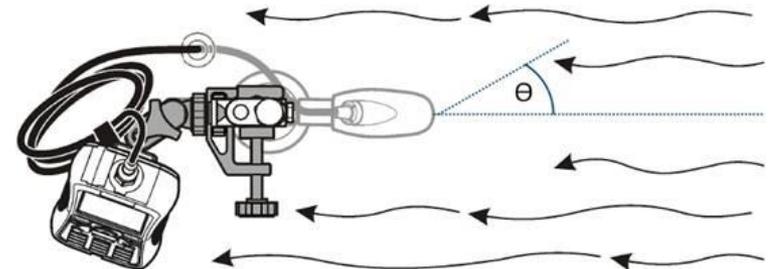
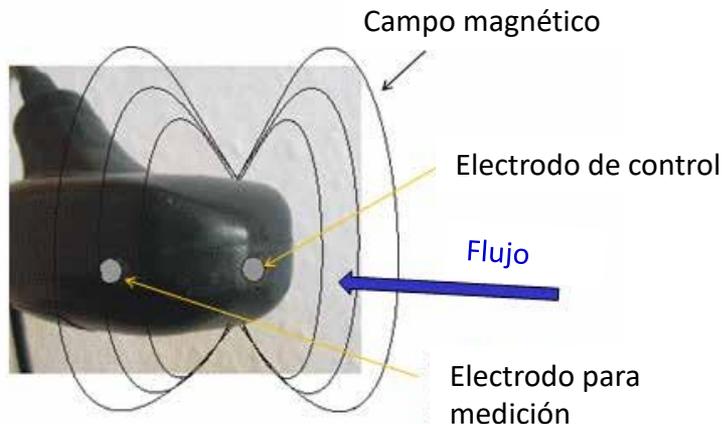
Correntómetro de hélice

- ❖ Aplicable en cauces y canales de diversa escala.
- ❖ Puede usarse por vadeo o desde puentes.
- ❖ La medición desde puentes requiere equipamiento adicional (linga, grúa, medidor de profundidad), lo que la hace considerablemente más costosa.
- ❖ Mucho error al medir con velocidades y tirantes bajos, no adecuado para casos de estiaje.
- ❖ Sensible al ángulo de esviaje respecto al flujo y a posibles obstrucciones por elementos flotantes arrastrados por el flujo.
- ❖ Funcionamiento mecánico, requiere mantenimiento frecuente.
- ❖ Debido al desgaste deben calibrarse periódicamente.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro magnético

- ❖ Utiliza el principio de Faraday que establece que un conductor (el agua en este caso) que se mueve entorno a un campo magnético genera una corriente proporcional a la velocidad.
- ❖ Provee una medida directa de la velocidad, sin curva de calibración.
- ❖ Solo mide una componente de la velocidad, en la dirección en que se alinea el instrumento.



MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro magnético



*FlowSens
(standard)*



*FlowFlat
(for low water measurements)*



MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro magnético

- ❖ Aplicable idealmente en cauces pequeños, para medición por vadeo.
- ❖ Mejora el rango de velocidades de medición respecto al correntómetro de hélice.
- ❖ Mayor precisión que el correntómetro de hélice
- ❖ Sensible al ángulo de esviaje respecto al flujo.
- ❖ No posee elementos mecánicos, no requiere tanto mantenimiento como el de hélice. Tampoco requiere calibración.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

[VIDEO](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

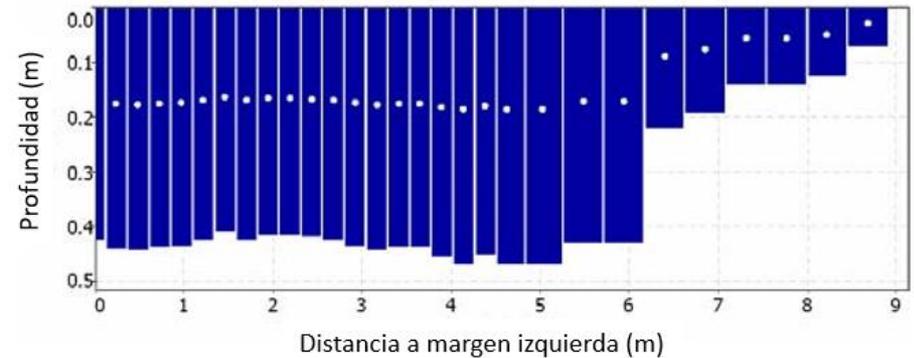
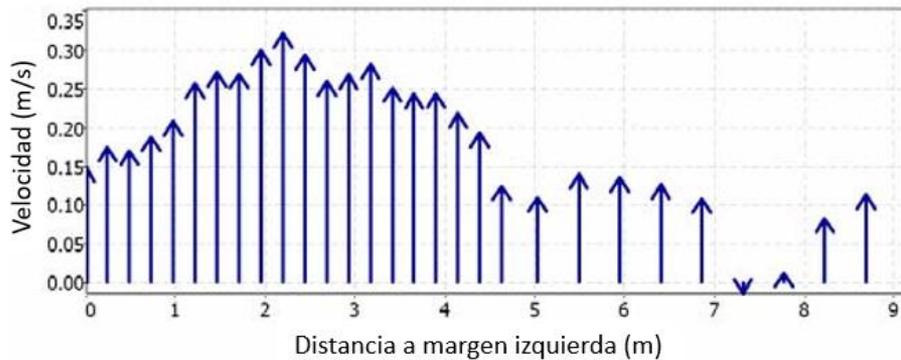
Correntómetro acústico (ADV)

- ❖ Funciona con un principio acústico, aprovechando el efecto Doppler.
- ❖ ADV = Acoustic Doppler Velocimeter
- ❖ Envía pulsos sonoros mediante el emisor. Estos rebotan en las partículas del flujo y su retorno es captado por los receptores. El instrumento estima la velocidad a partir del cambio en la longitud de la onda sonora entre su emisión y su recepción.
- ❖ Es capaz de medir tantas componentes de la velocidad como receptores tenga. Se comercializan con 2, 3 y hasta 4 receptores.



MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro acústico (ADV)



MEDICIÓN DE CAUDALES

Correntómetro acústico (ADV)



Instrumento	Rango de Velocidades (m/s)	Profundidad mínima (m)
Correntómetro de hélice	0.025 – 10	0.05
Correntómetro magnético	$1 \times 10^{-3} - 5$	0.08
Correntómetro acústico	$1 \times 10^{-3} - 4$	0.08

MEDICIÓN DE CAUDALES

Velocímetro acústico (ADV)

- ❖ Aplicable idealmente en cauces pequeños, para medición por vadeo.
- ❖ Igual o mayor precisión que correntómetro magnético.
- ❖ Menor sensibilidad a orientación del instrumento.
- ❖ Tampoco requiere mucho mantenimiento ni calibración.
- ❖ Permite aplicaciones científicas que exceden la medición de caudal.
- ❖ Depende de que haya una concentración adecuada de sedimento o partículas en suspensión.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría.

[VIDEO](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)

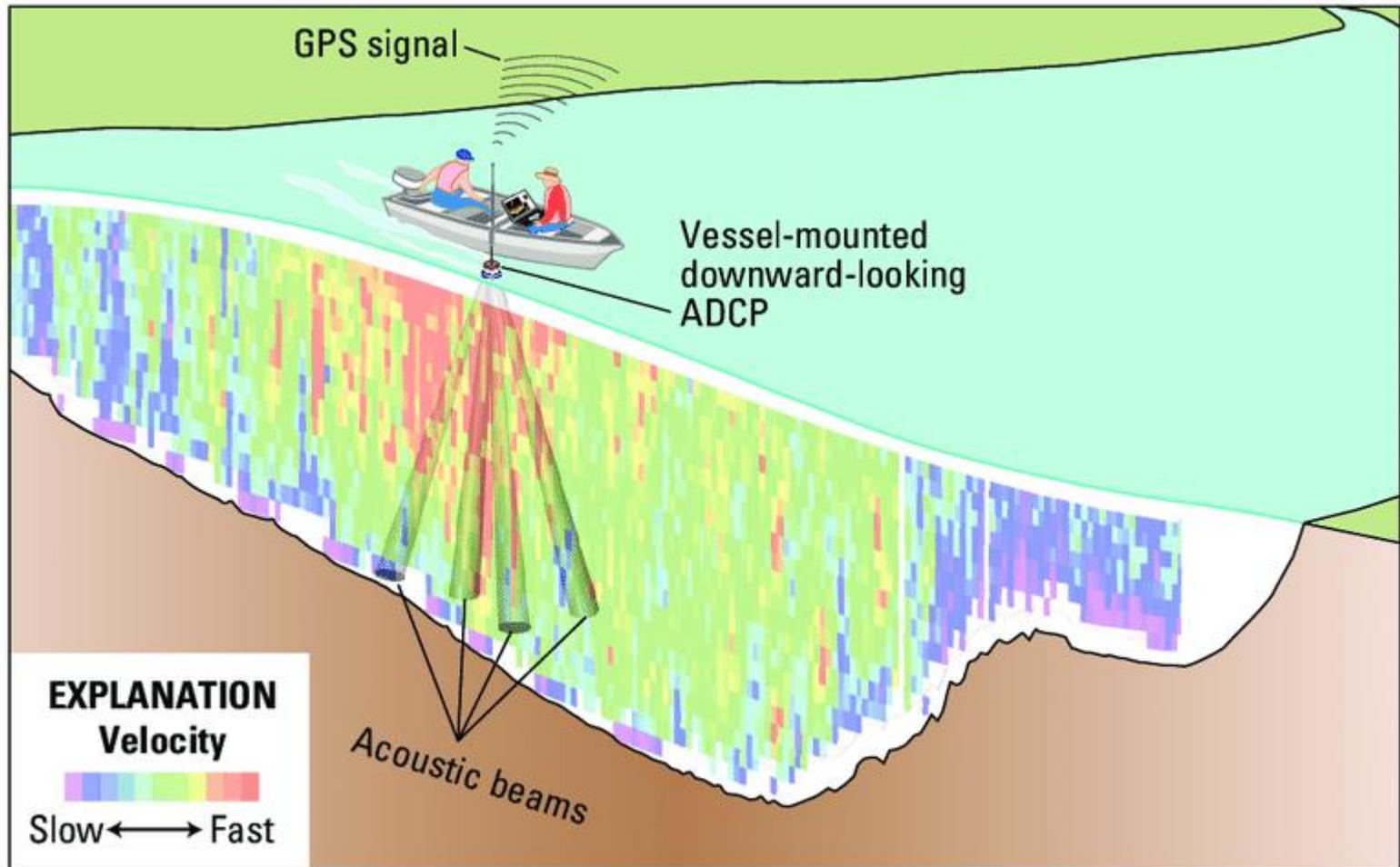
- ❖ Mismo principio de funcionamiento que el ADV.
- ❖ ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler
- ❖ Envía pulsos sonoros en 4 direcciones. La diferencia con el ADV es que estima perfiles de velocidad en esas 4 direcciones, en lugar de realizar mediciones puntualmente.
- ❖ Desplazándolo a lo ancho del cauce es capaz de medir todo el campo transversal de velocidad. El software del instrumento lo integra para determinar el caudal.



* Figuras extraídas del manual 3-A8 del USGS
“Discharge Measurement at Gaging Stations”

MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)



MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)

[VIDEO 1](#)

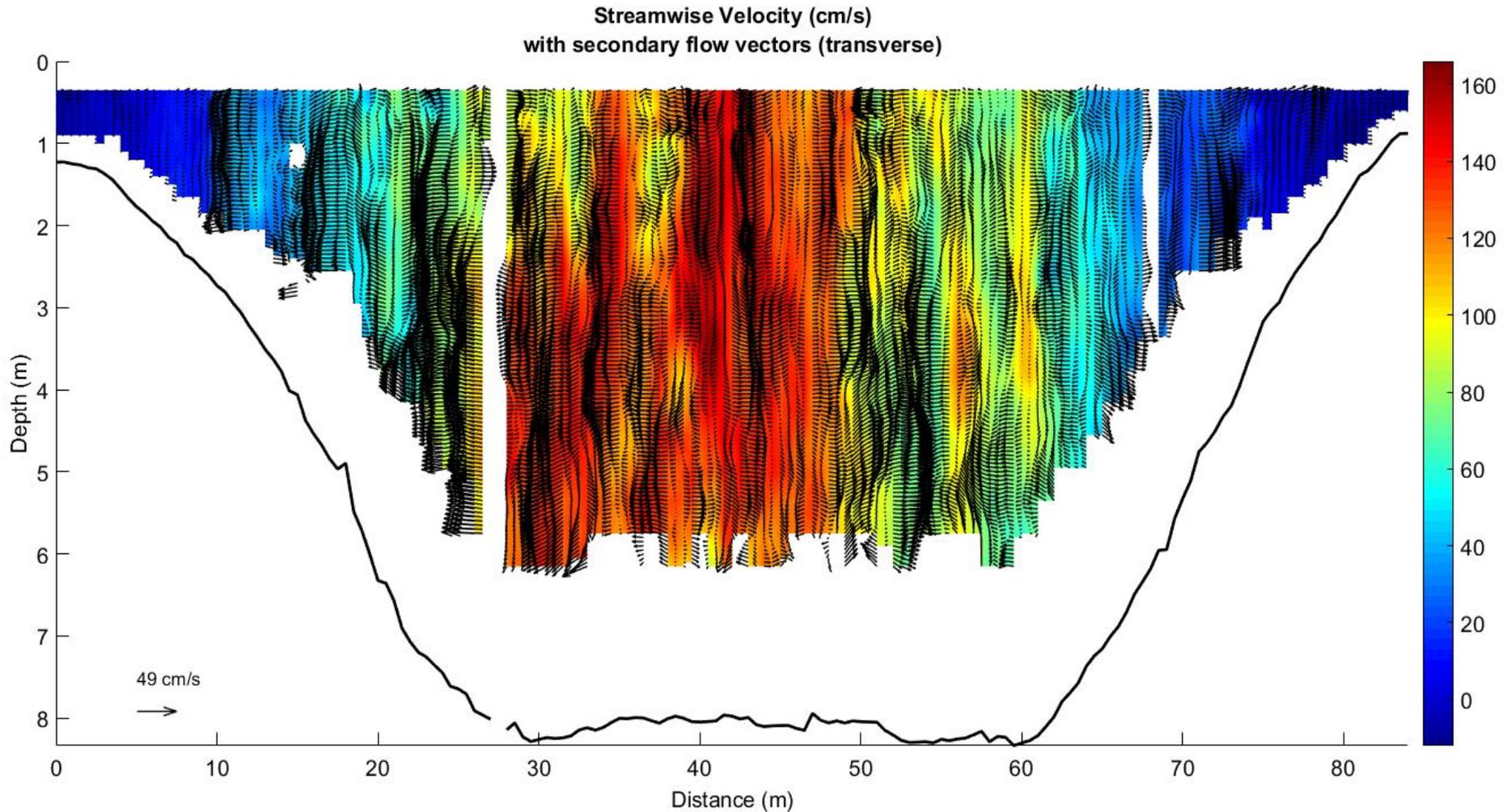
[VIDEO 2](#)

[VIDEO 3](#)

[VIDEO 4](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)



MEDICIÓN DE CAUDALES

Perfilador acústico (ADCP)

- ❖ El rango de aplicación depende de las características del instrumento. Los hay aptos para distintos rangos de tirante y caudal.
- ❖ Permite obtener una medida muy precisa del caudal si se usa adecuadamente.
- ❖ Utilizable por vadeo o desde puentes.
- ❖ Depende de que haya una concentración adecuada de sedimento o partículas en suspensión.
- ❖ Elimina la necesidad de relevar la batimetría de la sección, pues utiliza un pulso sonoro adicional con este fin.
- ❖ Puede ser un método de “caja negra”.
- ❖ Instrumento de costo elevado y que requiere personal capacitado para su uso.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Medición con trazadores

Se considera un trazador a cualquier elemento o sustancia que se mezcla o se desplaza junto con el flujo y es detectable por algún método.

Ejemplos:

- Tintas
- Sustancias químicas como fertilizante, sal, etc.
- Radioisótopos
- Elementos flotantes
- Secuencias de presión turbulenta generadas por vórtices

MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial

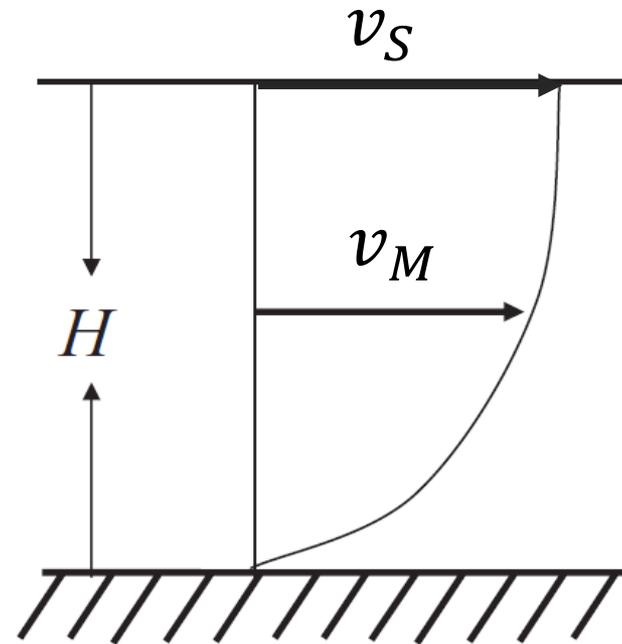
Se determina la velocidad superficial mediante el seguimiento de trazadores flotantes. Luego se estima la velocidad media en vertical a través de un coeficiente empírico α :

$$v_M = \alpha v_S$$

v_M = velocidad promedio en vertical

v_S = velocidad superficial

α = coeficiente empírico, toma valores entre 0.6 y 0.9

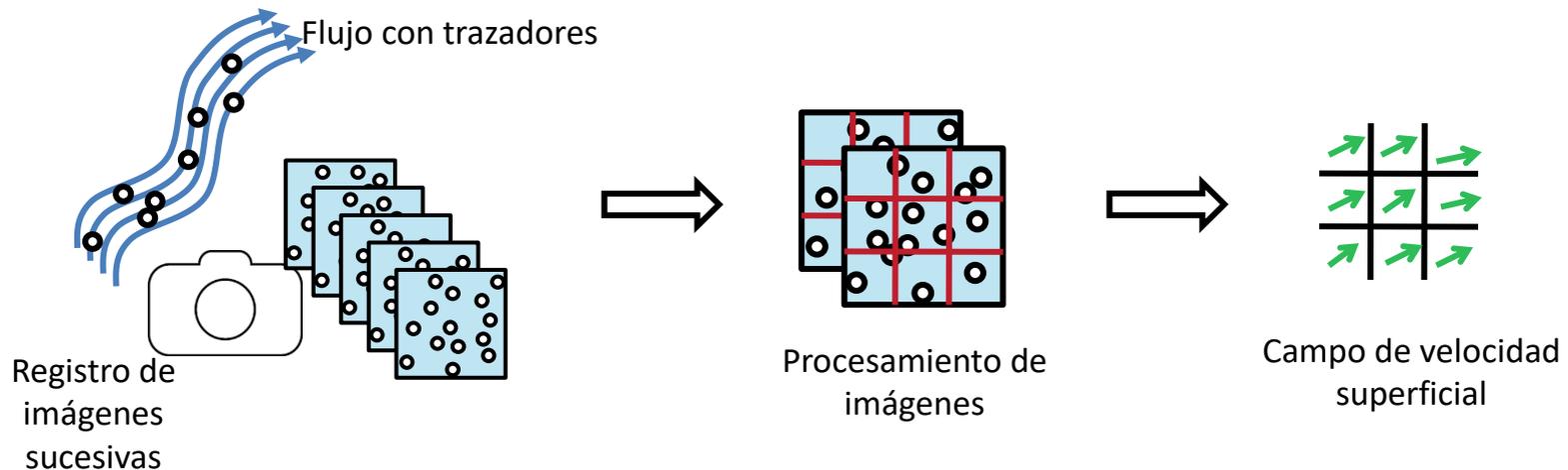


[VIDEO](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)

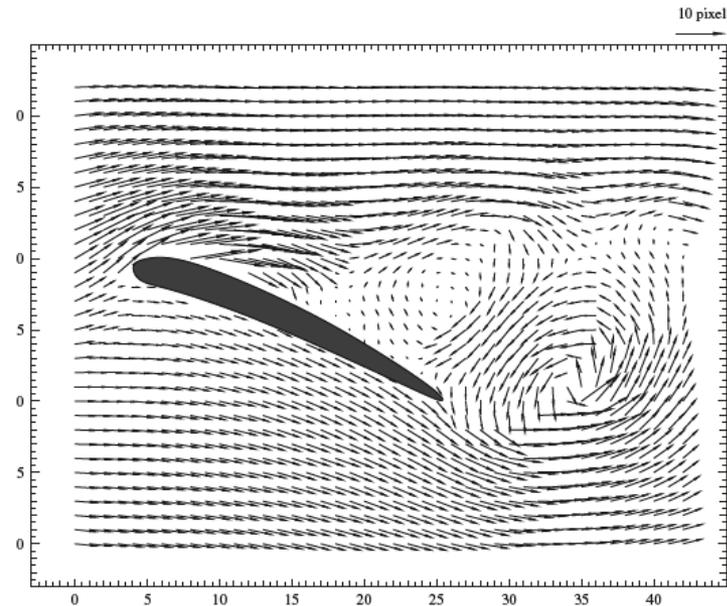
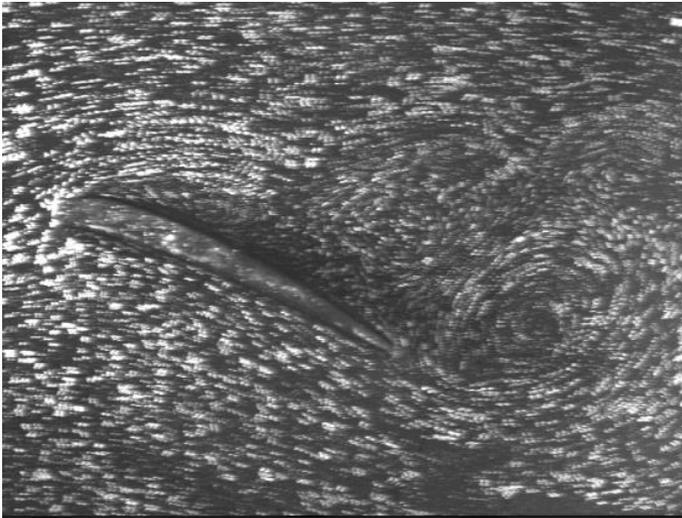
Se realiza un seguimiento de trazadores mediante fotografías sucesivas y luego se procesan las imágenes para obtener velocidades:



MEDICIÓN DE CAUDALES

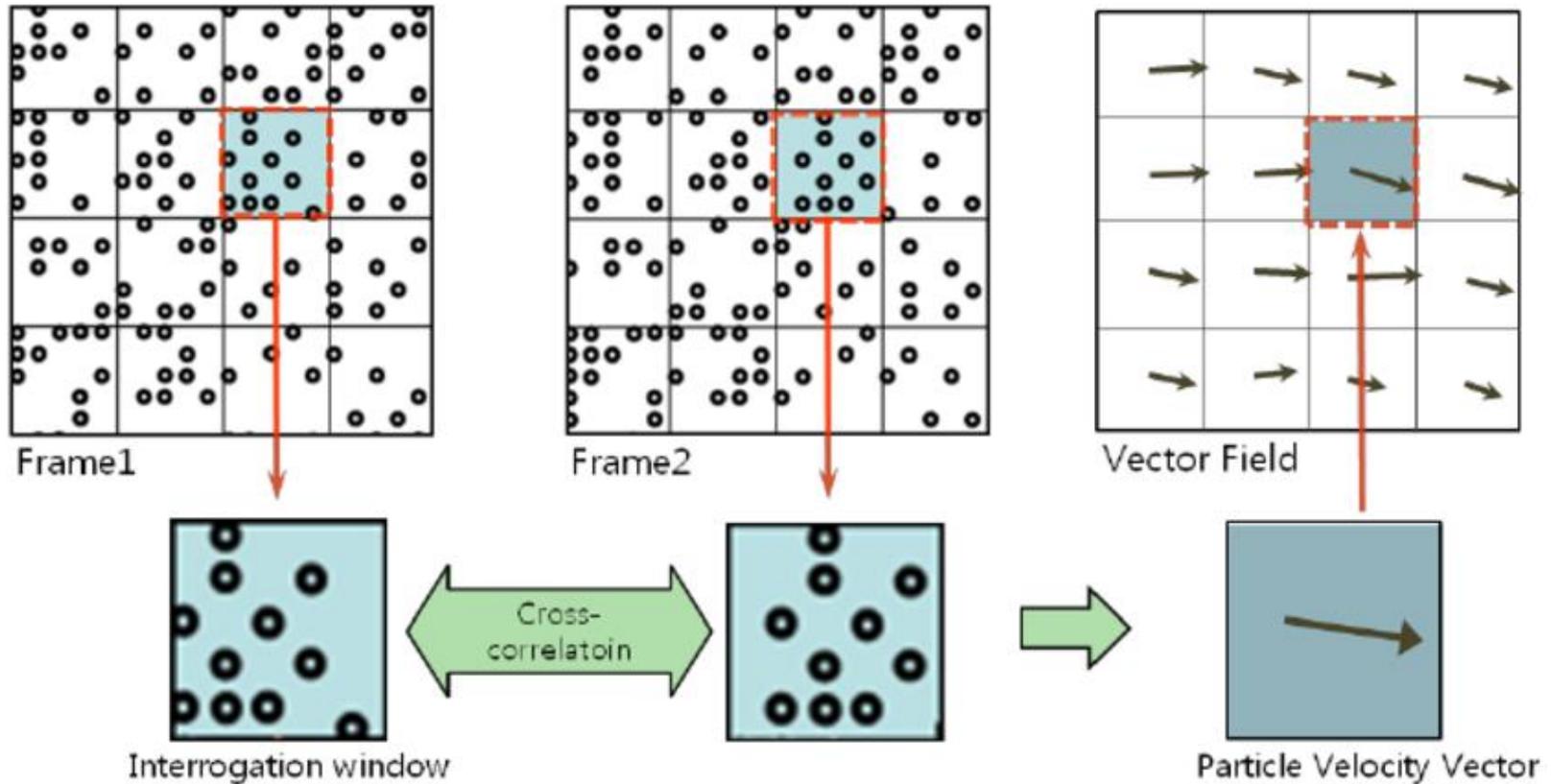
Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)

Tiene su origen en laboratorio, para la caracterización de flujos turbulentos. Tradicionalmente se utiliza iluminación láser y una cámara de alta velocidad.



MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes (PIV)



MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)

- ❖ Los avances técnicos en equipos de fotografía y de computación permitieron ampliar el método para medición en campo. A esta variante se la denomina LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry).
- ❖ El mismo se utiliza para determinar el campo de velocidad superficial del flujo, que luego se multiplica por el factor α para estimar el campo de velocidades medias. Este luego se integra en horizontal para el cálculo del caudal
- ❖ En este caso se requieren procesamientos adicionales, como aplicación de filtros y rectificaciones a las imágenes registradas.

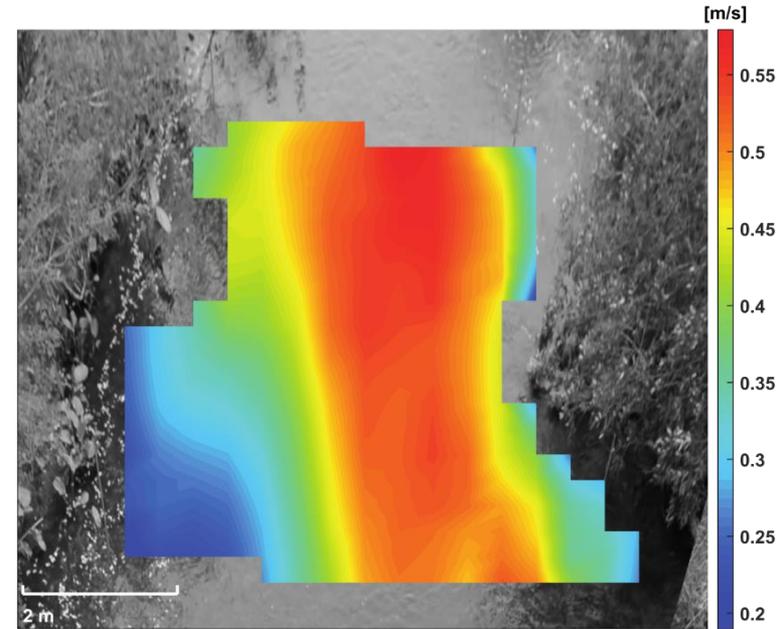
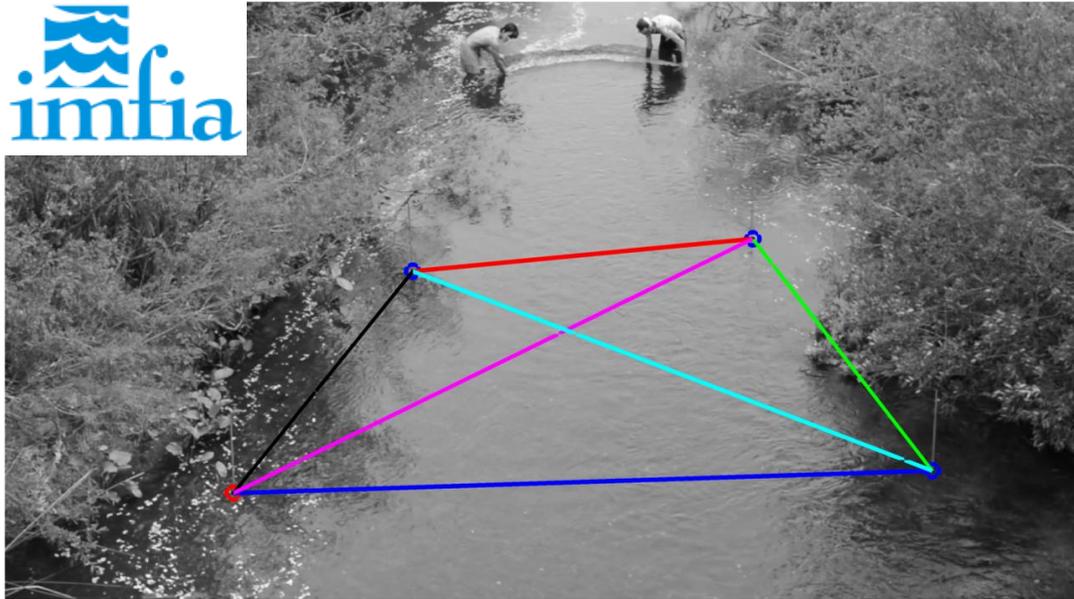
MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)



MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial - Velocimetría por imágenes de gran escala (LSPIV)



[VIDEO 1](#)

[VIDEO 2](#)

MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador superficial

- ❖ Aplicable a un amplio rango de condiciones, siendo particularmente ventajoso en condición de estiaje
- ❖ Mayor error que los instrumentos tradicionales de medición en la determinación de velocidades y caudales
- ❖ El parámetro α es variable en función del caudal, la geometría de la sección y el material del fondo. También es fuente importante de incertidumbre
- ❖ Método rápido y de bajo costo.
- ❖ Requiere relevamiento independiente de la batimetría
- ❖ Abre posibilidades al involucramiento ciudadano y crowdsourcing. 

[VIDEO](#)



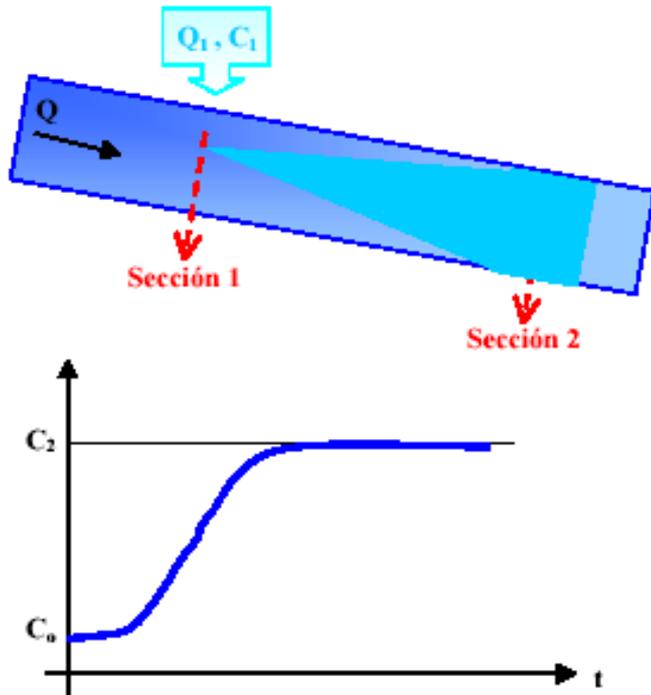
MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador químico

- ❖ Se introduce en el flujo una sustancia que se disuelve en el agua y cuya concentración se puede determinar.
- ❖ Comúnmente se utiliza sal.
- ❖ Se necesita:
 - ❖ Trazador conservativo: no se pierde masa.
 - ❖ Baja concentración natural del trazador.
 - ❖ Zona de mezcla que uniformiza concentración.
 - ❖ Caudal constante.

MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador químico



C_0 = concentración preexistente en el cuerpo de agua.

C_1 = concentración de la solución que se incorpora.

C_2 = concentración final en el punto de medición

$$qC_1 + QC_0 = (q + Q)C_2 \quad \Rightarrow \quad Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

MEDICIÓN DE CAUDALES

Trazador químico

- ❖ Aplicable en canales artificiales o cauces pequeños.
- ❖ Debe asegurarse la mezcla completa del trazador.
- ❖ No requiere conocer la velocidad del flujo ni la geometría de las secciones involucradas.

[VIDEO](#)