

# HIDROMETRÍA BÁSICA DE LAS CONDUCCIONES LIBRES

**JOSEP MARIA FRANQUET BERNIS**

DR. INGENIERO AGRÓNOMO, EUR-ING.

DR. CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

ACADÉMICO NUMERARIO DE LA REAL ACADEMIA EUROPEA DE DOCTORES

## ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
Resumen / Resum / Summary .....	3
<b>1. Introducción.....</b>	<b>4</b>
1.1. Generalidades .....	4
1.2. Concepto y definiciones .....	4
<b>2. Importancia .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Medición del caudal del agua.....</b>	<b>6</b>
3.1. Métodos de medición .....	6
3.1.0. Idea previa.....	6
3.1.1. Velocidad y sección mojada .....	7
3.1.1.1. Método del correntómetro o molinete .....	8
3.1.1.2. Método del flotador.....	9
3.1.1.3. Distribución de velocidades en la sección transversal.....	11
3.1.2. Estructuras hidrométricas.....	17
3.1.3. Método volumétrico .....	18
3.1.4. Método químico.....	18
3.1.5. Calibración de compuertas (método combinado).....	18
3.2. Sección de medición .....	19
3.3. Calibración de la sección.....	19
3.4. Registros de medición .....	20
<b>4. La red hidrométrica .....</b>	<b>20</b>
4.1. Definición.....	20
4.2. Análisis de la existencia y pertinencia de la red hidrométrica.....	20
4.3. Verificación del estado de funcionamiento de la red hidrométrica y calibración de las estructuras de medición.....	21
<b>5. Sistema estadístico de información hidrométrica (SEIH).....</b>	<b>21</b>
5.1. Establecimiento de métodos y formatos de registro .....	21
5.2. Ejecución de aforos y mediciones-observaciones en la red .....	21
5.3. Procesamiento e interpretación de la información.....	22

	<u>Pág.</u>
5.4. Entrega de la información para ser utilizada en las rutinas de operación.....	22
5.5. Documentación y archivo .....	23
<b>6. Aforo del agua. Metodología e instrumentación .....</b>	<b>23</b>
6.1. Definición.....	23
6.2. Importancia.....	23
6.3. Métodos de aforo .....	23
6.4. Aforo de un cauce con correntómetro .....	24
6.4.1. La estación de aforo .....	24
6.4.2. Método del correntómetro .....	24
6.5. Limnímetros y limnígrafos .....	25
6.5.1. Sistemas convencionales .....	25
6.5.2. El limnímetro electrónico .....	26
6.6. Aforo con flotadores .....	27
6.6.1. Metodología.....	27
6.6.2. Cálculo de la velocidad.....	28
6.6.3. Cálculo del caudal .....	28
6.7. Breve apunte de la hidrometría de las conducciones forzadas .....	28
6.7.1. Concepto .....	28
6.7.2. Instrumentos utilizados.....	28
6.8. Análisis estadístico e hidrometría.....	31
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>32</b>
<b>Anexo: perfiles transversales del río Ebro en su tramo final (Tortosa – Amposta) .....</b>	<b>34</b>
1. Perfiles transversales del río Ebro en el tramo Tortosa-Amposta (plantas) .....	35
2. Perfiles transversales del río Ebro en el tramo Tortosa-Amposta (secciones).....	40
3. Velocidades del agua en cada perfil.....	45
Referencias bibliográficas y fondos documentales.....	47
Relación de figuras / Relación de tablas .....	48

## RESUMEN

La hidrometría es una técnica de singular importancia en la ingeniería hidráulica, pues aparte de medir el caudal del agua circulante por una conducción libre (por gravedad) o forzada (a presión), comprende también las tareas propias de planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de riego de una cuenca hidrográfica, o de un sistema urbano, agrícola o industrial de distribución del recurso hídrico. En el presente trabajo se explica la metodología precisa para su aplicación el caso de las conducciones libres naturales (ríos, arroyos) o artificiales (canales, acequias), con un breve referido final a las conducciones forzadas (tuberías a presión). Por último, se presenta toda la instrumentación precisa para llevar a cabo las tareas de aforo, así como la temática referida las redes hidrométricas y el sistema estadístico de información.

**Palabras clave:** aforo, caudalímetro, sección, velocidad, coeficiente, instrumentos, sistema estadístico, red hidrométrica, punto de control, vertedero.

## RESUM

La hidrometria és una tècnica de singular importància en l'enginyeria hidràulica, ja que a banda de mesurar el cabal de l'aigua circulant per una conducció lliure (per gravetat) o bé forçada (a pressió), comprèn també les tasques pròpies de planejar, executar i processar la informació que s'enregistra d'un sistema de reg d'una conca hidrogràfica, o d'un sistema urbà, agrícola o industrial de distribució del recurs hídric. En aquest treball s'explica la metodologia precisa per aplicar-lo al cas de les conduccions lliures naturals (riu, rierols) o artificials (canals, sèquies), amb un breu referit final a les conduccions forçades (canonades a pressió). Darrerament, es presenta tota la instrumentació necessària per dur a terme les tasques d'aforament, així com la temàtica referida a les xarxes hidromètriques i el sistema estadístic d'informació.

**Paraules clau:** aforament, cabalímetre, secció, velocitat, coeficient, instruments, sistema estadístic, xarxa hidromètrica, punt de control, vessador.

## SUMMARY / ABSTRACT

*Hydrometry is a technique of singular importance in hydraulic engineering, because apart from measuring the flow of circulating water through free (gravity) or forced (pressure) conduction, it also includes the tasks of planning, executing and processing the information that is recorded from an irrigation system of a hydrographic basin, or from an urban, agricultural or industrial system of water resource distribution. This work explains the precise methodology for its application in the case of natural free conduits (rivers, streams) or artificial ones (canals, ditches), with a brief final reference to forced conduits (pressure pipes). Finally, all the necessary instrumentation to carry out the gauging tasks is presented, as well as the subject matter referred to, hydrometric networks and the statistical information system.*

**Key words:** *capacity, flowmeter, section, speed, coefficient, instruments, statistical system, hydrometric network, control point, weir.*

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

Gran parte de los problemas de la administración del agua radica en la deficiencia de controles del caudal en los sistemas hidráulicos, tanto públicos como privados. La Hidrometría se encarga particularmente de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de una conducción libre o forzada, por lo que sus técnicas resultan útiles para la determinación de los caudales y velocidades del flujo que deben circular por dichos cauces naturales o artificiales. En el presente trabajo nos centraremos, fundamentalmente, en la metodología correspondiente a las conducciones abiertas.

### 1.2. Concepto y definiciones

#### A) Hidrometría

En su forma clásica, se define la “hidrometría” como la parte de la hidrología que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo dentro de una sección transversal del flujo o corriente.

La hidrometría, aparte de medir el caudal del agua circulante por una conducción libre (por gravedad) o forzada (a presión), comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de riego de una cuenca hidrográfica, o de un sistema urbano, agrícola o industrial de distribución del agua. En este contexto, la hidrometría tiene dos propósitos generales:

- a. Conocer el volumen de agua disponible en la fuente (hidrometría a nivel de fuente natural).
- b. Conocer el grado de eficiencia de la distribución del recurso (hidrometría de la operación).

#### B) Sistema hidrométrico

Es el conjunto de pasos, actividades y procedimientos tendentes a conocer (medir, registrar, calcular y analizar) los volúmenes de agua que circulan en los cauces, canales y acequias de un sistema hidráulico, con el fin de programar, corregir y mejorar la distribución del agua en el mismo. El sistema hidrométrico tiene, como soporte físico, una red hidrométrica más o menos compleja.

#### C) Red hidrométrica

Es el conjunto de puntos de medición del agua, estratégicamente ubicados en un sistema hidráulico, de tal forma que constituya una red que permita interrelacionar la información obtenida.

## **D) Puntos de control**

Son los puntos donde se registran los caudales que pasan por la sección transversal aludida. Los puntos de control son de gran variedad de tipos, como, por ejemplo: estaciones hidrométricas en el río, la presa de almacenamiento, las compuertas de la estructura de captación o de toma, las obras de toma del canal principal o de las acequias de distribución del agua de riego, las caídas, vertederos, medidor Parshall, etc.

## **E) Registro de datos**

Es la colección de todos los datos que nos permiten cuantificar el caudal que pasa por la sección de un determinado punto de control.

El registro de caudales y volúmenes de riego se ejecuta de acuerdo a las necesidades de información requeridas para la gestión del sistema. Los registros se efectúan en el momento de realizar el aforo o mediciones en miras graduadas o reglas, dependiendo del método de aforo empleado. Modernamente también se emplean otros sistemas más automatizados.

Dependiendo también de la ubicación del punto de control, los registros obtenidos son los siguientes:

- Registro de los caudales en los ríos de la cuenca hidrográfica.
- Registro de salidas de agua de los reservorios.
- Registro de caudales captados y que entran al sistema de riego.
- Registro de distribución de caudales de agua en canales y acequias del sistema de riego.
- Registro de caudales entregados para el riego en la parcela de cultivo.

## **F) Reporte**

Es el resultado del procesamiento de un conjunto de datos obtenidos, en el cual normalmente una secuencia de caudales medidos se convierte en un volumen por período mayor ( $m^3/día$ ,  $m^3/mes$ ,  $hm^3/año$ , etc.).

## **G) Medición del caudal de agua**

La medición del caudal o gasto de agua que pasa por la sección transversal de un conducto (río, riachuelo, canal, acequia, tubería) de agua, se conoce como "aforo o medición de caudales". Este caudal, como es sabido, depende directamente del área de la sección transversal a la corriente y de la velocidad media del agua en dicha sección mojada.

La fórmula simple que representa este concepto es la siguiente:

$$Q = A \times V ,$$

donde generalmente se adoptan las siguientes unidades:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q} = \text{Caudal o gasto (m}^3/\text{s)}. \\ \mathbf{A} = \text{Área de la sección transversal (m}^2\text{)}. \\ \mathbf{V} = \text{Velocidad media de la sección mojada del agua en el punto analizado} \\ \text{(m/s)}. \end{array} \right.$$

## 2. IMPORTANCIA

La función principal de la hidrometría es proveer de datos oportunos y veraces que, una vez procesados, proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y evaluación del manejo del agua en un sistema hidráulico. A su vez, el uso de una información ordenada nos permite:

- a. *Dotar de información para el ajuste del pronóstico de la disponibilidad de agua.* Mediante el análisis estadístico de los registros históricos de caudales de la fuente (río, canal, aguas subterráneas, etc.), nos es posible conocer los volúmenes probables de agua que podemos disponer durante los meses de duración, por ejemplo, de la campaña agrícola. Esta información resulta de suma importancia para la elaboración del balance hídrico, la planificación de siembras y el plan de distribución del agua de riego.
- b. *Monitorear la ejecución de la distribución.* La hidrometría proporciona los resultados que nos permiten conocer la cantidad, calidad y la oportunidad de los riegos, estableciendo si los caudales previstos en el plan de distribución son los realmente entregados y, sobre esta base, decidir la modificación del plan de distribución, en el caso de que así sea necesario.
- c. Además de las utilidades anteriormente expresadas, la hidrometría nos sirve para *determinar la eficiencia en el sistema de riego y distribución del agua potable* y, eventualmente, como información de apoyo para la solución de los conflictos que puedan presentarse entre las partes implicadas (usuarios, Administración, ...).

## 3. MEDICIÓN DEL CAUDAL DEL AGUA

### 3.1. Métodos de medición

#### 3.1.0. Idea previa

Para efectuar mediciones en las corrientes líquidas se utilizan, en ingeniería, una gran variedad de dispositivos. A continuación, vamos a contemplar aquellos métodos de medida cuyo uso resulta más generalizado en la práctica. Conviene advertir que para el uso correcto de los instrumentos de medida es preciso previamente conocer sus características y coeficientes, siendo

necesario, en la mayoría de los casos, realizar el calibrado de los mismos de acuerdo con las aplicaciones del proceso (Torres, 1970)<sup>1</sup>.

Los métodos de aforo más utilizados, amén del empleo de los clásicos tubos de Pitot-Darcy y Venturi, que no se detallarán más aquí por razones obvias de espacio, son los siguientes:

1. Velocidad y sección mojada.
2. Estructuras hidrométricas.
3. Método volumétrico.
4. Método químico.
5. Método combinado. Calibración de compuertas.

### 3.1.1. Velocidad y sección mojada

Los métodos de aforo basados en este método son los más empleados; se requiere medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media de este flujo. Se emplea la expresión ya reseñada:

$$Q = A \times V, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ es el caudal del agua.} \\ A \text{ es el área de la sección transversal del flujo de agua.} \\ V \text{ es la velocidad media del agua.} \end{array} \right.$$

Generalmente, el caudal  $Q$  se expresa en litros por segundo (l/s) o bien en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ). En la ecuación anterior, si  $Q$  el caudal se expresa en  $m^3/s$ ,  $A$  se expresa en  $m^2$  y  $V$  se expresa en  $m/s$ .

Es fácil convertir  $m^3/s$  a l/s, sabiendo que  $1 m^3$  equivale a 1.000 litros. La abreviatura l/s, se puede expresar también como LPS (litros por segundo).

El problema principal es medir la velocidad media en los ríos o cauces naturales, ya que la velocidad varía en los diferentes puntos del interior de una masa de agua. Los métodos más conocidos de aforos de agua son los siguientes:

- a. Método del correntómetro o molinete.
- b. Método del flotador.
- c. Método usando dispositivos especiales, tales como: vertederos y canaletas (Parshall, trapezoidal, sin cuello, orificio, etc.).
- d. Otros.

Para la medición del agua circulante por un cauce natural, pues, existen varios métodos de aplicación, siendo los más utilizados el método del correntómetro y el método del flotador. Veámoslos descritos a continuación:

---

<sup>1</sup> Vide TORRES SOTELO, J.E. *Apuntes de hidráulica general y agrícola. Primera y Segunda Parte.* Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Valencia, 1970. Obra citada en la bibliografía.

### 3.1.1.1. Método del correntómetro o molinete

En este método, la velocidad del agua se mide por medio de un instrumento llamado “correntómetro” que mide la velocidad en un punto dado de la masa de agua. Un tipo bien conocido es el denominado “molinete de Woltmann”.

Existen varios tipos de correntómetros, siendo los más empleados los de hélice de los cuales hay de varios tamaños; cuanto más grandes sean los caudales o más altas sean las velocidades, mayor debe ser también el tamaño del aparato. Cada correntómetro debe tener un certificado de calibración en el que figura la fórmula necesaria para calcular la velocidad del agua sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo. Estos correntómetros se calibran en laboratorios especializados de hidráulica. Una fórmula de calibración, como la empleada en nuestro estudio acerca de los caudales medioambientales del tramo inferior del río Ebro (Franquet, 2009), es la siguiente:

$$V = a n + b$$

donde:

- V es la velocidad del agua, expresada en m/s.
- n es el número de vueltas de la hélice por segundo.
- a es el paso real de la hélice en metros.
- b es la llamada velocidad de frotamiento en m/s.

Como el correntómetro mide la velocidad en un punto determinado de la corriente, para obtener la velocidad media de un curso de agua se debe, en ciertos casos, medir la velocidad en dos, tres o más puntos, a diversas profundidades a lo largo de una franja vertical y a partir de la superficie libre del agua.

Las profundidades en las cuales se miden las velocidades con el correntómetro se hallan en función de la altura del tirante de agua **d**, siguiendo los parámetros establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Profundidades de lectura según el tirante.

Tirante de agua (d)	Profundidad de lectura del correntómetro
cm	cm
< 15	d / 2
15 < d < 45	0.6 · d
> 45	0.2 · d y 0.8 · d 0.2 · d, 0.6 · d y 0.8 · d

En general, la velocidad media a lo largo de un tirante se determina tomando la media de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad o calado del tirante,

según las recomendaciones del Departamento de Investigaciones Geológicas de los Estados Unidos (USGS), esto es, aplicando la fórmula:

$$V = \frac{1}{2} (\text{Velocidad a 0.2 del tirante} + \text{Velocidad a 0.8 del tirante}).$$

Conocidas ya las profundidades de lectura, se calcula el área de la sección transversal mojada, que se utilizará para el cálculo del caudal. Así, como aplicando siempre:

$$Q = V \times A, \text{ donde:}$$

$$\begin{cases} V = \text{velocidad determinada con el correntómetro o molinete.} \\ A = \text{Área de la sección mojada transversal correspondiente.} \end{cases}$$

La distribución de velocidades en una corriente libre resulta muy importante cuando se desea determinar el caudal usando un medidor de velocidad, que es un instrumento construido de tal manera que la velocidad angular  $\omega$  de su elemento giratorio (hélice o sistema de álabes) es proporcional a la velocidad  $V$  de la corriente. Un ejemplo característico es el del molinete de Woltmann, anteriormente citado. Mediante un circuito eléctrico, los valores de la velocidad son registrados en un cuentarrevoluciones. Las isotacas -curvas similares a las de nivel en topografía- que unen los puntos de igual velocidad en una sección transversal, suelen obtenerse por interpolación a partir de las medidas puntuales realizadas con el medidor de velocidad.

### 3.1.1.2. Método del flotador

El método del flotador se utiliza cuando no se poseen otros equipos de medición y para este fin se tiene que conocer el área de la sección y la velocidad del agua. Para medir la velocidad se utiliza un flotador con el cual se mide la velocidad del agua de la superficie, pudiendo utilizarse como flotador cualquier cuerpo pequeño que flote: como un corcho, un pedacito de madera o cartón, una botellita lastrada. Este método se emplea en los siguientes casos:

- A falta de un correntómetro o molinete.
- Excesiva velocidad del agua, que dificulta el uso del correntómetro.
- Presencia frecuente de cuerpos extraños en el curso del agua, que dificulta el uso del correntómetro (algas, ramas, bloques de hielo...).
- Cuando peligra la integridad física de la persona que efectúa el aforo.
- Cuando peligra la integridad del correntómetro.

Por lo que se refiere a la distribución de la velocidad en una sección transversal, siguiendo al profesor Torres Sotelo<sup>2</sup>, veamos que en el flujo en canales la distribución de las velocidades depende, entre otros factores, de la geometría del contorno, la rugosidad de las paredes, la pendiente motriz y el caudal. Las velocidades aumentan generalmente con la distancia a las paredes

---

<sup>2</sup> Vide: "Apuntes de hidráulica general y agrícola. Primera y Segunda Parte". Citado en la bibliografía.

y al fondo, registrándose los mínimos valores junto a éstas por el rozamiento con las mismas.

En canales y acequias artificiales de secciones regulares, como las descritas en el Artículo 16 del presente manual recopilatorio, la velocidad máxima se da en el eje de simetría de la sección transversal, un poco más debajo de la superficie libre del líquido, debido a la escasa resistencia que ofrece el aire, a una distancia de 0.05 a 0.25 del calado (media a:  $0.15 \times h$ ). En las secciones que son irregulares, como es el caso de los ríos o arroyos, el eje de la velocidad máxima generalmente se encuentra en la vertical que define el tirante máximo.

Esta velocidad media suele variar entre 0.75 y 0.90 veces la velocidad en la superficie, según se trate de cauces naturales pequeños o grandes, respectivamente.

Se han calculado, al respecto, diversas fórmulas empíricas que relacionan la velocidad media  $V$ , con la velocidad superficial  $V_s$  y la velocidad próxima al fondo  $V_f$ ; entre ellas citaremos la de Dubuat (1816), a saber:

$$V_f = 2 \cdot V - V_s$$

y como para valores de  $V_s$  comprendidos entre 0.2 y 1.5 m/s se admite, la expresión:

$$V = 0.8 \cdot V_s$$

Substituyendo en la expresión anterior, resulta:

$$V_f = 1.6 \cdot V_s - V_s = 0.6 \cdot V_s$$

o bien, en función de la velocidad media, se tiene una velocidad próxima al fondo de:

$$V_f = 2 \cdot V - V/0.8 = 0.75 \cdot V$$

El cálculo final consiste en aplicar las fórmulas simples y bien conocidas:

$$Q = A \times V, \text{ y también: } V = e/t,$$

en que:

- $V$  es la velocidad media expresada en m/s (un 80% de la velocidad superficial  $V_s$  que nos ofrece el método del flotador, para una velocidad superficial de 0.7- 0.8 m/s, a falta de determinaciones más precisas).
- $e$  es el espacio recorrido, expresado en m, por el flotador.
- $t$  es el tiempo en segundos del recorrido  $e$  por el flotador.
- $A$  = Área de la sección transversal ( $m^2$ ).
- $Q$  = Caudal ( $m^3/s$ ).

### 3.1.1.3. Distribución de velocidades en la sección transversal

En un caso más general, las relaciones existentes entre las velocidades media y superficial de una corriente de agua anteriormente definidas, vienen dadas por la expresión:

$$V = n \cdot V_s$$

siendo  $V$  la velocidad media de la sección mojada transversal del cauce de esta conducción libre,  $V_s$  la velocidad superficial y  $V_f$  la próxima al fondo del canal, tomando  $n$  los valores siguientes, en función de la velocidad superficial:

$V_s$ (m/s)	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00
$n$	0.76	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89

cuyos valores intermedios pueden interpolarse fácilmente (lineal o parabólicamente), y siendo:  $V = (1/3) \cdot (2 \cdot V_s + V_f)$ , que constituye una expresión alternativa a la anteriormente expresada de Dubuat (1816), debida a Bazin (1865), que ofrece valores de las velocidades estudiadas ligeramente diferentes.

La representación gráfica de la función anterior  $n = f(V_s)$  ofrece, teniendo también en cuenta la formulación de R. Prony (Francoeur, 1803) que veremos posteriormente, el siguiente resultado:

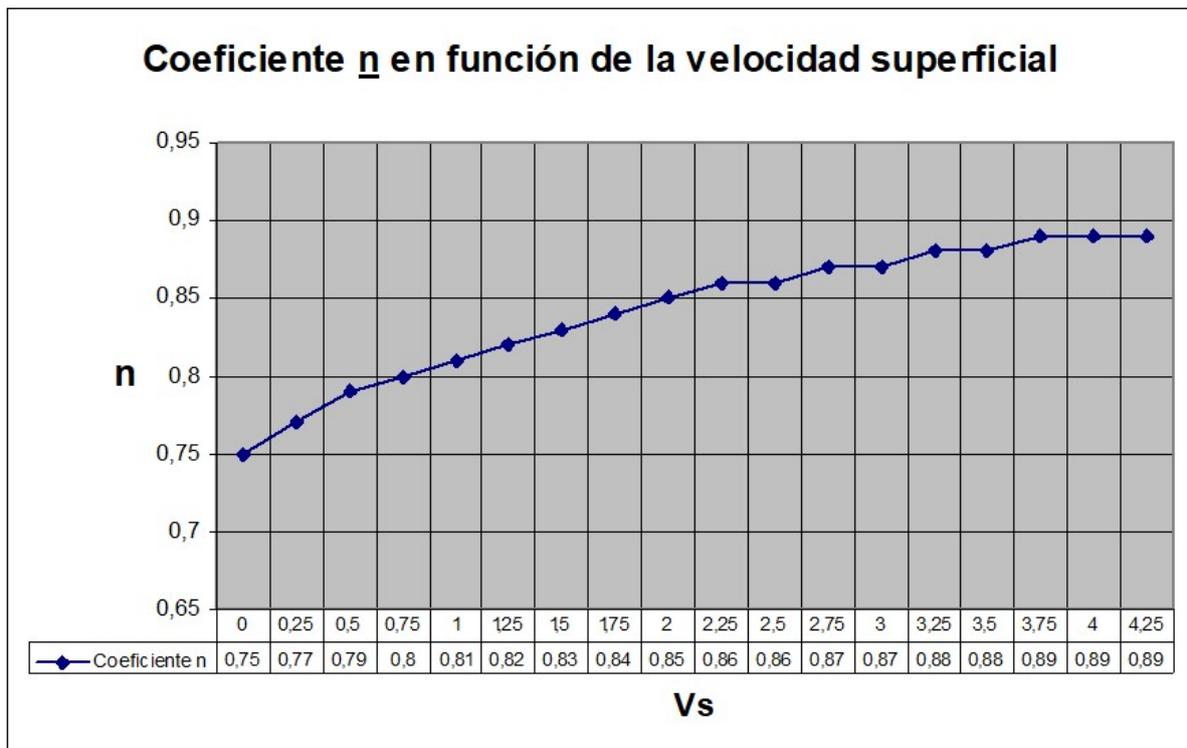


Fig. 1. Representación gráfica de la función  $n(V_s)$ .

Lo mismo podría afirmarse de otra expresión también debida a Bazin, a saber:

$$V = \frac{V_s}{1 + 14 \sqrt{\alpha + \frac{\beta}{R}}}$$

en función de la naturaleza más o menos rugosa de las paredes y fondo o solera, así como del radio hidráulico medio del cauce natural en estudio, que ofrece parecidos resultados a los deducidos de la anterior formulación de Dubuat.

R. Woltmann opinaba que la ley de distribución de las velocidades puede ser representada por una parábola de eje vertical, cuyo vértice corresponde a la zona de velocidad nula, en el supuesto de que el agua tenga suficiente profundidad como para alcanzarla. No obstante, el segmento de parábola comprendido entre la superficie libre de la lámina de agua y la solera del cauce apenas difería de una línea recta. J. A. Eytelwein, por razones de sencillez, adoptó esta recta y propuso la siguiente fórmula (expresada en el sistema métrico decimal):

$$V = (1 - 0.0127 \cdot h) V_s$$

siendo h el calado o profundidad del cauce, que ofrece valores sensiblemente superiores a los de la formulación de Dubuat.

R. Prony atribuía a la fórmula de Dubuat el inconveniente de que, para corrientes de muy escasa velocidad media, conducía a la consecución de resultados evidentemente falsos, o sea a  $V_f = 0$  m/s para una velocidad superficial de valor  $V_s = 0.027$  m/s y a  $V_f = 0.027$  m/s para  $V_s = 0$  m/s; dedujo así, de las observaciones del mismo Dubuat, que:

$$V = \frac{V_s + 2.372}{V_s + 3.153} \times V_s$$

cuyos resultados son coincidentes con la tabla y gráfica anterior, o bien la expresión más simple e intermedia:  $V = 0.816 \cdot V_s$ , que ofrecen ambas resultados más coincidentes con las expresadas determinaciones de Dubuat.

Mientras que, según Bazin, la velocidad varía muy poco en las proximidades de la superficie, según Hagen esta variación debería ser muy rápida, lo cual hállase en desacuerdo con la experiencia. En un ulterior trabajo, Hagen (1876) propuso aplicar la siguiente fórmula:

$$V = V_s (1 - 0.0582 \cdot \sqrt{h})$$

Harder (1878), basándose en la fórmula obtenida experimentalmente para las curvas de distribución de velocidades en la vertical media, empleaba dos elipses que presentan una tangente común vertical en el punto de máxima velocidad. Hessle (1899) sustentaba la opinión de que solera y superficie libre influyen, de análogo modo, sobre las velocidades, y supuso que la velocidad V, en un punto cualquiera, era la suma de una parte constante y otra variable

según dos segmentos parabólicos tangentes entre sí. Las parábolas de grado superior tienen la propiedad de aproximarse primeramente mucho al eje de abscisas para separarse luego de él con gran rapidez. Por tanto, si la velocidad en la solera ha de ser nula y, sin embargo, en las capas superiores el agua ha de fluir rápidamente, puede con facilidad representarse matemáticamente tal distribución mediante dichas parábolas o funciones polinómicas. No obstante, parece más lógico aceptar el punto de vista de que se admiten distintas leyes para el movimiento en la proximidad de la solera y en el resto de la masa líquida, es decir, iniciar la curva de esta última parte con una abscisa distante de cero. Por otro lado, la confirmación experimental de la distribución, según parábolas de grado superior, no se cumple en muchos casos.

Tratándose de cursos de agua naturales, es posible la aplicación de la fórmula de Manning específica para este tipo de cauces libres, así como también sería adecuada la aplicación de las fórmulas de cálculo (más propias o específicas para este tipo de cauces naturales) de Hermanek, Siedeck y Franquet (2005), que se presentan a continuación.

*Fórmula de Hermanek.* En este sentido, la velocidad media de circulación del agua por el cauce de un río o arroyo cuyo caudal se trata de determinar, según la formulación de Hermanek, viene dada por la expresión:

$$V = K' \sqrt{h \cdot I}$$

$$\text{en que } K' = \begin{cases} 30.7 \sqrt{h} \\ 34 \sqrt[4]{h} \\ (50.2 + 0.5h) \sqrt{h \cdot I} \end{cases}$$

$$\text{para una profundidad o calado medio respectivo} = \begin{cases} h \leq 1.5 \text{ m.} \\ 1.5 < h \leq 6 \text{ m.} \\ h > 6 \text{ m.} \end{cases}$$

y siendo I, como siempre, la pendiente longitudinal del cauce.

*Fórmula de Siedeck.* Su expresión general viene dada por:

$$V = \frac{h \sqrt{I}}{\sqrt[20]{L} \times 0.0316}$$

en que L es la anchura de la superficie libre del cauce natural.

Es de resaltar, por último, que para profundidades medias h comprendidas entre 0.80 y 2.00 m, Siedeck ofrece la relación:

$$V = V_s \times 20 \sqrt{\frac{h^2}{B}}, \text{ siendo B (anchura media del cauce)}$$

que también puede alejarse bastante, por cierto, de la expresada formulación de Dubuat.

*Fórmula de Franquet.* Sus diversas expresiones para cursos naturales de agua han sido expuestas en el Artículo 3 de este mismo manual recopilatorio para un intervalo de categorías de rugosidad  $K \in (9, 12)$ , por lo que nos remitimos a él para el logro de mayores especificaciones y detalles.

Por otra parte, en el excelente trabajo titulado “Determinación de los perfiles de velocidades del Bajo Ebro entre Tortosa y Amposta”, citado en la bibliografía (Franquet, 2009), llevado a cabo por el Departamento de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, mayo de 1985), que hemos tratado también en el capítulo 9 y anexo 2 del libro citado y fue desarrollado posteriormente por nosotros (véase el Anexo al presente Artículo de este manual), se estudian las velocidades del agua en los puntos más próximos al fondo ( $V_f$ ) expresadas en m/s (a una distancia de 20 a 25 cm del fondo) y que están resumidas en la tabla siguiente (34 medidas):

Tabla 2. Velocidades próximas al fondo (m/s).

PERFIL → VERTICAL ↓	7	8	14	16	19	23	1	5	24	$\overline{V_f}$
1	0.57	1.02	0.48	0.70	0.27	0.64	0.55	0.52	0.62	<b>0.60</b>
2	0.87	0.97	0.66	0.76	0.53	0.64	0.90	0.53	0.65	<b>0.72</b>
3	0.83	0.73	0.64	0.78	0.55	0.62	0.70	0.51	0.52	<b>0.65</b>
4	0.95	-	-	0.82	-	-	0.75	0.48	-	<b>0.75</b>
5	0.78	-	-	0.96	-	-	-	0.52	-	<b>0.75</b>
$\overline{V_f}$	0.80	0.91	0.59	0.80	0.45	0.63	0.73	0.51	0.60	<b>0.68</b>
$\overline{V}$	1.03	1.16	0.81	1.07	0.59	0.78	0.92	0.69	0.77	<b>0.87</b>
$\frac{\overline{V_f}}{\overline{V}} \times 100$	<b>78%</b>	<b>78%</b>	<b>73%</b>	<b>75%</b>	<b>76%</b>	<b>81%</b>	<b>79%</b>	<b>74%</b>	<b>78%</b>	<b>77%</b>

Así pues, la relación experimental obtenida entre la  $V_f$  y la  $V$ , en este caso, es la siguiente:

$$\frac{V_f}{V} = 0.77 ; V_f = 0.77 \times V,$$

que difiere algo de la que propugnaba Dubuat ( $V_f = 0.75 \times V$ ), según puede comprobarse en nuestros estudios (Franquet, 2003).

Respecto a la distribución de velocidades en la vertical se observa que, en la mayoría de las verticales, la velocidad máxima se da en la superficie (correspondiente a la medida A, situada entre 15 y 25 cm por debajo de la superficie libre). La velocidad desciende regular y progresivamente con la profundidad, acentuándose la curvatura del perfil de velocidades en las

proximidades del fondo. La velocidad de fondo (última medida efectuada, situada entre 20 y 25 cm del fondo), cualquiera que sea el calado y la velocidad de la conducción libre, es siempre superior al 55% de la velocidad superficial, siendo frecuentes cantidades del 70 y del 75%.

De cualquier modo, las velocidades medias del agua para cada perfil transversal se han obtenido promediando aritméticamente todas las medidas efectuadas con el molinete, según puede verse en el cuadro correspondiente del anexo nº: 2 del manual citado (Franquet, 2009). Dicho cálculo de las velocidades medias podría efectuarse también por el procedimiento analítico del “promedio integral” u “ordenada media”, previa la determinación de la pertinente ecuación de la parábola de las velocidades  $V = f(h)$  con las profundidades, por ajuste mínimo-cuadrático no lineal, para cada caso. Recordemos que este concepto deriva, en el cálculo infinitesimal, del conocido “teorema de la media”, a saber:

$$\int_a^b V(h) \cdot dh = \mu(b - a) = f(\xi)(b - a),$$

siendo  $h = b$  y  $h = a$  las cotas respectivas del fondo de cada sección y de la lámina de agua, con lo que la profundidad de cada vertical vendrá dada por la expresión:  $H_i = b_i - a_i$ . De este modo, el “valor medio” de la velocidad en cada vertical será:

$$V_i = \mu_i = \frac{1}{H_i} \int_a^b V(h) \cdot dh = f(\xi),$$

y para cada uno de los 9 perfiles transversales del estudio relacionado, se tendrá una velocidad media de:  $\bar{V} = \sum V_i/n$ , suponiendo que haya  $n$  verticales en cada perfil. En cualquier caso, el valor medio de la velocidad de circulación del agua por el río puede también obtenerse por aplicación del concepto de integral doble para cada vertical, siendo  $A$  el área comprendida entre la parábola de las velocidades, las ordenadas extremas y el eje de abscisas (en este caso vertical), así:

$$V_i = \frac{1}{H_i} \iint_A dh \cdot dV = \frac{1}{H_i} \int_a^b \left( \int_0^{f(h)} dV \right) \cdot dh = \frac{1}{H_i} \int_0^{f(h)} \left( \int_a^b dh \right) \cdot dV,$$

por aplicación del teorema de Fubini<sup>3</sup>.

Con frecuencia, puede suceder que el reticulado paralelo a los ejes coordenados cartesianos rectangulares y las fórmulas de integración a que nos han dado lugar no proporcionan precisamente el camino más cómodo para calcular una integral múltiple (doble). En tal caso, la integral múltiple en

---

<sup>3</sup> Matemático italiano (1879-1943). Fue profesor en el *Institute for Advanced Study* de Princeton. Le apodaban "el pequeño gigante" porque tenía un cuerpo pequeño y una mente grande. Aunque la conclusión del teorema de Guido Fubini se sabía desde hacía tiempo, y se la había aplicado con éxito en varios casos, no fue probada en general hasta el año 1907.

cuestión puede resolverse también por cambio de variable, haciendo la transformación biyectiva o biunívoca:

$$\boxed{\begin{matrix} h = h_1(u, v) \\ V = h_2(u, v) \end{matrix}}, \text{ con lo que se tiene que:}$$

$$\iint_A dh \cdot dV = \iint_A |J| \cdot du \cdot dv = J(u, v) \Delta u \cdot \Delta v, \text{ siendo } |J| \text{ el}$$

determinante funcional "jacobiano" con  $\begin{cases} \mathbf{n}: \text{ variables independientes} \\ \mathbf{n}: \text{ variables funcionales} \end{cases}$   
que es continuo, tal que:

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial h}{\partial u} & \frac{\partial h}{\partial v} \\ \frac{\partial V}{\partial u} & \frac{\partial V}{\partial v} \end{vmatrix} = \frac{\partial(h, V)}{\partial(u, v)} \neq 0 ; \text{ en efecto, los diferenciales totales son,}$$

operando en dos pasos sucesivos:

$$\begin{cases} dh = \frac{\partial h}{\partial u} du + \frac{\partial h}{\partial v} dv = 0 \text{ (suponiendo } h = \text{cte.)} \\ dV = \frac{\partial V}{\partial u} du + \frac{\partial V}{\partial v} dv \end{cases}$$

de donde eliminando **du** entre las dos ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$dV = -\frac{\partial V}{\partial u} \times \frac{\frac{\partial h}{\partial v}}{\frac{\partial h}{\partial u}} \cdot dv + \frac{\partial V}{\partial v} \cdot dv = \frac{1}{\frac{\partial h}{\partial u}} \overbrace{\left( \frac{\partial h}{\partial u} \times \frac{\partial V}{\partial v} - \frac{\partial h}{\partial v} \times \frac{\partial V}{\partial u} \right)}^{|J|} \cdot dv ,$$

expresión en la que se supone:  $\frac{\partial h}{\partial u} \neq 0$  y continua; se tendrá

(suponiendo  $v = \text{cte.} \Rightarrow dv = 0$ ):

$$dh \cdot dV = \left( \frac{\partial h}{\partial u} \cdot du \right) \times \left( \frac{1}{\frac{\partial h}{\partial u}} \cdot |J| \cdot dv \right) = |J| \cdot du \cdot dv , \text{ c.s.q.d.}$$

NOTA: El valor del determinante funcional jacobiano  $|J|$  se tomará siempre en valor absoluto. Por último, el recinto o dominio de integración experimentará el cambio:

$$A \xrightarrow{\text{transf.}} A'$$

$\left\{ \begin{array}{l} A: \text{ determinado por un contorno } C, \text{ de ecuación: } g(h,V) = 0, \text{ en el plano } hV. \\ A': \text{ determinado por un contorno } C', \text{ de ecuación: } g[h(u,v), V(u,v)] = 0, \text{ en el plano cartesiano } uv. \end{array} \right.$

En el caso discreto,  $J(\mathbf{u},\mathbf{v})$  significa el valor del determinante funcional jacobiano de la transformación en un cierto punto  $(\mathbf{u},\mathbf{v})$  del rectángulo de lados:  $\Delta u \Delta v$ . A este mismo resultado puede llegarse transformando la integral doble, que ofrece el área buscada, en integral curvilínea y, después de transformada ésta, expresándola nuevamente como integral doble mediante la conocida fórmula de Riemann<sup>4</sup>.

### 3.1.2. Estructuras hidrométricas

Para la medición de caudales también se utilizan algunas estructuras intencionadamente construidas, llamadas “medidores”. Las estructuras que actualmente se usan basadas en los dispositivos hidráulicos son: orificio, vertedero y sección crítica. Veámoslas, ahora, separadamente:

#### a) Orificio:

La ecuación general de descarga del orificio es la siguiente:

$$Q = C_d \cdot s \cdot (2gh)^{1/2}, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \text{Caudal (m}^3/\text{s)}. \\ C_d = \text{Coeficiente de caudal o de descarga} = C_c \cdot C_v \\ C_c = \text{Coeficiente de contracción de la sección.} \\ C_v = \text{Coeficiente de velocidad.} \\ s = \text{Área o sección del orificio (m}^2\text{)}. \\ g = \text{aceleración de la gravedad (9.81 m/s}^2\text{)} \\ h = \text{tirante de agua (m)}. \end{array} \right.$$

#### b) Vertedero:

Pueden ser de descarga libre o ahogada, de cresta delgada o ancha. La ecuación general de los vertederos es:

$$Q = K \cdot L \cdot H^N, \text{ donde:}$$

---

<sup>4</sup> Las ideas de Riemann (1826-1866) concernientes a la geometría del espacio tuvieron profundos efectos en el desarrollo de la teoría física moderna. Los escritos de Riemann de 1854 llegaron a ser un clásico en las matemáticas y estos resultados fueron incorporados dentro de la teoría de la relatividad y gravitación de Einstein. Influyó notablemente en el desarrollo de la teoría física moderna y proveía los conceptos y métodos usados después en la Teoría de la Relatividad. Era un original pensador y un anfitrión de numerosos métodos, teoremas y conceptos que llevan su nombre.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q} = \text{caudal.} \\ \mathbf{K, N} = \text{coeficientes.} \\ \mathbf{L} = \text{longitud de la cresta.} \\ \mathbf{H} = \text{tirante de agua.} \end{array} \right.$$

### c) Sección crítica:

Es el paso de una sección estrecha hacia una más amplia, provocando un cambio del régimen, donde es posible establecer la relación tirante-gasto.

La ecuación general utilizada es:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{H}^{\mathbf{N}}, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q} = \text{caudal.} \\ \mathbf{K, N} = \text{coeficientes.} \\ \mathbf{b} = \text{ancho de la garganta.} \\ \mathbf{H} = \text{tirante de agua.} \end{array} \right.$$

#### 3.1.3. Método volumétrico

Se emplea, por lo general, para la determinación de caudales muy pequeños y se requiere de un recipiente adecuado para recolectar el agua. El caudal resulta de dividir el volumen de agua que se recoge en el recipiente entre el tiempo que transcurre en coleccionar dicho volumen. Esto es:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{v}/\mathbf{T}, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q} = \text{caudal en m}^3/\text{s.} \\ \mathbf{v} = \text{volumen en m}^3. \\ \mathbf{T} = \text{tiempo en segundos.} \end{array} \right.$$

#### 3.1.4. Método químico

Consiste en la incorporación a la corriente de cierta substancia química de contraste, indicadora o trazadora durante un tiempo dado; tomando muestras aguas abajo, donde se estime que la substancia se haya disuelto uniformemente, se puede determinar la cantidad de substancia contenida por unidad de volumen y de ahí obtener el caudal buscado. Obviamente, debe asegurarse la absoluta inocuidad de dicha substancia para el ecosistema analizado.

#### 3.1.5. Calibración de compuertas (método combinado)

La compuerta es un orificio, de forma generalmente cuadrangular, circular o elíptico, en donde se establecen, para determinadas condiciones hidráulicas, los valores del caudal, con respecto a una abertura medida en el vástago de la misma compuerta.

Este principio es utilizado, dentro de la operación normal de una compuerta, para la construcción de una curva característica que nos permita determinar, tomando como referencia la carga hidráulica sobre la plantilla de la estructura, cuál es el gasto expresado en litros o  $m^3$  por segundo que discurre por el expresado orificio.

Sin embargo, al cambiar las condiciones hidráulicas del cauce del cual se está derivando, se produce la variación de las curvas establecidas, razón por la cual es necesario programar una secuencia de aforos para conocer cuál es el grado de modificación de la curva utilizada.

### **3.2. Sección de medición**

El lugar donde se va a efectuar la medición se conoce como la “sección transversal del curso de agua”. El lugar donde se va a medir la velocidad del agua debe estar emplazado en un tramo del cauce donde el flujo de agua tenga las siguientes características:

1. Los filetes líquidos sean paralelos entre sí.
2. Las velocidades sean suficientes para una buena utilización del correntómetro, en caso de que se utilice este instrumento en la operación de medida.
3. Las velocidades son constantes, para una misma altura del tirante de agua.

La primera característica exige, a su vez, escoger:

1. Un tramo recto de cauce, tal que sus márgenes sean rectas y paralelas.
2. Un lecho estable, y
3. Una sección transversal de flujo relativamente constante a lo largo del expresado tramo recto.

### **3.3. Calibración de la sección**

Tanto el área de la sección transversal mojada como la velocidad del agua pueden variar con los cambios de altura en el nivel de la lámina del agua; si hacemos esto en una sección adecuada, esta relación es generalmente fija, circunstancia que podemos aprovechar para que, una vez conocida esta relación existente entre nivel del agua, sección transversal y velocidad, puedan obtenerse y registrarse los caudales mediante una escala graduada de alturas, que indica la variación del caudal.

Cuando una sección está calibrada significa que se conoce, con buena exactitud, la variación de la altura del nivel del agua y el caudal que pasa por la misma. Para el caso de medidores y vertederos existen las fórmulas adecuadas en función de la altura y, en los casos de los ríos y arroyos, se trabaja con las curvas de calibración llamadas ( $h - Q$ ).

### 3.4. Registros de medición

Definidos ya los puntos de medición, los métodos de aforo y establecidas las responsabilidades del personal actuante, se procede a la ejecución de las observaciones y mediciones oportunas que luego deberán registrarse en los formatos siguientes:

- Registro de aforos con correntómetro.
- Resumen mensual de lectura de escalas.
- Resumen mensual de aforos en estaciones.
- Registro mensual de aforos en medidores.
- Análisis de pérdidas por distribución de agua por estación de aforo.
- Pérdidas entre volúmenes asignados y recibidos.
- Informe mensual de entrega de agua.

## 4. LA RED HIDROMÉTRICA

### 4.1. Definición

La red hidrométrica constituye el conjunto de estaciones de medición que se tiene dentro de un sistema que puede ser: de riego, de desagüe, hidrográfico o de agua potable. Este conjunto de estaciones debe ser planeado con la finalidad de determinar el caudal que circula en toda la red y conocer, en el caso concreto de un sistema de riego, cuáles son los caudales o volúmenes recibidos por el sistema en tiempo real, cuáles los entregados y cuáles los perdidos. En la secuencia o protocolo a seguir para la aplicación de la rutina de **hidrometría**, se distinguen las siguientes etapas, que se exponen en los dos siguientes epígrafes.

### 4.2. Análisis de la existencia y pertinencia de la red hidrométrica

Una de las funciones de quien tiene a su cargo la operación del sistema, debe ser analizar la pertinencia de que el sistema analizado, cuente con una red hidrométrica y un procedimiento para registrar y procesar la información. Este análisis comprende establecer la comparación entre el beneficio neto (B) que otorga la existencia de una red hidrométrica y los costos reales (C) que representan su implementación o mejoramiento y su operación, o sea, la determinación de la relación B/C y de otros indicadores financieros de referencia, como el valor actual neto de la inversión (VAN), el período de recuperación del capital (*pay-back*) o la tasa interna de retorno (TIR).

La operación y control de la red hidrométrica resulta de gran importancia porque permite conocer, graduar y controlar la información hidrológica en el ámbito de tomas directas, de tomas principales y secundarias de las comunidades de regantes, de las empresas distribuidoras del agua potable y de otros usuarios del recurso. Además, permite hacer el seguimiento o monitoreo exhaustivo de la campaña agrícola en caso de facturación del agua de riego, actividades de cobranza (volúmenes entregados, volúmenes facturados), análisis de eficiencia de la red y/o pérdidas (sistema, conducción, distribución), así como también tener actualizada la base de datos hidrológicos.

### **4.3. Verificación del estado de funcionamiento de la red hidrométrica y calibración de las estructuras de medición**

Es necesario determinar cada año el comportamiento hidráulico de las estructuras instaladas en un sistema de abastecimiento. Por esta razón es conveniente, dentro de un grupo determinado de estaciones, escoger y efectuar aforos para los gastos mínimos, medios y máximos que pueda medir la estructura y calcular la discrepancia con los aforos; las curvas así obtenidas no deben ser mayores a un 5% de desviación. Esta acción debe realizarse periódicamente cada año.

## **5. SISTEMA ESTADÍSTICO DE INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA (SEIH)**

### **5.1. Establecimiento de métodos y formatos de registro**

La información obtenida en la red a través de las estaciones de medición requiere el establecimiento de los métodos y formatos de registro. En este sentido, a fin de que las labores a ejecutar tengan el éxito deseado, es necesario que la acción vaya anticipada de la planificación de las tareas a realizar. Esto significa, entre otros aspectos, definir el objetivo de las acciones que se plantea ejecutar. Asimismo, resulta conveniente fijar las actividades y metas a alcanzar. Para establecer las metas es aconsejable la división del sistema en áreas de control hidrométrico, las cuales deberán ser marcadas en un plano detallado y establecida la responsabilidad del personal participante.

Determinados ya los sitios donde se efectuarán los aforos, se definirán los métodos y tipo de formatos que nos permitan obtener, con la mayor exactitud posible, los volúmenes del recurso que discurren por el cauce en un momento determinado.

Algunos lugares tienen ya establecida una red hidrométrica en todo el ámbito del sistema mayor, que está dividida en derivación, captación y almacenamiento, distribución, entrega y control del recurso hídrico, existiendo, para todos los casos, los formatos de los registros correspondientes, como son:

- Derivación: Túnel medido con correntómetro. Túnel medido con limnígrafo.
- Captación: Canal alimentador medido con limnígrafo. Compuerta de riego medida con tabla de descarga.
- Almacenamiento: Embalse medido con tablas de embalse. Canal de descarga medido con limnígrafo.
- Distribución: Canal medido con limnígrafo. Canal medido con aforo.
- Entrega y Control: Toma de cabecera en todas las comunidades de regantes, y caudales medidos con aforo y tabla de descarga.

### **5.2. Ejecución de aforos y mediciones-observaciones en la red**

Definida ya la localización de los puntos de control y el método de aforo a emplear, se procederá a la ejecución de las mediciones a través de los servicios correspondientes. Durante la aplicación de los métodos, se tomarán

en cuenta los errores que ya han sido detectados anteriormente a fin de evitar la repetición de los mismos y, por ende, el rechazo de la información por su falta de consistencia o relevancia.

Las mediciones deberán registrarse inmediatamente después de efectuada la lectura correspondiente. Éstas deberán hacerse siguiendo un orden prefijado. Debe existir absoluta claridad sobre quién y cuándo se registra, así como sobre quién y cuándo se procesa.

En todos los casos se debe contar con los formatos digitales correspondientes para su posterior ingreso en la base de datos, proceso, análisis y reportes en cuadros, tablas y gráficos.

### **5.3. Procesamiento e interpretación de la información**

Los datos levantados por los técnicos en los diferentes puntos de control, utilizando los formatos de registro pertinentes, son entregados, según la frecuencia o periodicidad establecida, al personal responsable de hacer las operaciones aritméticas necesarias para el cálculo de los parámetros (o bien mediante el software adecuado si se dispone de él) que nos permiten conocer cómo se comporta el cauce analizado. La supervisión, verificación y aprobación de la información estará a cargo de la Gerencia. En caso de que se cuente con un sistema automatizado de información hidrológica para el procesamiento de datos (SAIH), la digitalización de los registros a la base de datos estará a cargo del personal encargado del sistema de cómputo.

En muchas Juntas de Usuarios<sup>5</sup>, los datos que se toman en la estructura o estación, según sea la frecuencia de obtención de los mismos, se envían en los formatos establecidos a la oficina de operaciones, pudiendo ser éstos: horarios, diarios, semanales, quincenales, mensuales y anuales. Con esta información, se mantiene actualizada la base de datos, permitiendo a la vez hacer el seguimiento o monitoreo de las ocurrencias del sistema mayor de riego, determinación de eficiencias, pérdidas en la red, estadística de la campaña agrícola y control de tarifas.

### **5.4. Entrega de la información para ser utilizada en las rutinas de operación**

La salida y distribución oportuna de la información procesada debe ser enviada a la unidad de operación de las Juntas de Usuarios y ser utilizadas como elementos de juicio para poder realizar los movimientos de las compuertas indispensables que nos aseguren una correcta operación. Depende del justo manejo de estos datos el que se pueda mantener un constante equilibrio y para que las diferentes partes de un sistema no se vean castigadas por excesos o deficiencia de agua, que en el caso agrícola pueden originar descensos notables en los rendimientos de los cultivos, y respondan a las necesidades preestablecidas de caudal.

---

<sup>5</sup> En España algunas Juntas de Usuarios también se constituyen jurídicamente como Sociedades Agrarias de Transformación (SAT) cuando su finalidad es la distribución del agua de riego.

## 5.5. Documentación y archivo

Se necesita concentrar y conservar toda la información disponible, tanto de la base de datos, como la procesada en cuadros, tablas, gráficos y otros en archivos y sistemas de cómputo, en un lugar apropiado, porque ello resulta particularmente importante a fin de tomar las decisiones adecuadas para la correcta operación del sistema.

## 6. AFORO DEL AGUA. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

### 6.1. Definición

“Aforar” el agua consiste en medir el volumen de un depósito o el caudal del agua que transcurre por una conducción libre o forzada. En vez de “caudal” también se pueden emplear los términos “gasto”, “descarga” y, a nivel de campo, “riegos”.

### 6.2. Importancia

La medición o aforo de agua de cualquier curso de agua es importante desde diferentes puntos de vista, como:

- Saber la disponibilidad de agua con que se cuenta.
- Distribuir el agua a los usuarios en la cantidad deseada.
- Saber el volumen de agua con que se riegan los cultivos o se sirven los abastecimientos urbanos o industriales.
- Poder determinar la eficiencia de uso y de manejo del agua de riego.

### 6.3. Métodos de aforo

Son varios los métodos que se pueden emplear para aforar el caudal del agua, estando la mayoría de ellos basados en la determinación del área de la sección mojada transversal y la velocidad media, para lo cual se utiliza la fórmula clásica:

$$Q = A \times V, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \text{caudal en m}^3/\text{s.} \\ A = \text{Área de la sección mojada transversal en m}^2. \\ V = \text{velocidad en m/s.} \end{array} \right.$$

Los métodos más utilizados, que explicaremos a continuación, son los siguientes:

- aforo con correntómetro.
- aforo con limnímetros y limnógrafos.
- aforo con flotadores.

## **6.4. Aforo de un cauce con correntómetro**

### *6.4.1. La estación de aforo*

El aforo de un río, de un canal o de una acequia de riego o de desagüe también tiene lugar en una sección transversal del curso de agua, a la que llamaremos la “sección de control”.

El lugar donde siempre se va a aforar el agua, toma el nombre de “estación de aforos o foronómica”. En nuestros estudios (Franquet, 2009) nos hemos referido repetidamente a la EA 027 (“Río Ebro en Tortosa”) perteneciente a la red establecida por la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E).

El lugar que se escoja para establecer una estación de aforo debe reunir ciertos requisitos, algunos de los cuales ya fueron mencionados al tratar las condiciones de la sección de aforos. A saber:

1. El tramo del cauce que se escoja para medir el caudal del agua circulante debe ser aproximadamente recto, en una distancia de 150 a 200 metros, tanto aguas arriba como aguas abajo de la estación de aforo. En este tramo recto, no debe confluir ninguna otra corriente de agua, ni existir pérdidas o derivaciones del recurso.
2. La sección de control debe estar ubicada en un tramo en el cual el flujo sea calmado y, por lo tanto, libre de turbulencias, y donde la velocidad de la corriente esté ubicada dentro de un rango que pueda ser registrado por un correntómetro.
3. El cauce del tramo recto debe estar limpio de malezas o matorrales, piedras grandes, basuras, escombros, bancos de arenas, etc., para evitar imprecisiones en las mediciones de agua. Estos obstáculos hacen aún más imprecisas las mediciones efectuadas en épocas de estiaje.
4. Tanto aguas abajo como aguas arriba, la estación de aforo debe estar libre de la influencia de puentes, presas o cualquier otra construcción que pueda afectar las mediciones a llevar a cabo por efecto de la formación de curvas de remanso o de resalto, oleaje, etc.
5. El sitio escogido debe ser de fácil acceso para realizar las mediciones.

### *6.4.2. Método del correntómetro*

En un cauce cualquiera, para determinar el caudal que pasa por una sección transversal, se requiere, a su vez, saber el caudal que pasa por cada una de las subsecciones en que se divide la sección transversal. Para eso, se realiza el siguiente procedimiento para registrar las observaciones y calcular las velocidades y caudales. A saber:

1. La sección transversal donde se va a realizar el aforo se divide en varias subsecciones. El número de subsecciones depende del caudal estimado que podría pasar por la sección: en cada subsección, no debería pasar más del 10% del caudal estimado que pasaría por la sección. Otro criterio es que, en cauces grandes, el número de subsecciones no debe ser menor de 20.

2. El ancho superior de la sección transversal (superficie libre del agua) se divide en tramos iguales, cuya longitud es igual al ancho superior de la sección transversal dividido por el número de subsecciones calculadas.
3. En los límites de cada tramo del ancho superior del cauce, se trazan verticales, hasta alcanzar el lecho o fondo. La profundidad de cada vertical se puede medir con la misma varilla del correntómetro que está graduada. Las verticales se trazan en el mismo momento en que se van a medir las velocidades.
4. Con el correntómetro se mide la velocidad a dos profundidades en la misma vertical, a 0.2 y a 0.8 de la profundidad de la vertical, para lo cual se toma el tiempo que demora el correntómetro en dar 100 revoluciones y se calcula el número de revoluciones por segundo; con este dato, se calcula la velocidad del agua en cada una de las profundidades utilizando la fórmula correspondiente, según el número de revoluciones por segundo (n). En el caso de la medición de la velocidad en una parte del tramo final estudiado del río Ebro (Tortosa-Amposta), que se acompaña en el Anexo del presente Artículo, se emplean las siguientes fórmulas (Franquet, 2009):

$$\begin{cases} V = 0.2590 \cdot n + 0.005 & \text{cuando } n \text{ es } > 1.51 \\ V = 0.2517 \cdot n + 0.016 & \text{cuando } n \text{ es } < 1.51 \end{cases}$$

5. Se obtiene la velocidad promedio del agua en cada vertical. La velocidad promedio del agua en cada subsección es el promedio de las velocidades promedio de las verticales, que encierran la subsección.
6. El área de cada subsección se calculará fácilmente considerándola como un paralelogramo cuya base (ancho del tramo) se multiplica por el promedio de las profundidades que delimitan dicha subsección.
7. El caudal de agua que pasa por una subsección cualquiera se obtiene multiplicando su área por el promedio de las velocidades medias registradas, en cada extremo de dicha subsección.
8. El caudal de agua que pasa por el cauce, en definitiva, es la suma de los caudales que pasan por todas las subsecciones.

## **6.5. Limnímetros y limnigrafos**

### *6.5.1. Sistemas convencionales*

El método que se usa corrientemente para aforar un cauce es mediante el empleo del limnímetro o limnógrafo, puesto que usar frecuentemente el correntómetro resulta impracticable por lo difícil y tedioso que supone realizar las mediciones con este instrumento.

Un limnímetro es, simplemente, una escala tal como una mira de topógrafo, graduada en centímetros. Se puede utilizar para este fin la mira clásica del

topógrafo, pero, por lo general, se pinta o se inserta una escala en una de las paredes o taludes de la conducción. Éste es el caso de la mayoría de las estaciones de aforo o foronómicas de las diversas cuencas hidrográficas. Entonces, basta con leer, en la escala o mira, el nivel que alcanza el agua para saber el caudal de agua que pasa en este momento por la conducción libre, pero previamente se tiene que calibrar la escala o mira reseñada.

La calibración consiste en aforar el cauce varias veces durante el año, en épocas de estiaje y épocas de avenidas en el caso de un curso natural, por el método de correntómetro y anotar cuidadosamente la altura que alcanzó el agua, medida con el limnómetro. Se deben realizar varios aforos con correntómetro para cada determinada altura del agua. Con los datos de altura del agua (h) y del caudal (q) correspondiente obtenido, se construye la llamada “curva de calibración” en un eje de coordenadas cartesianas rectangulares.

El limnómetro siempre debe colocarse en el mismo sitio cada vez que se hacen las lecturas y su extremidad inferior siempre debe estar sumergida en el agua. Los limnómetros pueden ser de metal o de madera. Una escala graduada pintada en una pared de mortero de cemento, o bien mediante azulejos cerámicos, al costado de unas de las riberas del río, o del paramento en el caso de un cauce artificial, también puede servir perfectamente a los efectos de limnómetro.

Por lo general, los aforos de agua deben hacerse tres veces en el día, a las 6 a.m., 12 (mediodía) y 6 p.m. para obtener el caudal medio diario.

Una mejor manera de aforar el agua es empleando un aparato llamado “limnógrafo”, el cual tiene la ventaja de poder medir o registrar los niveles de agua en forma continua en un papel especialmente diseñado, que gira alrededor de un tambor movido por un mecanismo eléctrico o de relojería.

Los limnógrafos están protegidos dentro de una caseta de obra de fábrica. Vienen acompañados de las instrucciones precisas para su operación y cuidado, así como de un sistema de transmisión de datos *on line* por teleproceso hasta el correspondiente centro de control.

### *6.5.2. El limnómetro electrónico*

#### ***a) Descripción***

Sabiendo de las necesidades de modernización de las redes hidrométricas y de ampliación de su cobertura, y con el fin de contribuir en algún grado en tales procesos, últimamente se viene desarrollando un dispositivo electrónico de medición de niveles de flujo en las conducciones libres, que permitirá el registro y procesamiento de datos para suplir y ampliar, de una manera competitiva, las funciones de los actuales equipos de registro conocidos como “limnógrafos”.

El dispositivo en cuestión tiene la capacidad de comunicarse con un PC portátil con el que se programan las frecuencias de la toma de lecturas y se recoge la

información almacenada, la cual puede procesarse de inmediato y enviarse vía internet a las oficinas centrales.

### ***b) Objetivos***

Consisten fundamentalmente en contar con tecnología propia para satisfacer estas necesidades de medición, pues ello se traduce en menores costos de adquisición y de soporte técnico debido al dominio que se alcanza sobre ella; de ahí que este desarrollo constituya una alternativa a la tecnología comercial de punta disponible actualmente en el mercado especializado.

### ***c) Resultados***

Respecto al funcionamiento del limnómetro electrónico, veamos que tiene la capacidad de seguir el espejo del agua y registrar sus variaciones en base a la información digital de un sensor; algunos equipos comerciales con funciones similares utilizan encoders ópticos conectados al eje de la polea de los sistemas de flotadores tradicionales. Los beneficios potenciales más visibles de este desarrollo tecnológico estriban en la obtención oportuna y confiable de información hidrométrica a menores costos operativos, debido al suministro y soporte técnico propios.

## **6.6. Aforo con flotadores**

### ***6.6.1. Metodología***

Como ya hemos expresado, este método de aforo con flotadores se utiliza generalmente cuando no se dispone de un molinete o correntómetro, o cuando se producen excesivas velocidades en el cauce, con los consiguientes peligros para las personas operadoras y para los equipos de medición. La metodología, en el caso de tratarse de un cauce irregular o natural, consiste en:

- Seleccionar un tramo recto del cauce entre 15 y 20 metros de longitud.
- Determinar el ancho del cauce y las profundidades de éste en tres partes diferentes de la sección mojada transversal.
- Calcular el área de la sección transversal. Para ello se emplea la expresión:

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \times \mathbf{H}, \text{ donde:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{a, b, c} \text{ son las profundidades del cauce.} \\ \mathbf{B} = \text{ancho del cauce.} \\ \mathbf{A} = \text{área buscada.} \\ \mathbf{H} = \text{altura promedio de } (\mathbf{a} + \mathbf{b} + \mathbf{c})/3. \end{array} \right.$$

### 6.6.2. Cálculo de la velocidad

Para medir la velocidad en cauces naturales pequeños, se escoge un tramo recto del curso de agua y de alrededor de 5 a 10 m; se deja caer el flotador al inicio del tramo que está debidamente señalado y situado en el centro del curso del agua en lo posible y se toma el tiempo inicial  $t_1$ ; luego se toma el tiempo final  $t_2$ , cuando el flotador alcanza el extremo final del tramo que también se halla debidamente marcado; y sabiendo la distancia recorrida y el tiempo que el flotador demora en alcanzar el extremo final del tramo, se calcula la velocidad del curso de agua según la siguiente fórmula:

$$V = (L/T) \cdot k \text{ (velocidad), siendo:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \text{Longitud del tramo (aproximadamente 10 m).} \\ T = \text{Tiempo de recorrido del flotador entre dos puntos del tramo L} \\ \text{(segundos) = } t_2 - t_1. \\ k = \text{relación existente entre la velocidad media de la sección y la} \\ \text{superficial, para este tipo de cauces.} \end{array} \right.$$

### 6.6.3. Cálculo del caudal

De la misma manera, se lleva a cabo la determinación del gasto hidráulico mediante la expresión clásica:  $Q = A \times V$ , cuyos parámetros resultan bien conocidos.

## 6.7. Breve apunte de la hidrometría de las conducciones forzadas

### 6.7.1. Concepto

Un **caudalímetro**, medidor de caudal, medidor de flujo o flujómetro es un instrumento de medición para la medición del caudal volumétrico de un fluido o para la medición del caudal másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido.

Existen versiones mecánicas y eléctricas. Un ejemplo de caudalímetro eléctrico lo podemos encontrar en los calentadores de agua de paso que lo utilizan para determinar el caudal que está circulando o en las lavadoras o lavavajillas para llenar su tanque a diferentes niveles.

Un **hidrómetro** permite medir el caudal, la velocidad o la fuerza de los líquidos que se encuentran en movimiento, dependiendo de la graduación y aplicación de este mismo.

### 6.7.2. Instrumentos utilizados

#### a) Mecánicos visuales de área variable (rotámetros)

Se trata de un cono transparente invertido con una bola plástica en su base. El fluido, al circular por el conducto, impulsa la bola hacia arriba y a mayor caudal

más sube la bola. La gravedad hace bajar la bola al detenerse el flujo. El cono tiene unas marcas que indican el caudal fluyente.

*b) Mecánicos de molino*

Consisten en un molino cuyas aspas están situadas transversales a la circulación de fluido. El flujo hace girar el molino cuyo eje mueve un contador que acumula las lecturas. Un ejemplo de este uso son los contadores de agua de las viviendas o los antiguos contadores de gas natural.

*c) Electrónicos de molino*

Sus partes mecánicas consisten en un molino con aspas transversales a la circulación de flujo, que tiene en un extremo un imán permanente. Cuando este imán gira genera un campo magnético variable que es leído por un sensor de efecto de campo magnético (sensor de efecto Hall), que después el circuito electrónico lo convierte en pulsos que transmite a través de un cable.

En otra versión de este tipo de caudalímetro se instalan imanes en los extremos de las aspas. Al girar los imanes pasan cerca de un *reed switch* que cuenta los pulsos. La desventaja de este diseño se halla en la limitación de las revoluciones por minuto (RPM) que puede alcanzar a leer un *reed switch*.

También existe un tipo de caudalímetro de molino en versión transparente, donde sólo se requiera confirmar que existe circulación sin importar el caudal.

*d) Electrónicos de turbina*

Una turbina colocada de frente al flujo, encapsulada en las paredes de un tubo, rota proporcionalmente al caudal. La turbina, fabricada con un compuesto de resina y polvo de alnico, genera un campo magnético que es leído y codificado por un sensor de efecto Hall (Stormer, 1999).

*e) Diferenciales de presión (tipo Venturi)*

Son los más comunes. La tubería disminuye su diámetro levemente (por ejemplo, con un plato de orificio o un tubo de Venturi) y después regresa a su diámetro original. El fluido obligado a circular a mayor velocidad por esta reducción disminuye su presión a la salida. La diferencia de presión de antes y después es medida de manera mecánica o electrónica. A mayor diferencia de presión mayor es el caudal.

Existen otras variantes, pero todas ellas basadas en la diferencia o gradiente de la lectura de presión, antes y después.

*f) V-Cone*

El medidor de flujo de presión diferencial V-Cone es una tecnología patentada de medición de flujos con alta precisión, aplicable a gran variedad de fluidos, todo tipo de condiciones y un amplio intervalo de números de Reynolds. Utiliza el mismo principio físico que otros medidores de flujo de presión diferencial: el teorema de conservación de la energía del flujo de fluidos a través de una tubería. No obstante, las características de desempeño del V-Cone, muy

notables, son el resultado de su exclusivo diseño, que incluye un cono central situado en el interior del tubo.

El cono antedicho interactúa con el flujo del fluido, modificando su perfil de velocidad para crear una región de presión más baja, inmediatamente aguas abajo del cono. La diferencia entre la presión estática de la línea y la presión más baja creada aguas abajo del cono se mide a través de dos tomas piezosensibles. Una de las tomas se coloca inmediatamente aguas arriba del cono y la otra se coloca en la cara orientada aguas abajo. Después, la diferencia de presión se puede incluir en una derivada de la ecuación de Bernoulli para determinar el régimen de flujo. La posición central del cono en la línea optimiza el perfil de velocidad del flujo en el punto donde se hace la medición, asegurando mediciones de flujo altamente precisas y confiables, sin importar la condición del flujo aguas arriba del medidor.

#### *g) Magnéticos*

Están basados en la fuerza de Lorentz (que experimentan las cargas moviéndose en el seno de un campo magnético), de la que se deriva que el voltaje inducido a través de un conductor que se desplaza transversalmente a un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

Se aplica un campo magnético a una tubería (en una zona con un recubrimiento interior aislante) y se mide la diferencia de potencial (voltaje) de extremo a extremo de un diámetro de la tubería. Este sistema es muy poco intrusivo, pero sólo funciona con líquidos que tengan algo de conductividad eléctrica como es el caso de las aguas de abastecimiento agrícola, industrial o urbano. Es de muy bajo mantenimiento ya que no tiene partes móviles.

Cuando el fluido (libre de vacíos) pasa a través de las bobinas, se induce un pequeño voltaje en los electrodos que es proporcional al cambio del campo magnético, y el caudalímetro usa este valor para calcular el caudal del líquido circulante.

#### *h) De Vortex*

Montado en una tubería, está basado en el principio de generación de vórtices o torbellinos. Un cuerpo que atraviese un fluido generará vórtices flujo abajo. Estos vórtices se forman alternándose de un lado al otro, causando diferencias de presión que son censadas por un cristal piezoeléctrico. La velocidad de flujo es proporcional a la frecuencia de formación de los vórtices. Son equipos de bajo mantenimiento y buena precisión.

#### *i) De desplazamiento positivo*

Separan el líquido en porciones que llenan un recipiente mientras se desplaza. Después, cada porción es contada para medir el caudal. Existen muchas variantes de este sistema. De tornillo, de engranajes, pistones, etc.

#### *j) Ultrasonicos*

Son alimentados eléctricamente, y es posible encontrar dos tipos diferentes según su principio de medición: de efecto Doppler y de tiempo de tránsito. Este último consiste en medir la diferencia existente entre el tiempo que le toma a dos señales atravesar una misma distancia, pero en sentido contrario utilizando como medio un fluido. Si el caudal del fluido es nulo, los tiempos serán iguales, pero cuando hay flujo los tiempos serán diferentes, ya que las velocidades de las señales serán afectadas por la del fluido cuyo caudal se desea determinar. Esta diferencia de tiempo, más el conocimiento sobre la geometría de la tubería y la velocidad del sonido en el medio permiten evaluar la velocidad del fluido o el caudal.

Los de tiempo de tránsito son más exactos que los de efecto Doppler, pero para obtener lecturas correctas se requiere que los fluidos tengan un bajo porcentaje de impurezas; en caso contrario, los de efecto Doppler son de utilidad y entregan una muy buena señal, ya que su principio de funcionamiento se basa en el cambio de frecuencia de la señal reflejada sobre algún elemento que se mueve con el fluido.

Desde luego, la exactitud de estos sistemas de medición es muy dependiente del cumplimiento de los supuestos de flujo laminar.

#### *k) De diferencial de temperatura*

Se colocan dos termistores y en el centro de ellos una pequeña resistencia calentadora. Si ambos termistores leen la misma temperatura el fluido no está circulando. Según aumenta el flujo uno de los termistores lee la temperatura inicial fluido mientras que el otro lee la del fluido calentado. Con este sistema no solo se puede leer el caudal, sino que además se sabe el sentido de circulación.

La ventaja de este tipo de caudalímetro es que se puede conocer la cantidad de masa del fluido que ha circulado, y las variaciones de presión en el fluido afectan poco la medición.

#### *l) Medidores de Coriolis*

Los medidores de Coriolis se basan en el principio de las fuerzas inerciales que se generan cuando una partícula, en un cuerpo rotatorio, se mueve con respecto al cuerpo acercándose o alejándose del centro de rotación. Si una partícula de masa  $dm$  se mueve con velocidad constante en un tubo  $T$  que está rotando con una velocidad angular  $\omega$  con respecto a un punto fijo  $P$ , adquiere 2 componentes de aceleración Coriolis.

### **6.8. Análisis estadístico e hidrometría**

Consiste en estudiar los siguientes temas:

- *Diseño de redes y observaciones hidrológicas*: una breve introducción a los aspectos esenciales del diseño de redes y la administración de la información hidrológica básica.

- *Verosimilitud de la información hidrológica*: todas las medidas hidrológicas o los valores derivados de ellas contienen errores. Se recomienda efectuar pruebas de control de calidad para el examen de posibles errores en la información hidrológica.

- *Distribuciones teóricas de probabilidades*: este capítulo cubre el concepto de funciones de densidad, momentos factoriales y cuantiles, distribuciones empíricas, posiciones de ploteo, series parciales y funciones de distribución, incluyendo la distribución de Gauss o normal, log-normal, Pearson tipo III, log-Pearson III y Gumbel.

- *Análisis de correlación y regresión mínimo-cuadrática*: las consideraciones teóricas son útiles para indicar la existencia de correlación entre las variables hidrológicas en estudio. El problema estriba entonces en determinar el tipo y grado de correlación existente entre ellas (coeficientes  $R^2$  y F).

- *Eventos de crecida y estiaje*: se definen las características de las crecidas y estiajes en los cauces naturales y se indican los requisitos y procedimientos a seguir para su correcta evaluación.

- *Análisis de las series de tiempo*: el objetivo principal del análisis de series de tiempo en hidrología es el de separar la tendencia y los elementos periódicos, estacionales y estocásticos del hidrograma medido. Los métodos de series de tiempo o cronológicas también se utilizan para evaluar la precisión de las estimaciones de los parámetros estadísticos y determinar si una serie de tiempo es suficientemente larga o representativa.

- *Análisis diversos*: los capítulos siguientes podrían tratar del estudio de las autocorrelaciones y correlaciones cruzadas, análisis espectral, espectro cruzado y coherencia. El análisis de correlación cruzada lineal ofrece información valiosa acerca del grado de relación lineal y del tipo de concordancia o discordancia de las variaciones en dos series temporales.

## 7. CONCLUSIONES

- A) La Hidrometría se encarga particularmente de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan por una sección transversal de una conducción libre o forzada, por lo que sus técnicas resultan útiles para la determinación de los caudales y velocidades del flujo que deben circular por dichos cauces naturales o artificiales.
- B) La función principal de la hidrometría es proveer de datos oportunos y veraces que, una vez procesados, proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y

evaluación del manejo del agua en un sistema hidráulico agrícola, industrial o urbano.

- C) La operación y control de la red hidrométrica resulta de gran importancia porque permite conocer, graduar y controlar la información hidrológica en el ámbito de tomas directas, de tomas principales y secundarias de las comunidades de regantes y otros usuarios del recurso. Además, permite hacer el seguimiento o monitoreo de la campaña agrícola en caso de facturación del agua de riego, actividades de cobranza (volúmenes entregados, volúmenes facturados), análisis de eficiencia de la red y/o pérdidas (sistema, conducción, distribución), así como también tener actualizada la base de datos hidrológicos.
- D) La información obtenida en la red a través de las estaciones de medición requiere el establecimiento de los métodos y formatos de registro. En este sentido, a fin de que las labores a ejecutar tengan el éxito deseado, es necesario que la acción vaya anticipada de la planificación de las tareas a realizar. Esto significa, entre otros aspectos, definir el objetivo de las acciones que se plantea ejecutar.
- E) Resulta conveniente fijar las actividades y metas a alcanzar. Para establecer las metas es aconsejable la división del correspondiente sistema estadístico de información hidrológica (SEIH) en áreas de control hidrométrico, las cuales deberán ser marcadas en un plano escalado y establecida la responsabilidad del personal participante.
- F) Se necesita concentrar y conservar toda la información disponible, tanto de la base de datos, como la procesada en cuadros, tablas, gráficos y otros en archivos y sistemas de cómputo, en un lugar apropiado, porque ello resulta particularmente importante a fin de tomar las decisiones adecuadas para conseguir la correcta operación del sistema.

# ANEXO

## PERFILES TRANSVERSALES DEL RÍO EBRO EN SU TRAMO FINAL (TORTOSA – AMPOSTA)

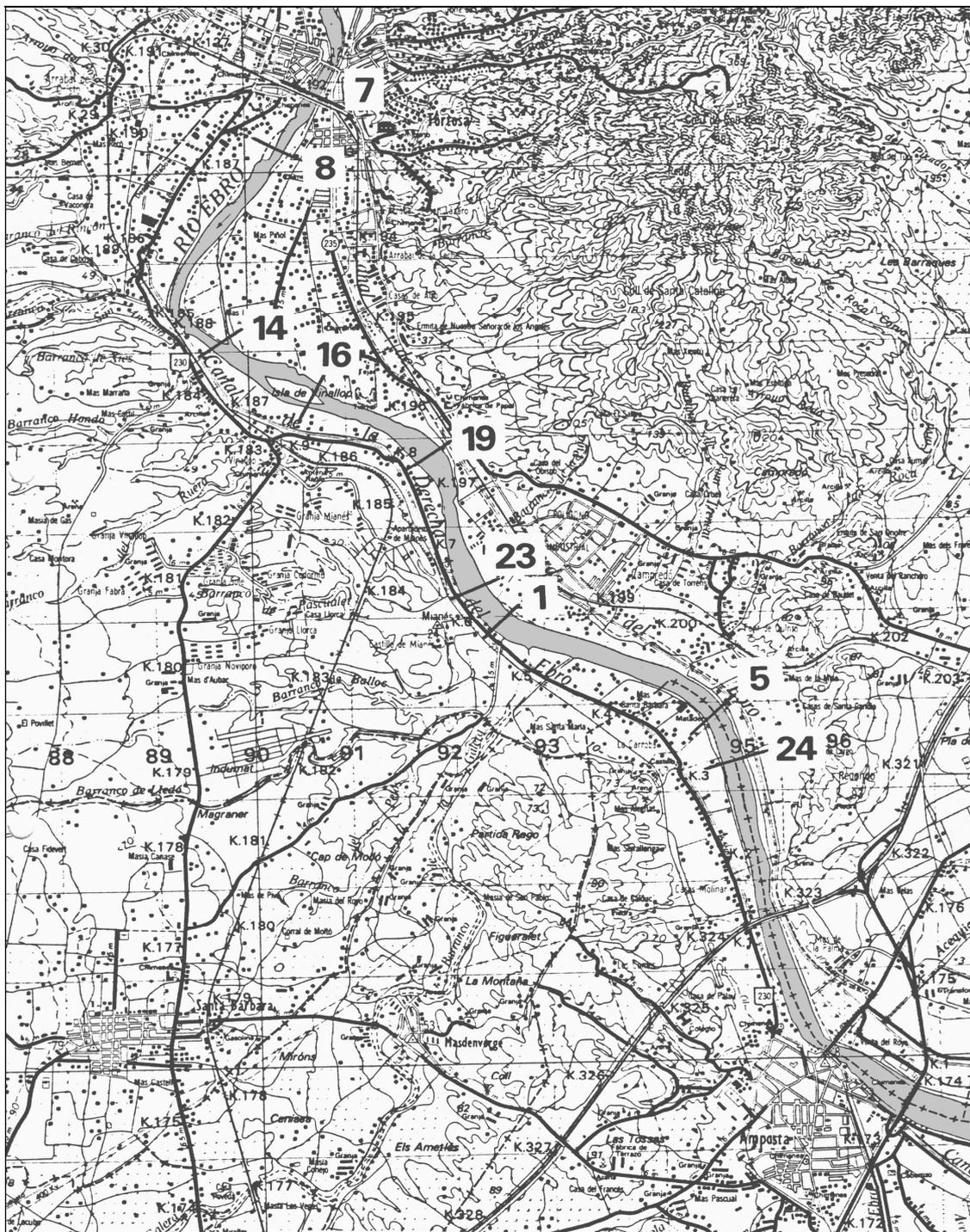
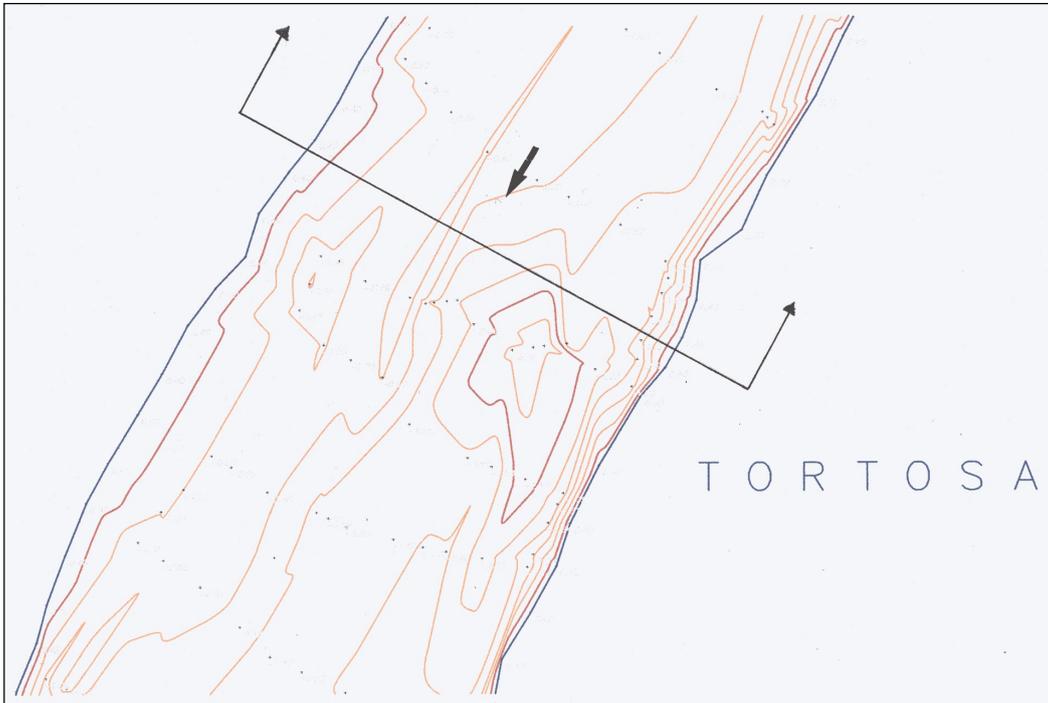


Fig. 2. Planta de las secciones estudiadas.

# 1. PERFILES TRANSVERSALES DEL RÍO EBRO EN EL TRAMO TORTOSA-AMPOSTA (PLANTAS)

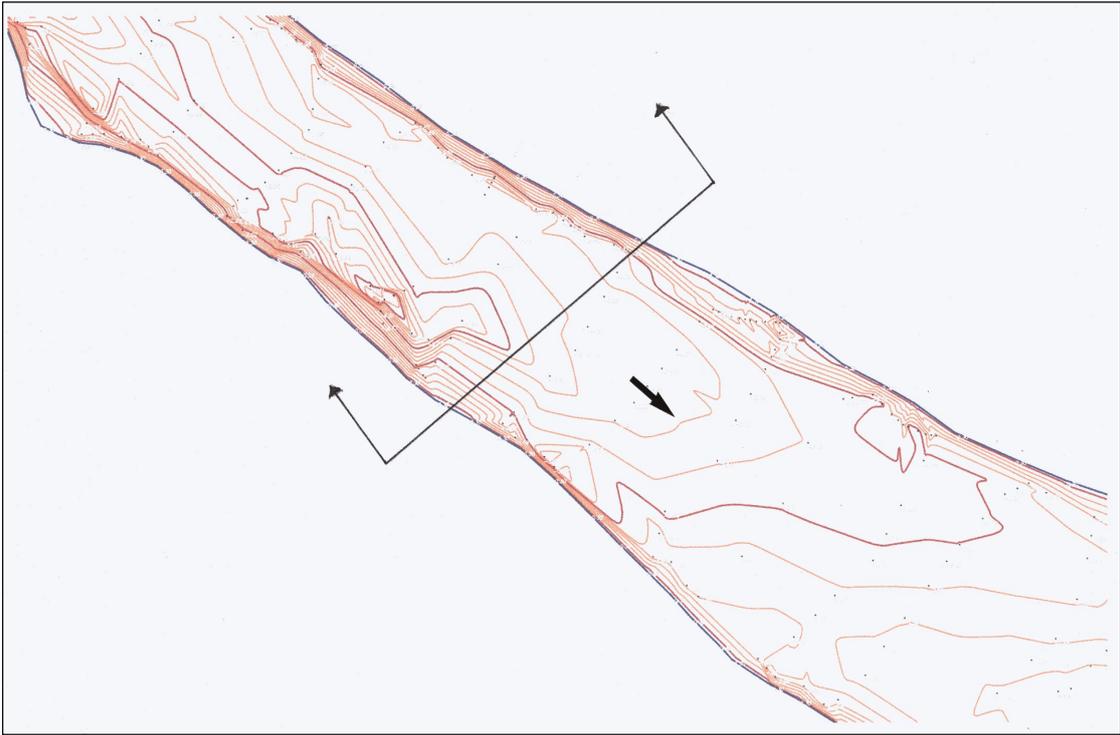
## PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 7



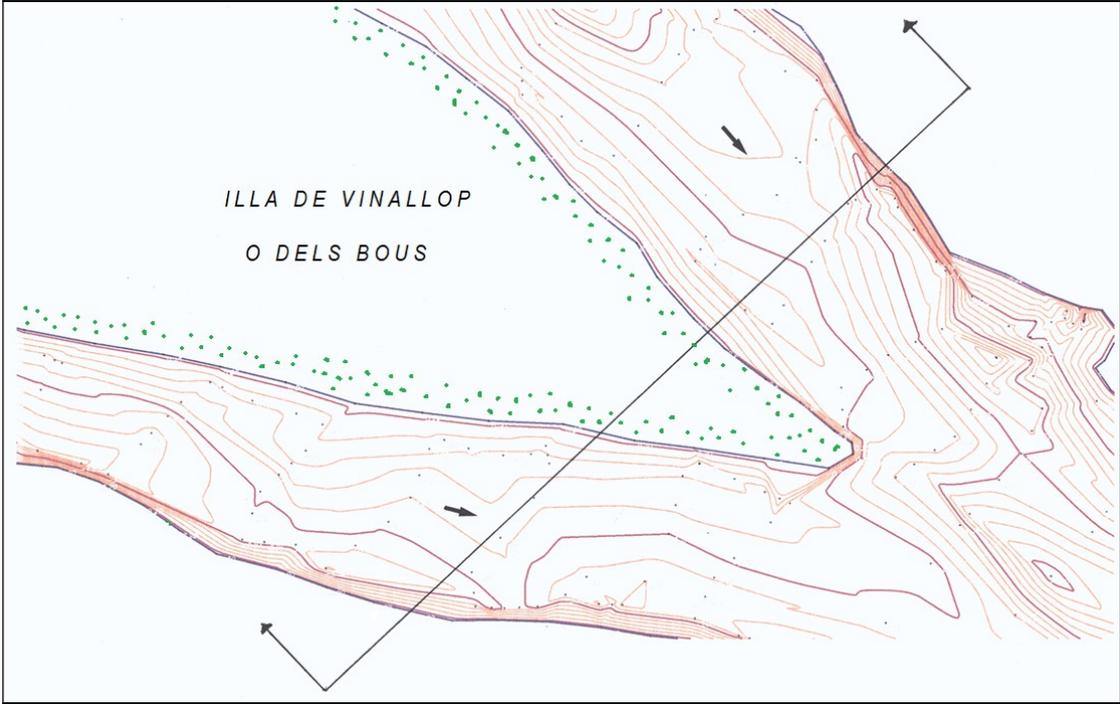
## PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 8



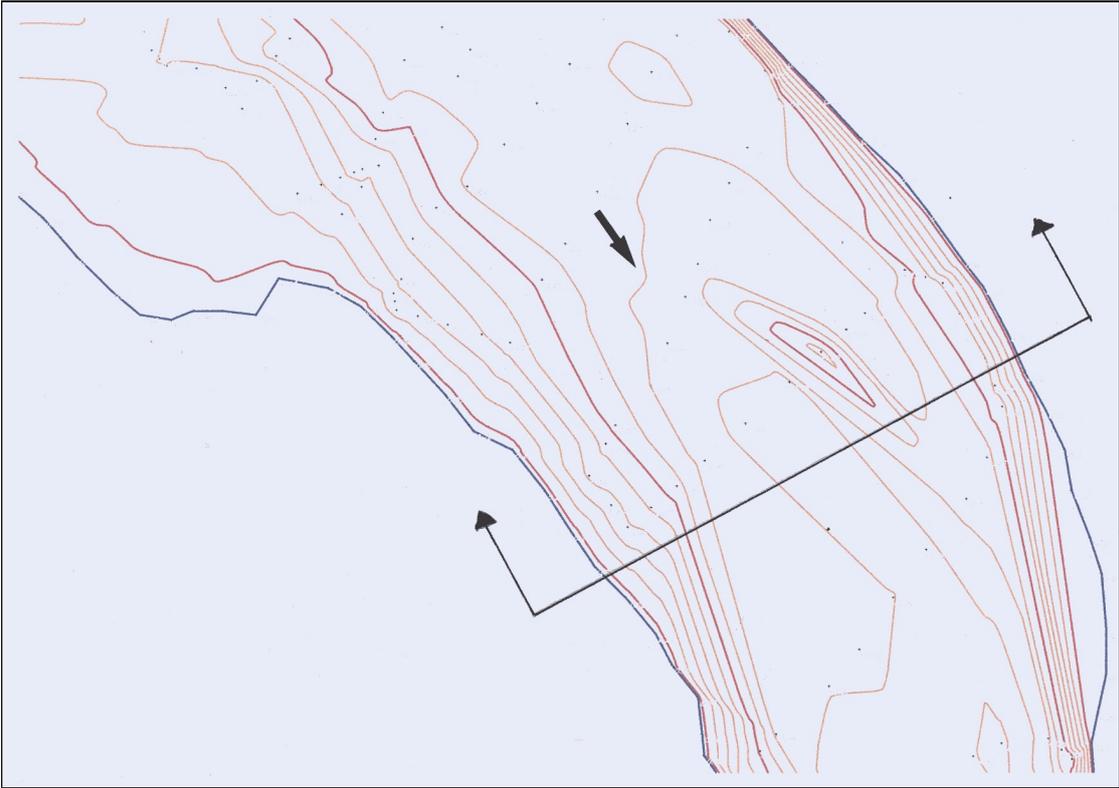
**PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 14**



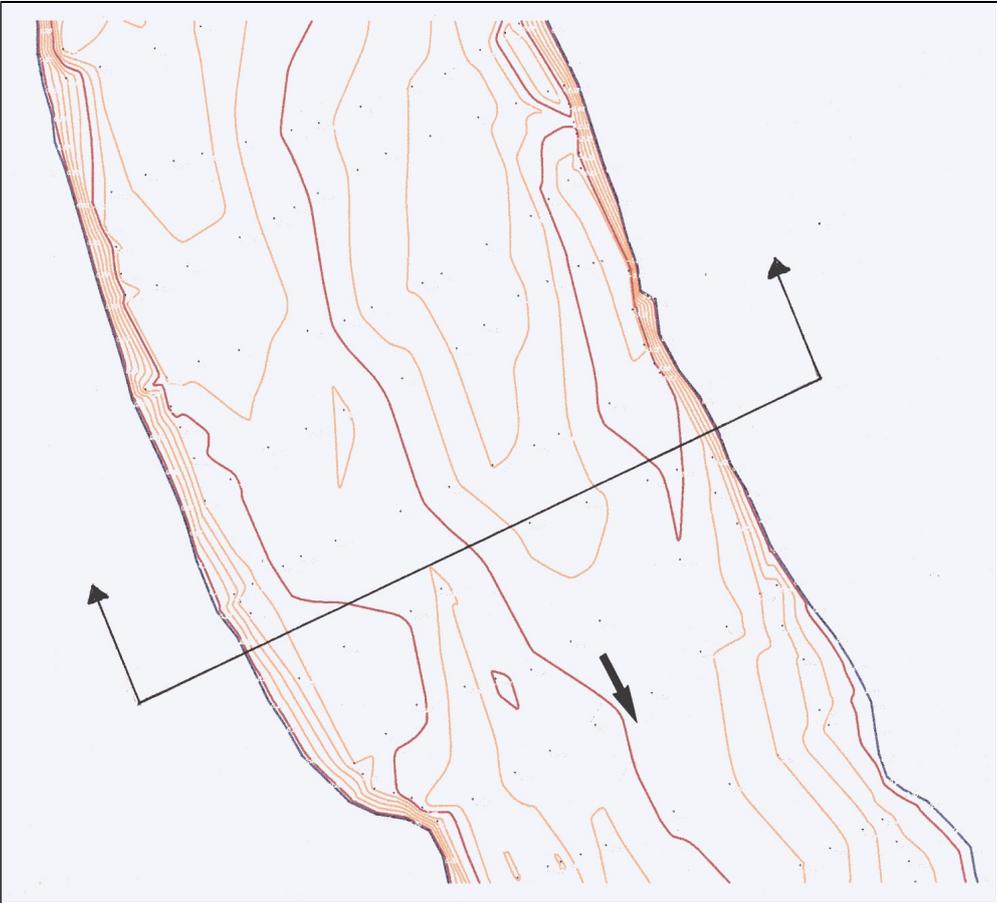
**PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 16**



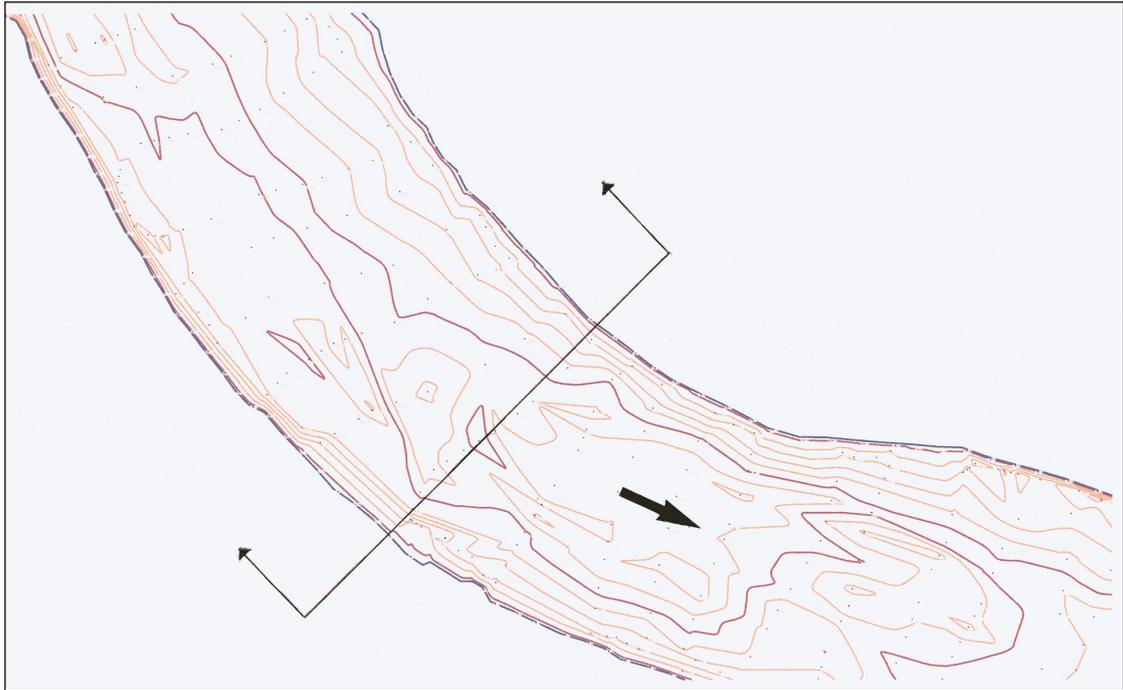
**PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 19**



**PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 23**



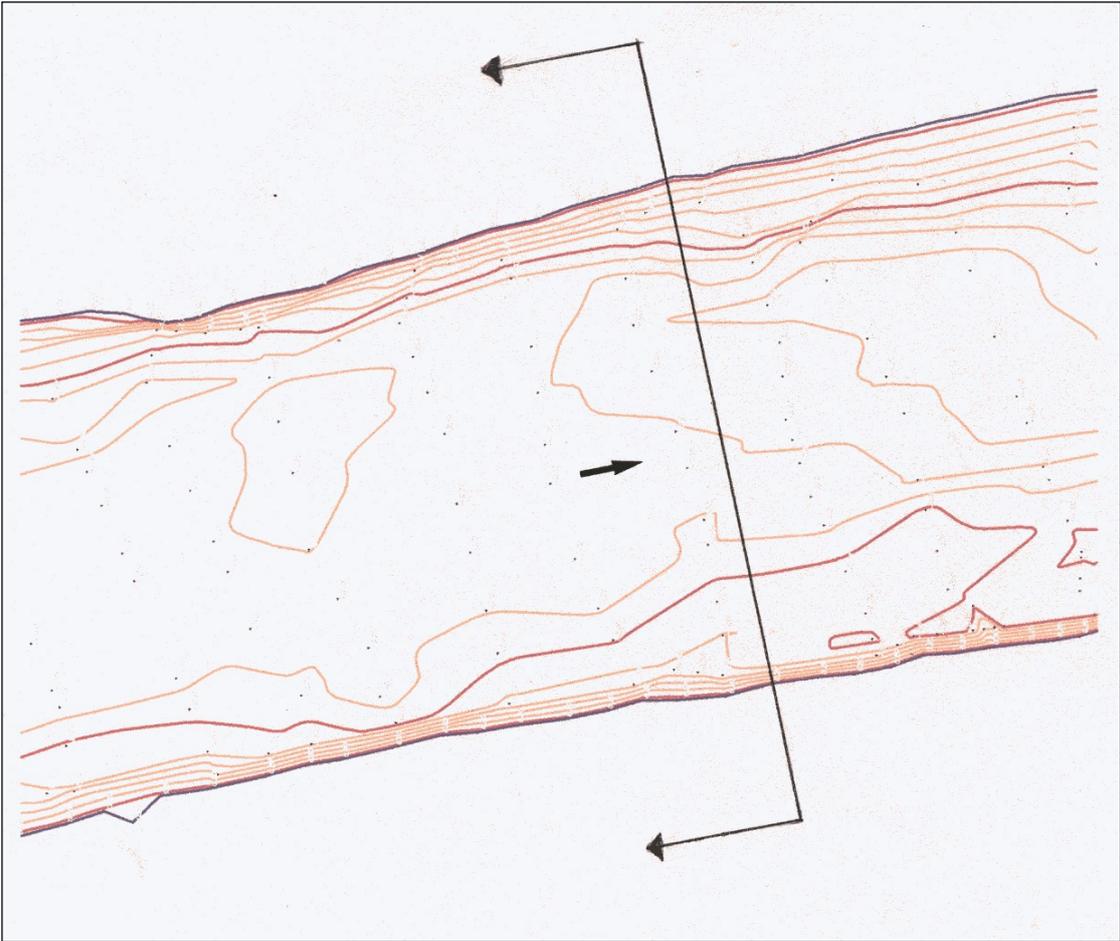
### PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 1



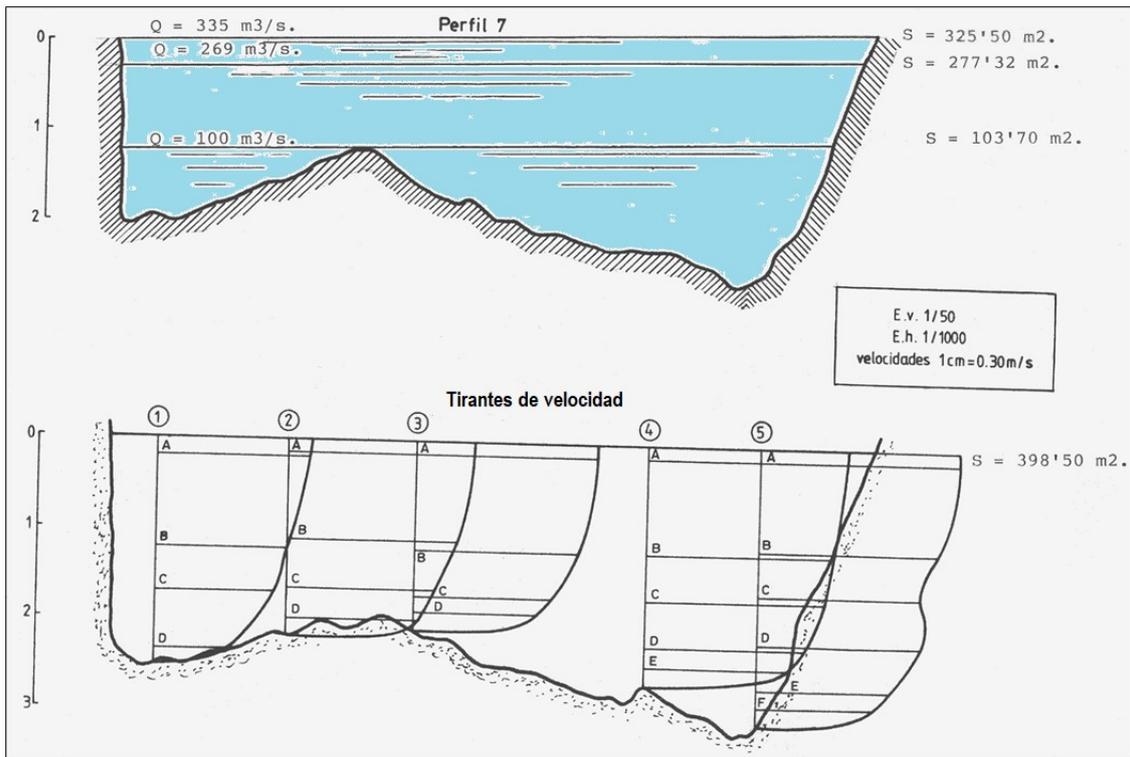
### PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 5



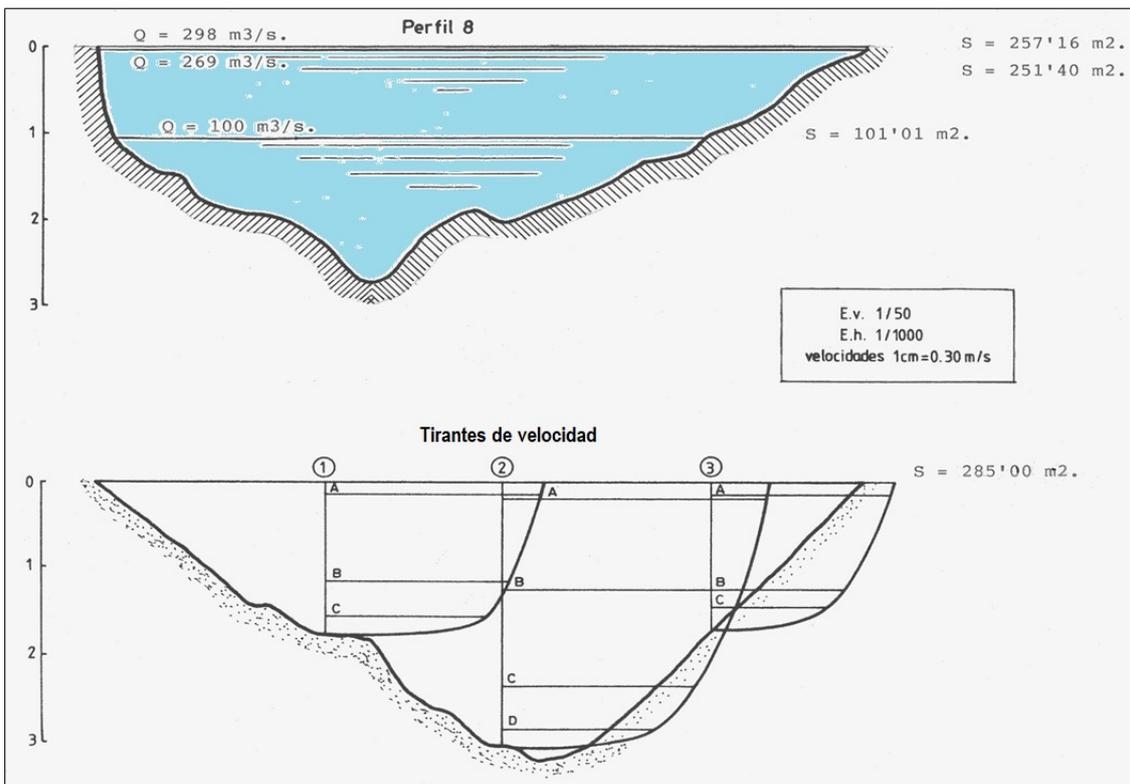
**PLANTA DEL RÍO EN PERFIL 24**



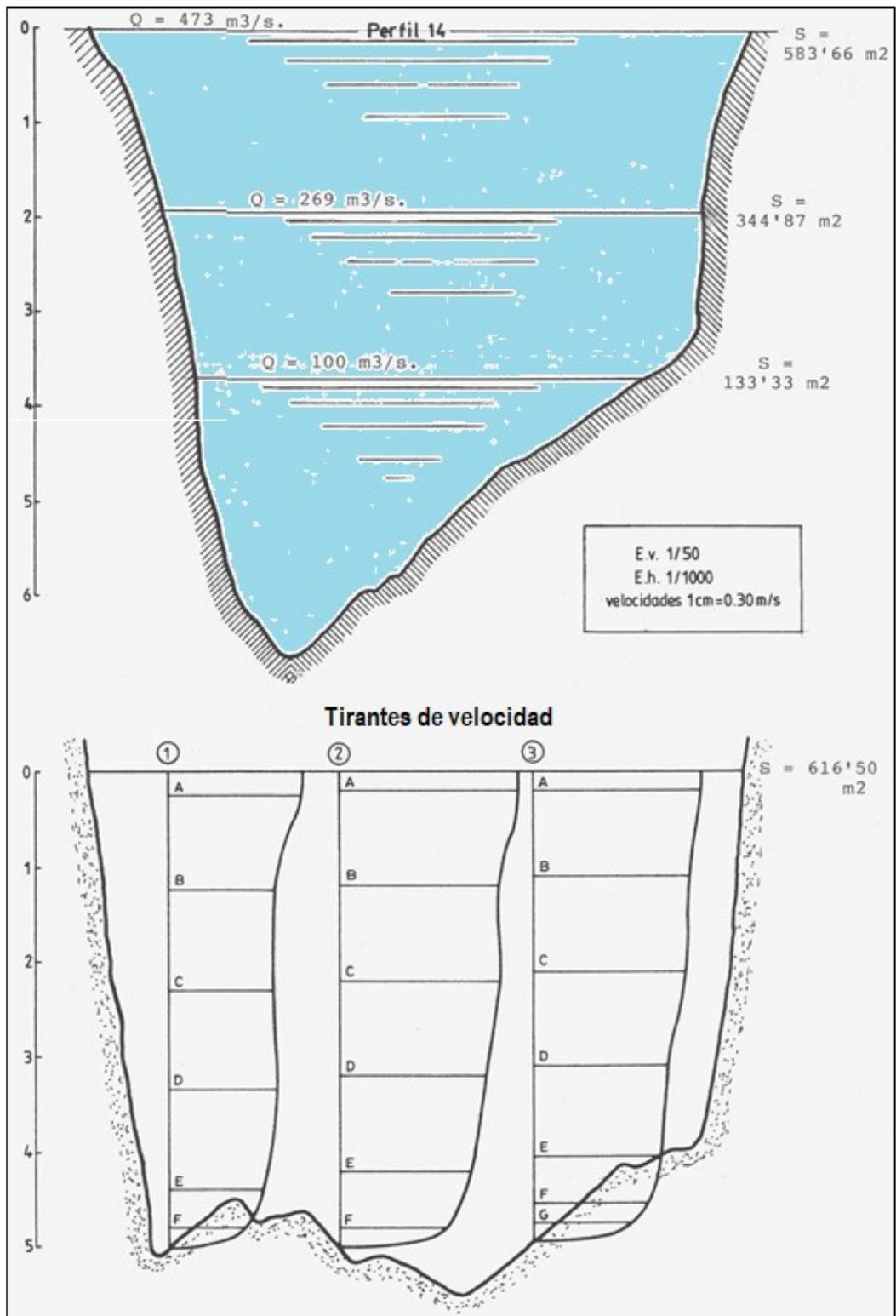
## 2. PERFILES TRANSVERSALES DEL RÍO EBRO EN EL TRAMO TORTOSA-AMPOSTA (SECCIONES)



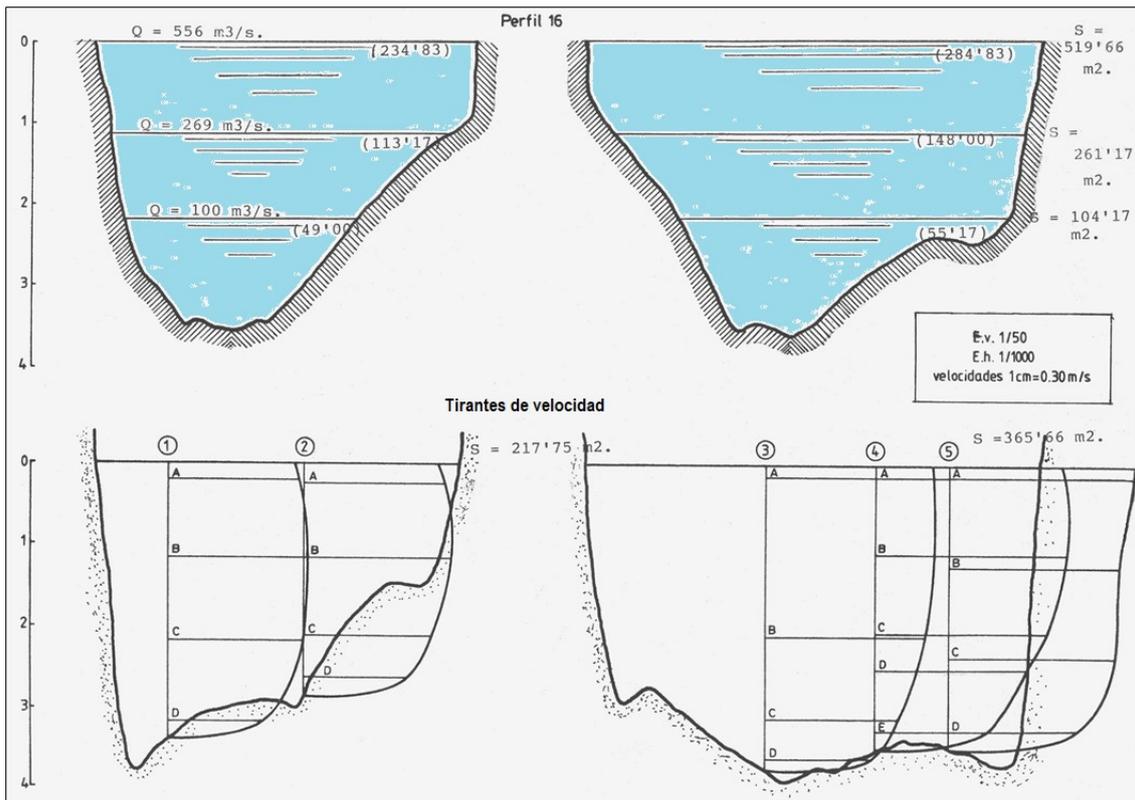
**PERFIL 7**



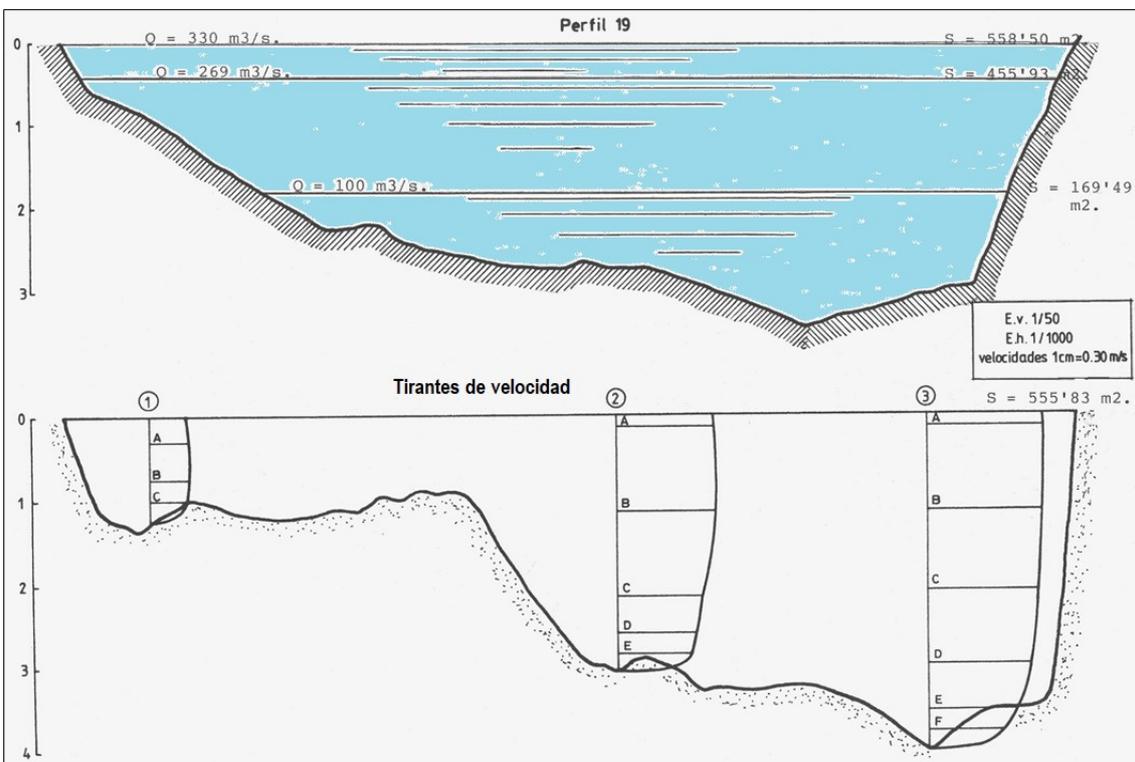
**PERFIL 8**



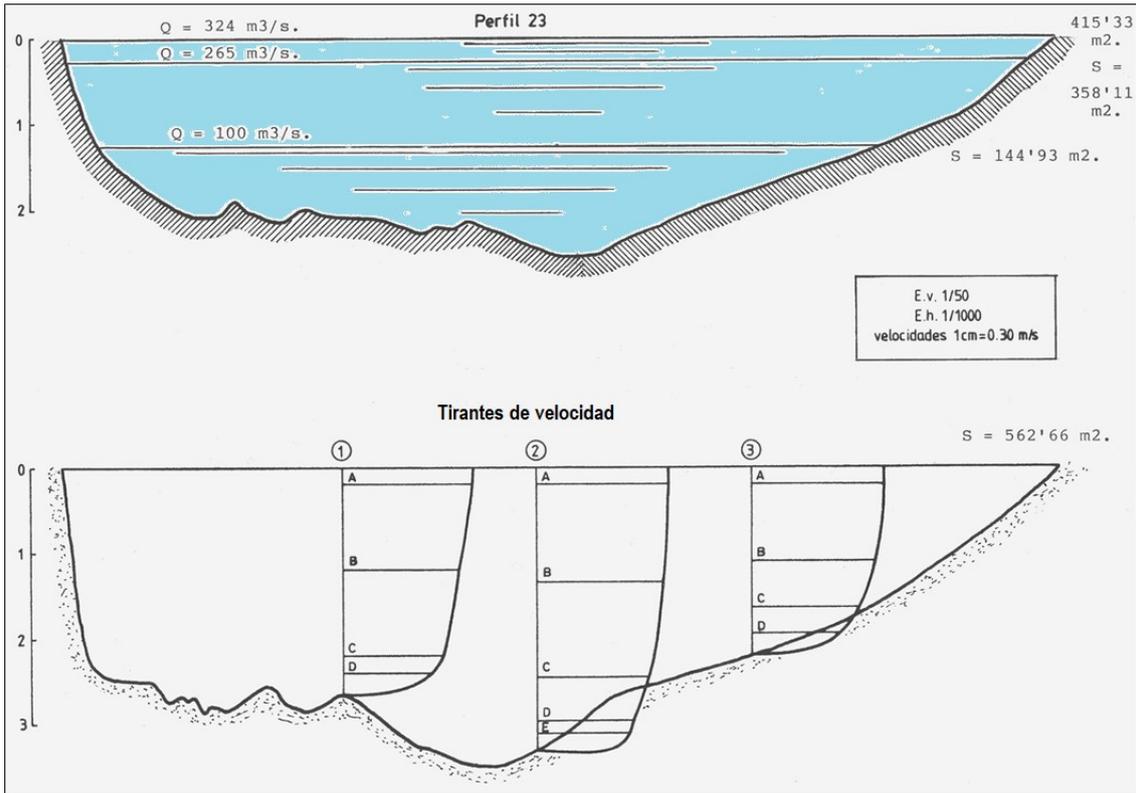
**PERFIL 14**



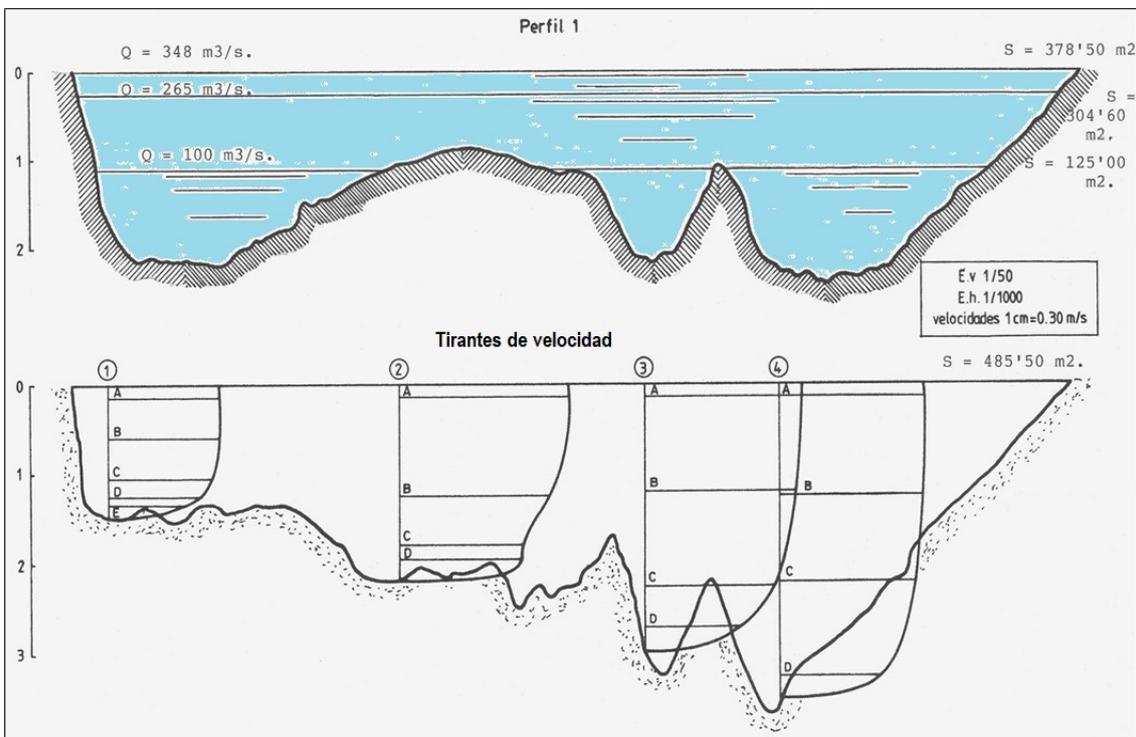
**PERFIL 16**



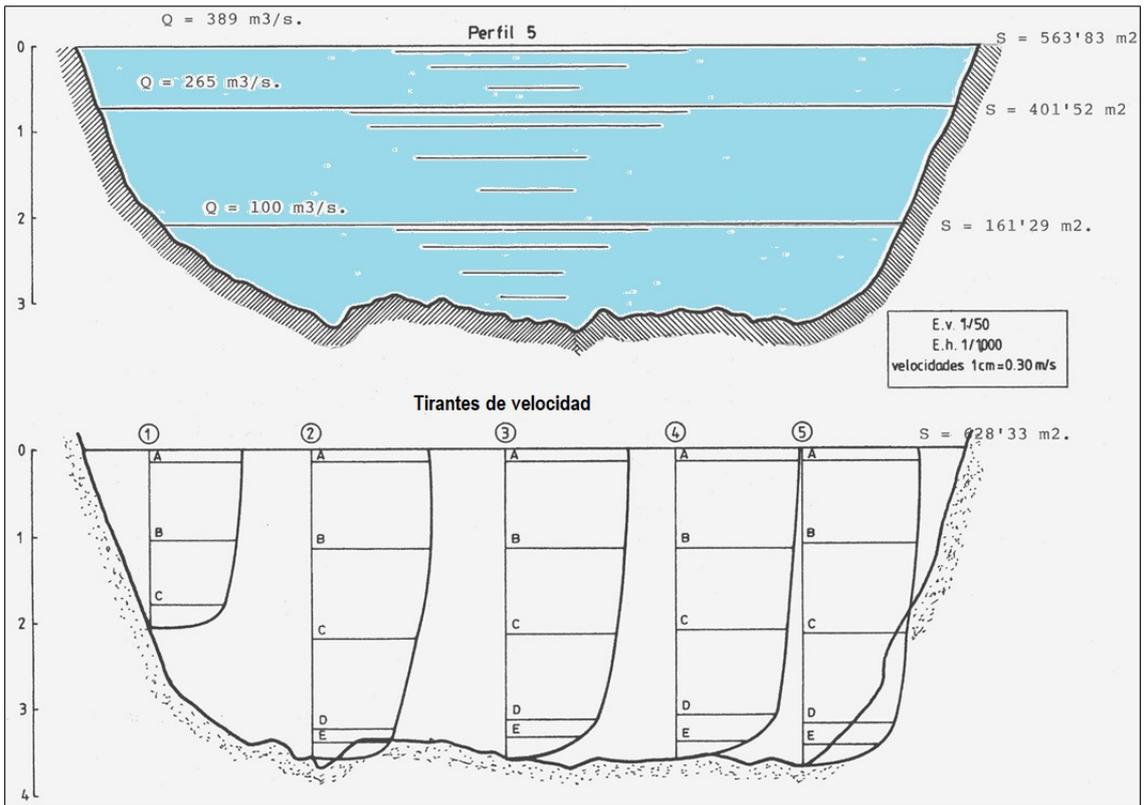
**PERFIL 19**



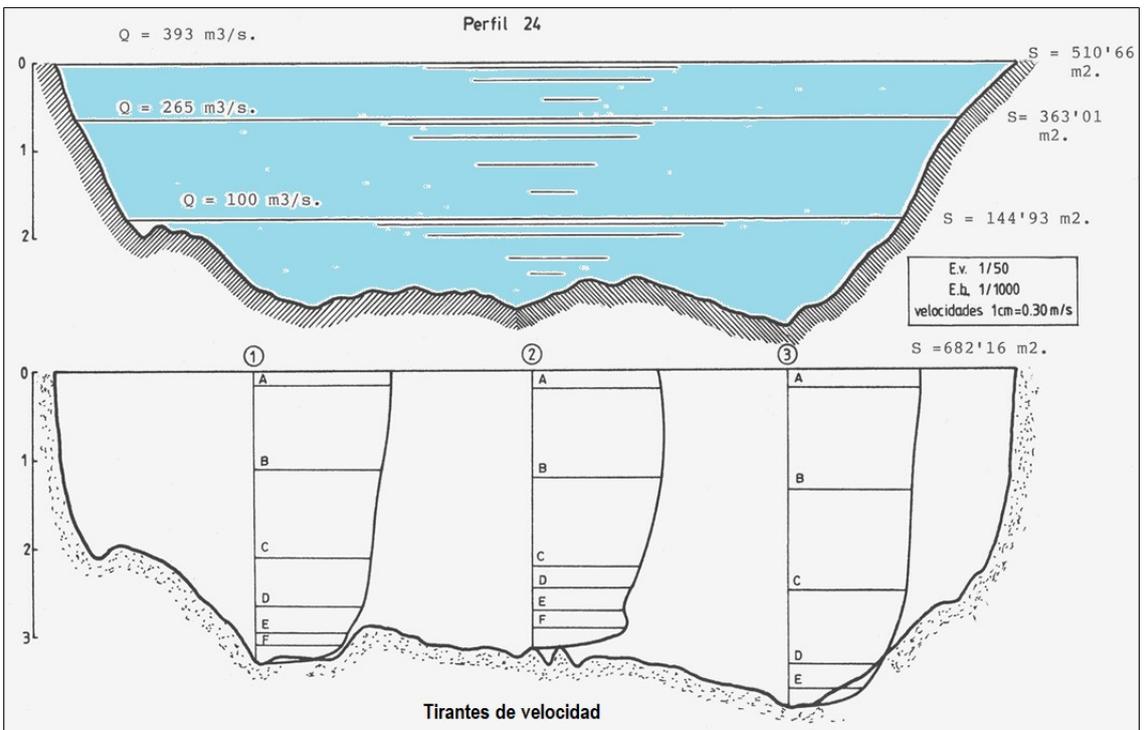
**PERFIL 23**



**PERFIL 1**



**PERFIL 5**



**PERFIL 24**

### 3. VELOCIDADES DEL AGUA EN CADA PERFIL

$\bar{V}$  = velocidad media a perfil lleno (medición de 1985)

$V_{269}$  = velocidad media para  $Q = 269 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{265}$  = velocidad media para  $Q = 265 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{100}$  = velocidad media para  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

#### PERFIL 7 (23)

1 A 1,02 m/s.	2 A 1,22 m/s.	3 A 1,20 m/s.	4 A 1,38 m/s.	5 A 1,32 m/s.
B 0,87 m/s.	B 1,13 m/s.	B 1,09 m/s.	B 1,25 m/s.	B 1,19 m/s.
C 0,79 m/s.	C 0,98 m/s.	C 0,91 m/s.	C 1,19 m/s.	C 1,07 m/s.
D 0,57 m/s.	D 0,87 m/s.	D 0,83 m/s.	D 1,06 m/s.	D 1,08 m/s.
			E 0,95 m/s.	E 0,86 m/s.
				F 0,78 m/s.

$\bar{V} = 1'03 \text{ m/s}$   
 $V_{269} = 0'97 \text{ m/s}$   
 $V_{100} = 0'92 \text{ m/s}$

#### PERFIL 8 (10)

1 A 1,36 m/s.	2 A 1,67 m/s.	3 A 1,12 m/s.
B 1,16 m/s.	B 1,53 m/s.	B 0,83 m/s.
C 1,02 m/s.	C 1,22 m/s.	C 0,73 m/s.
	D 0,97 m/s.	

$\bar{V} = 1'16 \text{ m/s}$   
 $V_{269} = 1'07 \text{ m/s}$   
 $V_{100} = 0'99 \text{ m/s}$

#### PERFIL 14 (19)

1 A 0,84 m/s.	2 A 1,11 m/s.	3 A 1,05 m/s.
B 0,67 m/s.	B 0,98 m/s.	B 0,98 m/s.
C 0,66 m/s.	C 1,00 m/s.	C 0,96 m/s.
D 0,68 m/s.	D 0,91 m/s.	D 0,84 m/s.
E 0,60 m/s.	E 0,82 m/s.	E 0,81 m/s.
F 0,48 m/s.	F 0,66 m/s.	F 0,71 m/s.
		G 0,64 m/s.

$\bar{V} = 0'81 \text{ m/s}$   
 $V_{269} = 0'78 \text{ m/s}$   
 $V_{100} = 0'75 \text{ m/s}$

#### PERFIL 16 (21)

1 A 0,96 m/s.	2 A 1,03 m/s.	3 A 1,25 m/s.	4 A 1,38 m/s.	5 A 1,37 m/s.
B 1,01 m/s.	B 1,10 m/s.	B 1,18 m/s.	B 1,41 m/s.	B 1,25 m/s.
C 0,99 m/s.	C 0,95 m/s.	C 0,98 m/s.	C 1,27 m/s.	C 1,23 m/s.
D 0,70 m/s.	D 0,76 m/s.	D 0,78 m/s.	D 1,10 m/s.	D 0,96 m/s.
			E 0,82 m/s.	

$\bar{V} = 1'07 \text{ m/s}$   
 $V_{269} = 1'03 \text{ m/s}$   
 $V_{100} = 0'96 \text{ m/s}$

PERFIL 19 (14)

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| 1 A 0,28 m/s. | 2 A 0,70 m/s. | 3 A 0,84 m/s. |
| B 0,28 m/s.   | B 0,71 m/s.   | B 0,82 m/s.   |
| C 0,27 m/s.   | C 0,61 m/s.   | C 0,79 m/s.   |
|               | D 0,56 m/s.   | D 0,74 m/s.   |
|               | E 0,53 m/s.   | E 0,64 m/s.   |
|               |               | F 0,55 m/s.   |

$$\bar{V} = 0'59 \text{ m/s}$$

$$V_{269} = 0'59 \text{ m/s}$$

$$V_{100} = 0'59 \text{ m/s}$$

PERFIL 23 (13)

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| 1 A 0,91 m/s. | 2 A 0,92 m/s. | 3 A 0,93 m/s. |
| B 0,81 m/s.   | B 0,88 m/s.   | B 0,86 m/s.   |
| C 0,70 m/s.   | C 0,78 m/s.   | C 0,75 m/s.   |
| D 0,64 m/s.   | D 0,67 m/s.   | D 0,62 m/s.   |
|               | E 0,64 m/s.   |               |

$$\bar{V} = 0'78 \text{ m/s}$$

$$V_{265} = 0'74 \text{ m/s}$$

$$V_{100} = 0'69 \text{ m/s}$$

PERFIL 1 (17)

- |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 A 0,82 m/s. | 2 A 1,25 m/s. | 3 A 1,16 m/s. | 4 A 1,07 m/s. |
| B 0,81 m/s.   | B 1,10 m/s.   | B 1,12 m/s.   | B 1,06 m/s.   |
| C 0,76 m/s.   | C 0,91 m/s.   | C 0,96 m/s.   | C 1,00 m/s.   |
| D 0,70 m/s.   | D 0,90 m/s.   | D 0,70 m/s.   | D 0,75 m/s.   |
| E 0,55 m/s.   |               |               |               |

$$\bar{V} = 0'92 \text{ m/s}$$

$$V_{265} = 0'87 \text{ m/s}$$

$$V_{100} = 0'80 \text{ m/s}$$

PERFIL 5 (23)

- |               |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 A 0,64 m/s. | 2 A 0,81 m/s. | 3 A 0,85 m/s. | 4 A 0,85 m/s. | 5 A 0,81 m/s. |
| B 0,59 m/s.   | B 0,81 m/s.   | B 0,83 m/s.   | B 0,81 m/s.   | B 0,80 m/s.   |
| C 0,52 m/s.   | C 0,71 m/s.   | C 0,76 m/s.   | C 0,77 m/s.   | C 0,72 m/s.   |
|               | D 0,56 m/s.   | D 0,63 m/s.   | D 0,70 m/s.   | D 0,64 m/s.   |
|               | E 0,53 m/s.   | E 0,51 m/s.   | E 0,48 m/s.   | E 0,52 m/s.   |

$$\bar{V} = 0'69 \text{ m/s}$$

$$V_{265} = 0'66 \text{ m/s}$$

$$V_{100} = 0'62 \text{ m/s}$$

PERFIL 24 (17)

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| 1 A 0,96 m/s. | 2 A 0,91 m/s. | 3 A 0,93 m/s. |
| B 0,89 m/s.   | B 0,91 m/s.   | B 0,87 m/s.   |
| C 0,81 m/s.   | C 0,76 m/s.   | C 0,83 m/s.   |
| D 0,76 m/s.   | D 0,70 m/s.   | D 0,65 m/s.   |
| E 0,65 m/s.   | E 0,64 m/s.   | E 0,52 m/s.   |
| F 0,62 m/s.   | F 0,65 m/s.   |               |

$$\bar{V} = 0'77 \text{ m/s}$$

$$V_{265} = 0'73 \text{ m/s}$$

$$V_{100} = 0'69 \text{ m/s}$$

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y FONDOS DOCUMENTALES

1. BAZIN, H y DARCY, H. *Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Deuxième partie. Recherches expérimentales relatives au remous et à la propagation des ondes*. Paris, Imprimerie impériale, 1865.
2. DUBUAT, L.G. *Principes d'hydraulique et de pyrodynamique vérifiés par un grand nombre d'expériences faites par ordre du gouvernement*. Paris : Firmin Didot, 1, n. éd. 1816.
3. EYTELWEIN, J.A. *Handbuch der Mechanik fester Körper und der Hydraulic*. Berlín: F. T. Lagarde, 1801. Recuperado de:  
[https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10059830\\_00005.html](https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10059830_00005.html)
4. FRANCOEUR, L.B. *Tratado de mecánica elemental para los discípulos de la Escuela Politécnica de París según los métodos de R. Prony*. 1803 [Leather Bound]. ASIN : B09DYYBMR1. Editorial: Generic (1 enero 2021). 421 p.
5. FRANQUET, J.M. *Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas (Una aproximación de los métodos estadísticos)*. Ed. Bibliográfica Internacional, S.L. – Universitat Internacional de Catalunya (UIC). Tortosa, 2005. 590 p.
6. FRANQUET, J.M. *El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro*. Ed.: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Tortosa, 2009. 344 p.
7. HAGEN, G. *Untersuchungen über die gleichförmige Bewegung des Wassers*. Berlin, 1876.
8. HARDER, P.E. *Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Kanälen*. Hamburg: Otto Meisner, 1878. Recuperado de:  
<https://books.google.es/books?id=urWimBGQ0V0C&pg=PP5&dq=HARDER,+P.+E.+Theorie+der+Bewegung+des+Wassers+in+Fl%C3%BCssen+und+Kan%C3%A4len>.
9. STORMER, H.L. *Nobel lecture: the fractional quantum Hall effect* (enlace roto disponible en Internet Archive; véase el historial, la primera versión y la última). *Review of Modern Physics*, 71, 4, 1999, 875-889 (en inglés).
10. TORRES, J.E. *Apuntes de hidráulica general y agrícola. Primera y Segunda Parte*. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Valencia, 1970.



## RELACIÓN DE FIGURAS

Fig. 1. Representación gráfica de la función  $n(V_s)$ .

Fig. 2. Planta de las secciones estudiadas.

## RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Profundidades de lectura según el tirante.

Tabla 2. Velocidades próximas al fondo (m/s).