UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS HIDRAULICAS

IREN

H I D R O M E T R I A

Aforos Mediante el Método de Dilución.

PHILIPPE BOIS

1 9 6 9

P R O L O G O

Este trabajo constituye una adaptación de "Hydrometrie Practique des Cours d'Eau" de H. André, Jefe del Servicio Hidrométrico de Electricité de France. Tuve oportunidad de colaborar con él en la enseñanza de estos métodos en la Escuela Nacional Superior de Hidráulica, pudiendo admirar su acuciosidad y capacidad de trabajo. Me parece, pues, conveniente transmitir esta experiencia a los interesados en el desarrollo de los métodos de dilución.

He completado el trabajo con algunas notas relativas al uso actual de la reconcentración y al porvenir del método.

Espero que este informe sea de utilidad a investigadores e ingenieros que tienen relación a la determinación de los recursos de agua.

Aprovecho la oportunidad para agradecer al señor Eduardo Varas C., la participación en este trabajo.

PHILIPPE BOIS

Santiago de Chile, Julio de 1969.

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

No se pretende en esta introducción demostrar la importancia de una buena red hidrometeorológica para la economía de un país, sobre todo cuando existe escasez de agua. Basta decir que actualmente esta preocupación se trata a nivel internacional en los planes del Decenio Hidrológico Internacional.

La labor más interesante de un servicio hidrométrico es dar, en función del tiempo, la variación del gasto de un río en algunas estaciones de su curso. Parece extraño, pero no existe todavía ningún aparato capáz de medir directamente el gasto de un río en un punto cualquiera de su curso. El método clásico es medir y registrar las variaciones del nivel del agua y determinar por algunas mediciones las leyes altura-gasto en estaciones privilegiadas.

Mientras no se encuentre un método más racional, tendremos que seguir con los métodos clásicos, es decir aforos con molinetes y aforos por dilución.

Este informe tiene por objeto dar una breve in-

formación del método de dilución y presentar los resultados y tendencias actuales.

Historia del Método:

En 1863 Sainte Claire Deville presentó un artículo a la Academia de Ciencias de Francia, titulado "Nuevo método para medir los gastos". Entre esta fecha y 1950, se hicieron algunos ensayos en Inglaterra, Holanda y Francia, pero solamente a partir de 1950 con las investigaciones de Dumas y Dodero en Grenoble, el método de aforo químico por dilución empezó a ser un método industrial. Electricité de France realiza actualmente cerca de 1.500 aforos por dilución al año. Además, según nuestros antecedentes, se está desarrollando en Suiza, Canadá, Africa y empezando en Brasil. ENDESA lo ha utilizado varias veces como método complementario del método por molinete.

C A P I T U L O I I

PRINCIPIOS DEL METODO

Generalidades

Se inyecta en el río una solución concentrada de una sal y se mide en que proporción esta solución se diluye en el río. Esa dilución es una función del gasto y bajo ciertas condiciones, existe una relación lineal, entre el gasto Q del río y el cuociente de las concentraciones, C_1/C_2, siendo C_1 la concentración inyectada y C_2 la concentración de las muestras tomadas río abajo del punto de inyección.

$$Q = k \left(\frac{C_1}{C_2} \right)$$

k: depende del procedimiento y del aparato.

Tenemos que insistir que cualquiera que sea el procedimiento utilizado, en ningún caso, se hace una medición de concentración, medición delicada y poco exacta cuando se trata de concentraciones débiles, sino una medición de un cuociente de concentración, medición mucho más exacta.

Para estar más preciso, se utilizan ge-

neralmente dos métodos:

1.- el procedimiento "por integración": se hace una inyección rápida de la sal y se toman muestras durante todo el pasaje de la nube salina, río abajo.

2.- el procedimiento " de inyección constante": se hace una inyección con concentración C_1 constante y se toman algunas muestras río abajo.

Además, cada uno de estos procedimientos puede utilizar el procedimiento de concentrar la sal a fin de ahorrar la cantidad de sal inyectada.

II.1 .- Procedimiento por integracion.

Se inyecta en una sección S_1 un volumen V conocido de una sal de concentración C_1; esa concentración es alta, no se conoce exáctamente, pero se requiere tener una muestra de ella para el desarrollo posterior en el laboratorio.

En una sección S_2, río abajo, bastante alejada, para contar con una buena mezcla, se toman muestras del agua durante todo el pasaje de la nube de sal.

II.1.1 Aspecto matemático (Fig. 1)

Sea dS una superficie elemental de S en A donde escurre un gasto dQ. Si T_A es el tiempo de pasaje de la nube en A, y $C_2(t)$ la concentración en el instante t en este elemento de superficie, la masa de sal que atraviesa dS durante T_A es:

$$(1) \qquad m = \int_o^{T_A} dQ \cdot C_2 dt = dQ \int_o^{T_A} C_2 dt$$

si el régimen es permanente.

si T es el tiempo máximo de pasaje de la nube en todos los puntos de S, la masa que atraviesa la sección S es:

$$(2) \qquad M = \iint_S \int_o^T dQ\, C_2 dt$$

Se encuentra que $\int_o^T C_2 dt$ es independiente de la posición del elemento dS si se cumple la condición de <u>mezcla homogénea</u>

Por lo tanto, (2) se escribe:

$$M = \int_o^T C_2 dt \cdot \int_S dQ = Q \int_o^T C_2 dt$$

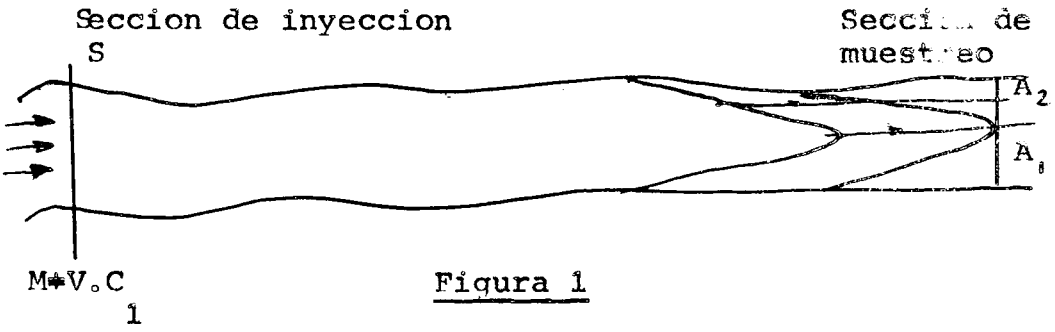


Figura 1

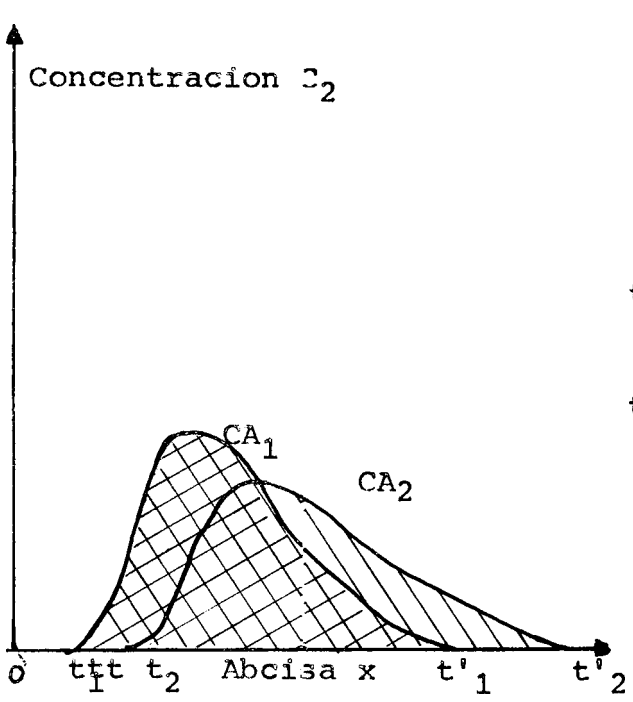


Figura 1 ter

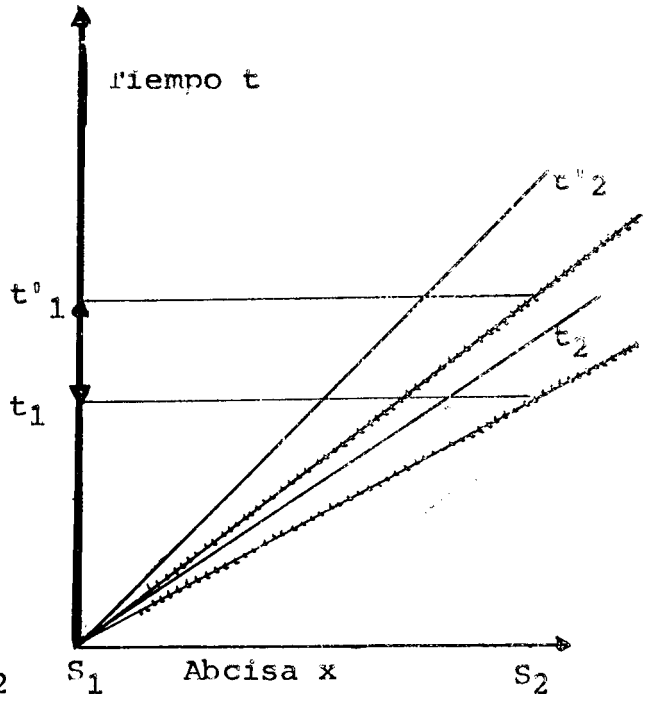


Figura 1 bis

Figuras 1; Procedimiento por integracion. Propagacion de una inyeccion instantanea.

Pero $M = VC_1$ si no hay entradas ni pérdidas de sal entre el punto de inyección y el punto de muestreo.

$$M = VC_1 = Q\int_0^T C_2 dt \qquad \text{sea:}$$

$$Q = \frac{VC_1}{\int_0^T C_2 dt} \qquad (3)$$

Entonces, sea C_2 la concentración promedio de una muestra global obtenida al tomar muestras en la sección dS durante T_A , la ec. 3 se escribe:

$$\boxed{Q = \frac{VC_1}{C_2 T_A}} \qquad (4)$$

Se ve entonces, que es factible tomar una muestra de C_2, compararla con C_1, para poder así calcular el gasto Q.

Condiciones:

1.- Régimen permanente del río durante la inyección: (10 minutos si $Q \simeq 10 m^3/s$ o 2 - 3 horas si $Q > 500\ m^3/s$).

2.- Conservación de la sal

3.- $\int_0^{T_A} C_2 dt = \text{constante}$

Esta última condición significa que la masa por unidad de gasto que pasa por un punto es independiente de la posición. (Condición de mezcla homogénea). En otras palabras, la masa que pasa por una sección elemental es únicamente función de la velocidad del agua que la atraviesa.

II.1.2 Aspecto físico (Fig. 1, 1', 1")

Vamos a suponer que la inyección en S_1 se hace de manera instantánea. La nube salina va a tener un aspecto como se indica en la figura 1. En A_1, punto de mayor velocidad, la sal aparece en el tiempo t_1, en A_2 aparece en $t_2 > t_1$, y desaparece en t'_1 y t'_2 respectivamente en A_1 y A_2. El intervalo $t'_2 - t_2$, tiempo de pasaje en A_2 es mayor que $t'_1 - t_1$ ya que la velocidad es menor.

La figura 1" da una idea de la variación, en función del tiempo de la concentración C_2 en A_1 y A_2. La condición de "mezcla homogénea" se realiza si las dos áreas delimitadas por CA_1 y CA_2 son iguales, es decir, si la masa de sal que pasa por una sección es únicamente función de la velocidad en este punto.

II.2 .- Procedimiento por inyección constante. (Fig. 2)

Este procedimiento fue el que se desarrolló pri-

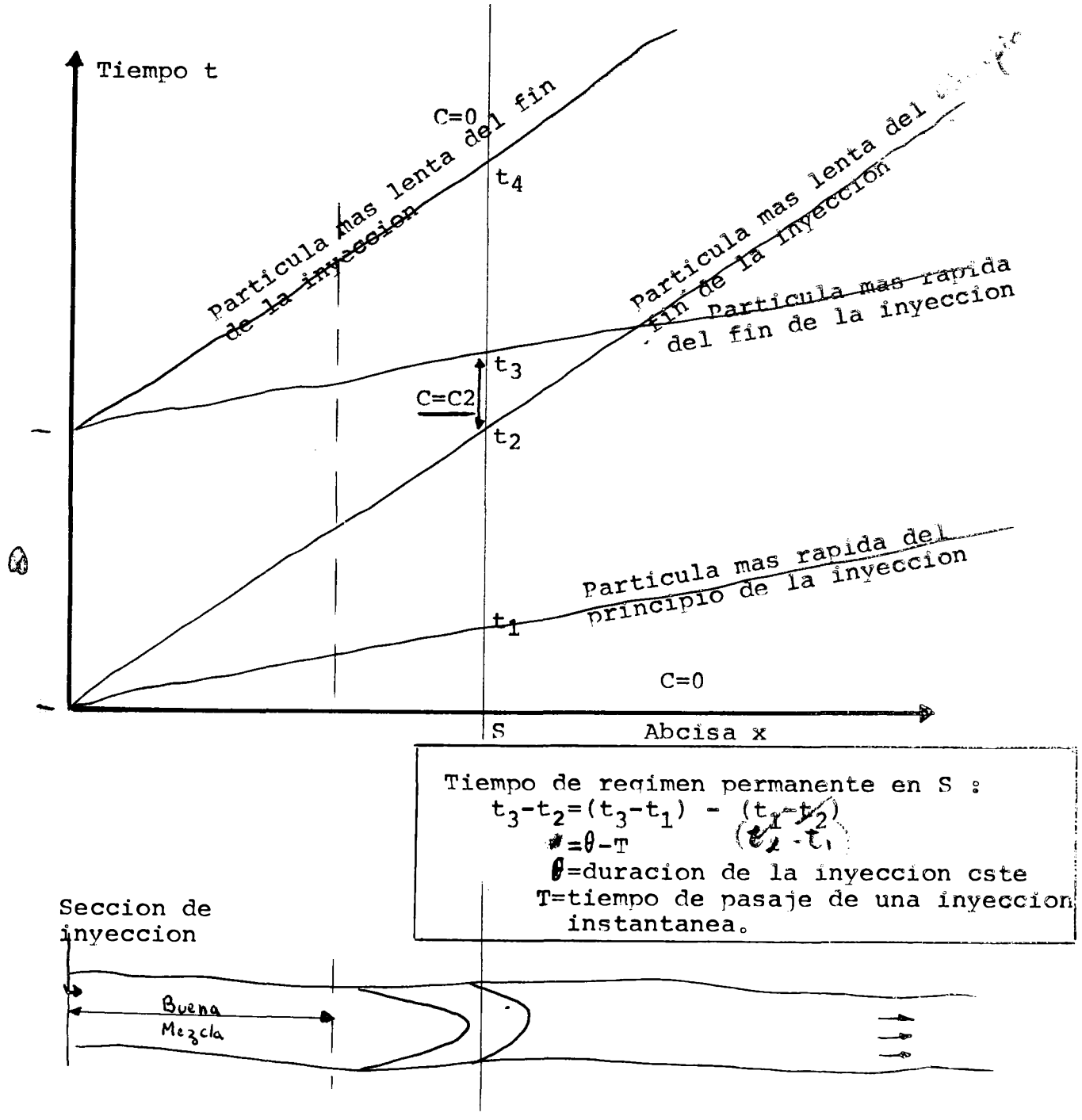


Figura 2: Inyeccion constante. Regimen permanente.

merc y sigue siendo muy usado por su seguridad de empleo.

Se inyecta en S_1 una solución de sal con una concentración C_1 de la cual tenemos una muestra "testigo". Esta inyección se hace con un gasto q constante y conocido (calibrado en el laboratorio), durante un tiempo suficiente para que la concentración en cualquier punto de S_2 sea homogénea y constante, durante 10 o 15 minutos.

Eso supone:

- régimen permanente
- conservación de la sal
- homogeneidad de la mezcla.

Sea Q el gasto del río. Si existe un régimen permanente y si no hay ninguna sal natural en el río:

$qC_1 = (Q + q) \; C_2$: la masa de sal que pasa en la unidad de tiempo en S_1 es la misma que en S_2. Como $\frac{q}{Q} \simeq 0$ (en general $< 10^{-4}$) se puede escribir:

$$\boxed{Q = q \frac{C_1}{C_2}} \qquad (1)$$

II.2.1 Aspecto matemático

J. Fleuré* demostró lo siguiente:

Si ϑ , duración de la inyección constante es mayor que el tiempo T_A de pasaje de una inyección instantánea en S_2, existe en A un período de concentración constante $C_2 = c - \frac{C_1}{Q}$ de duración $\theta - T_A$.

En otras palabras, si T es el tiempo total de pasaje de la nube salina en S_2 de una inyección instantánea y si la inyección constante tiene una duración $\theta > T$, existe en todos los puntos de S_2 una concentración constante durante un tiempo $\theta - T$.

II.2.2 Aspecto físico

En la figura 2, dibujamos 4 curvas (casi rectas):

S_1t_1: indica el tiempo de llegada según la abscisa x de la partícula más rápida del principio de la inyección.

S_1t_2: tiempo de llegada versus x de la partida más lenta del principio de la inyección.

θt_2: curva deducida de S_1t_1 después de una trag

* Ingeniero del servicio hidrométrico de EdF.
H. Dumas- Houille Blanche 1952 y 1953.

lación de amplitud ϑ según el eje del tiempo; es la curva representativa del tiempo de llegada de la partícula más rápida del fin de la inyección.

t_4: curva deducida de St_2 después de una traslación de amplitud ρ según el eje del tiempo. Representa el tiempo de llegada de la partícula más lenta de toda la inyección .

En general, estas curvas son prácticamente líneas rectas.

Sea un observador $\overset{en}{S}$, siendo S_1 S mayor que la longitud de mezcla; sea t = 0 el principio de la inyección constante.

- desde t = 0 hasta t = t_1 ninguna partícula pasa por S. C = 0, siendo C la concentración en un punto de S.

- desde t = t_1 hasta t = t_2, las partículas más rápidas de la inyección llegan; pero no ha llegado todavía la partícula más lenta del principio de la inyección, por eso la concentración aumenta: $C = C_2 \cdot F(t)$.

- desde t = t_2 hasta t = t_3 pasa la partícula más lenta del principio de la inyección pero no ha llegado todavía la más rápida del fin de la inyección.

Es decir hay igualdad de número de partículas que llegan. $C = C_2$, hay un tramo de concentración constante.

- desde $t = t_3$ hasta $t = t_4$, la concentración disminuye porque las partículas más rápidas ya han pasado.

$$C = C_2 \cdot \left[1 - F\ (t - \theta\ )\right]$$

- $t > t_4$ $\qquad C = 0$

Como las curvas son deducidas por traslación:

$\theta = t_3 - t_1$. Además $T = t_2 - t_1$ es el tiempo de pasaje de una nube salina de una inyección instantánea(ó de un colorante).

Por lo tanto, el resultado más importante es el siguiente:

> La duración del tramo de concentración constante es igual a la diferencia entre la duración de inyección y la duración del pasaje de la nube del trazador correspondiente a una inyección instantánea.

Otro resultado interesante:

"El régimen de concentración constante empieza cuando desaparece la nube del trazador".

C A P I T U L O I I I

MATERIAL NECESARIO

III.1 Procedimiento por inyección constante

III.1.1 Transporte. Embalaje

a) Colorante.

El colorante más usado es la fluoresceine (C_{20} H_{12} O_5); pero se puede utilizar la Rhodamine, el azul de Metilene...

Esos productos son en general muy tóxicos, por lo cual el embalse tiene importancia.

- Uso de colorante en polvo o cristales: Se pueden preparar bolsitas del producto, conteniendo cada bolsita "una unidad", es decir, masa suficiente para un gasto de 1 m^3/s. Por ejemplo, 20g de fluoresceine en los ríos de Europa. Conviene poner cada bolsita en otra bolsita de seguridad que sirve después para preparar la solución. Se preparan también bolsitas de diez y cien unidades. La fluoresceine tiene un poder de coloración de 20g / 1000 m^3 en aguas no turbias.

- Uso de colorante líquico: Conviene, cuando los

gastos son menores que 50 m^3/s preparar frascos plásticos de solución de trazador, asegurándose de la estanqueidad.

b) Trazador.

Es muy conveniente usar el trazador en forma líquida, 0,5 l, 1 l, 5 l. Se usa así para medir gastos hasta 10 m^3/s. Sin embargo, el transporte en forma sólida ahorra peso.

III.1.2 Material de inyección constante (Fig. 4)

- Vaso a nivel constante (Fig. 4) : Este aparato permite hacer inyecciones constantes de 10 a 100 cm^3/s. Está hecho de tal manera que incluye todo lo necesario para la práctica en el terreno y puede ser transportado como una mochila. Su funcionamiento debido a su simplicidad es seguro y su precisión bastante buena ($\pm$ 0,5%).

Su principio es mantener una carga constante sobre un diafragma calibrado.

III.1.3 Material de muestreo.

Está constituído por una docena de frascos de 100 cm^3. EdF utiliza actualmente frascos de plástico que se usan una vez solamente y luego se botan; así se impide cualquier error

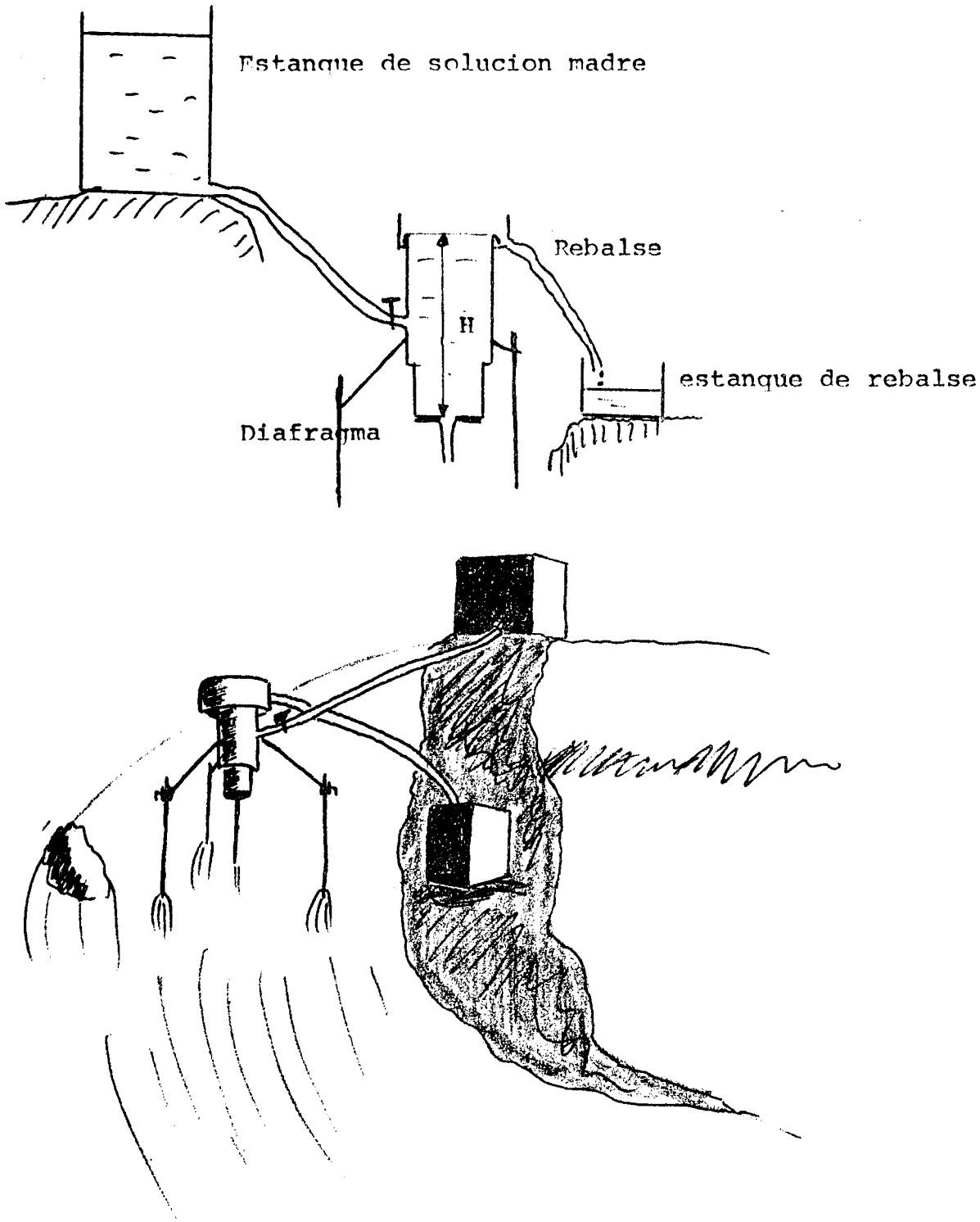


Figura 4 :Vaso a nivel constante.

por contaminación. Cada muestra se toma al hechar el frasco en el río con un cilindro metálico con dos partes móviles y una cuerda.

Peso del equipo para inyección constante:

- Estanque de 40 l en aluminio	4 kg
140 l en aluminio	12 kg
Vaso (según el tipo)	1,5-7 kg
2 vasos para llenar el estanque	2,5 kg
12 frascos en caja	1 kg
2 bidones de plástico	2 kg

O sea, se tiene un peso medio de 15 kg para medir gastos hasta de 5 m^3/s.

III.2 Material para el método de integración.

- Transporte-Embalaje. En este caso, es muy conveniente preparar diluciones de concentraciones iguales y de volúmenes tipos calibrados: 0,5 l, 1 l, 5 l, 10 l. Así el operador hecha una combinación de estos volúmenes tipos y no tiene que medir volúmenes en el terreno.

- Material de Inyección. Basta un estanque calibrado. Si se usan volúmenes tipos, no hay material de inyección.

- Material de Muestreo. EdF usa diferentes tipos, según el caso.

1) 2 cajas de 12 frascos de 100 cm^3
2) Una manguera y un filtro para tomar por gravedad, una muestra media en un estanque de 5 a 10 litros. Esto requiere un río con pendiente fuerte.
3) Una "micro-bomba" con una batería. La bomba de gasto constante toma también una muestra media.
4) Una bomba y un sistema muy sencillo para llenar cinco muestras simultaneamente.

Peso del material: 8 kg con la bomba y las baterías
3 kg si se trata de un muestreo por gravedad.

C A P I T U L O I V

UTILIZACION PRACTICA EN EL TERRENO

Elección del trazador.

- Trazadores minerales y orgánicos.

Condiciones:
- Muy solubles en agua
- estables
- escasos en las aguas fluviales
- baratos
- no tóxicos en solución
- fáciles de analizar a pesar de su débil concentración.

Se usa ahora bicromato de sodio ($Na\ Cr_2O_7 - H_2O$) y la rhodamine B ($C_{_0}H_{21}\ Cl\ O_2N_2$). Su valor, en cantidades importantes es aproximadamente 0,5 y 10 dollares el kg. respectivamente. La ventaja de la Rhodamine B es que su análisis se hace por fluorescencia lo que permite una concentración muy débil.

- Trazadores radioactivos.

Sería muy interesante usar radioisótopos de emisión γ, como Br 82 ó I 131 pero eso necesita autorizaciones ad

ministrativas, protecciones muy pesadas y una pila nuclear cerca del lugar de aforo.

La utilización de radioisótopos de emisión β resuelve estos problemas pero necesita un análisis muy delicado. Por eso no se usa todavía de una manera industrial.

IV.1 Elección de la sección de muestreo.

En general se hace un aforo para determinar la curva de descarga en una estación bien definida, lo cual limita la elección. Se puede, sin embargo, fijar algunas reglas generales:

1.- Longitud suficiente entre el punto de inyección y el punto de muestreo, para tener una mezcla homogénea. El ensayo del colorante da una idea al respecto y también H. Dutillet, encontró una fórmula verificada en ríos de montaña y de llanuras en Francia:

$$D = a\, l\, Q^{1/3} \qquad a \simeq 10$$

Q = gasto en m^3/s

l = ancho del río en m.

D es siempre un poco mayor que la longitud mínima de mezcla homogénea.

Lo mejor es elegir un lecho sinuoso y sin zonas de aguas muertas.

2.- Problemas de pérdidas y afluentes. Pérdidas y afluentes entre el lugar de inyección y el lugar de muestreo pueden influir de dos maneras:

- en la homogeneidad de la dilución
- en el valor del gasto medido.

Hay que considerar cada caso; en general, salvo en ríos karsticos o en regiones muy permeables, no representan un problema mayor.

Ensayo de coloración:

Se utiliza:
- para comprobar la buena homogeneidad de la mezcla
- para determinar el tiempo de llegada y el tiempo de pasaje de una inyección instantánea. (Hemos visto la importancia de esto).

Tenemos que añadir que resulta difícil medir el fin del pasaje de la coloración; por eso parece conveniente maximizar siempre este tiempo (por ej., tiempo observado + 50%).

IV.2 Preparación de la inyección.

IV.2.1 Inyección de gasto constante.

La figura 4 muestra un ejemplo de uso del vaso de nivel constante. Es muy recomendable inyectar la solución en un tramo de altas velocidades y, si es posible, en el medio del río.

Duración de la inyección.

Sea H_1 la hora de inyección del colorante, H_2 su llegada a la sección de muestreo, H_3 su desaparición. Si θ es el valor de la duración de la inyección, sabemos que existe un tramo de concentración C_2 constante igual a:

$$\text{Duración régimen permanente} = \theta - (H_3 - H_2)$$

Pero tenemos que tomar un número suficiente de muestras para comprobar: - la buena homogeneidad de la mezcla en el río.

- la existencia del regimen permanente.

Para eso, se tomará una muestra cada minuto en el

orden siguiente (por ejemplo): ribera derecha, centro, ribera izquierda, centro, ribera derecha... Por lo tanto, se elegirá una duración de inyección:

$$\theta \geq (H_3 - H_2) + 15 \text{ minutos}$$

Volumen del estanque de carga. Gasto de inyección. Peso de sal

(Tabla 1)

Conocemos ahora la duración de la inyección; se puede estimar el gasto del río sea al ojo, con flotadores o con otros antecedentes (basta conocer su orden de magnitud): sea Q.

Si se utiliza el bicromato de sodio, C_2 debe tener un valor entre 0,4 y 2 mg/l ó 0,01 a 0,4 mg/l si se hace después de una reconcentración.

Los elementos de la elección son los siguientes:

- la sal tiene una solubilidad de 500 g/l
- se dispone en el terreno de un estanque de carga de capacidad máxima conocida y de una serie de diafragmas.

Diafragma		Capacidad	Tiempo	Gasto estimado del río en m^3/s.				
mm	cm^3/s	en l.	en mn	0,1	0,5	1	10	50
				Peso de sal necesario				
3	14,5	20	23	0,2	1	2		
		40	46	0,4	2	4		
		100	115	1	5	10		
6	50	40	13	0,1	0,5	1	10	
		100	33	0,3	1,5	3	30	
		200	66	0,5	2,5	5	50	
10	144	100	11	0,1	0,5	1	10	50
		200	23	0,2	1	2	20	100
		400	46	0,4	2	4	40	200

TABLA 1: Peso de sal, volumen de inyección en función del gasto de inyección y del gasto estimado. (Ejemplo de un aparato de FdF).

Sabemos que:

$$C_2 = C_1 \frac{q}{Q} \qquad (1) \qquad\qquad \frac{C_2}{q} = \frac{C_1}{Q} \qquad (1)'$$

$$V = q\theta \qquad (2) \qquad\qquad \frac{V}{q} = \theta \qquad (2)'$$

Tenemos tres variables C_2, q, V y dos relaciones. Por lo tanto se establece una tabla de uso práctico en el terreno para cada aparato, dando a C_2 el valor 1 mg/l. Se elige así el peso de sal, q, V; la elección debe asegurar la existencia de un régimen permanente.

Ejemplo de uso de la tabla 4:

Q estimado : 1 m^3/s

$H_3 - H_2$: 10 minutos

por lo tanto $\theta \geq H_3 - H_2 + 15$ mn = 25 mn. Supongamos que el vaso que tenemos tiene una capacidad máxima de 40 l. Podemos tomar el diafragma de 3 mm y llenar el estanque de 40 litros con una cantidad de sal de 4 kg: la duración de la inyección va a ser de 46 mn, y C_2 = 1 mg/l si Q está bien estimado. Si la estimación de Q es dudosa se aumenta la cantidad de sal, porque siempre será más fácil diluir las muestras que reconcentrarlas.

- Algunas reglas de preparación

- Homogeneizar adecuadamente la solución "madre" del estanque vaciando y llenando una vez todo el aparato.

- El operador a cargo de la inyección toma una muestra de la solución madre, el otro se va al punto de muestreo y toma una muestra del agua del río (5 litros) antes del pasaje de la inyección.

Si la inyección empieza a la hora H, se toma la primera muestra a la hora $H_4 = H + (H_3 - H_1)$ y la última a la hora H_4 + 10 ó 15 mn. Una buena práctica es no hacer un ensayo previo de colocación, sino hechar al principio de la inyección un frasco de colorante y empezar el muestreo cuando desaparece completamente el colorante en la sección de muestreo.

IV.2.2 Procedimiento por integración.

La elección de la sección de medición y los ensayos previos son iguales a los del procedimiento por inyección constante. Sea $T = H_3 - H_2$ la duración del pasaje de una inyección instantánea; se determina el volumen $R = Q (T + T')$, volumen de agua del río que se va a llenar de sal; T' es la duración de la inyección.

Peso de sal: El peso de sal necesario para tener una concentración promedio C_2 es: $P = Q\,(T + T')\,.\,C_2$

Ejemplo: $Q = 5\ m^3/s$

$T = 10$ mn $= 600$ s.

$T' = 2$ mn $= 120$ s.

Si queremos $C_2 = 1$ mg/l $P = 3{,}6$ kg; por seguridad, conviene echar 5 kg. de sal.

Volumen de inyección: Sea C_1 la concentración de la solución madre, de volumen V. Por ser el resultado final:

$$Q = \frac{V}{T}\left(\frac{C_1}{C_2 \text{ media}}\right)$$

se requiere conocer con una muy buena precisión el volumen V.

Muestreo: Sabemos que lo importante es sacar muestras del mismo punto del río, ya que en distintos puntos no hay homogeneidad temporal ni espacial. Si el río es poco conocido, habría que tomar tres series de muestras en tres puntos del río para comprobar la condición de buena mezcla, es decir:

$$\int_0^T C_2\,(t)\,dq = \text{cste}$$

Se utilizan diversos procedimientos de muestreo:

1.- Muestreo en un punto durante un tiempo mayor que la duración del pasaje de la nube salina, con un intervalo constante de

tiempo bien definido aproximadamente igual a $\frac{T}{25}$ con el fin de poder sacar 25 muestras. La ventaja de este procedimiento es su simplicidad y la ligereza del material (menos de 3 kg).

Sin embargo su dificultad reside en el hecho que hay que tomar las muestras en la misma sección elemental.

2.- Realización de una muestra media: se toman a intervalos de tiempos iguales volúmenes iguales. Se consigue así directamente una muestra media.

3.- Realización de una muestra por muestreo a gasto constante. Eso se realiza con una bomba portátil ó una manguera si la pendiente del río lo permite.

4.- Procedimiento actual: La idea es la siguiente: no se conoce exáctamente la duración de pasaje de la nube sino su orden de magnitud; y los procedimientos 2 y 3 no permiten comprobar en el laboratorio que la nube salina pasó completamente durante el muestreo.

Sea H_2 y H_3 las horas de llegada y de desaparición de la nube salina en la sección de muestreo. Se toman cinco muestras de gasto constante en el mismo punto. Los muestreos empiezan simultáneamente a la hora $H_3 - \mathcal{E}$ pero se terminan:

Método de G. Mazeran

el primero	a	$H_2 + 0,75\ (H_3 - H_2)$
el segundo	a	$H_2 + 0,9\ (H_3 - H_2)$
el tercero		H_3
el cuarto		$H_3 + 0,1\ (H_3 - H_2)$
el quinto		$H_3 + 0,3\ (H_3 - H_2)$

La realización práctica es muy sencilla: una bomba lleva el agua del río a un vaso a nivel constante con cinco salidas (el conjunto utilizado por EdF pesa menos de 3 kg). Se llevan así cinco frascos. Veremos más adelante la utilidad de estas cinco muestras.

Observación: Se comprobó en el terreno que 80 a 94% de la sal pasa en $\frac{T}{2}$ y 97 a 99% en $\frac{3T}{4}$, siendo T la duración de pasaje de la nube; por lo tanto, hay que equivocarse de orden de magnitud para cometer un error apreciable en la determinación del gasto.

C A P I T U L O V

ANALISIS EN EL LABORATORIO

Se supone en este capítulo que la sal utilizada es el bicromato de sodio.

Definiciones: - concentración: masa de un producto por unidad de volumen de la solución (la exprimaremos en mg/l)
- dilución: es el cuociente de las concentraciones antes y después de cierto procedimiento. No tiene dimensión.
- concentración relativa: inverso de la dilución.

Principio del análisis: El punto importante del método es que en ningún caso se mide una concentración sino que se comparan concentraciones. Por eso la precisión es buena.

El objeto del análisis es comparar la dilución que hizo el río con la solución "madre" con diluciones conocidas de esa misma solución madre realizadas en el laboratorio. En pocas palabras, es comparar:

$$\frac{C_1}{C_2} \quad \text{con} \quad \frac{C_1}{C_{2,1}}, \quad \frac{C_1}{C_{2,2}}, \quad \frac{C_1}{C_{2,3}}, \quad \ldots$$

siendo esas últimas fracciones conocidas.

V.1 Aspecto Químico

- Reactivo del cromo. Su objeto es aumentar la coloración de soluciones pobres de cromo. El reactivo actualmente usado es el siguiente:

0,125 g. de difenylcarbazide : $(C_6 H_5)_2 CO (NH)_4$

50 cm^3 de acetona pura.

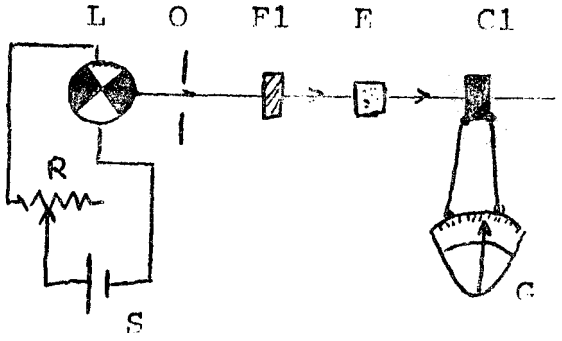
Ese reactivo es estable hasta una semana en frascos obscuros. De vez en cuando, se producen algunas dificultades debido a la pureza de la acetona; se utiliza ahora la acetona Merck's tipo electrónica, extremadamente pura.

V.2 Colorímetros. (Fig. 3)

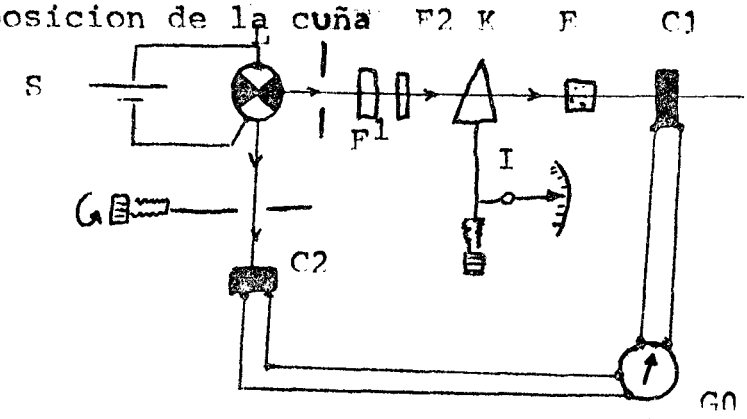
El colorímetro debe comparar las muestras del río con muestras de diluciones de la solución madre realizadas en el laboratorio, por lo tanto, no se medirán soluciones débiles directamente. El colorímetro tiene que ser:

- sensible
- estable durante los 20 minutos del desarrollo.
- fiel

S :Fuente de luz estabilisada.
R : Reostato.
L : Ampollita.
O : Dispositivo optico
F1 :Filtro verde
F2 :Filtro anticalorico
K : Cuña logaritmica de vidrio neutro
E :Muestra
C1:Celula fotoelectrica
C2:Celula de comparacion
G :Galvanometro
D :Diafragmo de comparacion
G0:Galvanometro de cero
I :Indicador de posicion de la cuña



Colorimetro 1



Colorimetro 2

Fig 3 : Esquemas de los colorimetros.

Por eso EdF hizo construir un tipo de colorímetro sencillo, liviano, sólido con posibilidad de uso en el terreno.

Vamos a describirlo con la ayuda del esquema 2 de la figura 3.

Una batería o una corriente de 6 volts permite crear dos haces de una misma luz:

- un haz pasa por un diafragma de compensación y alimenta una célula fotoeléctrica C_2.
- el segundo haz pasa por un dispositivo óptico de concentración, un filtro verde (color complementario del rojo-morado del cromo) un filtro anticalórico, un prisma logarítmico de vidrio neutro con su botón de reglaje, la muestra en un paralelepípedo de vidrio y una célula fotoeléctrica C_1.

Para cada muestra se regula la posición del prisma logarítmico U de tal manera que el galvanómetro G, alimentado en posición por las células C_1 y C_2 no recibe ninguna corriente. Como el prisma logarítmico tiene un indicador de posición I, podemos relacionar la coloración de cada muestra con la posición de I y comparar así coloraciones.

Cuesta cerca de 600 dólares

Longitud de onda 540 mμ

Ventajas de este aparato:

- sencillo y robusto
- indiferente a variaciones pequeñas de luz (porque van a igualarse en C_1 y C_2)
- el diafragma de compensación permite elegir la sensibilidad según la densidad de coloración.
- el prisma está hecho de tal manera que en el orden de concentración de 1 mg/l con el reactivo ya descrito, la respuesta de I sea función lineal de la densidad.

V.3 Procedimiento del Análisis.

V.3.1 Inyección constante.

Principio: hay que comparar las diferentes contracciones C_2 de las muestras del río tomadas durante el régimen permanente con algunas diluciones de la solución madre con agua del río antes del pasaje de la nube. Estas últimas diluciones de hacen en el laboratorio, salvo en caso de reducción importante del bicromato.

Elección de las diluciones. Sabemos que $\frac{C_1}{C_2} = \frac{q}{Q}$ y conocemos solamente el orden de magnitud de Q; como tenemos que preparar soluciones de concentración similares a las de las muestras del río, se

preparan por lo menos tres diluciones de la solución madre, cuando la curva del colorímetro I = f (C) es una recta, en otro caso 4 o 5 diluciones. El rango de desviación de estas diluciones depende del procedimiento usado para evaluar el gasto Q.

Ejemplo: $q = 20\ m^3/s$

$Q_{previsto}$ $10\ m^3/s$. Por lo tanto, concentración relativa esperada $\frac{q}{Q} = \frac{20}{10} \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-6}$

1.- Q ha sido revaluado a partir de una curva de descarga (aforo de comprobación). Se pueden elegir por ejemplo, tres diluciones: $1{,}5 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ correspondientes a un error de 50% sobre la evaluación del gasto.

2.- Q evaluado al ojo por un operador poco acostumbrado. Lo más conveniente sería preparar 6 diluciones entre $0{,}5$ y $5 \cdot 10^{-6}$ correspondientes a un error de estimación de 1 a diez.

Esas diluciones se preparan con vasos calibrados y pipetas. Hay que respetar siempre algunas reglas:

- Tener dos series de vasos: una para las concentraciones fuertes, otra para las concentraciones débiles. Eso sirve para impedir cualquier contaminación.

- Agitar bien (muy importante en la práctica) cada vez que se hace una nueva dilución.
- Distinguir claramente las diluciones.

Uso de "microburetas" : Una microbureta es un aparato tipo jeringa que permite entregar volúmenes muy pequeños (a partir de 10 mm^3) con una muy buena precisión, lo que simplifica todo el procedimiento de las diluciones, permitiendo efectuarlas en el terreno.

Caso de aguas turbias: Por regla general, mientras más turbias son las aguas, más pronto conviene hacer el análisis en el terreno.

1.- Materiales duros y gruesos. Basta en muchos casos hacer una decantación; lo mejor es preparar las diluciones de la solución madre con el agua turbia del río y realizar a continuación todas las decantaciones.

2.- Decantación fácil pero materiales arcillosos. Puede ocurrir que el bicromato de sodio desaparezca por reacción química. En este caso, bastante delicado, parece conveniente hacer las diluciones en el terreno y hacer decantar todas las muestras en condiciones idénticas. En Suiza se usa una filtración por

el vacío con membranas cuyos poros tienen un diámetro de 600 mμ. También se puede oxidar y concentrar.

3.- Decantación imposible. Se puede usar: filtración, centrifugación, o diluir de diez a cien veces las muestras en agua pura y reconcentrar después.

Introducción del reactivo - Análisis colorimétrico.

Es una operación sencilla y segura si está hecha con un orden perfecto; de ella depende en gran parte el éxito del aforo.

1.- Encender el colorímetro mucho antes de la operación a fin de conseguir el equilibrio térmico.

2.- Preparar todas las diluciones y las muestras. Echar 20 cm^3 de cada una en vasos muy limpios.

3.- Agregar ácido sulfúrico no reductor a todas las muestras para que el p_H esté entre 2 y 3. Se puede conseguir esto con 2 gotas de H_2SO_4 de 64°B por 20 cm^3 de cada muestra. Esta operación se realiza en el orden siguiente:

- agua pura del río
- dilución Nº 1 (menos concentrada)
- dilución Nº 2

Muestra Nº 1 del río

Muestra Nº 2 del río

4.- Luego, echar 1 cm^3 de reactivo en cada una de las muestras en el mismo orden, con un intervalo de tiempo de 30 a 60 segundos. Agitar cada vaso.

5.- Regular el colorímetro.

6.- Enjuagar la cubeta del colorímetro con la primera muestra (agua del río + ácido + reactivo) y llenarla con esta muestra. Leer la indicación del colorímetro, sacar la muestra y regular de nuevo el colorímetro. Esto sirve para conseguir una cierta accmodación del colorímetro.

Hacer lo mismo con la dilución Nº 1.

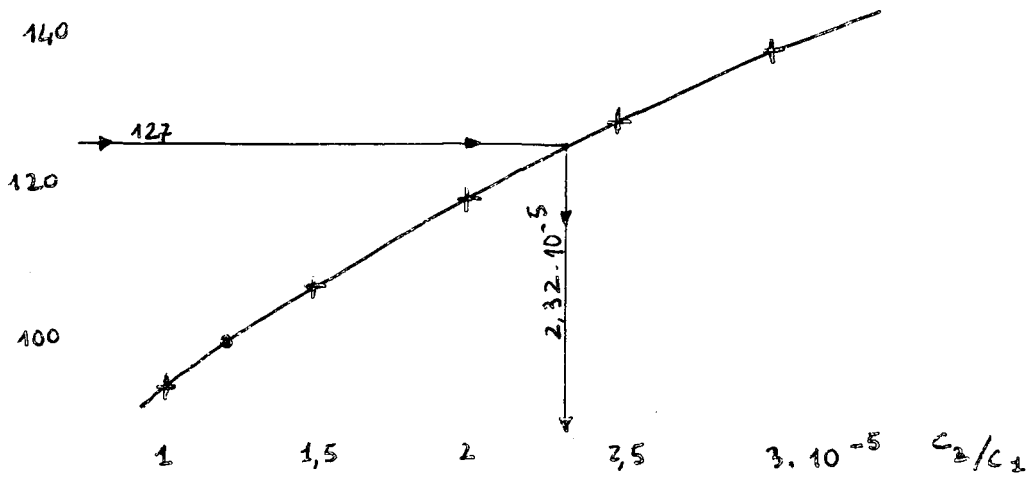
Observación: La evolución del color de complejo Cr^{+6} reactivo es progresiva y llega a su coloración máxima con una diferencia menor de 1% en densidad óptica, solamente 5 minutos después de la introducción del reactivo.

Por eso, es muy importante respetar un tiempo constante no menor de 5 minutos entre la introducción del reactivo la medida en el colorímetro.

Utilización de los resultados del colorímetro.

Luego, se dibuja en un papel milimetrado los puntos representativos de las diluciones de la solución madre (abscisa, concentración relativa y ordenada, lectura del colorímetro

$L = f (C_2/C_1)$

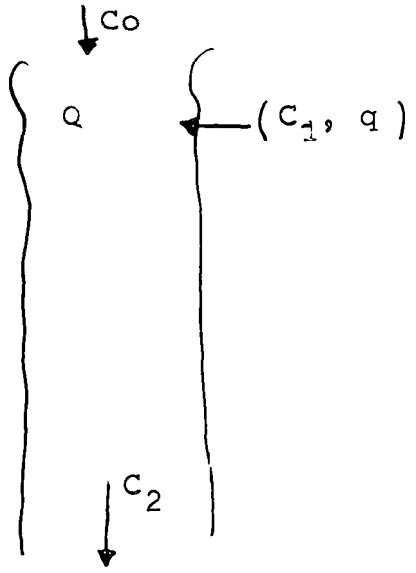


Se determina, gracias a los resultados del colorímetro las muestras del río correspondientes al tramo de régimen permanente y se calcula el valor promedio de esas lecturas, lo que permite conocer a partir de la curva de respuesta del colorímetro la concentración relativa C_2/C_1 de las muestras del río. Se deduce así el gasto del río:

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}$$

Notas: Caso de existencia previa de bicromato en el río.

- si la concentración del bicromato en el río es constante e importante, el aforo es válido pero pierde mucha precición.



$$QCo + qC_1 = (Q + q)\,C_2$$

$$Q\,\frac{Co}{C_2} + q\,\frac{C_1}{C_2} \simeq Q \qquad \text{sea}$$

$$Q = q\,\frac{\frac{C_1}{C_2}}{1-\frac{Co}{C_2}} \;;\; \frac{Co}{C_2} \text{ puede}$$

ser conocido por el examen de la muestra N° 1.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right) \text{ caso sin bicromato } + \frac{\Delta\left(\frac{Co}{C_2}\right)}{1-\frac{Co}{C_2}}$$

si $\frac{Co}{C_2} = 0{,}5$ el error puede duplicar.

- si la concentración en bicromato del río no es constante e importante, el aforo fracasa.

Se admite una desviación de $\pm$ 1% entre los valo

res de las muestras en el régimen permanente lo que significa un error de estimación mucho menor en el promedio. Se comprueba así la homogeneidad en el tiempo y en la sección de la mancha salina.

V.3.2 Análisis del aforo por integración.

El procedimiento de desarrollo químico es siempre igual. Vimos que hay diversas maneras de practicar el aforo en el terreno:

1.- Si se tomó una o algunas muestras medias durante T, mayor que la duración de pasaje de la nube de bicromato. La fórmula es la siguiente:

$$VC_2 = QTC_2 \quad \text{ó} \quad Q = \frac{V}{T}\,\frac{C_2}{C_2}$$

si V es el volumen de la inyección. El análisis consiste en determinar $\frac{C_2}{C_2}$ cuya aproximación para preparar las diluciones $\frac{Q \times T}{V}$

2.- Si se han tomado muestras medias con duraciones diferentes a partir del mismo instante.

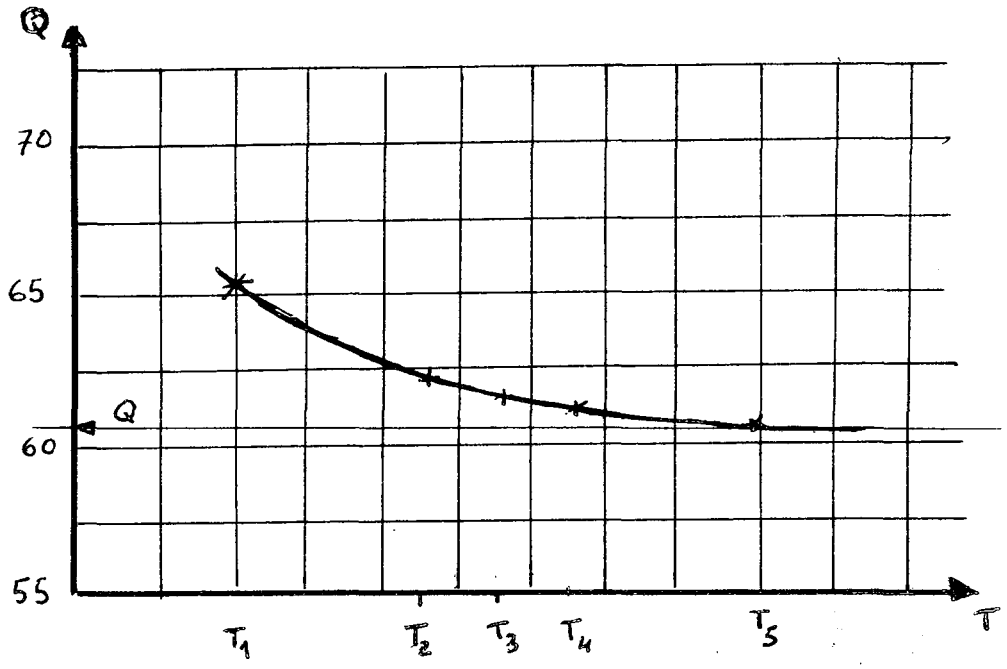
Se necesita saber que si T es la duración de pasaje de la nube y C_2 la concentración media de toda la nube, las concentraciones de las demás muestras tienen el orden de magnitud si-

guiente:

duración del muestreo	Valor previsible de concentración
$\frac{T}{2}$	1 a 1,9 C_2
$\frac{3T}{4}$	1,2 a 1,3 C_2
T	C_2
1,5 T	0,75 C_2
2 T	0,5 C_2

Esto permite deducir las diluciones de la solución madre que hay que preparar.

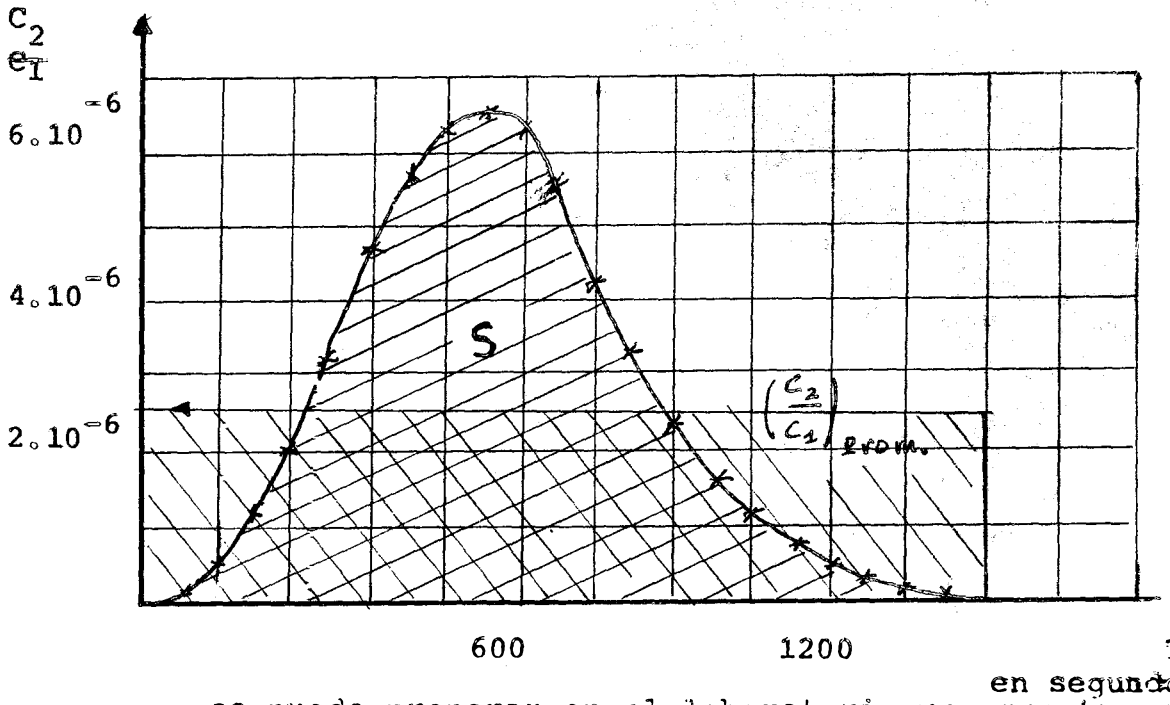
Se determina así, por el análisis, los valores $(\frac{C_1}{C_2})$ $_{1, 2, 3, 4, 5}$ de las diferentes muestras, los valores Q_i de los gastos ficticios correspondientes y se traza la curva $Q = f(T)$.



Q tiene que bajar hasta cierto límite, valor real de Q.

3.- Si se han tomado muestras con un intervalo de tiempo conocido durante todo el pasaje de la nube.

- se puede examinar cada una de las muestras; pero en este caso, hay que preparar muchas diluciones de la solución madre, debido a que las concentraciones de las diferentes muestras del río van a ser muy distintas (de 1 a 6). Se dibuja la curva $\frac{C_2}{C_1} = f(T)$ y se determina el valor promedio.



- se puede preparar en el laboratorio una nuestra medi

de las muestras al tomar volúmenes iguales de cada muestra.

Si t es el valor del intervalo y n el número de muestras:

$$T = (n + 1) \Delta t$$

$$Q = \frac{V}{(n+1)\ \Delta t} \cdot \frac{C_1}{C_2}$$

Comparación de estos procedimientos.

El análisis de todas las muestras permite trazar la cu
va de concentración en función del tiempo y da así una informaci
muy útil en cuanto a la seguridad del aforo. Sin embargo, es un
todo lento, es necesario preparar muchas diluciones de la soluci
madre.

El análisis de una muestra media realizada en el terreno es rápido y preciso, pero se pierde la certidumbre que el muestreo se hizo realmente durante todo el tiempo de pasaje de la nube.

El análisis de una muestra media realizada en el laboratorio es también rápido y permite mayores comprobaciones (realización de dos muestras medias ....)

V.4.- Caso de Reducción del Bicromato.

En general es una transformación de los iones de valencia 6 a iones de valencia diferente, 3 por ejemplo; estos últimos no aparecen en el examen colorimétrico. Las causas de reducción son diversas y poco conocidas en relación a los ríos.

En todo caso, parece conveniente:

1.- Efectuar en el terreno una serie de diluciones con el agua del río. Se supone así que las muestras del río y las diluciones realizadas van a transformarse de manera similar.

2.- Reoxidar las muestras. El procedimiento es el siguiente (por 20 cm^3 de muestra)

- añadir una solución a 10% de $Mn\ O_4K$ hasta la obtención de un color rosa permanente.

- echar 5 gotas de H_3PO_4 para acidificar la muestra.
- hervir 3 minutos.
- echar gota a gota azotura de sodio hasta que desaparezca el color (eso para reducir el exceso de MnO_4K)
- esperar que la temperatura baje
- completar con agua distillada hasta 20 cm^3.

Este procedimiento es muy delicado y se usa solamente en casos extremos.* En los casos dudosos, se puede echar en el terreno una gota de MnO_4K a las muestras.

V.5.- Reconcentración del Bicromato.

Generalidades: Los métodos que describimos anteriormente no tienen limitaciones teóricas en cuanto a la posibilidad de medir gastos importantes (mayores de 100 m^3/s); pero las cantidades de sal son demasiado importantes para un uso industrial (cerca de 1 kg. de bicromato de sodio por cada m^3/s).

Por eso se desarrolló una línea de investigaciones cuyo objeto era reconcentrar el bicromato de sodio antes del análisis colorimétrico. Según los antecedentes disponibles, el informe más reciente en este aspecto es la memoria de J.L. Dutillet** "Essais en vue de l'extension de la méthode de dilution aux jangeages des

---

* Se practica en Africa del Norte.

** Ing. Hidráulico actualmente en el servicio hidrométrico del "Génil rural".

débits de plusieurs centaines de metres cubes par seconde en rivieres de plaine".

Procedimiento propuesto por Dutillet.

Se trata de una extracción del bicromato por butanol $CH_3-CH_2-CH_2OH$ de calidad extra.

En efecto, en agua salada (350 g. de NaCl por litro), el butanol es muy poco soluble (1 a 1,3%) y como tiene una densidad de 0,850, su decantación es muy sencilla.

Ejemplo: extracción para concentrar 10 veces.:

1.- Echar 50 cm^3 de la muestra en una ampolla de decantación muy limpia.

2.- Añadir 1 cm^3 de H_2SO_4 3/4 N para que el pH quede entre 1,5 y 2,5.

3.- Añadir 1 cm^3 del reactivo ya descrito, agitar y dejar así 10 minutos para el desarrollo del color.

4.- Echar 17 g. de NaCl, agitar dos minutos y esperar el equilibrio térmico.

5.- Añadir 5 cm^3 de butanol (normal, puro p.a.)

6.- Hacer una decantación mayor que 10 mn.

7.- Sacar la mezcla colorada.

El análisis colorimétrico es lo mismo que sin reconcentración.

Siguiendo un procedimiento similar se pueden obtener concentraciones del orden de 40 veces la inicial.

C A P I T U L O V I

PRECISION Y ERRORES

Se conocen las fórmulas siguientes:

$$Q = q\,\frac{C_1}{C_2} \qquad (\alpha) \qquad \text{inyección constante}$$

$$Q = \frac{VC_1}{C_2 T} \qquad (\beta) \qquad \text{aforo por integración.}$$

Por lo tanto

$$\frac{\Delta Q}{Q} < \left|\frac{\Delta q}{q}\right| + \left|\frac{\Delta\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{\frac{C_1}{C_2}}\right| \qquad \text{caso } \alpha$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} < \left|\frac{\Delta V}{V}\right| + \left|\frac{\Delta\left(\frac{C_1}{C_2}\right)}{\frac{C_1}{C_2}}\right| + \frac{\Delta T}{T} \qquad \text{caso } \beta$$

α) - Inyección constante.

1.- error $\frac{\Delta q}{q}$. Este error proviene no de la medición en laboratorio de q sino de la mala reproducción de las condiciones ideales del escurrimiento, variación de altura de carga y variación del escurrimiento (establecimiento del régimen permanente,

viscosidad...)

Resultados experimentales demuestran que $\frac{\Delta q}{q} < 1\%$.

2.- error de evaluación de $\frac{C_1}{C_2}$

- error en la preparación de las diluciones (muy débil)
- error en el análisis. (múltiples causas, H.André da un orden de 1%).

Por lo tanto:

$$\boxed{\frac{\Delta Q}{Q} < 2\%}$$

en el procedimiento por inyección constante.

β)- Procedimiento por integración.

La diferencia con el cálculo precedente reside en el hecho que V y T son mediciones de terreno; además se consigue el resultado final a partir de unas muestras. Por eso, la precisión es menor. Según H. André

$$\frac{\Delta Q}{Q} \leqslant 3\%$$

γ)- Comparación con aforos por molinetes.

La experiencia de EdF (más de 1500 aforos por dilución

y por año) demuestra que la diferencia entre dos aforos bien hechos, uno químico, otro por molinete no excede 3%. Por regla general, el gasto obtenido en un aforo por molinete es menor que el gasto obtenido en un aforo por dilución.

C A P I T U L O V I I

CONCLUSIONES

1.- Interés del método de dilución.

Hace diez o quince años atrás, se usaba el método de dilución cuando no se podía aforar por molinete; efectivamente, el método de dilución es el complemento ideal del aforo por molinete. Se usaba, por lo general, en las mediciones de ríos torrentosos con altas velocidades, caso sencillo para un aforo por dilución.

Sin embargo, el método de dilución se desarrolló más, especialmente en el servicio hidrométrico de EdF, debido a las siguientes razones:

- costo mínimo del aparato de terreno
- rapidéz de medición de gastos usuales en regiones de producción hidroeléctrica.

Además, el límite superior de medición de gasto subió con la aparición de la posibilidad de reconcentrar las soluciones. Así, por ejemplo, fue posible medir en Francia gastos mayores de 1000 m^3/s.

Finalmente el estudio de Dutillet demostró la factibilidad técnica de medir sin barco, puente o cable gastos de ríos anchos en llanuras.

2.- Inconvenientes del método.

Es cierto que el método de dilución no es un método universal. Tiene también desventajas:

- requiere un equipo de técnicos bien formados y controlados muy a menudo por un ingeniero.
- no conviene usarlo cuando se presentan las condiciones ideales para un aforo con molinete.
- pueden presentarse problemas de orden químico cuando las aguas son saladas o turbias.
- un aforo por dilución mal hecho da muy poca información en cuanto al gasto, a diferencias de un aforo por molinete que siempre entrega el orden de magnitud del resultado.

3.- Investigaciones actuales y porvenir del método.

La tendencia actual de investigaciones es tratar de utilizar como trazador la Rhodamine B; por las siguientes razones:

- la concentración final puede ser muy débil $C_2=10^{-9}$ kg/ es decir 1000 veces menos que la concentración habitual del bicro

mato de sodio. Con este procedimiento bastarían 3 kg para medir 1000 m^3/s a un costo de 30 dólares.

- la posibilidad de desarrollar el aforo en el terreno: se comparan las muestras por fluorescencia. Además, acaba de salir en Estados Unidos un aparato portátil capáz de medir directamente la concentración en Rhodamine B en un río.

Así parece actualmente factible construir un aparato liviano, robusto capáz de medir rápidamente el gasto de un río por el método de dilución.

C A P I T U L O V I I I

BIBLIOGRAFIA

Andre H., Hydrometrie pratique des cours d'eau. Jaugeages par la méthode de dilution. Faculté des Sciences de Grenoble 1964. 100 p.

Dumas H., La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. La Houille Blanche Nº 5 , 1952 et 1 et 3 , 1953.

Dutillet J.L., Essais en vue de l'extension de la méthode de dilution aux jaugeages des débits de plusieurs centaines de metres cubes par seconde en rivieres de plaine. Faculté des Sciences de Grenoble. 1966.

Wilson F., Fluorometric Procedures for dye tracing. Book 3, Chapter A 12. Techniques of Water Resources Investigation of the United States Geological Survey. 1968.

PHB/rmum.

BIBLIOTECA IREN