

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE FLUJOS Y FACTORES QUE DETERMINAN LOS PERIODOS DE RETENCIÓN¹

¹ Este capítulo constituye una revisión realizada por el Ing. Víctor Maldonado Yactayo del texto “Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención”, de J. M. Pérez Carrión, publicado en CEPIS/OPS, *Manual de evaluación. Tomo II*, Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS/OPS, 1992.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas plantas de tratamiento de agua no tienen la eficiencia esperada por deficiencias hidráulicas que ocasionan determinadas características de flujo en la unidad y que afectan los periodos de retención del agua en los reactores. Estas situaciones tienen su origen en las deficiencias de diseño o en prácticas inadecuadas de operación de las unidades.

En el presente capítulo se analizan las metodologías para determinar el tiempo de retención en las unidades de mezcla, floculación y sedimentación; asimismo, se revisan las metodologías para determinar las características del flujo que en ellas se produce. Se presentará el uso de dos metodologías, el modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick y el análisis de la curva de tendencia de concentración del trazador.

1.1 Modelos de flujo

En las unidades de tratamiento de una planta, desde el punto de vista hidráulico, el flujo del líquido puede ser de dos tipos: discontinuo o intermitente y continuo. En el cuadro 2-1 se presenta una clasificación de los reactores en función del tipo de flujo presente en la unidad.

1.1.1 Flujo intermitente

El flujo de tipo discontinuo o intermitente es el menos habitual y consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el líquido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, vaciar la unidad y repetir el ciclo.

Este tipo de flujo, en la mayoría de los casos, no es práctico y generalmente los procesos en una planta de tratamiento son de flujo continuo, salvo que el proceso de tratamiento en sí exija la discontinuidad, o se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio.

Un ejemplo de este tipo de flujo lo constituye la prueba de jarras, en la cual los vasos se llenan con un volumen (V) de líquido, se someten a un proceso de tratamiento durante un tiempo de retención (t_0), terminado el cual se vacían y se preparan para una nueva prueba. En este caso, toda la masa líquida permanece en el reactor durante todo el tiempo de retención.

1.1.2 Flujo continuo

Este tipo de flujo es el habitual en las plantas de tratamiento de agua. Teniendo en cuenta esta característica, los reactores pueden ser de flujo de pistón, mezclado y no ideal.

a) Flujo de pistón

Se describe como aquel en el que todas las partículas de fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo. De esta manera, los elementos de fluido pasan a través del sistema y son descargados en la misma secuencia en que fueron introducidos y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el fluido que está en la unidad.

En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características. Se presenta con bastante aproximación en unidades hidráulicas como los canales Parshall, los vertederos, los floculadores hidráulicos de pantallas y en los decantadores con una relación largo/ancho bastante mayor de 1.

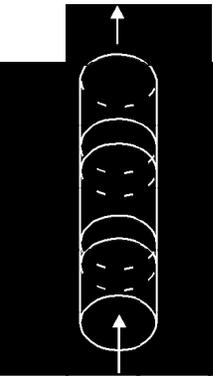
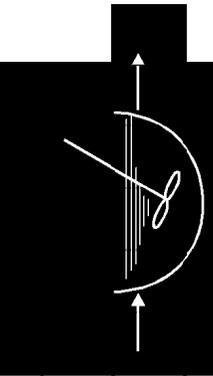
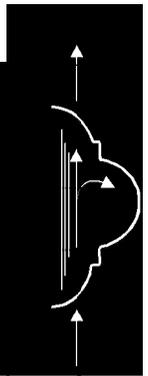
b) Flujo mezclado

Un reactor con flujo mezclado es aquel en el que todo elemento que ingresa al reactor se dispersa inmediatamente dentro de él. Además, se cumplirá que la concentración de una sustancia a la salida de la unidad es igual a la existente en todo el reactor. En la práctica es muy difícil lograr un flujo con estas características; solo se presentará bajo condiciones ideales. Se encuentra con bastante aproximación en retromezcladores o floculadores mecánicos con pocas cámaras en serie.

c) Flujo no ideal

Este tipo de flujo corresponde a cualquier grado intermedio entre flujo a pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como la presencia

Cuadro 2-1. Clasificación de los reactores en función del tipo de flujo presente (1)

Tipo de reactor	Esquema de identificación	Descripción y comentarios
De tanda, cochada o <i>batch</i>		Flujo discontinuo. Caudal nulo. Normalmente se mezcla contenido. <i>Ejemplos:</i> ensayo de la prueba de jarras en los estudios para el diseño y operación de las plantas potabilizadoras.
Flujo a pistón		Flujo continuo. Todos los elementos del fluido permanecen dentro del reactor un tiempo igual. Los elementos de fluido pueden presentar mezcla localizada a nivel de cada uno pero sin mezcla longitudinal. <i>Ejemplo:</i> solo se presentan como una aproximación en los floculadores hidráulicos de pantallas y en decantadores con una relación largo/ancha bastante mayor de 1.
Flujo mezclado		Flujo continuo. Un elemento que entra al tanque se dispersa inmediatamente dentro de él. La concentración de una sustancia a la salida es igual a la existente en todo el tanque. <i>Ejemplo:</i> solo se presentan como una aproximación en mezcladores mecánicos (retromezcladores) y en floculadores mecánicos de muy pocas cámaras en serie.
Flujo no ideal		Flujo continuo. Cualquier grado intermedio entre flujo y pistón y mezcla completa con otras posibles alteraciones como zonas muertas, cortocircuitos, recirculación. <i>Ejemplo:</i> es la situación presente en la mayoría de las unidades de las plantas de tratamiento.

de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Viene a ser el tipo de flujo con el que nos encontraríamos usualmente en las unidades de tratamiento en las plantas.

1.2 Influencia del tiempo de retención

Tradicionalmente se ha empleado para el diseño de los reactores utilizados en plantas de tratamiento de agua el parámetro denominado *tiempo o periodo de retención*.

En las plantas de tratamiento se dan procesos que ocurren muy rápidamente y también con mucha lentitud. Se necesitan tiempos de retención o periodos de contacto cortos o largos para lograr la transferencia o las reacciones necesarias.

Se entiende como *tiempo medio de residencia, permanencia o tiempo de retención* (t_o) del flujo en la unidad al cociente:

$$t_o = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Donde:

V = volumen de la unidad
 Q = caudal

Expresados en unidades homogéneas.

La permanencia es un concepto abstracto. Puede concebirse como el “tiempo promedio en el que el fluido de caudal (Q) pasa a través del reactor del volumen (V)”.

Es el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir de la unidad, en el caso de que todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma. Cabe indicar que el caso correspondería al flujo estable ideal.

En la práctica, es difícil que esto ocurra, ya que las condiciones hidráulicas del fluido (zonas muertas, corrientes de inercia, cortocircuitos hidráulicos, etcétera) hacen imposibles las condiciones de flujo estable.

La magnitud de la permanencia o tiempo de retención en diversas unidades es variable: del orden de segundos en la mezcla rápida y en la aeración por difusión; un lapso de minutos en la floculación, los filtros percoladores y los filtros rápidos; unas horas en las unidades de lodos activados; días en la purificación natural de aguas superficiales y en las lagunas de estabilización; semanas en la digestión anaeróbica de lodos de aguas servidas; y meses y aun años en la estabilización bental de depósitos en lagos y en el mar.

En otras palabras, en los reactores el tiempo de retención (t_0) es distinto para las diferentes fracciones del volumen (V) que entra en el tiempo $t = 0$. Es necesario, por tanto, estudiar la distribución del tiempo de retención en el reactor, para poder conocer la forma como ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento.

La importancia de la influencia del periodo o tiempo de retención en la eficiencia de una unidad de floculación queda demostrada por los resultados de evaluación en las plantas de tratamiento de agua.

En la figura 2-1 se presentan las eficiencias teóricas (pruebas de jarras) en función de los gradientes de velocidad y el tiempo de retención, presentando todas las curvas puntos de máxima eficiencia; cualquier variación del tiempo de retención en menos (cortocircuito hidráulico) o en más (espacios muertos) produce apreciables disminuciones en la eficiencia, fenómeno que es mas importante cuanto mayor es el gradiente de velocidad utilizado.

Analizando la curva *B*, que corresponde a un gradiente de velocidad de 80 s^{-1} , se presenta la máxima eficiencia

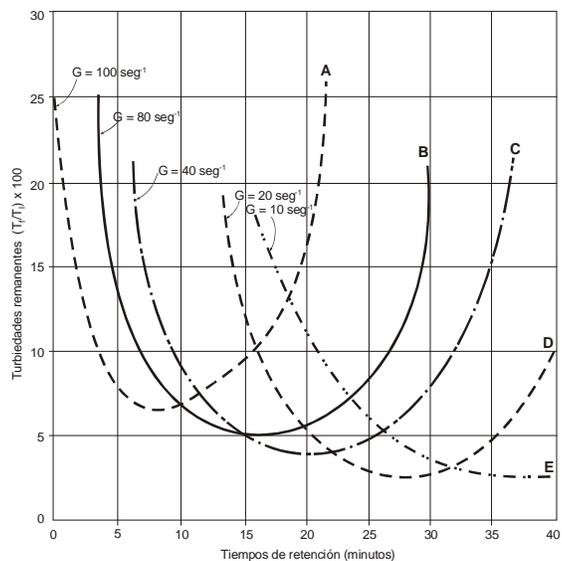


Figura 2-1. Influencia del periodo de retención en la eficiencia de la floculación (prueba de jarras). Planta La Atarjea. Lima, Perú (1)

remocional (95%) a los 15 minutos del tiempo de retención; con 10 y 20 minutos de retención disminuye la eficiencia a 92,5% y 93%, respectivamente.

Al producirse en la planta condiciones similares, se alcanzaron, en primer lugar, eficiencias menores (90%) que las determinadas en los ensayos de laboratorio y, en segundo lugar, mayor influencia de la variación del tiempo de retención, presentando eficiencias de 70% y 85% para un tiempo de retención de 10 y 20 minutos, respectivamente (figura 2-2).

En las unidades de sedimentación se producen influencias mayores por variaciones del tiempo esperado de retención y de sus principales factores concomitantes, tales como tipo de flujo y espacios muertos, al influenciar en la carga superficial (coeficiente del flujo dividido para el área superficial), que tiene las dimensiones de velocidad.

Esto hace que en realidad se presenten incrementos apreciables en las cargas superficiales o velocidades de asentamiento, lo que reduce notablemente la eficiencia remocional de la unidad.

Al realizar la evaluación del proceso de sedimentación de una planta de tratamiento de agua en América Latina, se obtuvo como eficiencia teórica (prueba de jarras) la curva A indicada en la figura 2-3 (curva de eficiencia teórica). De la evaluación de la planta se obtuvieron los datos indicados en el cuadro 2-2.

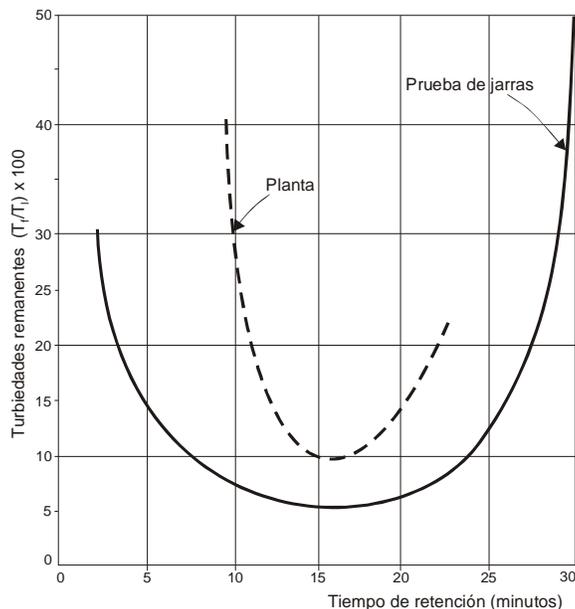


Figura 2-2. Influencia del periodo de retención en la eficiencia teórica (prueba de jarras) y real en la floculación (I)

Cuadro 2-2. Resultados de la prueba de trazadores en un sedimentador (1)

Porcentaje del tiempo de retención con relación al teórico	Porcentaje del flujo
< 50%	46
50% < TR	< 150 %
24	> 150% 30

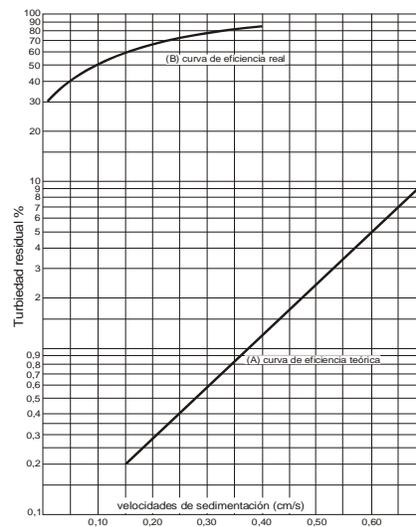


Figura 2-3. Influencia del periodo de retención y características hidráulicas en la eficiencia de un sedimentador (1)

Las alteraciones en el comportamiento del agua en la unidad pueden deberse a la presencia tanto de cortocircuitos hidráulicos como de espacios muertos, los cuales modifican las velocidades de sedimentación y la eficiencia de la unidad (curva B de la figura 2-3). Estos datos demuestran la importante influencia del periodo de retención y de la caracterización de flujos en la eficiencia del sedimentador.

1.3 Uso de trazadores para determinar el tiempo de retención y características hidráulicas de un reactor

Para visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora (sal, colorantes, ácidos o una sustancia radiactiva) que pueda ser aplicada en la entrada de la unidad, y

que simultáneamente se comience a registrar la concentración del trazador a la salida de la unidad (ver figura 2-4).

La aplicación del trazador puede hacerse en forma continua o instantánea, en la práctica en un intervalo de tiempo (Δt_0). Este último resulta ser el método más usado en las evaluaciones de plantas.

Analizaremos, en primer lugar, el caso de la inyección instantánea:

Supondremos aquí que la concentración inicial (C_0) del trazador permanece constante durante el breve tiempo de inyección (Δt_0).

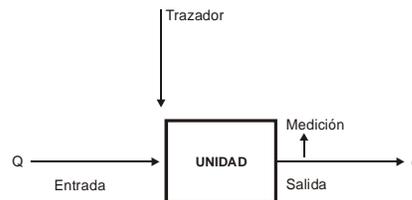


Figura 2-4. Aplicación de trazadores a un reactor (1)

La representación de la variación de la concentración del trazador en función del tiempo en una unidad con predominio de flujo de pistón se representa en la figura a del cuadro 2-3.

La figura b del cuadro 2-3 representa la concentración del trazador en función del tiempo en una unidad con predominio de flujo mezclado.

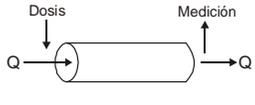
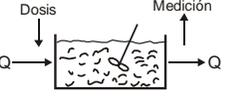
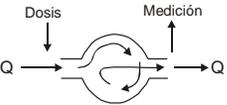
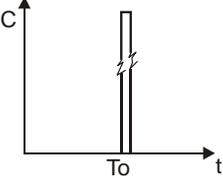
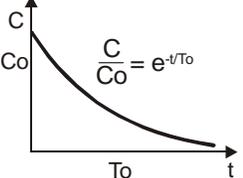
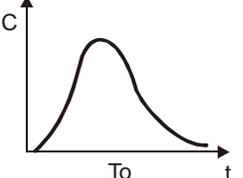
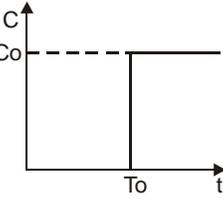
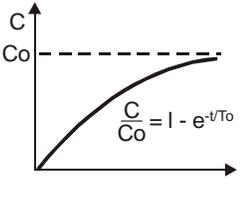
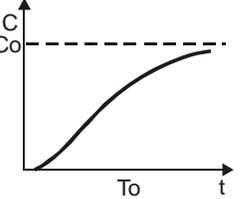
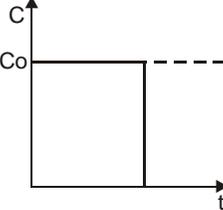
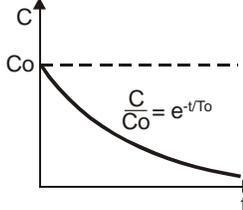
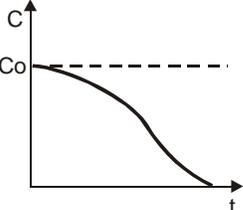
En una unidad bajo condiciones reales de funcionamiento (flujo no ideal; o sea con cierto grado de mezcla, cortocircuitos, zonas muertas, corrientes de inercia, etcétera), al medir y graficar la concentración del trazador a la salida en función del tiempo, se obtiene una curva del tipo de la indicada en la figura c, curva de Gauss del cuadro 2-3. En el caso de la aplicación continua, el tipo de curva que se obtiene es el indicado en las figuras d-i.

2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN REACTOR

Se utilizan dos métodos para evaluar las características hidráulicas de un reactor:

- a) Modelos matemáticos y especialmente el desarrollado por Wolf y Resnick.
- b) Análisis de la curva de tendencia (curva de Gauss).

Cuadro 2-3. Curvas típicas de concentración del trazador en el efluente de reactores con diferentes características hidráulicas (I)

Tipo de reactor / Tipo de dosis de trazador		Diagrama del reactor		
		Flujo de pistón	Flujo mezclado	Flujo no ideal
Instantánea				
				
Continua	Fase inicial			
	Fase final			

2.1 Modelos matemáticos

2.1.1 Teoría general

Supongamos el caso de un reactor que tenga un volumen de agua (V), al cual se le aplica una cantidad (P) de una sustancia química (trazador), la cual se disuelve y mezcla completamente en toda la masa de agua. En este caso, la concentración de esa sustancia en el volumen (V) será $C_0 = P/V$. Si en ese reactor se introduce el flujo Q en el tiempo ($t = 0$) y toda el agua que entra se mezcla completa e instantáneamente con el agua que había en el reactor, al medir la concentración de dicha sustancia a la salida de dicho reactor, se encontrará que la concentración (C) va disminuyendo progresivamente a través del tiempo.

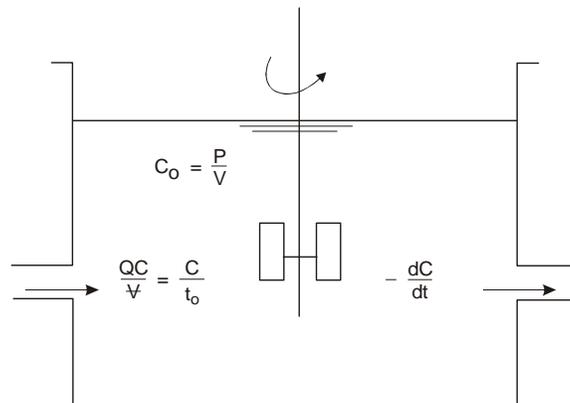


Figura 2-5. Reactor de flujo mezclado (1)

Por lo tanto, aceptando que esta es una reacción de primer orden, se puede hacer un balance de masas, considerando lo que entra y lo que sale del tanque. Así, la cantidad que entra es:

$$C_0 = \frac{P}{V} = \frac{QC}{V} \quad (2)$$

$$\text{Como } t_0 = \frac{V}{Q}, \quad C_0 = \frac{C}{t_0} \quad (3)$$

y la cantidad que sale es: $-\frac{dC}{dt}$

por lo tanto, $\frac{C}{t_0} = -\frac{dC}{dt}$ o $\frac{dC}{C} = -\frac{dt}{t_0}$

Integrando, para C entre C_0 y C , y t entre 0 y t , el primer y segundo término se obtiene:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = - \int_0^t \frac{dt}{t_0} = \frac{1}{t_0} \int_0^t dt$$

O sea:

$$\ln C - \ln C_0 = -\frac{t}{t_0}$$

y por tanto:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (4)$$

Donde:

C = la concentración que permanece el reactor en el tiempo
 C_0 = la concentración aplicada en el tiempo $t = 0$

Se obtienen curvas similares a las presentadas en la figura 2-6, para

$$\frac{t}{t_0} = 0, \quad \frac{C}{C_0} = 1$$

A partir de este punto, la concentración siempre decrece y por eso dC/dt tiene signo negativo. Para un reactor con flujo mezclado, se obtiene la curva ($M = 0$), y para flujo de pistón, la curva paralela al eje de las abscisas ($M = \infty$).

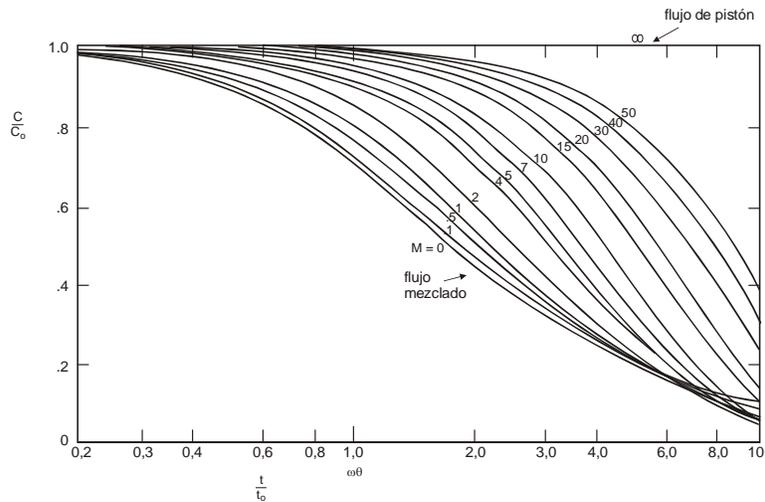


Figura 2-6. Variación de la concentración *versus* tiempo de retención (t)

Si en lugar de un solo reactor con un tiempo nominal de retención (t_0) se tienen dos reactores idénticos con tiempo de retención ($t_0/2$) cada uno:

$$\frac{C}{C_0} = - \left(\frac{dC_1}{dt} \right) \left(\frac{dC_2}{dt} \right)$$

Donde:

C = concentración que sale del primer reactor y entra al segundo
 C_1 = concentración inicial del segundo reactor, cuyo efluente tendrá la concentración C_2 .

Haciendo consideraciones similares para una serie (n) de reactores idénticos con un tiempo de retención cada uno de (t_0/n), se llega a la fórmula general:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{n (n - T)^{n-1}}{(n - 1)!} e^{-nT} \quad (5)$$

Donde:

$$T = \frac{t}{t_0}$$

Graficando esta fórmula para diferentes valores de n , se tiene una familia de curvas en la cual, para $n = 1$, se obtiene:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (6)$$

Expresión igual a la (4), y para $n = \infty$, $C/C_0 = \infty$, resulta la ecuación de una línea recta vertical que pasa por $t/t_0 = 1$, como se muestra en la figura 2-7 para ($M = \infty$).

En el cuadro 2-4 se presentan las características hidráulicas para diferentes unidades de tratamiento de agua.

Esto significa que si se tiene una serie infinita de reactores para el tiempo $t/t_0 = 1$, toda la sustancia que se hubiera agregado instantáneamente al reactor saldría también instantáneamente y nada saldría antes de $t/t_0 = 1$. A esta condición se la llama *flujo de pistón*, que podríamos definir como “aquel que existe cuando las láminas líquidas de espesor (dl) que entran al reactor se desplazan paralelas a sí mismas y perpendicularmente en el sentido del flujo, sin mezclarse”.

Cuadro 2-4. Características hidráulicas de unidades de tratamiento de agua (1)

Curva	Tipo de unidad
$M = 0$	Floculador mecánico (vertical), un solo compartimiento
$M = 0,9$	Sedimentador circular de flujo radial
$M = 3,0$	Sedimentador rectangular de flujo horizontal
$M = 7,0$	Sedimentador rectangular de flujo horizontal
$M = 13,0$	Floculador de pantallas de flujo horizontal

Por contraposición, el flujo totalmente mezclado es “aquel que existe cuando la composición del efluente en cualquier instante es idéntica al de toda la masa líquida”.

Sin embargo, el flujo de pistón y el flujo mezclado son dos casos extremos ideales que en la práctica rara vez ocurren en las plantas de tratamiento.

Por lo general, coexisten los dos tipos de flujo (pistón y mezclado), pues el número de reactores colocados en serie es limitado (uno a seis), existe mezcla de

flujo entre las distintas cámaras y, por lo tanto, parte del flujo sale antes que t_0 y parte después que t_0 .

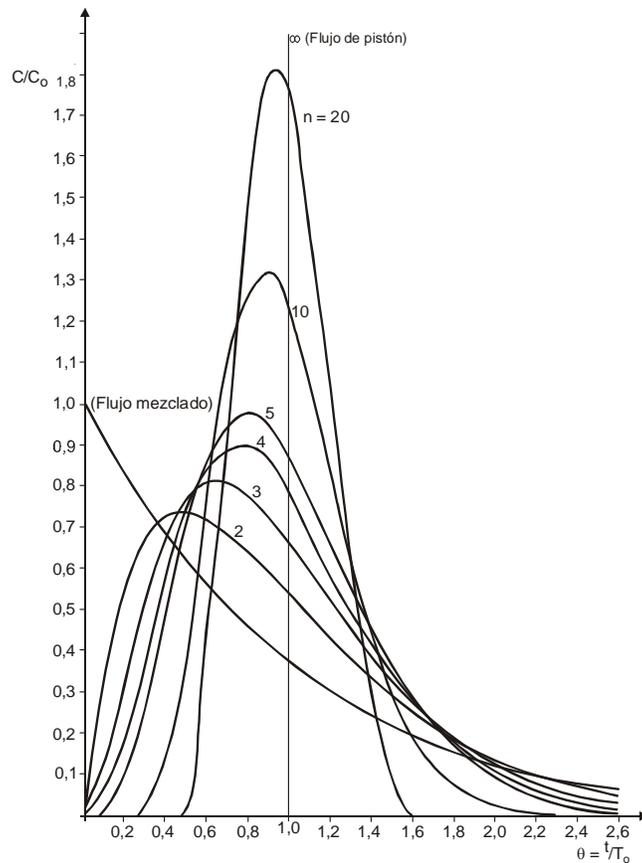


Figura 2-7. Reactores en serie (1)

La determinación de la proporción de flujo de pistón en floculadores y sedimentadores tiene una gran importancia, pues mide la fracción del volumen de agua que pasa por el reactor y que ha permanecido durante todo el tiempo de retención sometida al tratamiento deseado. En cambio, cuanto más flujo mezclado haya en un floculador o sedimentador, se puede considerar que una fracción mayor de la masa de agua ha sufrido un tratamiento más corto o más largo del que se desea, lo que en muchos casos es objetable.

Por eso, es ideal que en las plantas de tratamiento se diseñen los reactores de manera que presenten el máximo de flujo de pistón, pues con eso se garantiza que el agua tenga el tratamiento que se busca durante el periodo de retención proyectado.

En reactores no ideales, además de flujo de pistón y flujo mezclado, puede suceder que parte del volumen del agua que entra atraviese el tanque con tanta rapidez que salga instantáneamente, sin permanecer almacenado en él.

Este fenómeno se llama cortocircuito y se presenta debido a defectos en el diseño de la estructura de entrada y salida que permiten el paso directo del agua entre unas y otras, por corrientes de densidad de origen térmico o por variación de concentración, así como por efecto de la rotación de paletas en floculadores mecánicos, que impulsan parte de la masa líquida para que salga tan pronto como entra. El cortocircuito hidráulico se define por eso como aquella parte del flujo que tiene una velocidad infinita y un tiempo de retención cero.

2.1.2 Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick

Es evidente que cuando no hay espacios muertos, la fracción de flujo de pistón (p) y la fracción de flujo de no pistón ($1-p$) deben ser iguales a la unidad:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} &= 1 \\ P + (1 - p) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Cuando hay espacios muertos, si m es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción que no tiene espacios muertos será igual a $1-m$ y por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de pistón} + \text{flujo de no pistón} + \text{espacios muertos} &= 1 \\ [p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Ahora bien, en la ecuación (9) se estableció que el flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (9)$$

Si se considera que en el reactor se presenta una combinación de flujos de pistón y mezclado, la ecuación (9) se transforma en:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{t - p \cdot t_0}{(1 - p) \cdot t_0}} \quad (10)$$

Donde $p \cdot t_0$ es el tiempo de retención correspondiente a flujo de pistón y $(1-p)$ es el volumen de mezcla perfecta. Reordenando y simplificando, tenemos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1 - p)} \left[\frac{t}{t_0} - p \right]} \quad (11)$$

Si se considera que el sistema, además, tiene espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación el término $(1-m)$ para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta. Luego, tendríamos:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{1}{(1 - p) (1 - m)} \left[\frac{t}{t_0} - p (1 - m) \right]} \quad (12)$$

La fracción de la totalidad del trazador que ha salido del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0}$$

Reemplazando el valor de C/C_0 , se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{1}{(1 - p) (1 - m)} \left[\frac{t}{t_0} - p (1 - m) \right]} \quad (13)$$

Reordenando términos y tomando los logaritmos de ambos términos, se llega a:

$$\text{Log}[1 - F(t)] = \frac{-\text{Log } e}{(1 - p) (1 - m)} \left[\frac{t}{t_0} - p (1 - m) \right] \quad (14)$$

Que corresponde a la ecuación de una línea recta (figura 2-8), cuya pendiente está dada por:

$$\text{Tang } \alpha = \frac{\text{Log } e}{(1 - m) (1 - p)} \quad (15)$$

Multiplicando y dividiendo para p y sustituyendo el valor de $\text{Log } e = 0,435$, se obtiene:

$$\text{Tang } \alpha = \frac{0,435 p}{p (1 - m) (1 - p)} \quad (16)$$

Lo que hace:

$$\theta = p (1 - m) \quad (17)$$

Reemplazando en la ecuación (16) y reordenando, tenemos:

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0,435 + \theta \tan \alpha} \quad (18)$$

De la ecuación (17) se puede deducir que el volumen de espacios muertos será igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (19)$$

y el flujo mezclado M será igual a:

$$M = 1 - p \quad (20)$$

Los valores de las incógnitas θ y $\tan \alpha$ se obtienen al trazar la curva de $\text{Log } 1-F(t)$ (figura 2-8), donde:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} ; \quad y \quad (21)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_1}{t_0} - \frac{t_2}{t_0}} \quad (22)$$

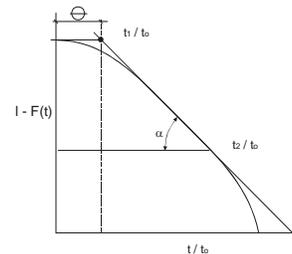


Figura 2-8. Curva de $I-F(t)$
Cantidad de trazador que permanece en el reactor (I)

Ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la figura 2-9.

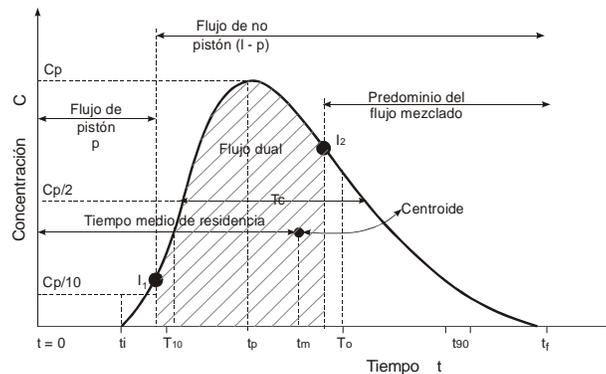


Figura 2-9. Concentración del trazador en el efluente de un reactor (1)

Existen los siguientes parámetros principales:

- t_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- t_{10} = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador
- t_p = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
- t_m = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
- t_o = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = V/Q .
- t_{90} = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
- t_f = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
- C_o = concentración inicial.
- C_p = concentración máxima a la salida.

Se pueden utilizar los siguientes criterios:

- a) Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado.

Si el valor de la relación es ($< 0,3$), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).

$$\frac{t_i}{t_o} \quad (23)$$

- b) Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_o$.

$$\frac{t_m}{t_o} \quad (24)$$

- c) Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación t_p/t_o se aproxima a 1 y $t_i/t_o > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.

$$\frac{t_p}{t_o} \quad (25)$$

- d) Está relacionado en general con la difusión debida a corrientes de inercia (turbulencia). Es igual al cociente ($\Delta t_o/t_o$) (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y aproximadamente del orden de 0,7 para flujo mezclado (según Villamonte).

$$\frac{t_c}{t_o} \quad (26)$$

- e) Está relacionado con las características de inercia turbulentas y de recirculación grande. Es igual al cociente $\Delta t_o/t_o$ (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y del orden de 2,3 para flujo mezclado ideal.

$$\frac{t_b}{t_o} \quad (27)$$

- f) Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.

$$e = \frac{(tf - tp) - tp - ti}{to} \quad (28)$$

g) Índice de Morrill

Este autor encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en porcentajes y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta (figura 2-10).

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión. Así:

$$\text{Índice de Morrill} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}} \quad (29)$$

Si todo el flujo fuera de pistón, la curva de la figura 2-10 sería una línea horizontal y el índice de Morrill sería 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo ($t = to$) y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

El estudio de la totalidad de la curva puede suministrar una información más completa que la de las tendencias centrales.

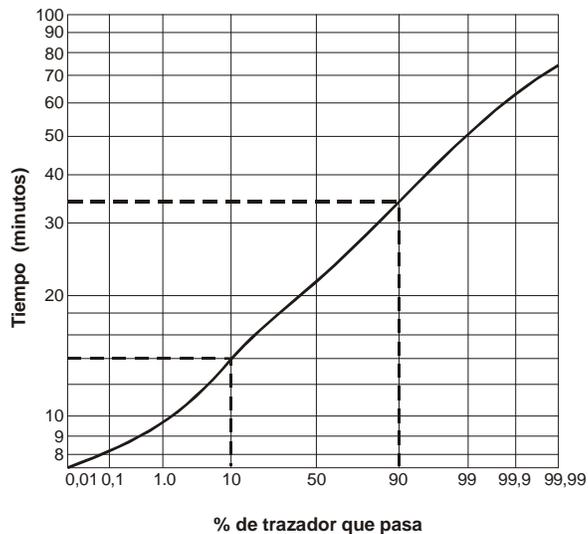


Figura 2-10. Índice de Morrill (1)

Generalmente, el solo observar la forma que toma la curva de trazadores brinda una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia.

El flujo de pistón puro, como se muestra en la figura 2-9, viene representado por el tiempo que transcurre hasta que aparece el trazador. Hirsch (3) considera que este tiempo se puede tomar en el punto de inflexión I_1 , cuando la curva cambia de cóncava a convexa.

De aquí en adelante, el flujo debe considerarse como no de pistón. Entre dicho punto y el punto de inflexión I_2 en la rama descendente, el flujo es dual (pistón y no pistón combinado). A partir del segundo punto de inflexión, el flujo tiene un carácter predominantemente mixto.

3. ENSAYO CON TRAZADORES

3.1 Objetivo

Las pruebas con trazadores han sido usadas por muchos años como medio para determinar el flujo en canales, ríos, reservorios y en acuíferos subterráneos.

En plantas de tratamiento su uso ha sido limitado, pero muy útil para determinar la distribución del flujo en unidades paralelas y evaluar las condiciones hidráulicas. En la actualidad estos ensayos se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores rápidos, floculadores, sedimentadores, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica. También tienen aplicación los ensayos de trazadores para la medición de caudal.

Un ensayo de trazadores consiste en agregar la sustancia trazador en el afluente del tanque o reactor que se quiere analizar, con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo.

3.2 Sustancias trazadoras

Las sustancias trazadoras pueden ser:

- a) Colorantes como fluoresceína o rodamina.
- b) Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros o nitratos, especialmente de sodio.
- c) Elementos radiactivos como isótopos.
- d) Ácidos: clorhídrico, benzoico.
- e) Otras sustancias químicas: alizarim, sapirool, naptol.

El uso de radioisótopos, a pesar de constituir un sistema bastante sofisticado, tiene grandes ventajas:

- Es mucho más preciso, pues los detectores de radiación son más sensibles.
- La determinación de los trazadores puede hacerse en forma continua sin necesidad de recoger muestras.
- Puede efectuarse aun en los casos en que no se tiene acceso al interior del sistema, pues la radiación puede ser medida a través de determinado tipo de materiales.
- Se adapta mejor a las investigaciones.

Una de las grandes desventajas de este sistema es que requiere utilizar equipo y personal especializados.

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas.

Es conveniente, además, escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el agua. Por tanto, la concentración total que se determine a la salida será sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada. Esta es la razón por la cual elementos como el cloro son malos trazadores. Por supuesto, en todos los casos hay que esperar que se pierda algo de trazador.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, resulta muy común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de plantas de tratamiento de agua el ion cloruro obtenido de la aplicación del cloruro de sodio. El cloruro de sodio o sal de

mesa o cocina es de fácil obtención y bajo costo. Asimismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad.

3.3 Procedimiento

La aplicación de trazadores puede hacerse de dos maneras distintas:

- En forma instantánea.
- En forma continua.

3.3.1 Dosificación instantánea

Se aplica una concentración (C_0) a la entrada de la unidad en evaluación en un tiempo muy corto, inferior a $1/30$ del tiempo teórico de retención (t_0) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua afluyente de la unidad que se piensa analizar.

En la dosificación instantánea, la concentración (C_0) que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua. Para el caso del uso del ion cloruro como trazador, es común usar concentraciones de entre 30 y 50 mg/L.

La cantidad de trazador P (kg) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \times K \times C_0}{l \times 10^3} \quad (30)$$

Donde:

- P = peso del trazador por añadir al reactor, kg
 V = volumen útil del reactor, m³
 K = constante de corrección
 C_0 = concentración, mg/L o g/m³
 l = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

$$K = \frac{\text{Peso de NaCl}}{\text{PesoCl}} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65$$

3.3.2 Dosificación continua

Se aplica la concentración (C_o) continuamente, por un tiempo no menor de tres veces el periodo de retención teórico (t_o), y luego se interrumpe bruscamente la dosificación.

La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando el proceso se paraliza). Además, se obtiene una concentración de equilibrio (cuadro 2-3, figuras d-i).

La cantidad de trazador P (kg/h) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \times K \times C_o}{l \times 10^3}$$

Donde:

- P = peso del trazador por añadir al reactor, kg/h
- Q = caudal de la unidad por evaluar, m³/s
- K = constante de corrección
- C_o = concentración, mg/L o g/m³
- l = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

3.4 Limitaciones de la prueba con trazadores

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer cómo se desplazan las diferentes masas de agua dentro de las unidades de tratamiento (mezcladores rápidos, floculadores, decantadores), pero los datos obtenidos se refieren solamente al momento en que se hace la prueba, y no representan necesariamente el comportamiento en todas las condiciones.

Por otra parte, los datos tampoco dicen nada sobre la eficiencia de los reactores, pues estos procesos dependen no solo de las características hidráulicas de los reactores sino también de factores de tipo químico.

Por eso puede presentarse el caso de que un sedimentador con un mal comportamiento hidráulico (flujo de pistón menor de 60%) produzca una mayor

remoción de partículas que otro con un buen comportamiento hidráulico, pero con partículas que tienen menor velocidad de sedimentación.

Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina tampoco las trayectorias de las partículas, del flujo o de cómo éste se distribuye en el reactor. Indica el tiempo de permanencia pero no su trayectoria.

Además, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para obtener resultados significativos:

1. El flujo debe ser constante durante la realización del ensayo.
2. El flujo debe ser segregado; es decir, el flujo que entra en la unidad no se debe mezclar con el de otras unidades.
3. Si el reactor contiene lodos depositados, puede producir interferencias, especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masas, por lo cual deberá ser previamente limpiado.
4. De preferencia conviene estabilizar el reactor para evitar interferencias, para lo cual es apropiado dosificar continuamente pequeñas dosis de trazador por un periodo de tiempo igual al del ensayo, antes de la evaluación.
5. El uso de altas concentraciones de trazador podría producir corrientes cinéticas por variación de densidad, lo que daría resultados erróneos, por lo cual es preferible el uso de métodos de dosificación continua o con bajas concentraciones.
6. Usualmente, por falta de tiempo se recurre a realizar una sola prueba para evaluar tanto floculadores como sedimentadores. Así se obtienen las curvas *A* y *B* de la figura 2-11 para el floculador y sedimentador conjuntamente; por diferencia de estas dos curvas, es posible obtener la curva *C*, que permite calcular la curva correspondiente al sedimentador.
7. La variación de la temperatura del medio ambiente o del agua ocasiona alteraciones en los resultados al producir corrientes térmicas, cuyos efectos se deben considerar. Este fenómeno produce muy marcadas variaciones en los ensayos de trazadores, tales como los indicados en las figuras 2-12 y 2-13.

Una solución aproximada, tradicionalmente usada en la aplicación del modelo simplificado de Wolf y Resnick en estas circunstancias, consiste en ajustar una línea tangente por la parte recta de la curva. La pendiente de esta recta es la $\tan \alpha$ y su intersección con el valor de 1,0 en las ordenadas permite calcular el valor de θ . Con estos valores aproximados se pueden aplicar las ecuaciones correspondientes.

8. Curvas resultantes del ensayo de trazadores en el mismo reactor deben tener igualdad de resultados, especialmente en lo relacionado con el tiempo inicial de presentación del trazador y el de máxima concentración, los valores de concentración máxima y las áreas bajo la curva.
9. El trazador debe aplicarse completamente disuelto en agua. Aplicar parte del trazador en sólido induce a error en el ensayo: el trazador demorará en salir de la unidad, pero esta demora no será por la existencia de espacios muertos sino porque al trazador le toma un mayor tiempo disolverse y salir de la unidad.
10. La toma de muestras en la salida de la unidad en evaluación debe extenderse hasta obtener por lo menos en tres mediciones consecutivas el valor de la concentración inicial (C_0) del trazador.
11. Las mediciones de la concentración del trazador a la salida de la unidad se realizan a través de la medición de la conductividad.

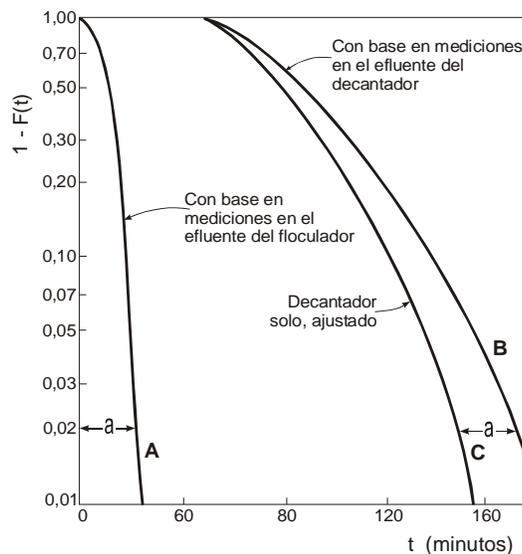


Figura 2-11. Determinación conjunta de características de dos reactores diferentes en serie (I)

Existe una relación directa entre la concentración del ion cloruro en el agua y la conductividad. Las mediciones de conductividad son fáciles y rápidas en comparación con las mediciones del ion cloruro.

12. Solo se recomienda realizar las mediciones de la concentración del trazador en términos del ion cloruro cuando se miden caudales. La determinación de caudales a través de un ensayo de trazadores demanda mediciones más precisas.
13. Considerando que las mediciones de la concentración del trazador se realizarán a través de la conductividad, se deben realizar continuas mediciones de este parámetro en el afluente a la unidad durante el ensayo. Esta información es útil para estar seguros de que la conductividad no ha variado o, en el caso de que exista variación, tener en cuenta este nuevo valor para decidir en qué momento se debe concluir el ensayo.

14. La toma de muestras del efluente de la unidad no debe hacerse en la superficie. En unidades donde el flujo sale de la unidad por secciones profundas se deben tomar muestras en mayor profundidad.

15. Si el efluente sale de la unidad a través de una sección ancha, se debe tomar más de una muestra, las que se mezclarán para medir la conductividad.

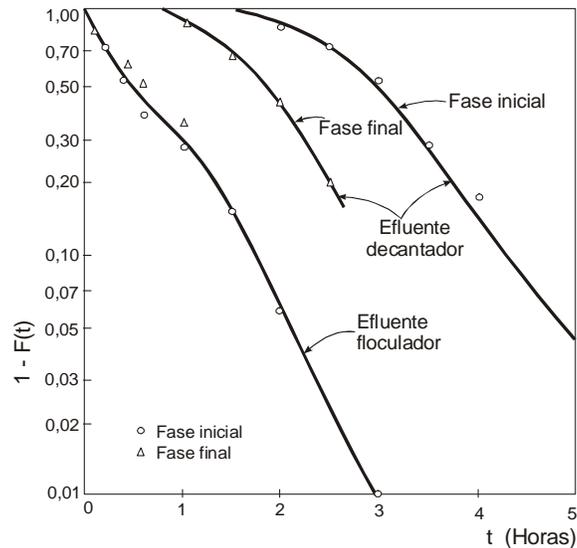


Figura 2-12. Influencia de la variación de temperatura (I)

16. Durante la evaluación de una planta es común determinar las características hidráulicas del mezclador rápido, canal de interconexión, floculadores, canal de distribución de agua floculada a decantadores y los decantadores. Se recomienda que los ensayos de trazadores se realicen de las últimas unidades hacia las primeras o de aguas abajo hacia aguas arriba. Esto permitirá no tener en la unidad en evaluación un trazador que se haya aplicado en la prueba anterior.

4. APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1 Cálculo de cantidad de trazador

4.1.1 Dosificación instantánea

Se trata de encontrar la cantidad de cloruro de sodio con un grado de pureza de 90%, que es necesario añadir instantáneamente a un floculador de 5 metros de ancho, 3 metros de profundidad y 15 metros de longitud, si se desea obtener una concentración de 50 mg Cl/L.

$$P = \frac{V \times K \times Co}{I \times 10^3}$$

Donde:

$$\begin{aligned} V &= 3,00 \times 5,00 \times 15,00 = 225 \text{ m}^3 \\ K &= 1,65 \\ I &= 0,90 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$P = \frac{225 \times 1,65 \times 50}{1.000 \times 0,90} = 20,62 \text{ kg}$$

Esta cantidad de sal deberá disolverse en agua, la que deberá ser agitada en forma permanente, inclusive durante la adición en el punto de mezcla previamente escogido.

4.1.2 Dosificación continua

Se trata de obtener una concentración de 5 mg/L de fluorosilicato de sodio, con 90% de pureza, para un sedimentador que tiene un periodo de retención teórico (t_0) de 2,5 horas, con un caudal de 1,10 m³/s.

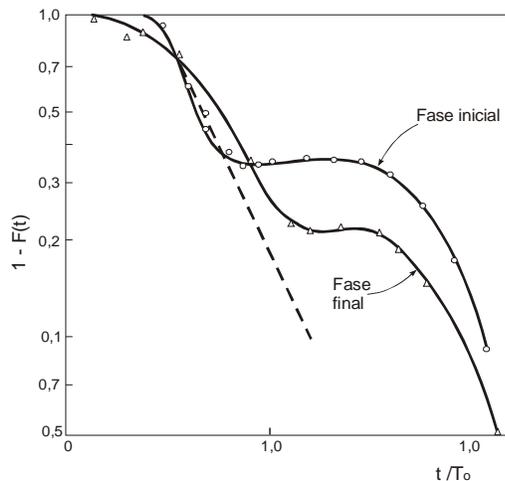


Figura 2-13. Presencia de turbulencia por corrientes de densidad (I)

Duración del ensayo (T_e): por lo menos tres veces el tiempo teórico de retención.

$$T_e = 3,00 \times t_o = 3,00 \times 2,50 = 7,50 \text{ horas}$$

La cantidad total de flourosilicato de sodio, si $K = 1,67$, será:

$$P = \frac{3.600 \times C_o \times Q \times K}{l \times 10^3} = \frac{3.600 \times 5,0 \times 1,10 \times 1,67}{0,90 \times 1.000} = 36,74 \text{ kg/h}$$

Se requerirá un peso total PT de:

$$PT = P \times T_e = 36,74 \times 7,5 = 275,55 \text{ kg}$$

4.2 Determinación de las características hidráulicas de un floculador mecánico

Se presentan a continuación los resultados de un ensayo de trazadores para determinar las características hidráulicas de un floculador mecánico de un solo compartimento, con agitador tipo turbina (figura 2-14).

4.2.1 Tiempo de retención teórico (t_o)

El caudal previamente determinado que entra al floculador es:

$$Q = 24,17 \text{ m}^3/\text{min}$$

El volumen de la unidad es:

$$V = A \times L \times H = 11,00 \times 12,50 \times 3,00 = 412,50 \text{ m}^3$$



Figura 2-14. Floculador mecánico de una sola cámara (2)

Luego, el tiempo de retención teórico será de:

$$t_o = \frac{V}{Q} = \frac{412,50}{24,17} = 17 \text{ min}$$

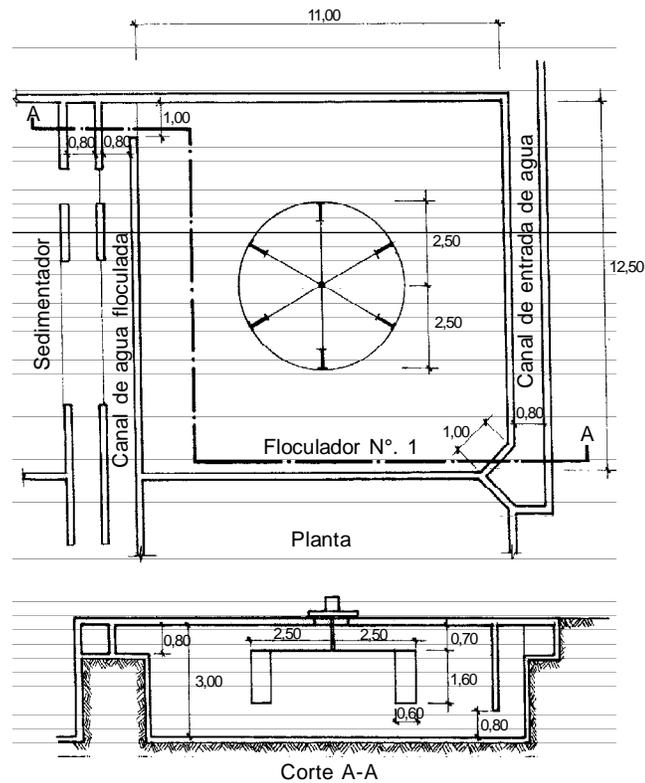


Figura 2-15. Esquema del floculador mecánico de una sola cámara (1)

4.2.2 Ensayo con trazadores

Si se desea obtener una concentración media de cloruros de 30 mg/L, utilizando como trazador el cloruro de sodio con un grado de pureza de 90%, la cantidad que se requiere dosificar es:

$$P = \frac{V \times K \times C_o}{l \times 10^3} = \frac{412,5 \times 1,65 \times 30}{0,90 \times 1.000} = 23 \text{ kg}$$

Una vez agregado el trazador, completamente disuelto, se tomaron muestras en frascos numerados a la salida del floculador cada tres minutos y analizando el contenido de cloruros en cada muestra (o mediciones de conductividad) de cada muestra, se obtuvieron los datos incluidos en el cuadro 2-5.

4.2.3 Análisis por el método de Wolf-Resnick

Los datos de las columnas 3 (t/t_0) y 8 ($1-F(t)$) se grafican en papel aritmético logarítmico, y se obtiene la curva de cantidad de trazador que permanece en el reactor (figura 2-16).

Se traza la tangente a la parte superior de la curva y se obtiene:

$$\theta = 0,125$$

$$\frac{t_1}{t_0} = 0,125$$

$$\frac{t_2}{t_0} = 1,97$$

Utilizando la ecuación (21):

$$\text{Tang } \alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} = \frac{1}{1,97 - 0,125} = 0,54$$

Utilizando la ecuación (18), se calcula el flujo de pistón:

$$P = \frac{\theta \text{ tang } \alpha}{0,453 + \theta \text{ tang } \alpha} = \frac{0,125 \times 0,54}{0,435 + 0,125 \times 0,54} = 0,135$$

$$P = 13,5\%$$

Cuadro 2-5. Resultados del ensayo de trazadores en un floculador mecánico (I)

Muestra (1)	t (2)	t/to (3)	C (4)	C-Co (5)	$\Sigma(C-Co)$ (6)	F(t) (7)	1-F(t) (8)
0	0	0	7,22	0	0	0	100,00
1	3	0,18	50,54	43,32	43,32	16,72	83,28
2	6	0,35	46,21	39,99	82,31	31,77	68,23
3	9	0,53	38,52	31,30	113,61	43,85	56,15
4	12	0,70	33,70	26,48	140,09	54,07	45,93
5	15	0,88	27,93	20,71	160,80	62,07	37,93
6	18	1,00	23,11	15,89	176,69	68,20	31,80
7	21	1,23	20,22	13,00	189,69	73,22	26,78
8	24	1,41	19,20	11,98	201,67	77,80	22,20
9	27	1,59	17,33	10,11	211,78	81,75	18,25
10	30	1,76	16,56	9,34	221,12	85,60	14,40
11	33	1,94	16,37	9,15	230,27	88,88	11,12
12	36	2,12	14,47	7,23	237,52	91,67	8,33
13	39	2,29	12,52	5,30	242,82	93,72	6,28
14	42	2,47	12,52	5,30	248,12	95,77	4,23
15	45	2,65	11,56	4,24	252,46	97,44	2,66
16	48	2,82	9,63	2,41	254,87	98,37	1,63
17	51	3,00	9,63	2,41	257,28	99,30	0,70
18	54	3,18	8,67	1,45	258,73	100,00	0,00
19	57	3,35	7,22	0,00	258,73	100,00	0,00
20	60	3,53	7,22	0,00	258,73	100,00	0,00

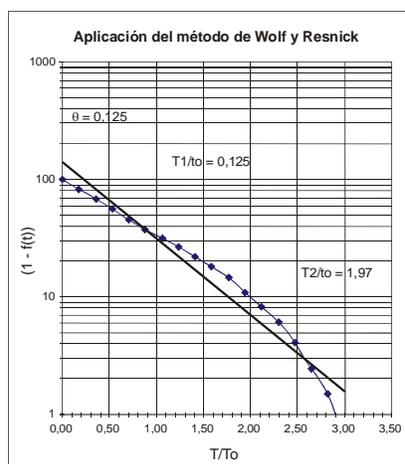


Figura 2-16. Aplicación del método de Wolf y Resnick (I)

Cuadro 2-6. Cálculos para la elaboración del cuadro 2-5 (I)

Columna	Criterio	Operaciones
1	Dato	
2	Dato	
3	t/to	3/17 = 0,18 6/17 = 0,35
4	Dato	
5	C - Co	50,54 - 7,22 = 43,32 46,21 - 7,22 = 38,99
6	Σ(c - Co)	0 + 43,32 = 43,32 43,32 + 38,99 = 82,31
7	$F(t) = \frac{\sum (C - C_o) \times 100}{\sum_m (C - C_o)}$	$\frac{43,32 \times 100}{258,73} = 16,72$ $\frac{82,1 \times 100}{258,73} = 31,77$
8	100 - F(t)	100 - 16,72 = 83,28 100 - 31,77 = 68,23

Por medio de la ecuación (19), se calculan los espacios muertos:

$m = 7,4\%$

Por medio de la ecuación (20) se calcula el flujo mezclado:

$M = 1 - P = 1 - 0,135 = 0,865$

$M = 86,5\%$

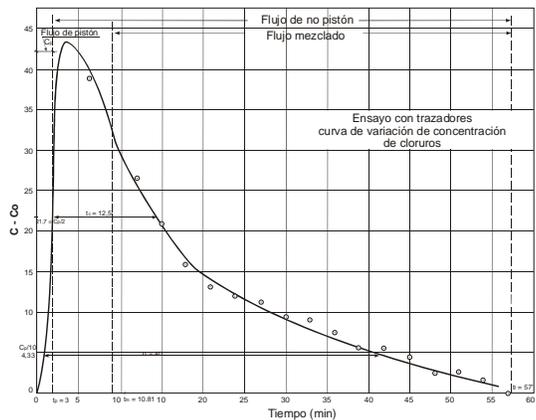


Figura 2-17. Variación de la concentración de trazador en el afluente del floculador mecánico de una sola cámara (I)

4.2.4 Análisis por el método de la curva de tendencia

Con los datos de las columnas 3 y 5 del cuadro 2-5 se levantó la curva de la figura 2-17 y del análisis de esta, los resultados indicados en el cuadro 2-7.

Cuadro 2-7. Criterios de evaluación a partir del análisis de la curva de variación de la concentración del trazador en el afluente (I)

Criterio	Consecuencia
$\frac{t_i}{t_o} < 0,3$	Existencia apreciable de cortocircuitos
$\frac{t_p}{t_o} = \frac{3}{17} = 0,18 \rightarrow 0$	Predominio de flujo mezclado
$\frac{t_c}{t_o} = \frac{12,5}{17} = 0,75$	Predominio de flujo mezclado
$\frac{t_b}{t_o} = \frac{40}{17} = 2,30$	Mezcla ideal
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$ $e = \frac{(57 - 3) - (3 - 0)}{17} = 3,00$	Existencia de flujo mezclado

4.2.5 Índice de Morrill

Los datos de las columnas 2 y 7 del cuadro 2-5 (Tiempo y Fracción del trazador que atraviesa el floculador) se grafican en papel de probabilidades-logarítmico y se obtiene la figura 2-18, que permite calcular el índice de Morrill:

$$I_M = \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{35}{2,2} = 15,91$$

Que refuerza el criterio de existencia de flujo mezclado en estado ideal.

4.2.6 Conclusiones

En el floculador se está produciendo un predominio de flujo mezclado (86,5%).

Se presentan cortocircuitos apreciables, que originan un tiempo de retención muy pequeño ($t_p = 3,5$ minutos), en lugar de un tiempo de retención calculado (t_o) de 17 minutos. Este hecho tiene las siguientes consecuencias: a) el volumen útil del floculador es solo 21% del calculado; b) ya que el tiempo de formación inicial del flóculo es de 7 minutos, este no tiene oportunidad de formarse en la unidad, sino que lo hace en el sedimentador, lo que disminuye apreciablemente la eficiencia de la planta; c) esta apreciable disminución del tiempo real de retención produce una elevación de 22% en el gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}}$$

Se presenta un gradiente real de 88 s^{-1} en lugar de 40 s^{-1} , hecho que también influye negativamente en la eficiencia del floculador.

Como conclusión principal del ensayo, por las razones indicadas se recomienda evitar el diseño de floculadores con un solo compartimento.

4.3 Determinación de las características hidráulicas de un floculador de pantallas de flujo vertical

Se muestra en el caso siguiente la determinación de las características hidráulicas de un floculador de pantallas de flujo vertical, que tiene las características indicadas en la figura 2-18.

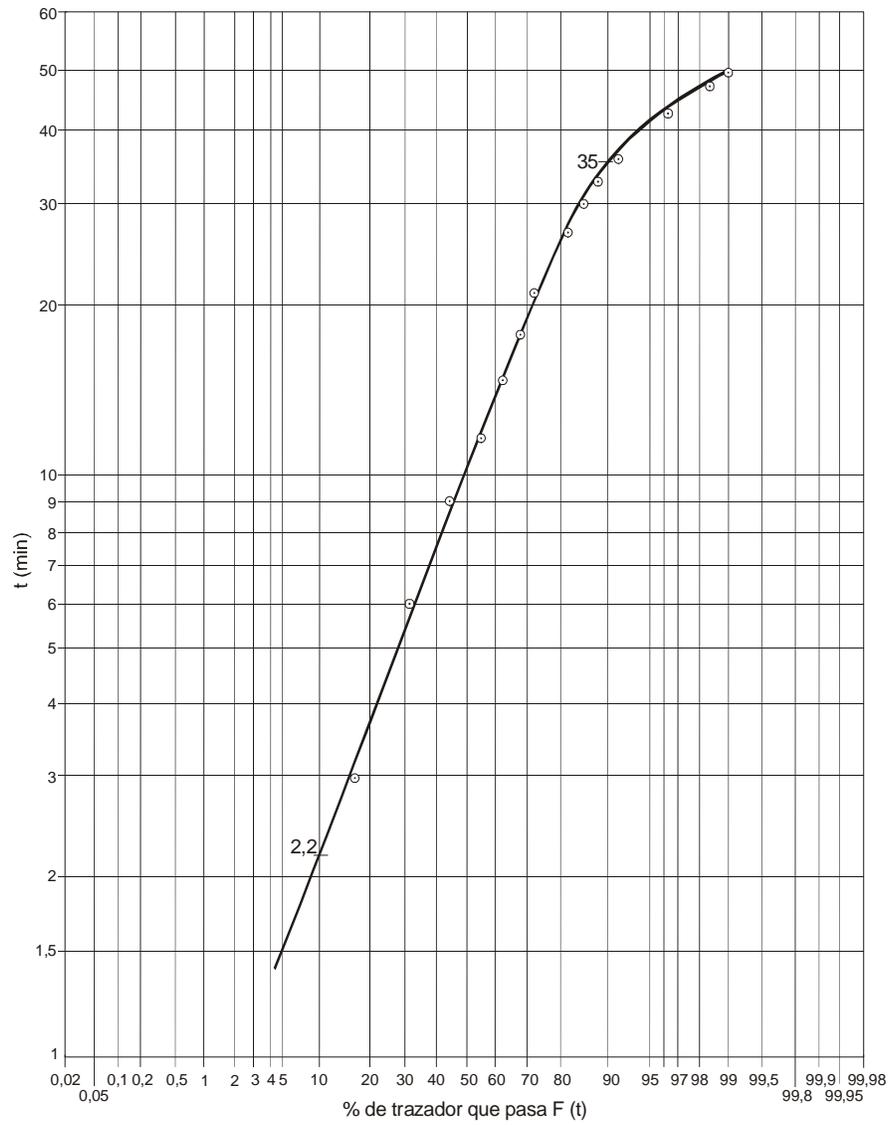


Figura 2-18. Índice de Morrill. Floculador mecánico (I)

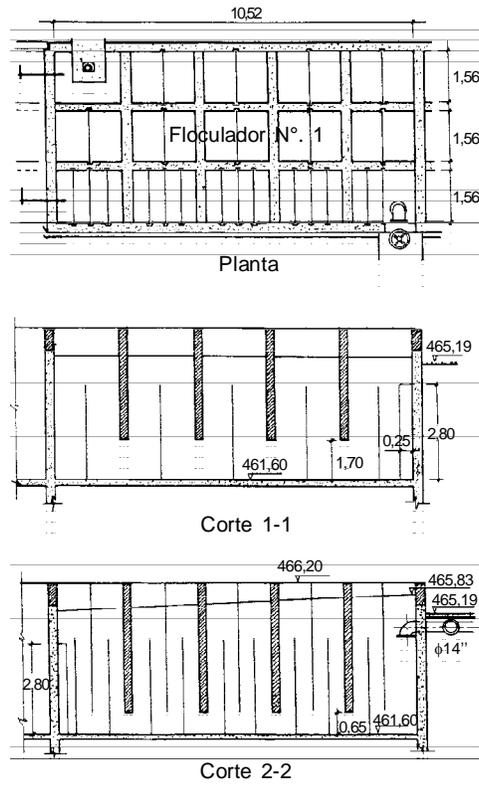


Figura 2-19. Floculador hidráulico de flujo vertical (1)



Figura 2-20. Vista del floculador hidráulico de la figura 2-19 (2)

4.3.1 Tiempo teórico de retención

Con el caudal de 250 lps y el volumen del floculador de 192 m³, se obtuvo el tiempo teórico de retención:

$$t_0 = \frac{V}{Q} = \frac{192}{0,250 \times 60} = 12,8 \text{ minutos}$$

4.3.2 Ensayo con trazadores

Se desea obtener una concentración media de cloruros de 50 mg/L, utilizando como trazador cloruro de sodio, con un grado de pureza de 90%. Es necesario dosificar instantáneamente:

$$P = \frac{V \times K \times C}{10^3 \times I} = \frac{192 \times 1,65 \times 50}{1000 \times 0,90} = 17,6 \text{ kg} = 18 \text{ kg}$$

Una vez agregado el trazador, se tomaron muestras en frascos numerados a la salida del floculador, cada dos minutos en la primera etapa, cada minuto en la segunda etapa y cada cinco minutos en la etapa final. Al analizar el contenido de cloruros, se obtuvieron los resultados que se indican en el cuadro 2-8. Este cuadro se elaboró siguiendo el procedimiento indicado en el ejemplo anterior.

4.3.3 Análisis por el método de Wolf-Resnick

Al graficar los datos de las columnas 3 y 8, t/t_0 y $1-F(t)$ en escalas aritméticas-logarítmicas, se pudo determinar la curva de cantidad de trazador que permanece en el floculador en un tiempo determinado (figura 2-21). Trazando la tangente a la curva, se obtienen los siguientes datos:

$$\theta = 0,85$$

$$\frac{t_1}{t_0} = 0,85$$

$$\frac{t_2}{t_0} = 1,40$$

Aplicados estos datos en la ecuación (22), se obtiene:

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}} = \frac{1}{1,40 - 0,85} = 1,82$$

Para calcular el flujo de pistón, se utiliza la fórmula (18):

$$p = \frac{\theta \tan \alpha}{0,453 + \theta \tan \alpha} = \frac{0,85 \times 1,82}{0,435 + 0,85 \times 1,82} = 0,78$$

$$p = 78\%$$

Por medio de la ecuación (19) se determina el porcentaje de espacios muertos:

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} = 1 - \frac{0,85}{0,78} = -0,00$$

$$m = 0\%$$

El flujo mezclado se calcula por la ecuación (20):

$$M = 1 - P = 1 - 0,78 = 0,22; \quad M = 22\%$$

Cuadro 2-8. Ensayo de trazadores en un floculador de pantallas de flujo vertical (I)

Muestra (1)	t (2)	t/to (3)	C (4)	C-Co (5)	$\Sigma(C-Co)$ (6)	F(t) (7)	1-F(t) (8)
0	0	0	8,0	0	0	0	100
1	2	0,16	8,0	0	0	0	100
2	4	0,31	8,0	0	0	0	100
3	6	0,47	8,0	0	0	0	100
4	8	0,63	36,0	28	28	2,85	97,15
5	9	0,70	63,0	55	83	8,43	91,57
6	10	0,78	95,0	87	170	17,28	82,72
7	11	0,86	95,0	87	257	26,12	73,88
8	12	0,94	135,0	127	384	39,02	60,98
9	13	1,02	141,0	133	517	52,54	47,46
10	14	1,09	146,0	138	655	66,57	33,43
11	15	1,17	111,0	103	758	77,03	22,97
12	16	1,25	85,0	77	835	84,86	15,14
13	17	1,33	81,0	73	908	92,28	7,72
14	19	1,48	42,0	34	942	95,73	4,27
15	21	1,64	26,0	18	960	97,76	2,24
16	23	1,80	20,0	12	972	98,78	1,22
17	25	1,95	16,0	8	980	99,59	0,41
18	30	2,34	12,0	4	984	100	0
19	35	2,73	8,0	0	984	100	0

4.3.4 Análisis por el método de la curva de tendencia

Los datos de las columnas 2 y 5 del ensayo de trazadores (cuadro 2-8) sirven para elaborar la figura 2-22, a partir de la cual se determina:

Tiempo de aparición del trazador $t_i = 6,00$ min.

Tiempo modal (máxima concentración) $tp = 13,70$ min.

Tiempo para que atraviese la totalidad del trazador $tf = 35,0$ min.

Valores auxiliares:

$tb = 14,5$ min

$tc = 6,9$ min

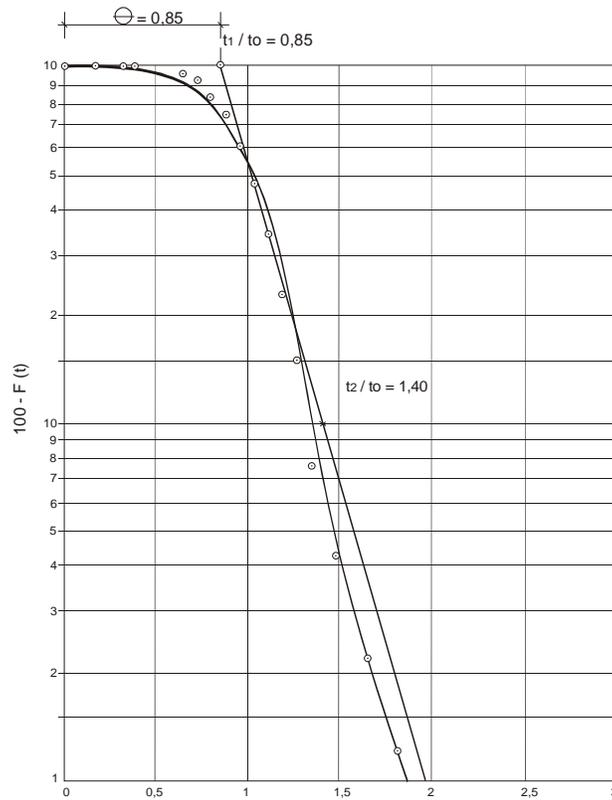


Figura 2-21. Aplicación del método de Wolf y Resnick al floculador hidráulico (1)

El tiempo mediano (t_m), correspondiente al paso de 50% del trazador, se obtiene interpolando los siguientes datos de las columnas (2) y (7):

	Tiempo	$\Sigma(C - C_0)$
	12	39,02
	<u>13</u>	<u>52,54</u>
Diferencia	1	13,52
	X	(50 - 39,02 = 10,98)

$$X = \frac{10,98 \times 1}{13,52} = 0,81$$

Entonces, el valor de tm será:

$$tm = 12 + 0,81 = 12,81$$

Aplicando los conceptos teóricos presentados en la subsección 2.2, se obtienen los resultados del cuadro 2-9.

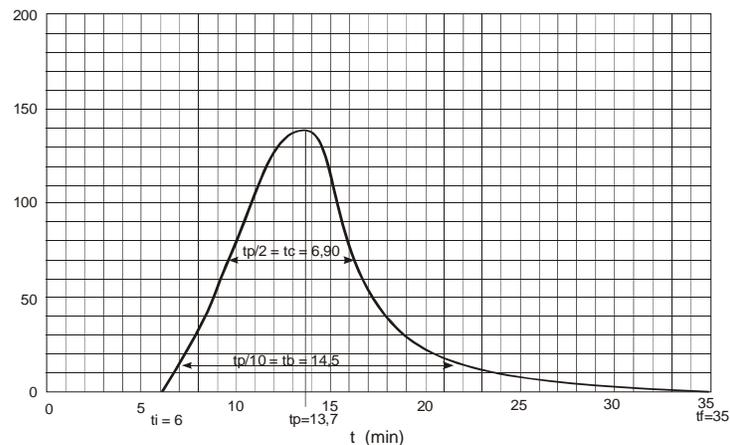


Figura 2-22. Variación de la concentración del trazador en el floculador hidráulico (I)

Cuadro 2-9. Resultados del análisis de la curva de concentración del trazador en el efluente del floculador hidráulico de flujo vertical (I)

Criterio	Consecuencia
$\frac{t_i}{t_o} = \frac{6,0}{12,8} = 0,47$	Presentación de flujos de pistón y mezclado
$\frac{tm}{t_o} = \frac{12,81}{12,8} = 1$	No se presentan cortocircuitos ni espacios muertos
$\frac{tp}{t_o} = \frac{13,7}{12,8} = 1,07$	Existe predominio de flujo de pistón
$e = \frac{(tf - tp) - (tp - ti)}{t_o}$ $e = \frac{(35 - 13,7) - (13,7 - 6)}{12,8} = 0,80$	Predominio de flujo de pistón con valor sobre 65%

4.3.5 Índice de Morrill

Al graficar los datos de las columnas 2 y 7, t y $F(t)$ en papel logarítmico-probabilidades, se obtiene la figura 2-23, que permite calcular el índice de Morrill.

$$I_M = \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{17,00}{8,70} = 1,95$$

Lo cual indica la existencia de los dos tipos de flujos: pistón y mezclado.

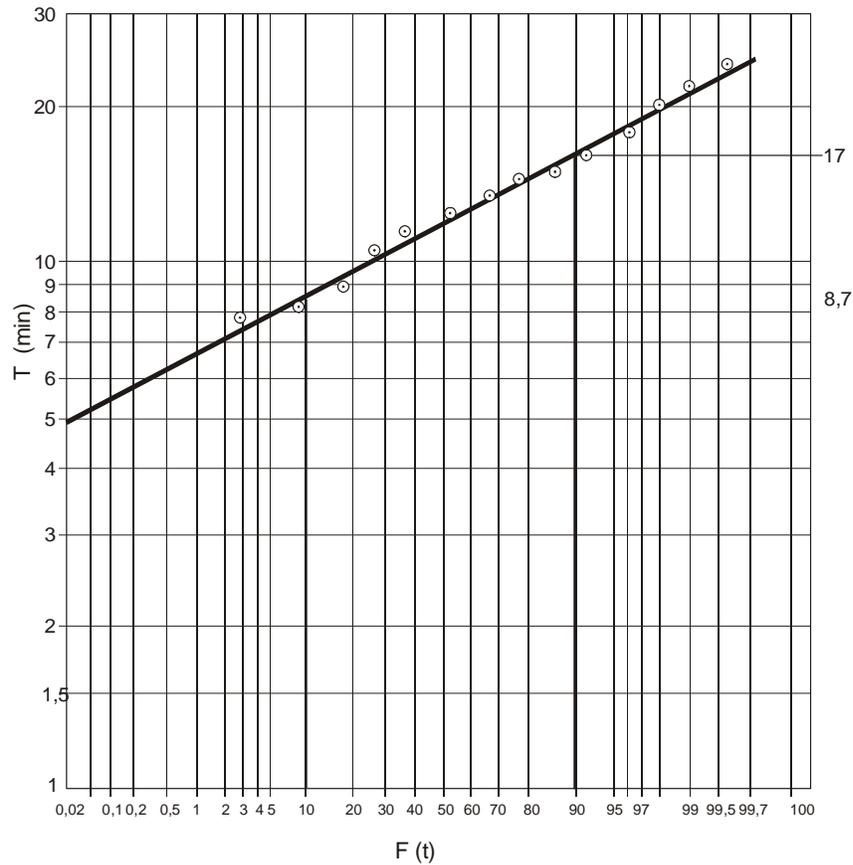


Figura 2-23. Índice de Morrill. Floculador hidráulico de flujo vertical (1)

4.3.6 Conclusiones

- En el floculador se está produciendo principalmente flujo de pistón (78%), pero la forma de pequeñas celdas o unidades en serie origina flujo mezclado (22%).
- Por otra parte, no se presentan cortocircuitos ni espacios muertos apreciables, que podrían afectar el tiempo de retención, haciendo que los tiempos de retención teórico y real sean relativamente iguales.
- Desde el punto de vista hidráulico, el presente reactor es eficiente, aunque no ideal, pues presenta un porcentaje alto de flujo mezclado.

4.4 Determinación de las características hidráulicas de un sedimentador rectangular de flujo horizontal

Se presentan a continuación los resultados de las características hidráulicas de una unidad de sedimentación de flujo horizontal que se puede apreciar en la figura 2-24. Las características geométricas de la unidad se indican en la figura 2-25. Se puede apreciar que el agua floculada ingresa por el fondo de la unidad.



Figura 2-24. Vista del decantador de flujo horizontal (2)

4.4.1 Tiempo teórico de retención

Con un caudal de 250 L/min y un volumen del sedimentador de 1.672 m³, el tiempo teórico de retención es:

$$T_o = \frac{V}{Q} = \frac{1.672}{0,250 \times 60} = 111,47 \text{ min}$$

Se desea obtener una concentración media de cloruros de 30 mg/L utilizando cloruro de sodio con un grado de pureza de 90%. Es necesario dosificar instantáneamente:

$$P = \frac{V \times K \times C}{10^3 \times I} = \frac{1.672 \times 1,65 \times 30}{1.000 \times 0,90} = 91,96 \text{ kg} = 92 \text{ kg}$$

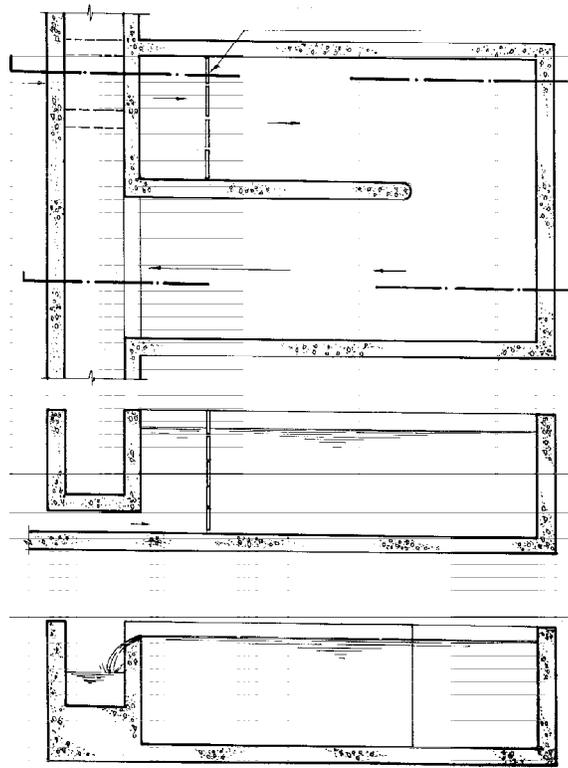


Figura 2-25. Sedimentador de flujo horizontal (1)

4.4.2 Ensayo con trazadores

Una vez agregado el trazador, se tomaron muestras en frascos numerados, a la salida del sedimentador, cada 10 minutos. Al analizar el contenido de cloruros de cada muestra, se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro 2-10.

Cuadro 2-10. Resultados de la prueba de trazadores en el sedimentador de flujo horizontal (I)

Muestra (1)	t (min) (2)	t/to (3)	C (4)	C-Co (5)	$\Sigma(C-Co)$ (6)	F(t) (7)	1-F(t) (8)
1	10	0,09	16	8	8	5,12	94,88
2	20	0,18	20	12	20	12,80	87,20
3	30	0,27	20	12	32	20,48	79,52
4	40	0,36	14	6	38	24,32	75,68
5	50	0,45	20	12	50	32,00	68,00
6	60	0,54	26	18	68	43,52	56,48
7	70	0,63	22	14	82	52,48	47,52
8	80	0,72	20	12	94	60,16	39,84
9	90	0,81	16	8	102	65,28	34,72
10	100	0,90	16	8	110	70,40	29,60
11	110	0,99	16	8	118	75,52	24,48
12	120	1,08	14	6	124	79,36	20,64
13	130	1,17	14	6	130	83,20	16,80
14	140	1,26	12	4	134	85,76	14,24
15	150	1,35	12	4	138	88,32	11,68
16	160	1,44	12	4	142	90,88	9,12
17	170	1,53	12	4	146	93,44	6,56
18	180	1,61	12	4	150	96,00	4,00
19	190	1,70	12	4	154	98,56	1,44
20	200	1,79	10	2	156	100	0
21	210	1,88	8	0	156	100	0

4.4.3 Análisis por el método de Wolf-Resnick

Siguiendo los procedimientos indicados en los ejemplos anteriores, se preparó la figura 2-25 y se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\theta = 0,20$$

$$\frac{t_1}{t_0} = 0,20$$

$$\frac{t_2}{t_0} = 1,20$$

$$\tan \alpha = 1,0$$

Flujo de pistón = 31,5%
 Espacios muertos = 36,5%
 Flujo mezclado = 68,5%

4.4.4 Análisis por el método de la curva de tendencia

Siguiendo la metodología de los ejemplos anteriores, se elaboró la figura 2-26, en la cual se puede apreciar la presencia tanto de cortocircuitos hidráulicos como de espacios muertos y asimetría del lado derecho de la curva.

4.4.5 Índice de Morrill

$$I_M = \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{17,00}{1,60} = 10,63$$

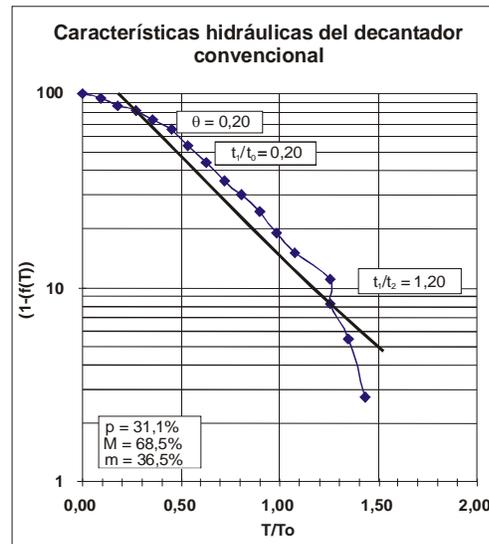


Figura 2-26. Características hidráulicas del decantador convencional (I)

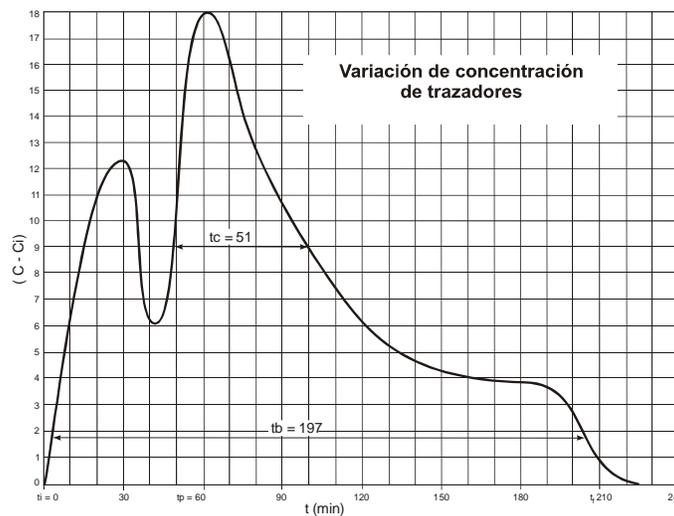


Figura 2-27. Variación de la concentración del trazador (I)

4.4.6 Conclusiones

El sedimentador se caracteriza por presentar fenómenos que no deben existir en una unidad de sedimentación:

- Predominio de flujo mezclado (46%) sobre flujo de pistón (31%), cuando un sedimentador debe tener por lo menos 60% de flujo de pistón y 40% de flujo mezclado.
- Presencia de cortocircuitos apreciables: 63% del total del trazador pasa antes del periodo teórico de retención.
- Presencia de 23% de espacios muertos.

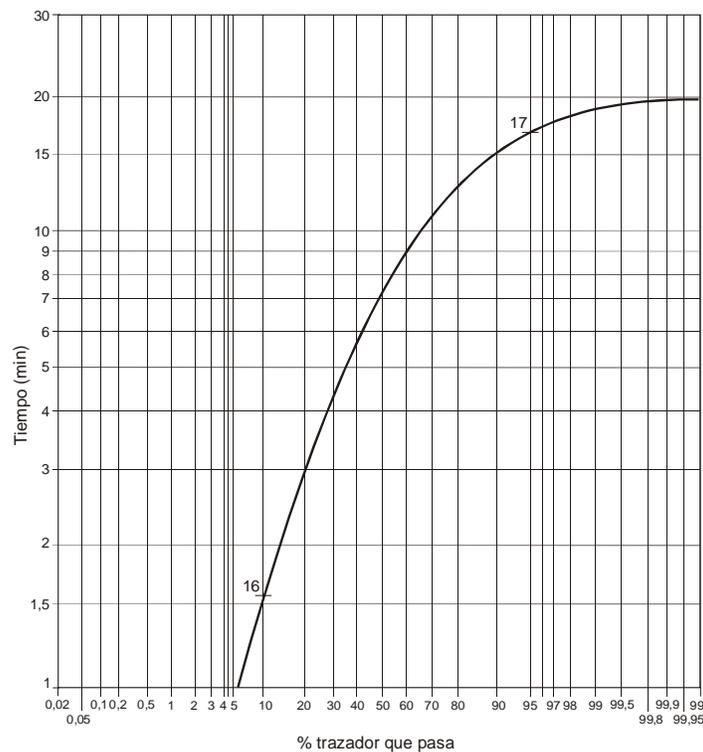


Figura 2-28. Índice de Morrill. Sedimentador de flujo horizontal (I)

5. OTRAS APLICACIONES IMPORTANTES

A continuación se desarrollan otras aplicaciones importantes de la prueba de trazadores.

5.1 Medición de caudales

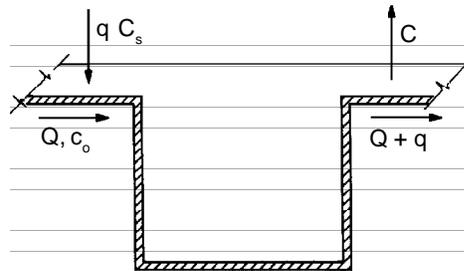
En la operación y evaluación de una planta de tratamiento de agua comúnmente se presentan dos problemas:

- Determinación de caudales de entrada o salida de la planta, con el fin de calibrar los instrumentos de medición.
- Determinación de caudales distribuidos a cada unidad de tratamiento, con el fin de determinar parámetros operacionales o calibrar instrumentos.

Estos problemas pueden resolverse utilizando procedimientos convencionales de aforo directo (orificios, vertederos, etcétera), indirecto, medición de velocidades (uso de molinetes, flotadores, etcétera) o preferentemente utilizando trazadores, lo cual se analiza a continuación.

5.1.1 De entrada a la planta

- a) Teoría básica. Por medio de un dosificador tal como el indicado en la figura 28, se agrega una solución con un caudal (q , L/s) y una concentración de trazador (c_s , mg/L) a una estructura en la cual está fluyendo un caudal (Q , L/s) con una concentración inicial de c_o , mg/L . Si se toma una muestra de agua y se determina su concentración final (c , mg/L), y se hace un balance de masas en la entrada y salida, se tiene:



$$Q \cdot c_o + q c_s = (Q + q) c \quad (31)$$

Figura 2-29. Dosificador para aplicación constante (1)

Despejando, se obtiene el caudal que está pasando por la estructura:

$$Q = \frac{q(c_s - c)}{(c - c_o)} \quad (32)$$

- b) Aplicación. En una planta de tratamiento se trató de calibrar un medidor Parshall con un ancho de garganta de 30,5 cm. La ecuación general que correlaciona altura de agua con los caudales tiene la forma:

$$Q = Kh^n \quad (32)$$

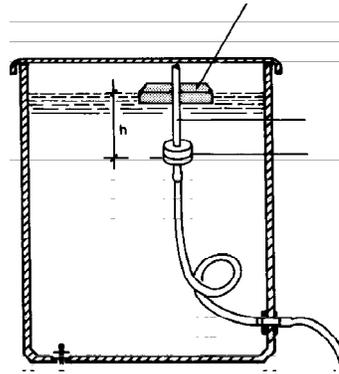


Figura 2-30. Unidad para aplicación continua de trazador

En la cual:

- Q = caudal (L/s)
 h = Altura de agua en la sección de medición (cm)
 K, n = Constantes específicas de la unidad construida

Se utilizó como trazador sal común (cloruro de sodio) aplicada en forma continua. Los resultados de los ensayos se detallan en las seis primeras columnas del cuadro 2-11.

Cuadro 2-11. Medición de caudales (I)

Ensayo n.º (1)	h_c (cm) (2)	q (L/seg) (3)	c_o (mg/L Cl) (4)	c_s (mg/L Cl) (5)	c (mg/L Cl) (6)	Q (L/seg) (7)
1	15,35	0,132	5,94	13,094	56,6	33,97
2	18,75	0,136	6,93	16,864	51,2	51,65
3	21,35	0,136	5,90	16,020	37,6	68,57
4	24,65	0,132	6,90	19,054	35,6	82,87
5	25,25	0,132	6,90	19,046	36,6	84,5

Los caudales se obtienen de la siguiente forma:

$$Q = \frac{q(c_s - c)}{(c - c_o)} = \frac{0,132(13,094 - 56,6)}{(56,6 - 5,94)} = 33,97 \text{ L/s}$$

Tomando logaritmos, la ecuación 37 puede expresarse como:

$$\text{Log } Q = \text{Log } K + n \text{ Log } h \tag{34}$$

Aplicando la teoría de los mínimos cuadrados a la ecuación de una recta con los resultados obtenidos, resulta la información del cuadro 2-12.

Cuadro 2-12. Análisis de regresión (I)

h	x = log h	Q	= log Q
15,35	1,186	33,97	1,531
18,75	1,273	51,65	1,713
21,35	1,329	68,57	1,836
24,65	1,392	82,87	1,918
25,25	1,402	84,50	1,927

De donde:

$$\text{Log } K = 0,639, \quad K = 0,230 \text{ y } n = 1,842$$

Resultados que una vez sustituidos en la ecuación 33 nos permiten establecer la ecuación final de aforo del Parshall con un grado de ajuste de $r^2 = 0,99$.

$$Q = 0,23 h^{1,842} \tag{35}$$

5.1.2 De entrada a cada unidad

- a) Teoría básica. Para encontrar el caudal que está entrando a cada unidad en serie, se requiere conocer:

El caudal total (Qt)

La concentración inicial del trazador en el agua (C_o)

El número de unidades en serie (n)

En un punto común antes de entrar a las unidades se añade un peso determinado de trazador en completa disolución. Se toman simultáneamente muestras a la entrada de cada unidad durante un tiempo prudencial y se obtiene para cada unidad una curva de variación tal como la indicada en la figura 2-31.

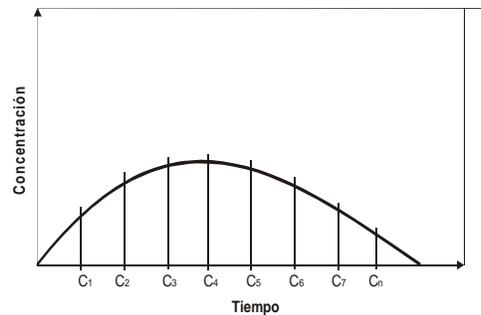


Figura 2-31. Variación de concentraciones en cada unidad (I)

La concentración total que ha entrado en la unidad será:

$$C_N = c_1 + c_2 + \dots + c_n$$

Las masas de trazador que entran a cada unidad (figura 32) serán:

$$M_1 = Q_1 \times C_1$$

$$M_2 = Q_2 \times C_2$$

$$M_n = Q_n \times C_n$$

y así sucesivamente, haciendo que la masa total sea proporcional al caudal total. El caudal que entra a cada unidad será proporcional a la masa de trazador que ingresa a la respectiva unidad (figura 2-32).

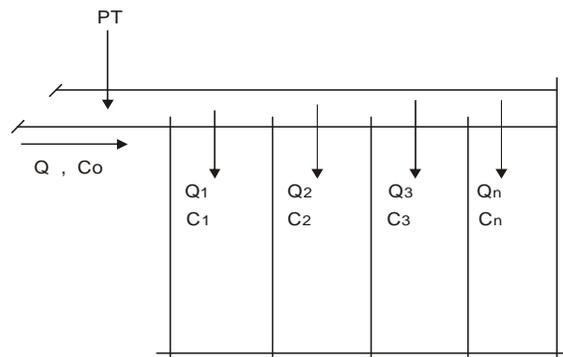


Figura 2-32. Balance total de masas (I)

Aplicación práctica

Una planta de tratamiento de agua de América Latina tiene cuatro decantadores conectados en serie. Durante el proceso de evaluación de dicha planta se utilizó el ensayo de trazadores (solución de cloruro de sodio) dosificado instantáneamente a la salida de los floculadores. Se tomaron muestras a la entrada de cada decantador y se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro 2-13.

Cuadro 2-13. Concentraciones medidas a la entrada de los decantadores (I)
 $Q = 920 \text{ L/s}$, $c_o = 5 \text{ mg/L}$

Muestra	Tiempo (m)	Decantadores							
		n.º 1		n.º 2		n.º 3		n.º 4	
		c mg/L	c-c _o mg/L						
1	0,0	10	-	10	-	10	-	10	-
2	0,5	15,5	5,5	10	-	10	-	10	-
3	1,0	22,5	12,5	12	2	10	-	10	-
4	1,5	20	10,0	17	5	12	2	10	-
5	2,0	17	7,0	20	10	15	5	12	2
6	2,5	15,0	5,0	18	8	20	10	14	4
7	3,0	12,0	2,0	17	7	15	5	18	8
8	3,5	10,0	-	12	2	13	3	15	5
9	4,0	10,0	-	12	2	12	2	12	2
10	4,5	10,0	-	10	-	11	1	12	2
11	5,0	10,0	-	10	-	10	-	10	-
12	5,5	10,0	-	10	-	10	-	10	-
13	6,0	10,0	-	10	-	10	-	10	-
Total		C ₁ = 42,0		C ₂ = 36,0		C ₃ = 28,0		C ₄ = 23,0	

Aplicando la última ecuación, se obtuvieron los caudales de entrada a cada decantador (col. 3) en la siguiente forma:

$$q_1 = \frac{C_1 \times Q}{\sum c} = \frac{42 \times 920}{129} = 299$$

Cuadro 2-14. Caudales de entrada a cada decantador (1)

Decantador n.º (1)	$\Sigma(c-c_0)$ (2)	Caudal (L/s) (3)
1	42	299
2	36	256
3	28	200
4	23	165
Total	129	920

REFERENCIAS

- (1) Pérez Carrión, J. M. Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención, tomo II. Manual de evaluación. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS/OPS, 1992.
- (2) Canepa de Vargas, L. Fotos y proyectos de archivos personales. Lima, CEPIS/OPS.
- (3) Hirsch, A. A. "Basin Tracer Curves Interpreted by Basic Analytics". *Journal ASCE*, 95, SA6, 1969.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Arboleda, J., Grimplastch, B. S. y Kirchmer, C. J. *Métodos de evaluación de procesos de plantas de tratamiento de agua*. Borrador para revisión. Lima, CEPIS/OPS, 1974.
- Fitch. "Flow Patch Effect on Sedimentation". *Sewage and Industrial Wastes*, enero, 1956, pp. 1-9.
- Coppocok, E. *Evaluation of Settling Basin Performance*. New Haven, Connecticut, 1976.
- Wallace, A. "Design and Analysis of Sedimentation Basins". *Journal of Water and Sewage Waste*, 1976, prog. R-219-R-222.
- Crosby y Bender. *Hydraulic Considerations that Affect Secondary Clarifier Performance*. EPA, 1980.
- Takamatsu y Naito. "Effects of Flow Conditions on the Efficiency of a Sedimentation Vessel". *Water Research*, 1967, vol. 1, pp. 437-450.
- Hart. "Improved Hydraulic Performance of Chlorine Contact Chambers". *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. (51) 12, pp. 2.868-2.875.

Dauls and Wills. "Flow Patterns in a Rectangular Sewage Sedimentation Tank". *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. (34) 3, pp. 241-242.

Hudson. "Residence Times in Pretreatment". *Journal of the American Water Works Association*, enero, 1975, pp. 45-52.

Wolf-Resnick. *Residence Time Distribution in Real Systems*. Haifa, Israel Institute of Technology, Chemical Engineering Dept., 1963.

Hart y Gupta. "Hydraulic Analysis of Model Treatment Units". *Journal of Environmental Engineering Division*, agosto, 1978, pp. 785-797.