

## **CAPÍTULO 11**

### **CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS PROCESOS Y DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS UNIDADES**

*Ing. Lidia de Vargas*

En este capítulo trataremos sobre los criterios y procedimientos para seleccionar las alternativas de tratamiento de acuerdo con las variaciones de calidad de la fuente, así como los criterios para determinar los parámetros óptimos de diseño y de operación de las unidades de tratamiento, en función de la calidad del agua que se va a tratar.

## **1. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DE LA FUENTE**

Para efectuar la selección de las alternativas de tratamiento, es necesario reunir información sobre la calidad de la fuente que nos permita conocer sus variaciones a lo largo del tiempo. Con esta finalidad deben programarse varios muestreos de la fuente que comprendan por lo menos un ciclo estacional completo: estiaje y creciente, a fin de recopilar información suficiente para conocer las variaciones de calidad e identificar los parámetros de calidad que constituyen un problema. Estos son aquellos parámetros que exceden los niveles máximos indicados en las normas de calidad de agua para consumo humano principalmente locales, y para los parámetros no especificados en estas normas, los valores guía de la OMS y las recomendaciones de la EPA. Los parámetros de calidad decisivos para seleccionar la alternativa de tratamiento adecuada son los siguientes:

- turbiedad y/o color;
- NMP de coliformes termotolerantes/100 mL de muestra;
- conteo de algas.

En los casos en que haya otra planta abasteciéndose de la misma fuente, la información de los archivos de control de calidad del agua que ingresa a esta planta será de mucha ayuda para conocer el comportamiento de la fuente. Debido también a que se producen ciclos de seca y ciclos lluviosos, sería deseable obtener información de varios años, que permita conocer estas variaciones a través del tiempo.

Se precisan, además, análisis físicoquímicos completos de las épocas de características extremas (estiaje y creciente), para determinar los parámetros de calidad que exceden los límites establecidos por las normas locales y/o internacionales.

Las fuentes de abastecimiento que aún no han sido sujetas a tratamiento para consumo humano tal vez constituyan el caso más laborioso en cuanto a la obtención de información suficiente para determinar las alternativas de tratamiento. En este caso, será necesario programar la realización de una serie de muestreos en las épocas críticas, cuya duración dependerá de la importancia del estudio y de los recursos disponibles.

Lo ideal será realizar por lo menos un muestreo semanal durante los meses más representativos de las épocas de estiaje y creciente. Lo mínimo aceptable sería disponer, por lo menos, de información acerca de la época de creciente o de lluvias, que es la determinante en cuanto a la selección del tratamiento, porque al diseñar el proyecto de planta, la podemos dejar preparada para operar con filtración directa, lo cual no implica un costo adicional en la construcción del sistema. Para esto solo se acomodan apropiadamente las unidades de la planta de tal modo que se tenga acceso directo de la mezcla rápida al canal de distribución a los filtros. Durante la operación del sistema, si la filtración directa es conveniente o necesaria, podrá ser implantada sin problema alguno.

Todos los datos obtenidos sobre la turbiedad, el color, la alcalinidad, el pH y el NMP/100 mL de muestra se procesan en histogramas de valores promedio, máximos y mínimos mensuales y curvas de frecuencia acumulada.

Una vez procesada la información y obtenidas las curvas indicadas, la analizamos en relación con los criterios indicados en los cuadros 3-1, 3-2, 3-3 y 3-4 de este mismo manual.

Este estudio debe realizarse como parte del estudio de factibilidad de un sistema, de tal manera que el grado de tratamiento que la fuente requiere ya esté definido antes de licitar o contratar la realización del proyecto. Los parámetros de diseño de la planta también deben ser determinados en esta etapa, de tal manera que se pueda especificar claramente en los términos de referencia del proyecto el grado de tratamiento que la fuente requiere y los parámetros bajo los cuales se debe proyectar cada una de las unidades que van a conformar el sistema. Los

procedimientos de laboratorio para determinar estos parámetros de diseño se tratarán mas adelante en este mismo capítulo.

Al finalizar este capítulo, desarrollaremos algunos ejemplos de estudios de selección de diferentes alternativas de tratamiento y determinación de parámetros de diseño.

## **2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LOS PROCESOS**

La determinación de los parámetros de los procesos mediante simulación en el laboratorio es necesaria en la fase de proyecto para determinar las dimensiones de las unidades de la planta o para rehabilitar u optimizar sistemas existentes. Durante la evaluación de un sistema, ello servirá para determinar si las unidades están operando de acuerdo con las condiciones que el agua requiere y durante la operación de una planta, permitirá ajustar los procesos a las mencionadas condiciones.

### **2.1 Fundamentos**

Investigaciones realizadas en las últimas décadas (1, 2, 3, 4) han demostrado que para cada tipo de agua existen parámetros de diseño específicos que optimizan los procesos y producen la máxima eficiencia remocional.

En el proceso de coagulación, O'Melia y Stumm (1) han demostrado la existencia de una dosis óptima que varía en función del pH y de la concentración de coloides presente en el agua cruda. Los autores encontraron que con dosis menores que la óptima no se desestabilizan los coloides y con dosis mayores, se pueden llegar a reestabilizar, lo que deteriora la calidad del efluente. En floculación, Villegas y Letterman (2) demostraron que la dosis óptima ( $D$ ), el tiempo de retención ( $T$ ) y el gradiente de velocidad ( $G$ ) interactúan de acuerdo con la relación  $GT^n = K$ , en la cual ( $n$ ) y ( $K$ ) dependen de cada tipo de agua.

Argaman y Kaufman (3) demostraron también que para obtener una eficiencia dada, existe un tiempo de retención mínimo, que corresponde a un determinado valor de gradiente de velocidad y que por debajo de este valor mínimo, ya no se consigue la misma eficiencia, no importa cuál sea el gradiente de velocidad aplicado en el proceso. Dejaron establecido que para cada tiempo de retención

dado, existe un gradiente de velocidad que optimiza el proceso y que, al ser superado, se rompe el flóculo, lo que causa el deterioro de la calidad del efluente.

A partir de la aplicación de estos criterios, posteriormente (5) se comprobó que la variación de estos parámetros produce un decrecimiento en la eficiencia de los procesos, lo que produce una calidad de agua inferior, generalmente con un consumo mayor de sustancias químicas.

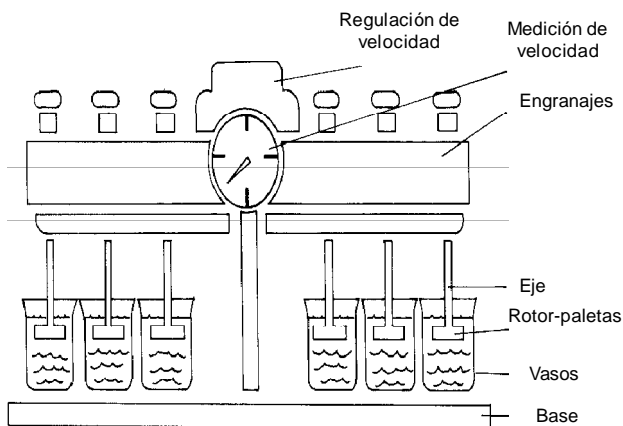
Con la misma metodología usada en estas investigaciones (1, 2, 3) y con los recursos normalmente disponibles en los laboratorios de las plantas de tratamiento, se han elaborado procedimientos para la determinación de estos parámetros, de manera de obtener la máxima eficiencia posible, mediante la aplicación de los criterios expuestos (6, 7, 8).

## 2.2 Equipos utilizados

### 2.2.1 Antecedentes

En el laboratorio, uno de los equipos más usados en el tratamiento de las aguas como elemento de control de la coagulación es el equipo de prueba de jarras. G. W. Fuller, J. Cairol y E. Theirault son precursores de la prueba de jarras como modelo predictivo.

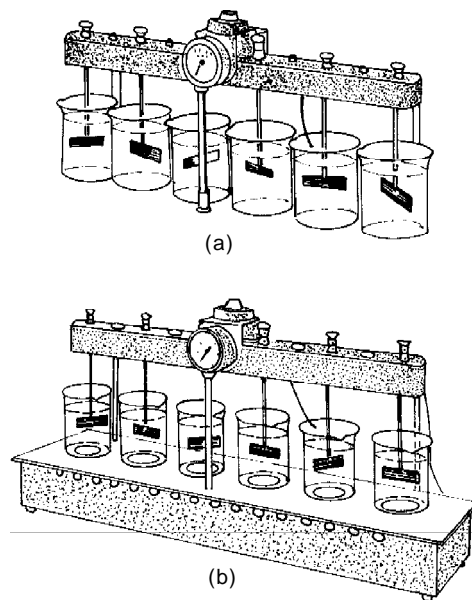
De acuerdo con la información obtenida, probablemente el primer ensayo de prueba de jarras fue realizado por W. L. Langelier en la Universidad de California en 1918. Las primeras aplicaciones y el desarrollo inicial corresponden a John Baylis, Bartow y Petterson, Fleming, Nolte y Kromer.



**Figura 11-1.** Equipo de prueba de jarras (9)

Aportes tecnológicos posteriores fueron realizados por Tolman, Niekel, Gekershausen, Langelier-Ludwig, Cross et al., C. Henry, Smith, Straub, Elliassen, Norcon, Cox y otros, que perfeccionan continuamente el ensayo y lo aplican con éxito a diversas condiciones de coagulación de las aguas. Estos autores orientaron principalmente el modelo de prueba de jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación.

### 2.2.2 Descripción del equipo de prueba de jarras utilizado



Para efectuar los ensayos de simulación de procesos, existen algunas variaciones en el equipo tradicional, que son descritas en la literatura. Aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas (figura 11-2).

Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- Figura 11-2.** Equipo de prueba de jarras (9)
- Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto).
  - Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
  - Vasos de precipitado de 2 litros de capacidad, de cristal refractario, tal como se presentan en la figura 11-3.

A continuación se analizarán algunos de los componentes más importantes.

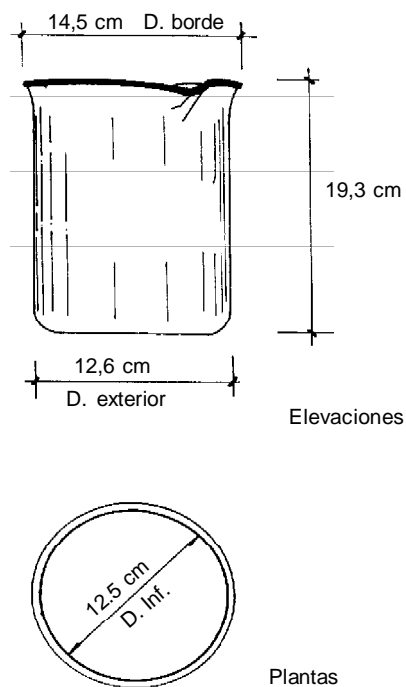
### 2.2.3 Sistema de dosificación

Las unidades de agitación múltiple usadas en las pruebas de coagulación deben ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra. Este equipo es importante cuando una sola persona realiza la prueba.

La mayoría de los equipos comerciales olvidan este detalle, que es la causa de muchos resultados erróneos. Los estudios muestran que las diferencias que existen en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos pueden afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación. También puede alterar los resultados la velocidad de adición, que debe ser lo más rápida posible.

La práctica usual de adicionar coagulantes a cada vaso mediante el uso de una pipeta graduada no puede ser desechada en forma radical, pero la velocidad de adición del reactivo químico es muy lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidez requerida para avanzar con la dosificación.

Una manera simple de evitar estas dificultades es medir las cantidades de coagulante que se van a aplicar a cada jarra con una pipeta y verterlo en vasitos, de los cuales se succiona mediante jeringas hipodérmicas desechables, provistas de su aguja. Se llena cada jeringa con la dosis respectiva, se retira la aguja y se la coloca delante la jarra correspondiente, en un soporte de madera especialmente



**Figura 11-3.** Jarras de precipitado de 2 litros (9)

acondicionado que se instala en el puente superior del equipo, en el cual se han horadado de 6 a 12 agujeros en los que se colocan las jeringas hipodérmicas. Al momento de aplicar el coagulante, con el equipo funcionando y programado con los tiempos y gradientes adecuados, se aplasta una banda de madera que presiona los émbolos de todas las jeringas lo más rápido posible (máximo: 5 segundos). Esto permite la aplicación simultánea e instantánea en todas las jarras. Este equipo auxiliar permite que una sola persona ejecute toda la prueba. Si no se dispone de este equipo, se requiere de por lo menos tres personas para efectuar una aplicación correcta, considerando que cada una aplica a dos jarras, una de ellas da la voz indicando el tiempo de inicio de la prueba y la otra acciona el equipo.

En general, se recomienda aplicar la dosis de coagulante muy cerca del agitador, con el equipo operando con el gradiente de mezcla y aplicando exactamente lo que se debe efectuar en el mezclador de la planta. Los equipos de prueba de jarras automáticos, que permiten velocidades de hasta 300 revoluciones por minuto, son ideales para efectuar simulación de procesos, y en ellos la bondad de los resultados depende mucho de la exactitud con la que se ejecuta la prueba. Utilizando estos equipos y estatores o deflectores en las jarras, se pueden obtener gradientes dentro del rango recomendable para mezcla rápida, con tiempos tan breves como 5 segundos, al cabo de los cuales el equipo automáticamente cambia para el gradiente de floculación programado.

#### *2.2.4 Sistema de agitación*

- **Descripción del sistema**

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas. En el cuadro 11-1 se detallan las características de las paletas.



Cuadro 11-1. Características de agitadores (9)

Tipo de paleta	Número de paleta	Diámetro (D-cm)	Área proyectada (a-cm)	Observaciones
Plana-1	2	7 y 6	17,5	a
Plana-2	2	7,2	28,8	b
Plana-3	2	7,2	18,4	c
Hélice	3	5,0	4,50	d
Doblada	2	5,0	2,80	

- a) Utilizada en el modelo Phipps y Bird.  
 b) Tipo impulsor marino.  
 c) Utilizada por Florida 1-Environmental specialities.  
 d) Utilizada por Florida 2-Environmental specialities.

Cuando no se utilizan estatores, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos. La inercia producida durante el ensayo de

floculación ocasiona la formación de un helicoide que afecta el proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón, se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo,

tales como los indicados en la figura 11-4.

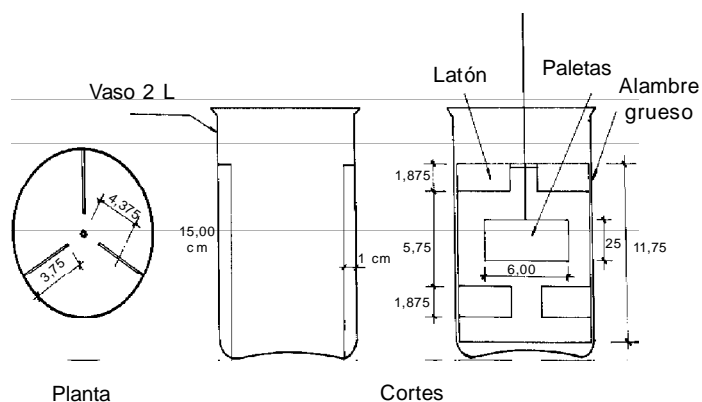


Figura 11-4. Estatores o deflectores (9)

a) *Condiciones teóricas*

El esfuerzo cortante producido entre dos láminas de agua que se deslizan con diferente velocidad está dado por la siguiente fórmula:

$$T = \mu \frac{dv}{ds} \quad (1)$$

en la cual

$$\frac{dv}{ds} = \text{gradiente de velocidad absoluta}$$

La potencia consumida para mover las láminas de agua estará dada por:

$$P = T \frac{dv}{ds} \quad (2)$$

Reemplazando el valor de  $T$ , obtenemos:

$$P = \mu \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 \quad (3)$$

Para un reactor cualquiera, la potencia unitaria dispensada en unidad de tiempo sería:

$$P = \mu G^2 \quad (4)$$

siendo

$G$  = gradiente de velocidad media;

ecuación que permite calcular el valor de  $G$  en función de  $P$  y por unidad de volumen:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (5)$$

$P$  = potencia total

$V$  = volumen del reactor

En el equipo de jarras, la potencia teórica está dada por:

$$P = K. a. C_f N^3 \quad (6)$$

en la cual

- $K$  = coeficiente  
 $a$  = área proyectada de las paletas normal a la dirección tangencial  
 $C_f$  = coeficiente de dragado  
 $N^3$  = velocidad

El coeficiente  $K$  involucra tanto la forma de las paletas como la geometría del vaso.

b) *Determinación del gradiente de velocidad*

Ruey, Hudson, Singley y Camp determinaron los gradientes de velocidad para diferentes tipos de rotores y deflectores. En la figura 11-5 se muestra el ábaco correspondiente a jarras de 2 litros con o sin deflectores.

Los valores indicados en el gráfico pueden ser modificados para cualquier temperatura o volumen, siempre y cuando se mantengan las relaciones geométricas por medio de las relaciones siguientes:

- $G$  = gradiente de velocidad producida por el equipo normalmente utilizado (Phipps y Bird) y vasos de 2 litros de capacidad.

$$G_x = G \sqrt{\frac{\mu}{\mu_x}} \quad (7)$$

- $G_x$  = gradiente de velocidad para una temperatura ( $X$ )

$$G'_x = G \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} \quad (8)$$

- $G'_x$  = gradiente de velocidad para un volumen ( $X$ )

y específicamente para frascos de un litro estará dado por:

$$G' = 1.4 G \quad (9)$$

- $G'$  = gradiente de velocidad de un vaso de 1 litro

o para cualquier área de rotores, por la siguiente expresión:

$$G''x = G \sqrt{\frac{ax}{a}} \quad (10)$$

$G''x$  = gradiente de velocidad obtenida para un área de paletas ( $ax$ )

Como auxiliar de cálculo para la fórmula (7), se incluye el cuadro 11-2.

Nomenclatura:

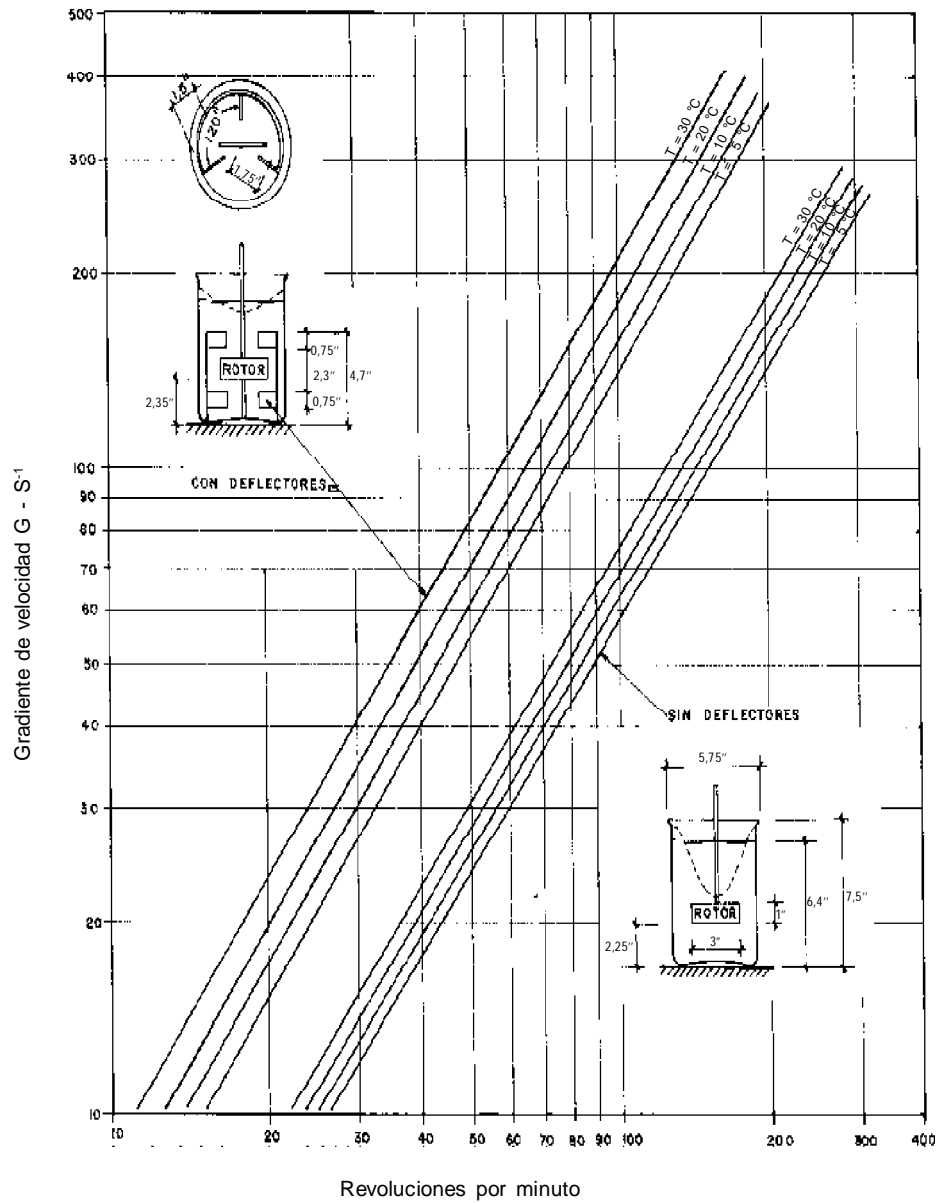
- $\mu$  = Viscosidad absoluta del agua para una temperatura ( $t$ ), la cual determina un gradiente ( $G$ ).
- $\mu_x$  = Viscosidad absoluta del agua para una temperatura diferente de ( $t$ ).
- $V_1$  = Volumen del recipiente para un gradiente ( $G$ ) que normalmente es de 2 litros.
- $V_2$  = Volumen para el cual se desea determinar el nuevo gradiente de velocidad ( $G'x$ ).
- $a$  = Área de paletas del equipo normalmente utilizado (Phipps y Bird).

### 2.2.5 Descripción de las jarras

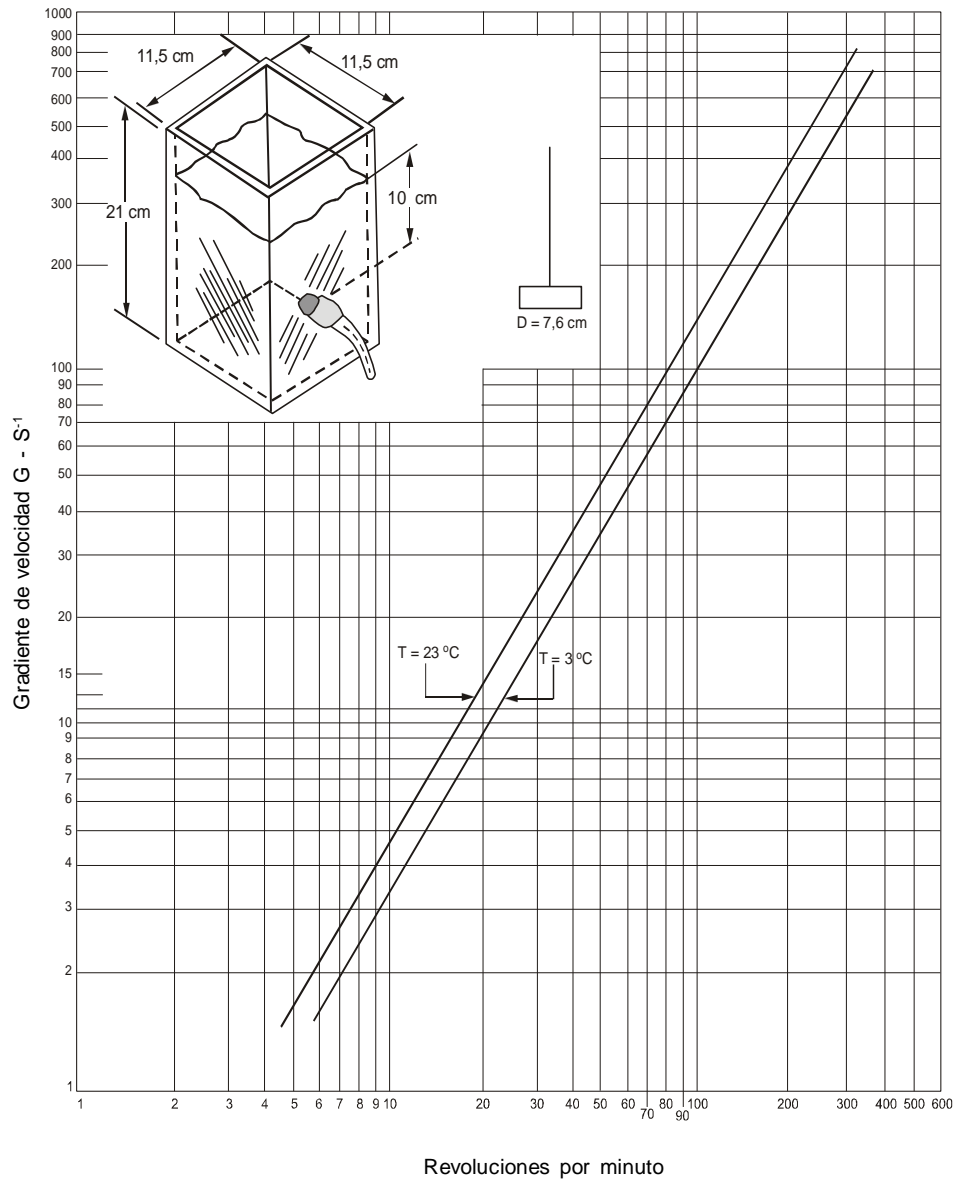
Las jarras o vasos que se van a usar deben poder ser acomodados en el aparato y tener 2.000 mL de capacidad; en caso de no tenerse vasos de este tamaño, podría optarse por vasos de 1.000 mL. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes para obtener muestras satisfactorias del agua sedimentada. Podrían usarse botellas cuadradas, pero antes deben asegurarse las modificaciones producidas por cambio de secciones para el cálculo de gradientes.

En lo posible, debe evitarse el lavado de las jarras con detergentes, ya que muchos de estos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio. Si estos no son completamente removidos, pueden afectar los resultados de las pruebas en forma significativa.

En la figura 11-6 se detallan las características de los vasos.



**Figura 11-5.** Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros. Jarra de sección circular (9)



**Figura 11-6.** Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros. Jarra de sección cuadrada. Desarrollado por la Universidad de Michigan

**Cuadro 11-2. Valores auxiliares para el cálculo de gradientes de velocidad (9)**

Temperatura °C	Viscosidad absoluta $\mu$ (poise)	$\sqrt{\mu}$
0	0,01792	0,1339
1	0,01732	0,1316
2	0,01674	0,1294
3	0,01619	0,1272
4	0,01568	0,1252
5	0,01519	0,1232
6	0,01473	0,1214
7	0,01429	0,1195
8	0,01387	0,1178
9	0,01348	0,1161
10	0,01310	0,1145
11	0,01274	0,1129
12	0,01239	0,1113
13	0,01206	0,1098
14	0,01175	0,1084
15	0,01145	0,1070
16	0,01116	0,1056
17	0,01088	0,1043
18	0,01060	0,1030
19	0,01034	0,1017
20	0,01009	0,1004
21	0,00984	0,0992
22	0,00961	0,0980
23	0,00938	0,0969
24	0,00916	0,0957
25	0,00898	0,0946
26	0,00875	0,0938
27	0,00855	0,0928
28	0,00836	0,0914
29	0,00818	0,0904
30	0,00800	0,0894

#### 2.2.6 Sistema de toma de muestras

Después de la mezcla rápida y la floculación, se tiende a sedimentar en condiciones adecuadas. Los estatores descritos anteriormente ayudan a minimizar la rotación persistente del agua dentro del vaso durante el periodo de sedimentación. Luego se succiona el sobrenadante con una pipeta volumétrica de 50 mL a

la misma profundidad en todos los vasos o por medio de un sifón de 3 mm de tubo de vidrio (véase la figura 11-6). Este sifón debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que sea representativo de una profundidad determinada. El sifón debe ser construido como para dar iguales velocidades de flujo en cada vaso y así disminuir la posibilidad de arrastre de sedimentos. El flujo puede ser regulado mediante una pinza de presión. El sifón está sostenido por un flotador de tecnopor, que va a ayudar a mantener constante la altura de toma de la muestra y el nivel del agua.

Antes de tomar la muestra, se debe descartar, a través del sifón, aproximadamente 10 mL de agua y luego tomar algo más de 30 mL de muestra para la determinación de la turbiedad. Se debe tener un abastecimiento de más o menos 50 vasitos para tomar las muestras. Con algo de práctica y la ayuda de un cronómetro, se pueden obtener controles precisos del tiempo.

### 2.2.7 Iluminación

Para observar el flóculo formado en los vasos, es conveniente, aunque no esencial, una buena iluminación.

Idealmente, los vasos deben estar provistos con una base blanca y una iluminación en ángulo recto a la dirección del observador; por ejemplo, arriba o abajo de los vasos (figura 11-7). Se deben evitar fuentes de luz que generen mucho calor y con un efecto significativo en la coagulación y sedimentación, lo que ocasiona diferencias de temperaturas entre el agua del modelo y la realidad. Ello redundará en la obtención de resultados erróneos.

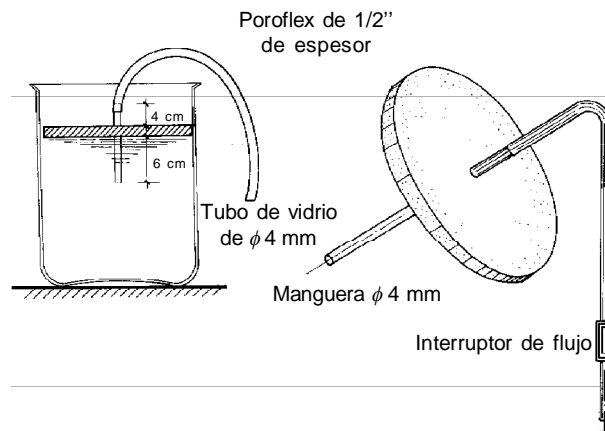


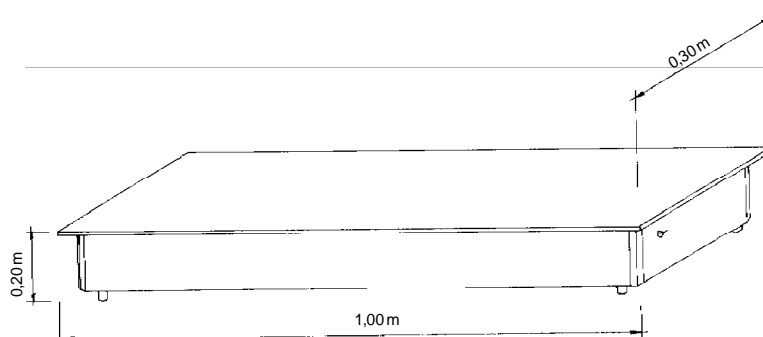
Figura 11-6. Sifón para la toma de muestras (9)



### 2.2.8 Equipo auxiliar

Además de la unidad de agitación, es necesario un cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones comprendidas en las pruebas. También se requieren medidores de turbiedad, pH y color.

#### a) Turbidímetro



**Figura 11-7.** Base iluminada sobre la cual se coloca el equipo de prueba de jarras (9)

La medición de la turbiedad del agua se considera como el parámetro más importante para caracterizar los procesos. La medición de la turbiedad se logra mediante el uso de un turbidímetro convencional que mide la intensidad de la luz que pasa a través de una muestra de agua o la intensidad de la luz que es dispersada por las partículas en suspensión que están presentes en la muestra, generalmente desde una dirección situada a  $90^\circ$  de la dirección original del haz de luz. Un ejemplo de un turbidímetro que en su diseño usa el principio de transmisión es el Hellige. De los que miden la dispersión de la luz, denominados *turbidímetros nefelométricos*, tenemos el Hach 2100-A y el DRT 100 de Estados Unidos. En estos equipos, los resultados deben ser reportados redondeando las cifras, como se indica a continuación:

**Cuadro 11-3. Forma de reportar los resultados en turbidímetros nefelométricos**

Turbiedad (UT)	Usar intervalos de
0 – 10	0,05
1 – 10	0,1
10 – 40	1,0
40 – 100	5,0
100 – 400	10,0
400 – 1.000	50,0
> 1.000	100,0

*b) Medidor de pH*

Desde tiempo atrás, es conocido que la efectividad de la coagulación depende directamente del pH. Debido a ello, la medición de este parámetro antes y después de la floculación tiene importancia básica, por lo cual debe disponerse de un medidor de pH de preferencia potenciométrico. Como alternativa, podría usarse uno colorimétrico.

El pH es un indicador de la concentración de los iones hidrógeno en solución  $pH = \log_{10} (H^+)$  y debería ser leído con una sensibilidad de 0,01 unidades en el medidor de pH con electrodos de vidrio y para referencia de calomel, que dispone de un compensador de temperatura. Este medidor debe ser calibrado con una solución amortiguadora fresca, cuyo pH está en el rango de operación deseada. En general, para la medición de aguas naturales y tratadas en plantas de potabilización, se requiere una precisión de 0,05 unidades.

*c) Comparador de cloro*

En muchos casos existe interés en la remoción del color en lugar de la turbiedad. En estos casos la medición del color residual del agua después de floculada y sedimentada puede servir para caracterizar el ensayo.

Este parámetro puede ser determinado mediante comparación visual con soluciones coloreadas de concentraciones conocidas. También puede compararse con discos especiales de color que han sido previamente calibra-

dos. El método de comparación del platino-cobalto es el establecido como método normalizado y la unidad de color es la producida por un mg/L de platino en la forma de ion de cloroplatinato. La comparación del color se efectúa mediante el uso de tubos Nessler (de la forma alta y de 50 mL).

El color del agua también puede ser determinado, como ya se ha mencionado, por comparación con discos de color ubicados dentro de una caja metálica o de otro material que contiene los tubos comparadores de la muestra y del agua destilada incolora.

Los discos de vidrio dan resultados acordes con los obtenidos por el método de platino-cobalto y su uso es reconocido.

El resultado de la medición de color se expresa como sigue:

**Cuadro 11-4. Forma de expresar los resultados de la medición de color**

Unidades de color	Aproximación a
1 – 50	1
51 – 100	5
101 – 250	10
251 – 500	20

Junto con estos resultados, también se deben reportar los resultados del pH, parámetro del cual depende el color.

d) *Vidriería*

Además de los seis vasos de precipitado o jarras adecuadas, que de preferencia son de 2 litros de capacidad, debe disponerse de pipetas de Mohr de 2 y 10 mL para la adición de coagulantes a los vasos, seis frascos de vidrio de 120 mL, dos buretas con sus respectivos soportes y, por lo menos, 50 vasitos de 50 mL. En lo posible, esta prueba debe efectuarse a la misma temperatura que tiene la planta de tratamiento y es necesario controlarla en diferentes puntos del proceso, para lo cual es conveniente tener un termómetro adecuado.

### *2.2.9 Precauciones y limitaciones*

Con la prueba de jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de floculación y sedimentación en la planta de tratamiento.

Sin embargo, dado el pequeño volumen (1 a 2 L) que tienen los vasos de precipitado, en comparación con el gran volumen de los tanques de floculación reales, la prueba de jarras constituye una reproducción parcial del proceso.

Las razones para esto son de orden físico y químico, y, entre otras, son las siguientes:

- a) En los reactores existe un flujo continuo; en cambio, en las jarras no hay flujo. Esto hace que en los primeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la prueba de jarras, el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo (reactor del tipo de tanda o cochada).
- b) La escala de las jarras no guarda relación con la escala del flóculo, por cuanto este se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores. Por tanto, la proporción entre la escala de la turbulencia que se produce en uno y otro caso y el tamaño del flóculo es diferente, lo que afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.
- c) La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua pueden ser mucho mejor controladas en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento.

No obstante estas deficiencias, la prueba de jarras sigue siendo el método más usual de los que hasta ahora disponemos para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que, por desgracia, suele ser bastante común.

### **2.3 Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras**

En los ensayos experimentales se imponen ciertos controles que sirven para evaluar los efectos producidos al variar el valor del parámetro que está siendo medido. Cuando los ensayos se efectúan con el equipo de prueba de jarras, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) equipo usado para la prueba;
- 2) análisis de laboratorios requeridos;
- 3) dosis de coagulante;
- 4) concentración del coagulante;
- 5) sistema de adición del coagulante;
- 6) dosificación del ayudante de floculación;
- 7) sistema de adición del ayudante de floculación;
- 8) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida;
- 9) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta;
- 10) sistema de toma de muestra.

Entre las observaciones generales que se deben tener en cuenta al ejecutar la prueba de jarras, tenemos:

- a) El tiempo y secuencia de dosificación: en algunas oportunidades el coagulante se adiciona a cada vaso (muestra) a diferentes tiempos según su turno. Tal procedimiento es inefectivo, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación, debido a que el tiempo entre la adición del coagulante y el ayudante siempre es crítico.
- b) En todos los casos, después de dosificados y mezclados los coagulantes con el agua, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:

#### *2.3.1 Soluciones químicas empleadas (1)*

Las soluciones de coagulantes, ayudantes de coagulación y otros productos químicos que se van a usar en las pruebas de coagulación deben ser preparados en concentraciones tales que puedan ser medidas de manera conveniente y precisa. Véase el cuadro 11-5.

En los laboratorios de las plantas de tratamiento es mejor preparar las soluciones para los ensayos con los mismos coagulantes que se usan en la planta y no con reactivos purificados de laboratorio.

**Cuadro 11-5. Soluciones patrón para la prueba de coagulación (9)**

Producto químico	Concentración de la solución patrón o suspensión	Prepare una solución nueva después de	Notas
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$	10% (0,86% Al)	1 ó 2 meses	
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	10% (2% Fe)	1 mes	Renovar la solución si se pone opalescente.
Almidón soluble	0,5%	2 días	Diluir 10 veces inmediatamente antes del uso.
Derivados de poliacrilamida	0,05%	1 mes	La solución debe tener, por lo menos, un día. Diluir 10 veces antes de su uso.
$\text{H}_2\text{SO}_4$	0,1 N	3 meses	
NaOH	0,1 N	1 mes	
Tierra fuller	0,5%	3 meses	Agitar bien antes de usar.

El reactivo principal es la solución de sulfato de aluminio, cloruro o sulfato férrico. Se prepara agregando agua destilada a 100 g de coagulante hasta completar el volumen de 1.000 mL, con lo que se obtiene una solución de 10% que se puede conservar como solución patrón, por uno, dos o tres meses.

El ensayo de prueba de jarras se hace diluyendo 10 mL de la solución patrón hasta completar 100 mL con agua destilada. Queda una solución al 1% que no se puede conservar por más de 24 horas *pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.*

Cuando es necesario, debido a la baja alcalinidad de la muestra, hay que preparar una suspensión de cal añadiendo agua destilada a 10 g de dicho material hasta completar un volumen total de 1.000 mL. Debe anotarse el compuesto de cal que se ha utilizado, CaO o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y evitar el contacto de la suspensión así preparada con el aire, cuyo contenido de  $\text{CO}_2$  puede reaccionar con el óxido de

calcio para formar carbonato que precipita. Antes de usar la suspensión, hay que agitarla.

### 2.3.2 *Tamaño del flóculo producido*

Se observa el tamaño del flóculo producido y se lo evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño puede expresarse en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra o según el índice de Willcomb, que se incluye en el cuadro 6 y la figura 11-9. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, aunque no siempre el mayor tamaño de partículas produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos.

### 2.3.3 *Tiempo inicial de formación del flóculo*

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer indicio de formación de flóculo es uno de los sistemas para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, que ni aún así suele ser fácil, pues cuando el flóculo recién se forma, es casi incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápido no necesariamente es el mejor.

En esta evaluación debe tenerse en cuenta la diferencia de tiempo con que se agregaron los coagulantes a los vasos de precipitado. Si no se dispone de un sistema de aplicación simultánea que vierta la solución en las seis jarras al mismo tiempo, el coagulante tiene que agregarse con intervalos de 10 a 30 segundos en cada vaso y debe marcarse en los mismos, con lápiz de cera, el tiempo de aplicación en la forma siguiente:  $t = 0$  (para el vaso 1),  $t = 10 s$  (para el vaso 2),  $t = 20 s$  (para el vaso 3), etcétera. El tiempo de aparición del primer flóculo será igual al tiempo inicial de aplicación del coagulante a la primera jarra, hasta que se note el primer indicio de flóculo, menos el tiempo que tarde en hacerse la aplicación a la jarra considerada.

Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

**Cuadro 11-6. Índice de floculación de Willcomb (9)**

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta.)
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

#### 2.3.4 Determinación de pH, alcalinidad, coagulante y turbiedad o color residuales

La determinación de estos parámetros se hace 10 a 20 minutos después de suspendida la agitación. Se extraen las paletas del agitador, se deja sedimentar el agua durante este tiempo y se succiona la muestra con una pipeta volumétrica de 100 mL, a la misma profundidad en todos los vasos (3 a 10 cm) o por medio de un sifón como el que se presenta en la figura 11-6.

A la muestra así extraída se le determina: (a) el pH, (b) la alcalinidad total, (c) la turbiedad o el color, y (d) el contenido de coagulante residual.

Sin embargo, no siempre se obtiene la más baja concentración de coagulante residual con la dosis que produce la más baja turbiedad, en especial, cuando se usan pequeñas cantidades de coagulante. Además, hay que tener presente que el aluminio es soluble en un rango de 0,2 a 0,4 mg/L, según sea el pH del agua.

## 2.4 Parámetros de dosificación

Los principales ensayos de dosificación que se deben determinar en el laboratorio son los siguientes:



- selección del coagulante apropiado;
- rango de dosis óptimas necesarias;
- concentración óptima del coagulante;
- pH óptimo de coagulación;
- dosis de modificador de pH;
- selección de ayudante de coagulación y dosis óptima.

#### 2.4.1 Selección del coagulante

Consiste en efectuar ensayos con todos los coagulantes comercialmente disponibles, para seleccionar el que proporciona la mayor eficiencia al más bajo precio, para una determinada fuente.

Con cada coagulante se efectuará un estudio completo de dosis óptima, concentración y pH óptimo de coagulación, y se sopesará eficiencia *versus* costo de la sustancia química y de las instalaciones necesarias para su manipulación y dosificación, para seleccionar el coagulante más apropiado. A continuación se indican los procedimientos que se deberán aplicar en cada caso.

- **Determinación de la dosis óptima**

- a) *Propósito*

El objetivo de este ensayo es determinar la dosis de coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales, que permita la formación de un flóculo grande, compacto y pesado, que pueda ser fácilmente retenido en los decantadores y que no se rompa y traspase el filtro. Debe observarse que no necesariamente el flóculo que sedimenta con rapidez es el que queda retenido en el filtro. El flóculo que se busca es el que dé el mayor rendimiento, con todo el conjunto de procesos.

- b) *Equipos, materiales y reactivos*

- Equipo de prueba de jarras con 6 jarras de 2 litros, 6 deflectores, 6 tomadores de muestras y 6 jeringas hipodérmicas desechables de 10 cm<sup>3</sup>, con sus agujas.

- Turbidímetro con la sensibilidad suficiente para determinar con precisión turbiedades menores de 10.
- UNT, de preferencia un equipo nefelométrico de tipo digital.
- Colorímetro.
- Medidor de pH.
- Seis vasitos de 50 y 100 mL, de vidrio o plástico.
- El coagulante seleccionado.

*c) Procedimiento*

- 1) Determinar la temperatura, la turbiedad, el color, el pH, la alcalinidad y la dureza total del agua cruda con la que se va a trabajar. Determinar también la presencia de hierro y manganeso si esta es significativa.
- 2) Calcular la cantidad de coagulante que se va a aplicar a cada jarra mediante la ecuación de balance de masas:

$$P = D \times Q = q \times C$$

Donde:

- $P$  = peso de coagulante por aplicar  
 $D$  = dosis de coagulante en mg/L  
 $Q$  = capacidad de la jarra en litros  
 $q$  = volumen de solución por aplicar (mL)  
 $C$  = concentración de la solución en mg/L

Ejemplo:

Se debe aplicar una dosis de 10 mg/L a una jarra de 2 litros con una solución al 2%.

Calcular el volumen de solución que debe colocarse en la jeringa.

$$q = \frac{10 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L)} \times 1.000}{20.000 \text{ (mg/L)}} ; q = 1,0 \text{ mL}$$

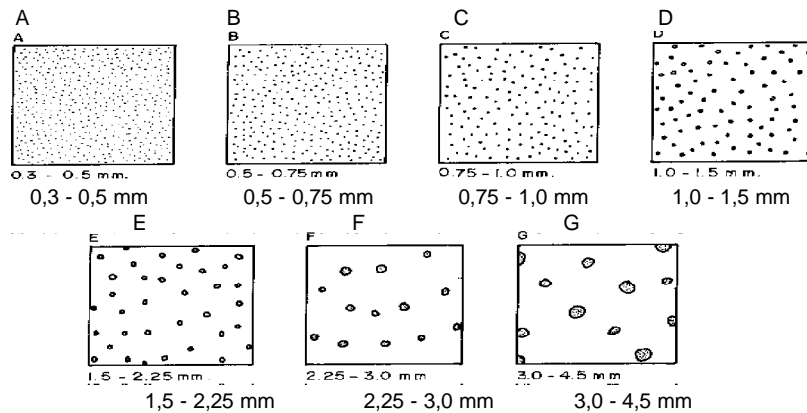
- 3) Colocar las cantidades del coagulante que se va a aplicar a las jarras en cada vasito mediante una pipeta. Succione el contenido del vasito con una jeringa hipodérmica con la aguja puesta, para extraer hasta la última gota.
- 4) Retire la aguja y coloque la jeringa delante de la jarra correspondiente. Ponga en funcionamiento el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = tiempo: 5 segundos, Velocidad = 300 rpm

Memoria 2 = tiempo: 20 minutos, Velocidad = 40 rpm

Si en el ábaco de la figura 5 entramos a las curvas que corresponden a una prueba con estatores con una velocidad de 300 rpm y temperatura promedio de 20 °C, podemos comprobar que en estas condiciones se consigue un gradiente de velocidad de aproximadamente  $770 \text{ s}^{-1}$ . Asimismo, durante la etapa de floculación con 40 rpm se estará aplicando un gradiente de velocidad de  $52 \text{ s}^{-1}$  que corresponde a un gradiente de floculación promedio.

- 5) Inicie el funcionamiento del equipo, aplicando en forma simultánea e instantánea el coagulante a todas las jarras. Cuide de que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida. Recuerde que para que el proceso sea bien simulado, el coagulante debe aplicarse en el punto de máxima turbulencia.
- 6) Si el agua requiere un alcalinizante, este debe añadirse antes del coagulante. No es necesario contabilizar el tiempo entre la aplicación de ambos. La dosis de alcalinizante se decidirá en una prueba especial, en la que manteniendo la dosis de coagulante constante, se aplicarán dosis variables de una suspensión de cal al 1% (10 gramos de cal en un litro de agua).
- 7) Cuando el proceso de floculación se inicie, estaremos atentos a identificar en qué jarra aparece primero formación de flóculos y anotaremos el tiempo en que esto ha ocurrido.
- 8) Instantes antes de que el proceso de floculación concluya, observe el tamaño del flóculo que se ha desarrollado y compárelo con la tabla de la figura 11-8.



**Figura 11-8.** Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación (según WRA)

- 9) Una vez que el equipo ha concluido con los tiempos de mezcla y floculación, se apaga automáticamente y se procede a retirar las jarras, colocar los tomadores de muestras, cebar los sifones utilizando una jeringa, atracar el extremo del sifón utilizando una liga o bandita (colocada alrededor de la jarra), y dejaremos sedimentar el agua entre 5 y 15 minutos.
- 10) Cumplido el tiempo de sedimentación seleccionado, descartar los primeros 10 mL de muestra retenidos en el sifón y tomar las muestras a todas las jarras en un volumen de aproximadamente 30 mL. Medir turbiedad y color. Si se requiere mayor cantidad de muestra para análisis adicionales (pH, hierro, manganeso, etcétera), tomarla posteriormente.
- 11) Los resultados se grafican en papel aritmético. Se selecciona como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.
- 12) Se analizan los diversos datos de dosis óptima para cada turbiedad de agua cruda y, mediante la teoría de mínimos cuadrados, se determina la recta de mejor ajuste que será de la forma:  $y = a + bx$ .

Donde:

$y$  = turbiedad de agua cruda y  
 $x$  = dosis óptima de coagulante

para obtener la curva de dosificación de coagulante para el agua en estudio.

d) *Aplicación práctica. Determinación de dosis óptima*

**Cuadro 11-7. Turbiedad remanente (1)**

Dosis de coagulante (mg/L)	Turbiedad de agua cruda (UNT)			
	50	150	240	320
22,5	4,5			
25	2,8			
27,5	2,4			
30	(2,1) 1			
32,5	2,3			
37,5	2,7	10		
40		4,2		
42,5		(3,2) 2	3,5	
45		3,5	3	4
47,5		4,2	2,7	7
50		7,1	(2,5) 3	5,5
52,5			2,8	5,2
55			3,2	(3,4) 4
57,5				4,1

Utilizando el equipo de prueba de jarras, se determinó la variación de la calidad del agua en función de la dosis de coagulante (en este caso, sulfato de aluminio), para diferentes turbiedades que se presentaron en la fuente. Véase el cuadro 11-7.

Los puntos 1, 2, 3 y 4 del cuadro anterior muestran las dosis óptimas para tratar las turbiedades correspondientes, con las cuales se efectúa el gráfico de la figura 11-9.

Este gráfico es necesario para diseñar o evaluar todas las instalaciones de dosificación de una planta de filtración rápida y, por supuesto, para operarla.

Si los operadores disponen de un gráfico como este, pueden cambiar rápidamente la dosificación del coagulante cada vez que cambia la turbiedad del agua cruda.

- **Determinación de la concentración óptima**

a) *Antecedentes*

Diversos estudios han demostrado que la concentración del coagulante influye en la eficiencia de la mezcla rápida, lo que modifica los resultados del proceso de coagulación.

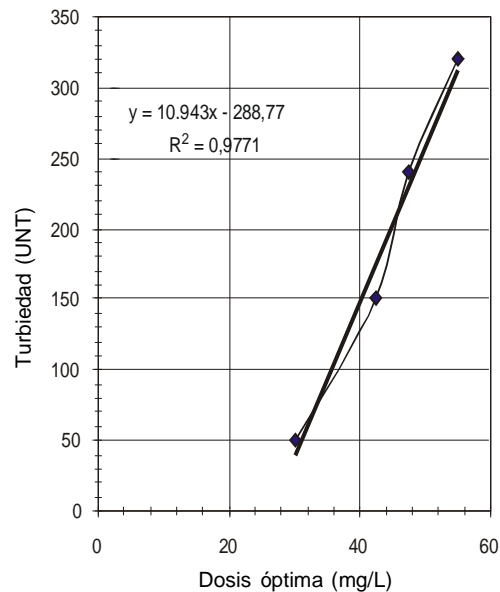
Es necesario trasladar esta experiencia a las plantas de tratamiento, previa selección del valor óptimo a nivel de laboratorio.

b) *Propósito*

Determinar la concentración de coagulante que optimice el proceso.

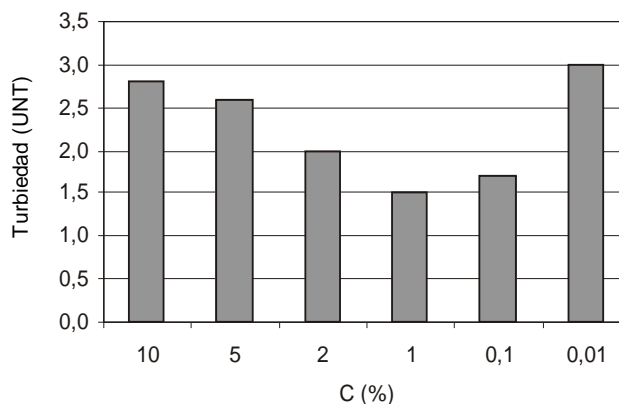
c) *Procedimiento*

- 1) Determinar la dosis óptima. Para esto, debe emplearse una solución de coagulante al 1% (10 g/L), la cual tiene un pH de 4,0 a 4,5.
- 2) Preparar una solución patrón del coagulante al 10% (100 g/L), preparar soluciones al 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 y, finalmente, se utilizará también la solución patrón al 10%.
- 3) Llenar las jeringas de acuerdo con el procedimiento indicado para la dosis óptima, pero colocando en todas la misma dosis óptima ya determinada, con las diferentes concentraciones de solución preparadas.



**Figura 11-9.** Correlación turbiedad versus dosis óptima

- 4) Efectuar la mezcla rápida, la floculación y la decantación de acuerdo con lo indicado en la prueba anterior.
  - 5) Durante el proceso, evalúe el tamaño del flóculo (índice de Willcomb) y la velocidad de la reacción.
  - 6) Determine la turbiedad o el color residual de cada muestra.
  - 7) Con los datos obtenidos, dibuje un histograma como el de la figura 11-9.
- d) *Aplicación práctica*



**Figura 11-10.** Concentración óptima del coagulante

Se determinó una dosis óptima de 20 mg/L para una turbiedad preparada con caolinita y se prepararon las soluciones indicadas en la primera columna del cuadro 11-8 para efectuar la prueba, y se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro.

La mecánica de la prueba es similar a la prueba de dosis óptima. La diferencia está en que a cada jarra se le aplica la dosis óptima a una diferente concentración, de manera que la concentración del coagulante es la única variable y cualquier diferencia en los resultados se debe a la concentración.

**Cuadro 11-8. Resultados de la prueba de concentración óptima**

Concentración de la solución (%)	pH	Turbiedad residual (UNT)
10	2,65	2,8
5	2,84	2,6
2	3,32	2,0
1	3,50	1,5
0,1	3,73	1,7
0,01	4,12	3,0

Sin lugar a dudas, es más difícil mezclar un volumen pequeño de solución con una gran masa de agua que un volumen mayor. Cuando el coagulante está más diluido, se facilita la mezcla, pero también se va incrementando el pH, hasta llegar a la hidrólisis del coagulante, con lo cual su efectividad se reduce notablemente.

En la prueba realizada se puede observar que con altas concentraciones de 10% y 5%, la turbiedad residual que se obtuvo no fue tan buena como con concentraciones bajas de 1 a 0,1 %. En cambio, al llegar a una concentración de 0,01, en que el pH fue de 4,12, los resultados se deterioraron notablemente debido a la hidrólisis parcial del coagulante. Véase la figura 11-10.

- **Determinación del pH óptimo de coagulación**

*a) Propósito*

Determinar el rango de pH óptimo de la muestra estudiada, en relación con el coagulante o ayudante de coagulación utilizado.

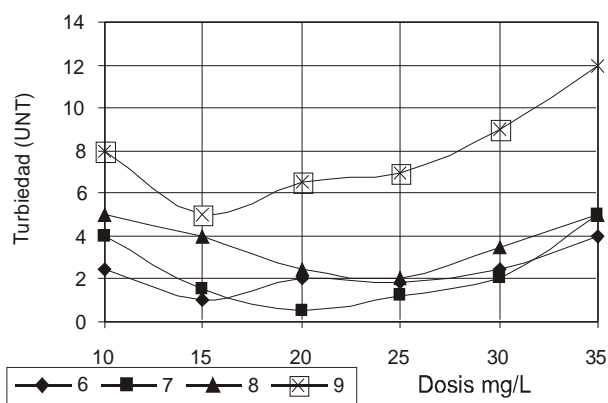
*b) Equipos y materiales*

Equipo de prueba de jarras, con todos los aditamentos indicados en las pruebas anteriores; turbidímetro, de preferencia nefelométrico; equipo para determinar el pH de la muestra; colorímetro con sensibilidad para determinar con precisión las unidades de color remanente en el agua tratada. Ácido sulfúrico diluido 0,1 N, hidróxido de sodio diluido 0,1 N y el coagulante seleccionado.



c) *Procedimiento*

- 1) Si el problema del agua es turbiedad, efectuar la prueba dentro de un rango de pH de 6 a 9. Si el problema es color, en un rango de 4 a 7.
- 2) Se prepararán los diferentes pH colocando el agua para las seis jarras en un solo recipiente y si el pH que se desea obtener en esta muestra es más bajo que el pH natural del agua, agregar ácido sulfúrico. Si es mayor, aplicar hidróxido de sodio. Se agregará gota a gota el modificador, agitando con una varilla para homogeneizar. Se puede mantener el bulbo del medidor de pH dentro de la muestra para determinar el cambio del pH.



**Figura 11-11.** Determinación del pH y la dosis óptima

- 3) Una vez ajustado el pH, se efectúa una prueba de dosis óptima y se determina la dosis que produce el efluente de mejor calidad.
- 4) Se continúa de igual forma con los demás pH. Se dibujan todas las curvas en un solo gráfico. La curva que presente el punto de mínima más bajo —es decir, el efluente más claro— estará indicando el pH y la dosis óptimos.
- 5) Se recomienda efectuar un estudio económico considerando el consumo de coagulante en el caso de efectuar el tratamiento con el pH natural del agua *versus* el tratamiento con modificadores de pH y dosis óptima generalmente menor. También convendría evaluar si la reducción de turbiedad y color es significativa, así como la mayor duración de las carreras de filtración que se obtendrían, y compararlas con el mayor costo de operación, mantenimiento e instalaciones adicionales.

d) *Aplicación práctica*

Se efectuó esta prueba con un agua que presentaba 80 UNT de turbiedad y pH de 7,0. Se prepararon muestras con pH de 6, 8 y 9, y se efectuó una dosis óptima con cada muestra. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las curvas de la figura 11-11.

Al analizar el gráfico, podemos apreciar que los mejores resultados se obtuvieron con el pH natural del agua y que la dosis óptima es de 20 mg/L.

Como se puede apreciar con valores de pH menores o mayores, la calidad del efluente se deteriora.

- **Selección de ayudantes de coagulación**

a) *Antecedentes*

Existe una gran variedad de ayudantes de coagulación. Algunos solo se pueden usar en procesos industriales o en aguas servidas, porque son tóxicos o cancerígenos. Otros, en cambio, están aprobados para uso en agua potable. Por tanto, *la primera condición que debe reunir un polielectrolito es que no sea peligroso para la salud*. La EPA publica periódicamente las listas de polielectrolitos que pueden usarse en aguas para consumo humano.

Asimismo, aunque un determinado ayudante de coagulación esté aprobado para el uso en tratamiento de agua, ello no garantiza que dé buenos resultados con cualquier tipo de agua. Por el contrario, algunos de ellos no solo no mejoran sino que pueden perjudicar el proceso, debido a que en cierto tipo de aguas dispersan el flóculo. Todo depende de la carga eléctrica que posean (pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos), así como de la carga eléctrica de las partículas en suspensión y de la energía necesaria para la absorción de los polímeros.

La única forma de seleccionar el polímero más efectivo para cada tipo de agua es hacer pruebas de jarras en el laboratorio con un buen número de ellos para determinar cuál es el que más conviene, tanto técnica como económicamente. Muchas veces el resultado puede indicar que no conviene usar un ayudante de coagulación, porque no es suficientemente eficiente o porque encarece demasiado el costo de producción. Con la finalidad de evitar el riesgo que siempre existe por el empleo generalizado de sustancias químicas, también se recomienda ensa-

yar primero con productos naturales como almidones, celulosas, alginato, goma de cactus y gelatina común.

*a) Objetivo*

Comparar la eficiencia de remoción de turbiedad y/o color de varios polielectrolitos, a fin de escoger el que mejor se adapte a las características del agua que se quiere analizar.

*b) Equipos y materiales*

Los mismos equipos y materiales indicados en las pruebas anteriores y los polielectrolitos entre los cuales se efectuará la selección.

*c) Procedimiento*

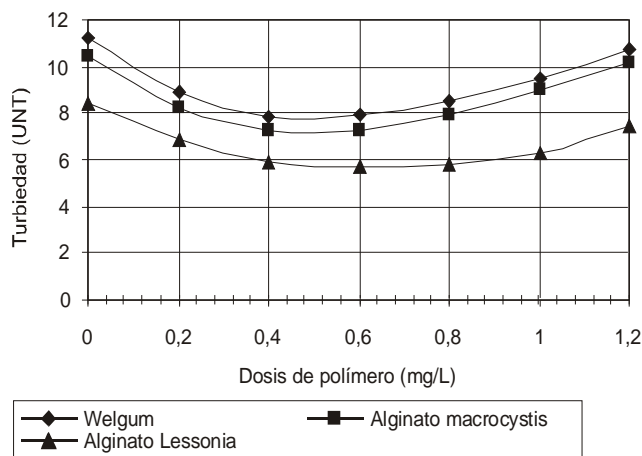
- 1) Efectuar una prueba de jarras en forma convencional para determinar la dosis óptima de coagulante metálico (sulfato de aluminio o cloruro férrico).
- 2) Preparar una nueva prueba de jarras en la que se adicionará a cada jarra la dosis óptima de coagulante seleccionada, además de dosis variables de polielectrolito (entre 0,1 y 1,0 mg/L o entre 0,01 y 0,5 mg/L, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes), excepto a la primera jarra, para que sirva de comparación con las demás.
- 3) Durante el proceso, determinar el índice de Willcomb y el tiempo inicial de formación del flóculo en cada jarra.
- 4) Suspendida la agitación al cabo de 15 a 30 minutos, dejar sedimentar el agua por 10 minutos, tomar el sobrenadante y determinar la turbiedad o color residual y el pH. Repetir con el mayor número de polielectrolitos disponibles a fin de hacer una selección preliminar.
- 5) Una vez seleccionado el polielectrolito que dio los mejores resultados, se efectúan nuevos ensayos disminuyendo la dosis de coagulante metálico (por ejemplo, 75% de la óptima) y agregar polielectrolito en cantidad variable, o mantener constante la dosis de polielectrolito determinada con anterioridad, variando la dosis de coagulante hasta obtener la combinación más econó-

mica. Si la calidad del agua varía durante el año, deben hacerse ensayos para diferentes condiciones de turbiedad y color.

Por lo general, se obtienen resultados diferentes cuando se agrega el polielectrolito antes y después del coagulante. Comúnmente esta última alternativa es la mejor, pero deben ensayarse ambas, a fin de constatar cuál es la secuencia más apropiada.

d) *Aplicación práctica*

Se incluye parte de un estudio sobre polielectrolitos realizado en los laboratorios del CEPIS/OPS, en Lima, Perú. Los ensayos presentados fueron hechos con aguas del río Rímac en época de baja turbiedad (15 a 30 UNT) y aguas con turbiedad artificial (50 UNT). Se empleó una cantidad menor de sulfato de aluminio (15 mg/L) que la dosis óptima (20 mg/L), cuando se varió la dosis de polielectrolito. Véase la figura 11-12.



**Figura 11-12.** Selección de ayudantes de coagulación

Como puede apreciarse, la adición adecuada de polielectrolitos como ayudantes de coagulación y/o floculación puede contribuir a bajar costos de tratamiento por las pequeñas dosis que se emplean y el aumento de la eficiencia, con lo que se alargan las carreras de filtración. Por otro lado, si se elige el tipo adecuado de polielectrolito, el flóculo que se obtiene permite la formación de lodos cuyos sedimentos son fácilmente disponibles.

- **Determinación de los parámetros de floculación**

- a) *Propósito*

El propósito de este ensayo es la determinación de los parámetros de floculación: gradiente de velocidad ( $G$ ) y tiempo de retención ( $T$ ), en función de las dosis óptimas determinadas y empleando el método de Villegas y Letterman (2).

- b) *Equipos y materiales*

Los mismos indicados anteriormente.

- c) *Procedimiento*

- 1) Se toma la muestra de agua cruda y se determinan los parámetros básicos de calidad: turbiedad y/o color, pH y alcalinidad.
- 2) Se llenan las 6 jarras con una muestra del agua cruda que se va a flocular.
- 3) Se pone a funcionar el equipo con la máxima velocidad de rotación de las paletas (por ejemplo, 300 rpm).
- 4) Se aplica la dosis de modificador de pH y la dosis óptima de coagulante, de acuerdo con lo determinado en el ensayo correspondiente.
- 5) A partir de la aplicación del coagulante, se realizará la mezcla rápida durante un tiempo instantáneo de aproximadamente 5 segundos.
- 6) Al finalizar la mezcla rápida, se iniciará el proceso de floculación, para lo cual se habrá ajustado la memoria del equipo para uno de los gradientes de velocidad seleccionados. El rango de gradientes de velocidad óptimas para esta prueba fluctúa entre 80 y 20  $s^{-1}$ . Cuando el estudio corresponda a una planta de gran capacidad, se tomarán intervalos de 10  $s^{-1}$ ; cuando se trate de una planta pequeña, se tomarán intervalos de 20  $s^{-1}$ .
- 7) Luego de iniciada la floculación, a los 5 minutos se retira la primera jarra, se coloca el tomador de muestras y se deja sedimentar durante 10 minutos. Después de 10 minutos, se retira la segunda; luego de 15, la tercera; y así sucesivamente, hasta que a los 30 minutos se retira la última. Con cada jarra se procede de modo similar.

- 8) Se determina la turbiedad residual ( $T_f$ ) a cada muestra, se calcula la eficiencia remocional ( $T_f/T_o$ ) y se registran los datos en un cuadro similar al cuadro 11-9.
- 9) Se repite el ensayo incrementando el gradiente de velocidad de acuerdo con el intervalo seleccionado.
- 10) Se repite el procedimiento con cada una de las condiciones de turbiedad o color, representativas de la calidad de agua cruda existente.
- 11) Se grafica en escalas aritméticas la eficiencia remocional ( $T_f/T_o$ ) *versus* los tiempos de floculación de cada una de las jarras de las que proceden las muestras analizadas. En este gráfico se determina el tiempo total de floculación, en función del punto en que se produce el menor valor de ( $T_f/T_o$ ).
- 12) Posteriormente, se grafican los valores de  $T_f/T_o$  *versus* gradientes de velocidad, para cada tiempo de floculación analizado. En cada curva de tiempo se produce un punto mínimo (punto de inflexión de la parábola), que corresponde al gradiente de velocidad que optimiza con ese tiempo de retención. Este punto mínimo es el de máxima eficiencia remocional para el tiempo de retención correspondiente. En cada curva de tiempo se identifica el punto mínimo tomando el gradiente de velocidad óptimo correspondiente.
- 13) Se grafican en papel doble logarítmico los valores de tiempo *versus* gradientes de velocidad óptimas. Se determina la línea de mejor ajuste de estos puntos aplicando mínimos cuadrados y se determina la ecuación de correlación y el grado de ajuste. Si el grado de ajuste es aceptable ( $r^2 = 0,90$ ), se continúa el calculo; en caso contrario, deberá repetirse el procedimiento de laboratorio, y se deberá trabajar con más cuidado para mejorar los datos.
- 14) El tiempo de retención determinado en el primer gráfico se divide para el número de tramos que tiene el floculador (en el caso de que estemos evaluando una unidad) o bien para el número de tramos que hemos seleccionado en la unidad que estamos proyectando y con cada tiempo entramos al gráfico y determinamos la gradiente de velocidad correspondiente.

d) *Observaciones*

Tomar en cuenta las siguientes precauciones para obtener información confiable:

- Exactitud en los tiempos de toma de muestras.
- Realizar los ensayos a la temperatura normal del agua. La temperatura ha sido reconocida como un factor muy importante en el tratamiento. Camp et al. (2) estudiaron los efectos de la temperatura en la coagulación con coagulantes férricos. La necesidad de llevar a cabo los ensayos a la temperatura del agua en la planta es especialmente importante con aguas que tienen bajas temperaturas y elevadas turbiedades.
- Manipular cuidadosamente el tomador de muestras para no alterar las condiciones de reposo de la masa de agua, lo que malograría la sedimentación.

e) *Aplicación práctica*

Se estudiaron las aguas que abastecen a una ciudad para realizar el proyecto de ampliación y mejoramiento del sistema existente (3). Con una turbiedad de 30 UNT se realizaron los ensayos de floculación y se obtuvieron los datos indicados en el cuadro 11-9, con los que se graficaron las curvas de la figura 11-13.

**Cuadro 11-9. Resultados de ensayos de floculación**

Gradientes de velocidad $G \text{ s}^{-1}$	Turbiedad residual (UNT)					
	5	10	15	20	25	30
80	12	2	20	5,6	18	25
60	13	7	6	4,5	8	12
40	24	10	8	4	6,4	9
20	30	27	25	10	14	10

La figura 11-13 está mostrando las curvas de gradiente de velocidad obtenidas a partir de los datos de turbiedad residual *versus* tiempo. La curva más baja del gráfico ( $40 \text{ s}^{-1}$ ) esta indicando que el proceso optimiza con un tiempo total de floculación de 21 minutos.

A partir de las curvas de gradientes de velocidad del gráfico de la figura 11-13, se obtienen las curvas de tiempo de la figura 11-14. Ubicando los puntos de máxima remoción con cada uno de estos tiempos, se obtienen los gradientes de velocidad con los que cada tiempo de retención optimiza. Véase el cuadro 11-10.

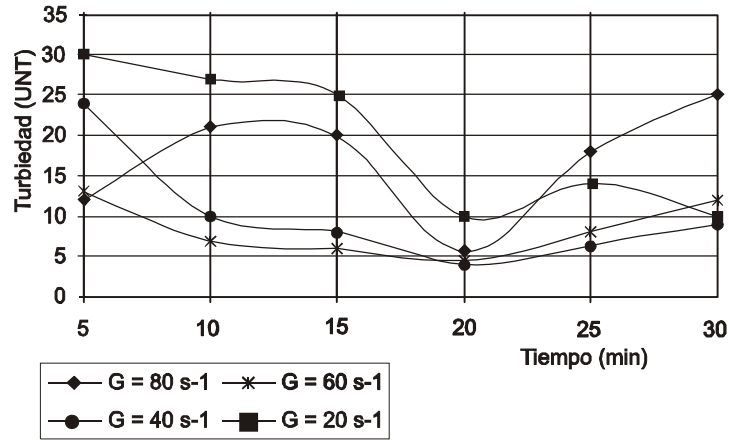


Figura 11-13. Tiempo total de floculación

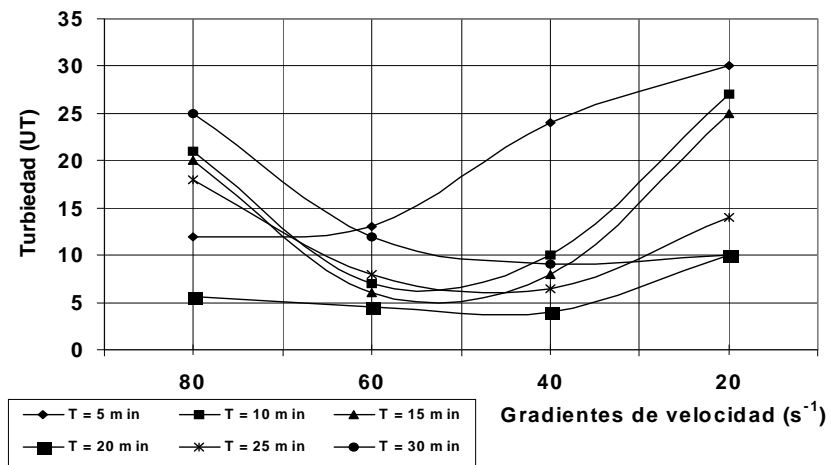


Figura 11-14. Gradientes de velocidad óptimas

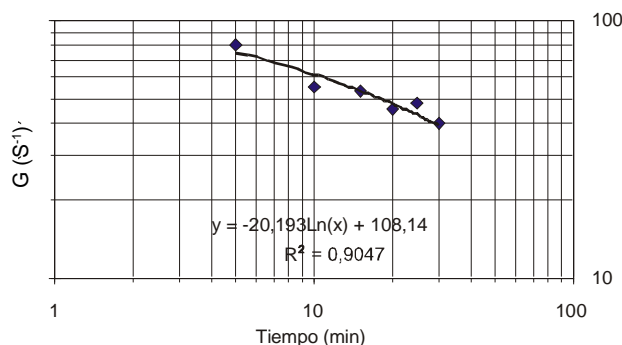
Cuadro 11-10. Gradientes de velocidad óptimas de floculación (10)

T (min)	5	10	15	20	25	30
G (s <sup>-1</sup> )	80	55	53	45	48	40

Aplicando mínimos cuadrados a los datos del cuadro 10, se obtiene la correlación de la figura 11-15.



Como la unidad de floculación tiene 600 L/s de capacidad, se eligió un floculador vertical de 3 tramos. Siendo el tiempo de retención total de 21 minutos, cada tramo tendrá un tiempo de retención aproximado de 7 minutos.



**Figura 11-15.** Correlación de  $G$  y  $T$

Entrando con un tiempo de 7 minutos a la correlación del gráfico de la figura 11-15, se encuentra que con este tiempo optimiza un gradiente de velocidad de  $69 \text{ s}^{-1}$  y entrando con 21 minutos, el gradiente correspondiente es de  $47 \text{ s}^{-1}$ .

Como regla general, si se agrega un gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$  en la etapa terminal del proceso de floculación, se logra un floculo más pesado y compacto, con el que se obtienen las metas de calidad del proceso con una tasa de sedimentación más alta. Por lo tanto, el rango de gradientes de velocidad recomendable para esta agua estaría entre  $69$  y  $20 \text{ s}^{-1}$ , rango dentro del cual deberán estar las gradientes de velocidad de los tres compartimentos.

- **Determinación de los parámetros de decantación**

a) *Propósito*

Determinar la tasa de diseño y la eficiencia remocional de un decantador laminar de placas en condiciones ideales.

b) *Equipos y materiales*

Los indicados para las pruebas anteriores.

c) *Procedimiento*

- 1) Llenar las seis jarras del equipo con la muestra de agua en estudio. Encender el equipo y agregar la dosis óptima, realizando la mezcla rápida de

acuerdo con lo indicado anteriormente. Se programará la memoria del equipo con los parámetros de mezcla (300 revoluciones por minuto y 5 segundos) y a continuación se colocan las gradientes y el tiempo de mezcla seleccionados. Véase el cuadro 11-11.

**Cuadro 11-11. Parámetros para el ensayo de decantación**

Tramo	Tiempo de retención (min)		Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )
	Parcial	Total	
1	7	7	69
2	7	14	55
3	7	21	20

- 2) Las gradientes y el tiempo de mezcla van a darse en forma consecutiva simulando el paso del agua por una unidad de floculación. Cuando el equipo pare, deberá estar todo el material preparado para iniciar el muestreo.
- 3) A cada jarra se le tomará una muestra a un tiempo diferente. La primera, al minuto; la segunda, a los 2 minutos; la tercera, a los 4; la cuarta, a los 5; y la sexta, a los 10 minutos.
- 4) Determinar la turbiedad residual de las muestras y llenar el cuadro 11-12.
- 5) Después de media hora, trasegar el sobrenadante de una de las jarras, colocar el lodo en una probeta, medir el volumen formado y determinar los mililitros de lodo producidos por cada litro de agua tratada. Este dato es necesario para diseñar las tolvas de los decantadores.

**Cuadro 11-12. Resultados del ensayo de decantación (10)**

T (s)	Vs (cm/s)	Tf(UNT)	Co = Tf/To
60	0,100	25,6	0,73
120	0,050	16,0	0,30
180	0,033	11,0	0,24
240	0,025	4,7	0,17
300	0,020	5,3	0,15
480	0,013	4,6	0,10
600	0,010	3,6	0,10
660	0,09	3,6	0,10

- 6) Esta prueba debe repetirse con cada una de las turbiedades representativas de la época crítica o lluviosa.
- 7) Se calculan los valores de  $(h/T)$  para cada tiempo de toma de muestra. Este valor corresponde a  $(Vs)$ , la velocidad de sedimentación en  $(cm/s)$ . El valor de  $(h)$  es la altura de toma de muestra graduada en el sifón.
- 8) Con los valores de  $(Vs)$  en  $cm/s$  en las abscisas y los valores de  $(Co = Tf/To)$  en las ordenadas, se obtiene la curva de sedimentación para el agua estudiada. Véase el gráfico de la figura 11-16.
- 9) En la columna 1 del cuadro 11-13 se coloca el rango usual de variación de las tasas de sedimentación de las partículas (20 a 60  $m^3/m^2.d$ ), variándolas de 10 en 10. Deducir los valores correspondientes de  $(Vs)$  en  $cm/s$  para cada tasa y colocar en la columna 2.
- 10) Con los valores de  $(Vs)$  en  $cm/s$  del cuadro, entrar a la curva de sedimentación obtenida en el ensayo (figura 11-16) y determinar los valores correspondientes de  $(Co = Tf/To)$ , los cuales se colocan en la columna 3.
- 11) Tomar de la curva los valores de  $(Cf)$  y  $(a)$ .  $(Cf)$  es la porción de turbiedad que no se removió en el proceso. La curva tiene una porción inicial (lado izquierdo de la curva, en que se vuelve asintótica; no importa cuán largo sea el tiempo de sedimentación que demos a la muestra, la turbiedad residual es la misma. Esta es la porción de turbiedad que solo puede ser removida por el filtro. El valor de  $(a)$  corresponde a esta velocidad a partir de la cual la

Cuadro 11-13. Selección de la tasa de decantación (10)

<b>q</b> <b>(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Vs</b> <b>(cm/s)</b>	<b>Co</b> <b>(Tf/To)</b>	<b>Rt</b> <b>(%)</b>	<b>Tr</b> <b>(UNT)</b>	<b>Tf</b> <b>(UNT)</b>
20	0,023	0,14	0,982	29,45	0,55
30	0,035	0,24	0,944	28,32	1,68
<b>35</b>	0,041	0,26	0,931	27,93	<b>2,07</b>
40	0,046	0,32	0,907	27,21	2,79
50	0,058	0,33	0,894	26,82	3,18
60	0,069	0,37	0,873	26,19	3,81

curva comienza a hacerse asintótica. Esta velocidad ( $a$ ) es la menor velocidad con que se justificaría proyectar un decantador para esa agua, porque aunque tomáramos valores menores, la remoción será la misma y estaríamos agrandando la unidad sin conseguir mayor eficiencia.

- 12) Calcular en la columna 4 el porcentaje total de remoción ( $Rt$ ), en la columna 5 la turbiedad removida ( $Tr$ ) y en la columna 6 la turbiedad final o remanente ( $Tf$ ).

$$Rt = [ 1 - (Co - Cf) ] + [ (a + Vs) / 2 Vs ] (Co - Cf)$$

$$Tr = Rt \times To$$

$$Tf = To - Tr$$

- 13) La carga superficial del decantador será aquella que corresponda al valor de turbiedad final ( $Tf$ ) deseado en el efluente de la unidad.

d) *Aplicación*

Se realizó la prueba de decantación con las gradientes de velocidad y tiempos indicados en el cuadro 11-12.

Con los datos de las columnas 2 y 4 del cuadro anterior se obtuvo la curva de decantación de la figura 11-16.

Se puede observar que la velocidad ( $a$ ) con la que se conseguiría la máxima eficiencia remocional es de 0,09 cm/s y esta coincide con un valor de  $Co = Cf = 0,10$ , concentración de turbiedad que no puede remover el decantador.

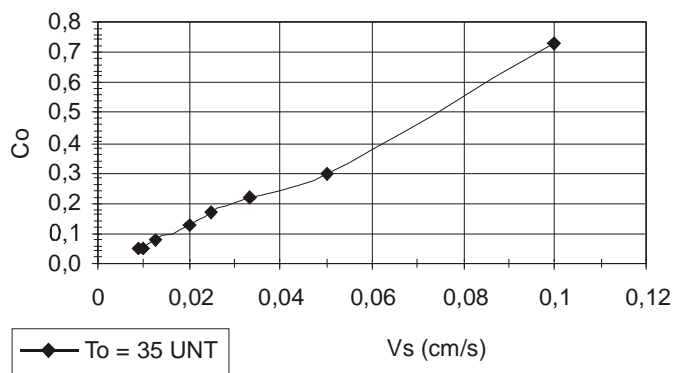


Figura 11-16. Curva de sedimentación

La meta de calidad propuesta para el efluente de esta unidad es de 2,0 UNT, por lo que ahora es necesario identificar con qué tasa de decantación se obtendría un efluente de esta calidad. Para ello elaboramos el cuadro 11-13, con las directivas anteriormente indicadas.

La tasa con la que se alcanzaría la meta propuesta es de  $35 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ . Como esta tasa fue obtenida en condiciones ideales, la tasa con la que se proyectarían los decantadores debe afectarse de un coeficiente seguridad de 30%. Por lo tanto, la tasa de proyecto sería de  $35/1,3 = 29 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ .

- **Determinación de los parámetros de filtración directa**

La determinación de los parámetros para un proyecto de filtración directa sigue un procedimiento especial, dado que en esta alternativa de tratamiento los procesos involucrados son mezcla rápida y filtración y, en algunos casos, un proceso de floculación corto.

### ***Dosis óptima***

a) *Propósito*

Obtener la dosis de coagulante y el pH óptimo para efectuar el tratamiento mediante filtración directa.

b) *Equipos y materiales*

- Equipo de prueba de jarras con vasos de 2 litros de capacidad.
- Turbidímetro nefelométrico.
- Medidor de pH.
- juego de deflectores o estatores para vasos de 2 litros.
- 6 jeringas desechables de  $10 \text{ cm}^3$ .
- 6 vasos de plástico para tomar las muestras.
- 6 embudos con soportes.
- Papel de filtro Whatman 40.
- Sulfato de aluminio o el coagulante en uso si se trata de un sistema en operación.
- Ácido sulfúrico concentrado o hidróxido de sodio.

c) *Procedimiento*

- Ejecutar varias pruebas de dosis óptima variando el pH de la muestra de agua cruda entre 4 y 7. Véase el cuadro 11-14.
- Seleccionar la dosis óptima de coagulante para cada valor de pH. Véase la figura 11-17.
- En cada ensayo proceder del siguiente modo:
  - 1) Graduar la muestra al pH seleccionado para la prueba, utilizando ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.
  - 2) Preparar los embudos con el papel Whatman 40.
  - 3) Llenar las jarras con un litro de la muestra de agua y colocar los estatores.
  - 4) Para seleccionar el rango de dosis que se va a aplicar, considerar el 50% de la dosis que se requiere para coagulación de barrido y, tomándola como punto medio, aumentar y disminuir esta dosis para las seis jarras.
  - 5) Preparar las jeringas con el rango de dosis seleccionadas.
  - 6) Colocar en la memoria del equipo los parámetros de la prueba: mezcla rápida, 300 revoluciones por minuto y 3 segundos.
  - 7) Al tiempo cero, agregar el coagulante simultáneamente a todas las jarras y prender el equipo.
  - 8) Apenas se apague el equipo, tomar muestras simultáneamente tragando suavemente de las jarras a los embudos.
  - 9) Determinar turbiedad y/o color y pH a las muestras filtradas.
  - 10) Graficar las curvas de turbiedad y /o color residual *versus* dosis para cada pH.
  - 11) La curva de la dosis menor estará indicando el pH y la dosis óptima para el proceso.

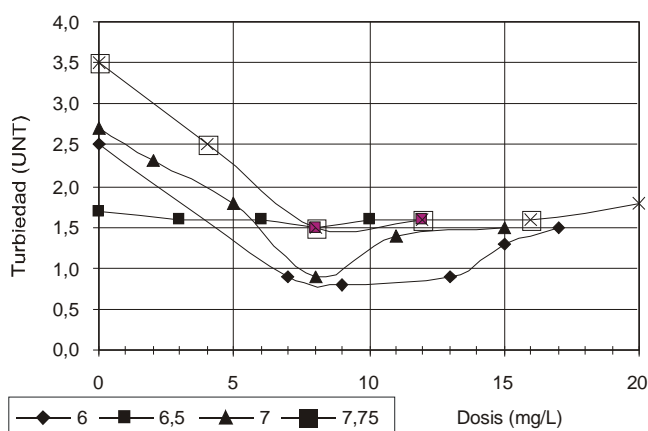
**Cuadro 11-14. Selección de la dosis y pH óptimo para filtración directa (9)**

jarras	pH = 6			pH = 6,5			pH = 7			pH = 7,5		
	D (mg/L)	Tf (UNT)	pH	D (mg/L)	Tf (UNT)	pH	D (mg/L)	Tf (UNT)	pH	D (mg/L)	Tf (UNT)	pH
1	0	2,5	5,60	0	1,7	6,25	0	2,7	6,50	0	3,5	7,25
2	7	0,9	5,75	3	1,6	6,35	2	2,3	6,11	4	2,5	7,45
3	9	0,8	5,80	6	1,6	6,35	5	1,8	6,45	8	1,5	7,50
4	13	0,9	5,80	8	1,5	6,35	8	0,9	6,70	12	1,6	7,40
5	15	1,3	5,85	10	1,6	6,40	11	1,4	6,75	16	1,6	7,35
6	17	1,5	5,95	12	1,6	6,45	15	1,5	6,75	20	1,8	7,45

d) *Aplicación*

Se ensayó en el laboratorio con una muestra de agua que tenía 18 UNT de turbiedad y un pH de 7,75.

Se seleccionaron valores de pH de 6; 6,5; 7 y 7,5 y se ejecutaron 4 pruebas de jarras.

**Figura 11-17. Dosis y pH óptimos**

Los resultados obtenidos se indican en el cuadro 11-14.

Las curvas de la figura 11-17 (9) reproducen los resultados del cuadro 11-14.

Del análisis de las curvas se puede indicar que la mayor eficiencia está dada por la curva más baja del gráfico, que corresponde al pH 6,0. Asimismo, la dosis con que este pH tuvo mayor eficiencia fue 8 mg/L.

### ***Floculación corta para filtración directa***

#### *a) Propósito*

Obtener los valores de la gradiente de velocidad y los tiempos de retención que optimizan la formación del microfloculo para filtración directa.

#### *b) Equipos y materiales*

- 6 tomadores de muestras
- Los demás equipos y materiales son los indicados en la prueba anterior.

#### *c) Procedimiento*

- 1) Variar las gradientes de velocidad entre 60 y 150 s<sup>-1</sup> y ejecutar un ensayo con cada gradiente de velocidad.
- 2) Variar los tiempos de floculación entre 0 y 10 minutos con cada gradiente de velocidad.
- 3) En cada ensayo se procederá del siguiente modo:
  - a) Llenar hasta la mitad (1 litro) las jarras con el agua cruda y colocar los estatores.
  - b) Colocar en la memoria del equipo los parámetros del ensayo: 3 segundos con 300 revoluciones por minuto y 10 minutos con las revoluciones por minuto correspondientes a la gradiente de velocidad seleccionada.
  - c) Adicionar el coagulante simultáneamente a todas las jarras, con lo que se inicia el proceso.
  - d) A partir del inicio de la floculación, retirar una por una las jarras en los tiempos previstos. Así, por ejemplo, al tiempo 0, 2, 4, y así sucesivamente, hasta la sexta jarra a los 10 minutos. Filtrar de inmediato y trasegar directamente de la jarra al embudo preparado con el papel Whatman 40.
  - e) Determinar la turbiedad remanente a cada muestra.



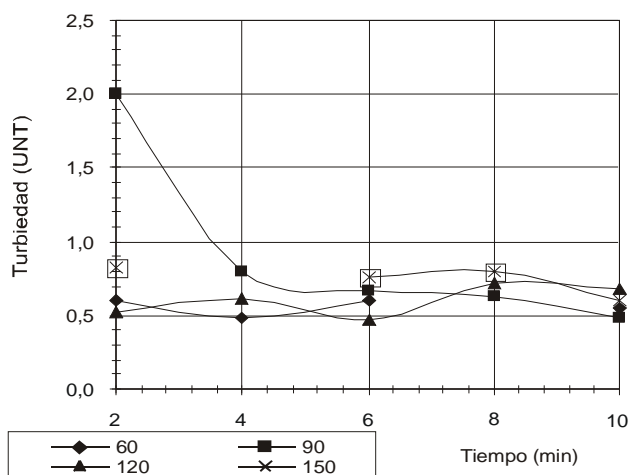
d) *Análisis de los resultados*

- 1) Graficar las curvas de turbiedad remanente *versus* tiempo de floculación para cada gradiente de velocidad.
- 2) Seleccionar el tiempo de retención y la gradiente de velocidad que den la mayor eficiencia remocional.

e) *Aplicación*

Con un pH de 6,5 y dosis de 8 mg/L se efectuaron cuatro pruebas de floculación.

- 1) Las gradientes de velocidad seleccionadas fueron 60, 90, 120 y 150  $s^{-1}$ . Los tiempos variaron entre 0 y 10 minutos.



- 2) Las gradientes de velocidad se indican en el cuadro 11-15.

**Figura 11-18.** Gradiente de velocidad óptima para filtración directa

**Cuadro 11-15.** Selección de gradientes de velocidad y tiempos óptimos de floculación para filtración directa (9)

Prueba	G	Tiempo (min)					
	$s^{-1}$	0	2	4	6	8	10
1	60	2,00	0,60	0,48	0,60	0,65	0,55
2	90	9,20	2,00	0,80	0,67	0,63	0,48
3	120	0,62	0,52	0,62	0,47	0,72	0,68
4	150	2,60	0,82	0,72	0,76	0,80	0,60

- 3) Las curvas de la figura 11-18 (9) reproducen la variación de la turbiedad remanente *versus* tiempo para cada gradiente de velocidad.

f) *Conclusiones*

Del análisis de las curvas de la figura 11-18 se puede observar que las mejores condiciones de calidad de agua se obtienen con una gradiente de velocidad de  $60 \text{ s}^{-1}$  y 4 minutos de tiempo de retención, con menor gasto de energía.

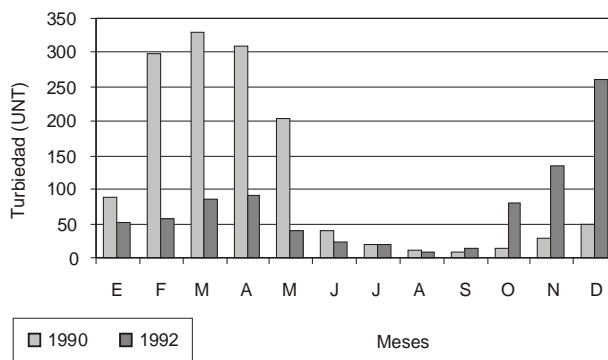
### 3. APLICACIONES PRÁCTICAS

#### 3.1 Caso del proyecto de una planta nueva

*Ejemplo 1*

Este estudio corresponde a un río que fue considerado como probable fuente para el abastecimiento de agua de una ciudad. No se contaba con información de calidad de la fuente ni existía otra planta que estuviera abasteciéndose de la misma fuente cuya información pudiera ser útil para este estudio. El tiempo y los recursos disponibles eran muy limitados, por lo que no se pudieron organizar muestreos durante los meses críticos.

Sin embargo, se agotaron esfuerzos para reunir toda la información de calidad posible, tanto en los archivos de la empresa de agua como en la universidad local. Se aprovechó información relacionada con estudios de tesis e investigaciones. Esta información se complementó con algunos muestreos y de este modo se llegó a caracterizar el comportamiento de la fuente y a conocer las variaciones que presentaba la calidad del agua cruda y los parámetros problema del objeto de tratamiento.



**Figura 11-19.** Promedios mensuales de turbiedad

En el cuadro 11-16 se sintetizan los resultados de varios análisis físico-químicos y bacteriológicos efectuados para conocer la calidad de la fuente. Del análisis de esta información podemos concluir que los parámetros problema —es decir, los que exceden los límites aceptables para consumo humano— son la turbiedad, el color y la contaminación fecal. Por lo tanto, la fuente requiere para su tratamiento un sistema de clarificación mediante filtración rápida completa con alternativa para filtración directa.

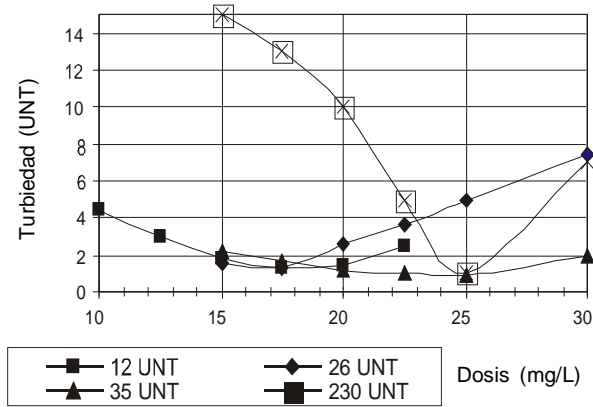
**Cuadro 11-16. Resumen de análisis físicoquímicos de la fuente (II)**

Fecha	Guías	12/II/96	20/III/96	25/III/96	27/III/96
Parámetros	de la OMS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Temperatura (°C)	-	14	16	16	14
Turbiedad (UNT)	5	78	49	30	39
Color (UC)	15	>50	>50	>50	>50
pH	6,5 – 8,5	7,4	7,9	7,9	7,9
Dióxido de carbono (mg/L)	-	7,4	6,6	6,6	0,0
Alcalinidad total	-	88	118	116	102
Alcalinidad a la fenolftaleína	-	0,0	0,0	0,0	8,0
Dureza total	-	248	252	252	208
Calcio (mg/L como Ca <sup>++</sup> )	-	93	65	69	60,5
Magnesio (mg/L)	-	4,4	21,9	19,4	13,9
Cloruros (mg/L)	250	21	63	52,4	46
Sulfatos (mg/L)	250	88	69	68	45
Hierro (mg/L)	0,3	0,26	0,0	0,0	0,0
Sólidos totales (mg/L)	1.000	1.860	359	358	500
Coliformes totales/100 mL		5,2 (10) <sup>3</sup>	4,5 (10) <sup>3</sup>	2,6 (10) <sup>3</sup>	1,8 (10) <sup>3</sup>
Coliformes termotolerantes/100 mL		4,5 (10) <sup>2</sup>	2,4 (10) <sup>2</sup>	3,8 (10) <sup>2</sup>	5 (10) <sup>2</sup>

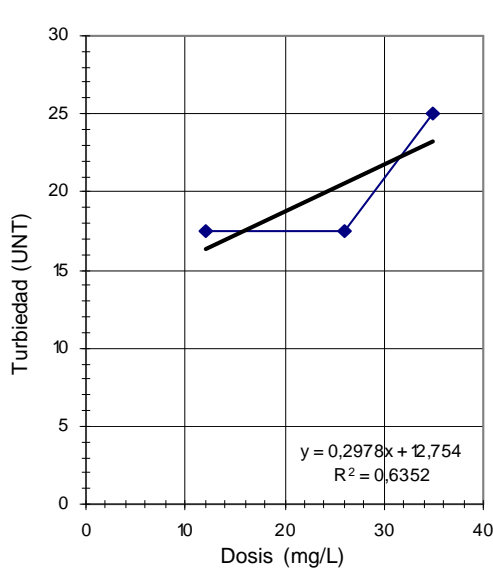
Con la información de turbiedad obtenida de un trabajo de investigación y algunos datos de la empresa de agua, se elaboró el histograma de la figura 11-19. Se puede apreciar que se presentan turbiedades altas de hasta 330 UNT en promedio, durante unos 4 meses al año, y turbiedades bajas el resto del tiempo. Es posible operar con filtración directa entre mayo y noviembre o entre junio y octubre, dependiendo de si el año es seco o lluvioso.

**Alternativa de filtración rápida completa**

Se determinaron en el laboratorio los parámetros óptimos para diseñar las unidades de la planta. Se realizaron las pruebas de dosis óptima y se obtuvieron los resultados indicados en la figura 11-20. Con los resultados de estas pruebas se graficó la curva de dosificación que aparece en la figura 11-21, que aunque presenta un bajo grado de ajuste, permite conocer el rango dentro del cual pueden variar las dosis de coagulante para tratar el agua de esta fuente.



**Figura 11-20.** Dosis óptima de coagulante

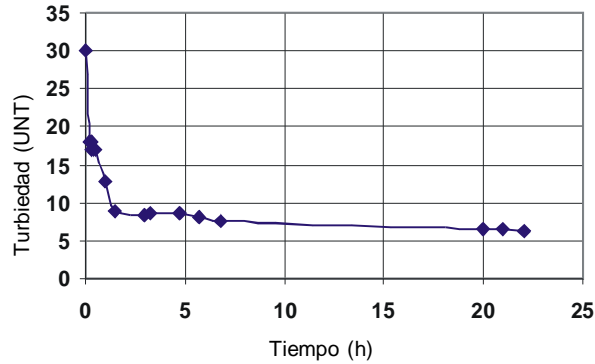


**Figura 11-21.** Curva de dosificación

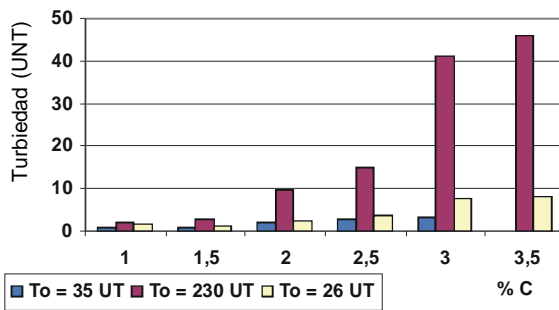
Como se puede apreciar, en este gráfico no se incluyó el resultado obtenido con la turbiedad de 230 UNT, que fue la máxima con la que se pudo alcanzar una muestra para efectuar el estudio de laboratorio y que, como se puede observar en el histograma de turbiedad de la figura 11-19, es representativa de los valores máximos que suelen presentarse en la época de lluvia. La dosis obtenida para 230 UNT fue de 20 mg/L, más baja que la que se obtuvo para 35,0 UNT. En una investigación realizada por la universidad local se encontró que los estratos del cauce del río son ricos en bentonita, la cual tiene propiedades coagulantes, por lo que

cuando aumenta la turbiedad se incrementa el contenido de bentonita y las dosis son casi constantes a pesar de que la turbiedad crece.

Asimismo, al efectuarse ensayos de sedimentación natural, se encontró que la turbiedad fácilmente sedimentaba y se reducía a la mitad en una hora de sedimentación, aun con turbiedades tan bajas como 35 UNT. Considerar en este caso un presedimentador en el proyecto permitiría un gran ahorro de sustancias químicas y daría gran confiabilidad a la operación de la planta, sobre todo durante la operación con filtración directa. Ello permitiría, además, ampliar las carreras de los filtros (figura 11-23).



**Figura 11-22.** Curva de sedimentación natural



**Figura 11-23.** Concentración óptima

Se efectuaron ensayos de concentración óptima de acuerdo con lo indicado en el procedimiento descrito, con muestras que presentaban 26, 35 y 230 UNT y se obtuvieron los resultados indicados en la figura 11-23.

Se puede observar que con concentraciones mayores de 2%, la turbiedad residual se incrementa. Se obtienen los mejores resultados para concentraciones de 1,0 a 1,5%.

Definidos los parámetros de mezcla, se efectuaron las pruebas de floculación. Se variaron los gradientes de velocidad entre 20 y 80. Se obtuvieron los resultados indicados en el gráfico de la figura 11-24. Se puede apreciar que el tiempo de floculación óptimo es de 20 a 21 minutos.

El gráfico de la figura 11-25 está indicando los gradientes de velocidad con los que se optimiza el proceso. Tomando un tiempo total de floculación de 21

minutos y seleccionando tres tramos de diferentes gradientes de velocidad para la unidad que se va a proyectar, tendríamos que cada tramo deberá tener un tiempo de retención de 7 minutos. Entrando con estos tiempos al gráfico de la figura 11-25, encontramos que los gradientes con los que se optimizarían estos tiempos son 65, 50 y 45

$s^{-1}$ . También podrían ser 4 de 5 min c/u y gradientes de velocidad de 70, 60, 50 y  $20 s^{-1}$ . Con una gradiente de  $20 s^{-1}$  al final, se consigue aglomerar mejor el flóculo.

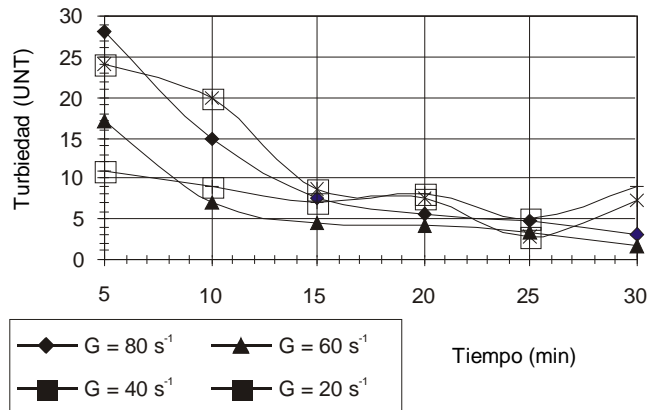


Figura 11-24. Tiempo total de floculación

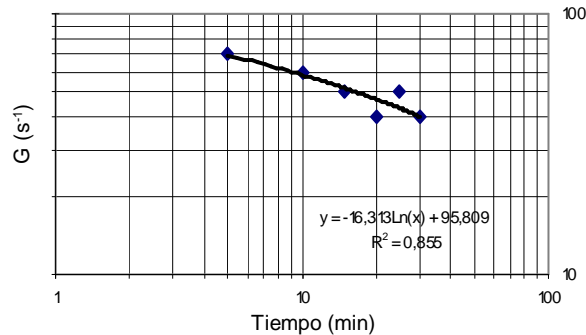
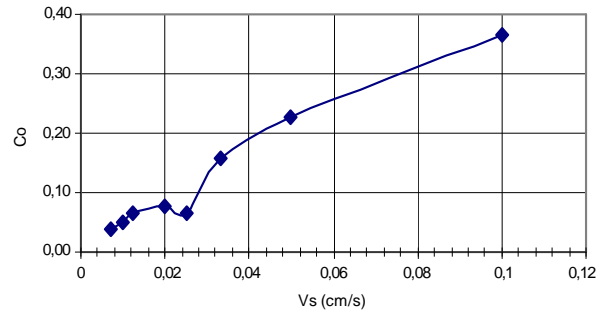


Figura 11-25. Gradientes de velocidad y tiempos óptimos

Se efectuó la prueba de decantación aplicando los parámetros óptimos de dosificación y floculación seleccionados y se obtuvo la curva de la figura 11-26.

Se analizó la curva para obtener la velocidad o tasa de decantación con la cual se obtendría una turbiedad final de 2,0 UNT y se obtuvo el cuadro 11-17.



**Figura 11-26.** Curva de decantación

**Cuadro 11-17.** Selección de la velocidad óptima de decantación (II)

q m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	Vs cm/s	Co	Rt %	Tr	Tf
10	0,012	0,11	0,989	35,12	0
20	0,023	0,15	1,001	35,53	0
30	0,035	0,34	0,970	34,44	1,07
40	0,046	0,42	0,934	33,15	2,35
50	0,058	0,48	0,760	26,98	8,52
60	0,069	0,56	0,863	30,63	4,87

Como se puede apreciar en el cuadro 11-17, se obtiene un flóculo duro que decanta fácilmente, con una tasa tan alta como 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, lo que permite obtener un efluente con apenas 2,0 UNT, con el cual se podrían alcanzar las recomendaciones de la EPA para alcanzar un efluente exento de huevos de parásitos. Como este valor es obtenido en condiciones ideales de laboratorio, fue afectado por un coeficiente de seguridad de 30% y la tasa de proyecto sería de 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d.

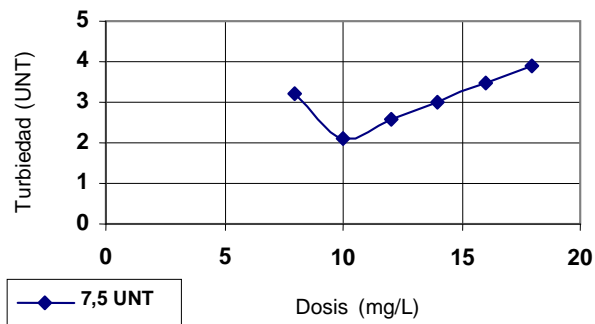
En el cuadro 11-18 se sintetizan los parámetros óptimos de filtración rápida completa para proyectar la planta.

**Cuadro 11-18. Parámetros óptimos para el proyecto (11)**

Instalaciones de tratamiento	Parámetros óptimos	
	Instalaciones de dosificación	Rango dosis de coagulante Concentración pH óptimo de coagulación
Unidades de tratamiento	Tiempo de retención	Gradiente de velocidad (s <sup>-1</sup> )
Presedimentador	Una hora	
Mezclador	Ideal menos de un segundo	700 a 1.200
Floculador	5 min	65
	5 min	50
	5 min	45
	5 min	20
Decantadores	30 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	

**Alternativa de filtración directa**

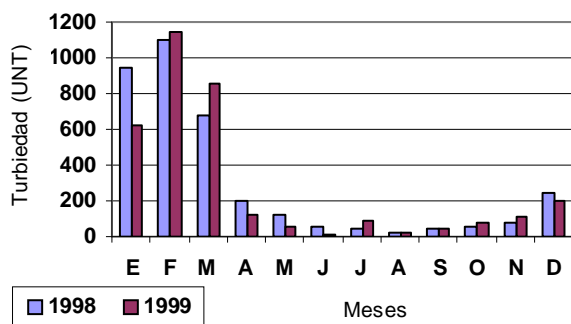
Se efectuó la prueba de dosis óptima para filtración directa con una turbiedad de 7,5 UNT, alcalinidad: 192 mg/L, pH = 7,9 y temperatura = 21 °C. El gráfico de la figura 11-27 muestra los resultados de la prueba.



**Figura 11-27. Dosis óptima para filtración directa**

Se puede apreciar que debido a que tanto el pH como la alcalinidad natural del agua son altos, la dosis óptima obtenida se encuentra en el valor máximo recomendable para esta alternativa. Sin embargo, es posible que en la práctica se pueda acondicionar con dosis menores con la ayuda de la presedimentación, que es efectiva aun con turbiedades bajas, para asegurar la obtención de carreras de filtración suficientemente largas.





**Figura 11-28.** Histograma de turbiedad de agua cruda

### Ejemplo 2

La información que vamos a analizar corresponde al estudio de una planta de tratamiento de agua que fue proyectada con la asesoría del CEPIS/OPS (12). En este caso, por existir otra planta operando con aguas del mismo río, se dispuso de suficiente información de calidad de la fuente.

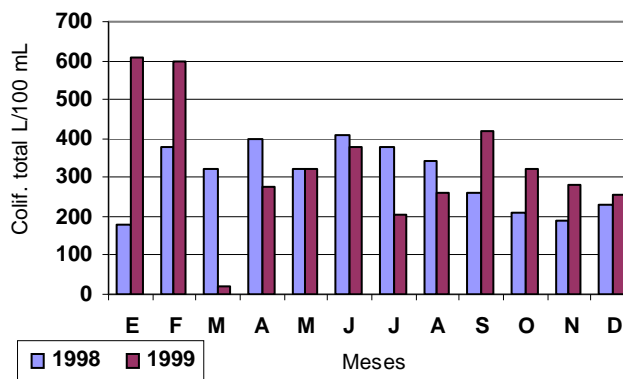
### Alternativas de tratamiento (12)

El histograma de la figura 11-28 permite determinar que se presentan turbiedades altas, de noviembre a mayo, aproximadamente el 60% del año. El resto del tiempo las aguas son relativamente claras.

Los histogramas de las figuras 11-29 y 11-30 indican cómo varía el NMP de coliformes totales y termotolerantes

en la fuente, respectivamente. Se puede observar que los termotolerantes presentan un valor máximo de 340/100 mL de muestra. Como las concentraciones máximas de coliformes termotolerantes presentadas son menores de 600/100 mL, no se requiere considerar precloración.

Del análisis de esta información podemos concluir que la fuente requiere filtración rápida completa aparentemente el 60% del año, y el tiempo restante, filtración directa.



**Figura 11-29.** Histograma de variación de coliformes totales

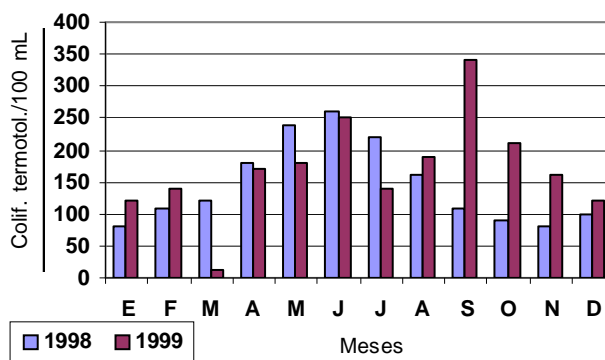
**Parámetros de diseño para filtración rápida completa (12)**

Se tomó una muestra que presentaba las siguientes características:

- turbiedad = 1.559 UNT
- pH = 6,94
- alcalinidad = 26 mg/L

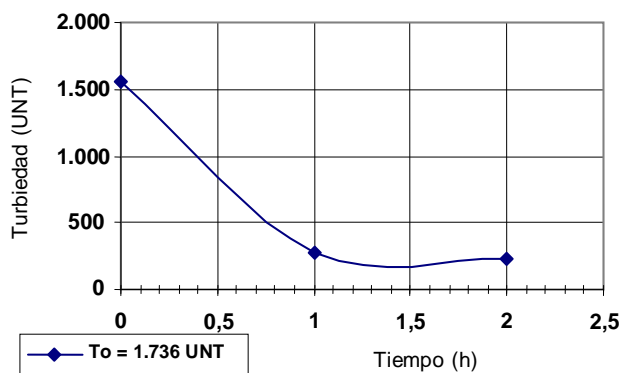
Se aisló una porción de la muestra y se efectuó una prueba de sedimentación natural tomando muestras cada hora.

En la primera hora la turbiedad bajó a 270 UNT y en la segunda a 230 (figura 11-31). Se dejó presedimentar toda la muestra y trasegando el sobrenadante se obtuvo una muestra homogénea que presentaba 388 UNT, con la que se efectuó el estudio completo de parámetros de los procesos.



**Figura 11-30.** Coliformes termotolerantes en el agua cruda

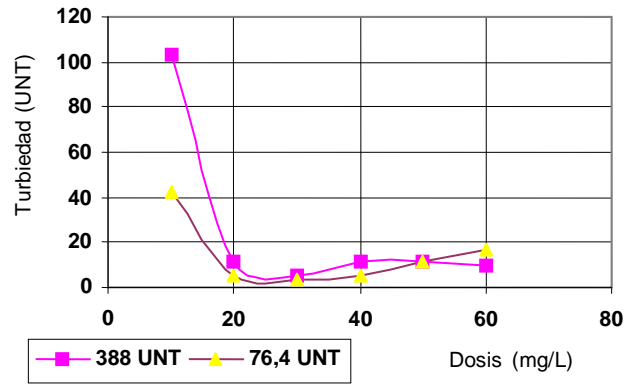
El gráfico de la figura 11-32 está indicando que para el rango de turbiedad estudiado de 76,4 a 388 UNT, las dosis óptimas varían entre 20 y 30 mg/L. Solo la muestra con 388 UNT fue producto de una presedimentación. Es posible que si las otras muestras hubieran sido sometidas a este proceso previo, las dosis obtenidas hubieran sido menores.



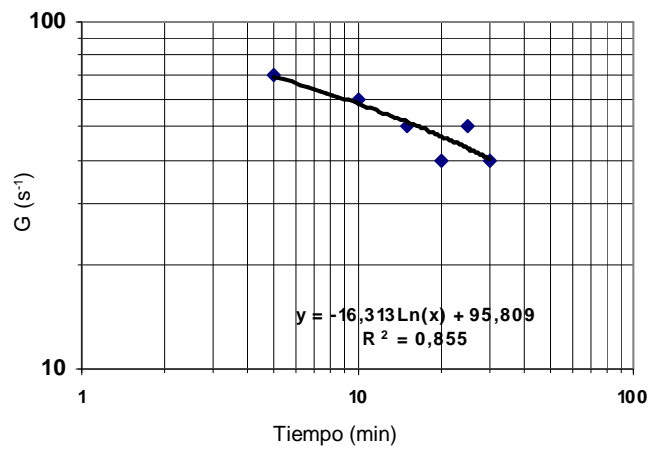
**Figura 11-31.** Curva de sedimentación natural

El gráfico de correlación de la figura 11-33 fue obtenido del estudio de floculación. El estudio indicó que el tiempo total de floculación necesario variaba entre 15 y 20 minutos y los gradientes óptimos entre 70 y 45 s<sup>-1</sup>. Se efectuó la prueba de de-

cantación con los tiempos y gradientes óptimos determinados y se obtuvo la curva de la figura 11-34, datos que se incluyen en el cuadro 11-19.



**Figura 11-32.** Dosis óptimas de coagulantes

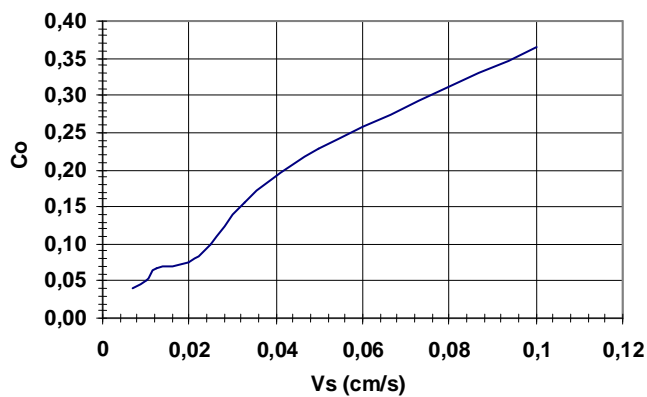


**Figura 11-33.** Correlación de gradientes de velocidad *versus* tiempo

**Cuadro 11-19. Resultados de la prueba de decantación (12)**

T seg	V cm/s	Turbiedad final (Tf)	Co = Tf / To
60	0,1000	25,6	0,37
120	0,0500	16	0,23
180	0,0333	11	0,16
240	0,0250	4,7	0,07
300	0,0200	5,3	0,08
480	0,0125	4,6	0,07
600	0,0100	3,6	0,05
900	0,0067	2,83	0,04

Con los resultados de las columnas 2 y 4 del cuadro anterior, se obtuvo la curva de decantación de la figura 11-34.



**Figura 11-34.** Curva de decantación

Analizando la eficiencia que se obtendría tratando las aguas de este río con tasas de decantación variables entre 10 y 30, se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro 11-20.

**Cuadro 11-20. Selección de la tasa óptima de decantación (12)**

<b>q</b> <b>m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d</b>	<b>Vs</b> <b>(cm/s)</b>	<b>Co</b>	<b>Rt</b> <b>(%)</b>	<b>Tr</b> <b>(UNT)</b>	<b>Tf</b> <b>(UNT)</b>
10	0,012	0,07	0,998	76,21	0
20	0,023	0,09	0,986	75,32	1,08
25	0,028	0,13	0,973	74,31	2,09
30	0,035	0,17	0,954	72,85	3,55

Los resultados del cuadro 11-20 indican que con una tasa de 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d se obtendría un efluente con 2,0 UNT. En el cuadro 11-21 se resumen los parámetros óptimos para el proyecto.

**Cuadro 11-21. Parámetros óptimos para el proyecto (12)**

<b>Instalaciones de tratamiento</b>	<b>Parámetros óptimos</b>	
Instalaciones de dosificación	Rango dosis de coagulante Concentración pH óptimo de coagulación	8 – 40 mg/L 1% el natural del agua
<b>Unidades de tratamiento</b>	<b>Tiempo de retención</b>	<b>Gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>)</b>
Presedimentador	Una hora	16 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d
Mezclador	Ideal menos de un segundo	700 a 1.200
Floculador	6 min 6 min 6 min	55 35 20
Decantadores	25 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Stumm, W. y O'Melia, C. R. Stechiometry of coagulation. *Journal of the American Water Works Association*. 1978.
- (2) Andreu-Villegas, R. y Letterman, R. D. Optimizing flocculator power input. *Journal of the Environmental Division*, abril, 1976.
- (3) Argaman, Y. y Kaufman, W. J. Turbulence and Flocculation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Proceedings, ASCE, 1970.
- (4) Hudson, H. E. Physical aspects of flocculation. *Journal of the American Water Works Association*, julio, 1965.
- (5) Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de control de calidad de agua para consumo humano. Plantas evaluadas en los diversos países de América Latina durante las prácticas de campo de los cursos de evaluación de plantas de tratamiento de agua. 1981-1988.
- (6) Pérez Carrión, J. y Castro de Esparza, M. L. *Determinación de variables químicas*. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.
- (7) Pérez Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. *Procesos Unitarios. Laboratorio, Floculación*. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.
- (8) Pérez, Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. Estudio y diseño de la planta de tratamiento de agua de Barranca. Lima, 1978.
- (9) Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. *Manual II. Criterios de Selección*. Serie Filtración Rápida. CEPIS, 1992.
- (10) Vargas, Lidia. Evaluación Técnica de la Planta de Filtración Rápida de Sullana. Informe Técnico 422, julio, 1995.
- (11) Vargas, Lidia. Estudio de tratabilidad de las aguas del río Vilcanota. Informe Técnico 444, mayo, 1996.

- (12) Vargas, Lidia. Asesoría-estudio de la nueva planta de filtración rápida de Paria, Huaraz, marzo, 1999.

### **BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL**

Argaman, Y. y Kaufman, W. J. Turbulence and Flocculation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. Proceedings, ASCE, 1970.

Di Bernardo, Luiz. Comparación entre la filtración realizada en papel de filtro y en una estación piloto de filtración directa ascendente. Universidad de São Paulo. Escuela de Ingeniería Sanitaria de San Carlos. Presentación en el Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Noviembre de 1984.

Hudson, H. E. Physical aspects of flocculation. *Journal of the American Water Works Association*, julio, 1965.

Pérez Carrión, J. y Castro de Esparza, M. L. *Determinación de variables químicas*. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.

Pérez Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. *Estudio y diseño de la planta de tratamiento de agua de Barranca*. Lima, CEPIS, 1978.

Pérez Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. *Procesos Unitarios. Laboratorio, Floculación*. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.

Pérez Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. *Procesos Unitarios. Laboratorio. Sedimentación*. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Lima, CEPIS, 1981.

Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de control de calidad de agua para consumo humano. *Plantas evaluadas en los diversos países de América Latina durante las prácticas de campo de los cursos de evaluación de plantas de tratamiento de agua*. 1981-1988.

### **Coagulación y mezcla rápida**

- Adin, Bauman y Cleasby. Selection of sand filtration rates. *Journal of the American Water Works Association* (5), mayo, 1962, pp. 579-602.
- Andreu-Villegas, R. y Letterman, R. D. Optimizing flocculator power input. Presentación en la 94.<sup>a</sup> Conferencia Annual de la American Water Works Association. Junio de 1974.
- Griffiths. Application of jar test analysis at Phoenix. Presentación en la 94.<sup>a</sup> Conferencia Anual de la American Water Works Association, junio, 1972.
- Hahn y Stumm, W. Kinetics of coagulation with hydrolyzed al. *Journal Colloid Interface SCI* 128, 1968, pp. 134-144.
- Hudson, H. Evaluation of plant operating records. *Proceedings AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants* (I), junio, 1974, pp.1-12.
- IVES. A new concept of filtrability. *Prog. Water Technology*, vol. 10, pp. 123-137.
- Letterman, R. D. Quon y Gemmell. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. *Proceedings AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants* (X), junio, 1974, pp. 145-156.
- Pérez, J. M. Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America; final report. Lima, CEPIS/OPS, 1977.
- Pérez, J. M. Evaluation of El Imperial water treatment plant; final report. Lima, CEPIS/OPS, 1978.
- Richter, C. *Avaliação de estação de tratamento de água: SANEPAR-CEPIS Tipo A*. Curitiba, SANEPAR, 1977.
- Singley, E. y Hudson, H. Jar testing and utilization of jar-test data. *Proceedings AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants* (VI), junio de 1974, pp. 79-103.



Vrale, L. y Jordan, R. M. Rapid mixing in water treatment. *Proceedings AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants (IX)*, junio, 1974. pp. 131-144.

Wagner, E. Up-grading existing water treatment plants rapid mixing and flocculation. *Proceedings AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants (IV)*, junio, 1974, pp. 56-66.

### **Floculación**

AWWA-EUA Public Health Service. Training Project Panel Discussion. Practical plant experience monitoring clarification processes. *AWWA-USPHS Training Project Proceedings/Atlantic City, N. J.*, junio, 1967.

Babcock, R. H. y Knowlton, K. F. Conductivity-difference control of chemical coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, 48 (6), junio, 1956.

Baylis, J. R. Measuring the volume of coagulated matter passing filter beds. *Water Works & Sewage*, 78, 1931, pp. 33.

Birkne, F. B. y Morgan, J. J. Polymer flocculation kinetics of dilute colloidal suspensions. *Journal of the American Water Works Association*, 60 (2), febrero, 1968, pp. 175-191.

Camp, T. R. & Stein, P. C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal Boston Society of Civil Engineers*, 30 (4), octubre, 1943, pp. 219-237.

Camp, T. R. Floc volume concentration. *Journal of the American Water Works Association*, 60, 1968, pp. 656-673.

Conley, W. R. y Evers, R. H. Coagulation control. *Journal of the American Water Works Association*, 60 (2), febrero, 1968, pp. 165-174.

Coulter, W. H. High speed automatic blood cell counter and cell size analyzer. National Electronics Conference, Chicago, Illinois.

- Fair, Gemmel. A mathematical model of coagulation. *Journal Colloidal Science*, 19 (4), abril, 1964, pp. 360-372.
- Gerdes, W. F. A new instrument—the streaming current detector. National ISA Analysis Instrument Symposium, 12/Houston, Texas, 1966.
- Granstom, M. L. y Shearer, S. D. Conductometric control of coagulant dosage in treatment plants. *Journal of the American Water Works Association*, 50 (3), marzo, 1958, pp. 410-416.
- Ham, R. K. A study of particle size changes during coagulation. Tesis de doctorado no publicada. Seattle University of Washington, 1967.
- Ham, R. K. y Christman, R. F. Agglomerate size changes in coagulation. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, 95 (SA3), junio, 1969, pp. 481-502.
- Hannah, S. A.; Cohen, J. M. y Robeck, G. G. Measurement of floc strength by particle counting. *Journal of the American Water Works Association*, 59 (7), julio, 1967, pp. 843-858.
- Hannah, S. A.; Cohen, J. M. y Robeck, G. G. Control techniques for coagulation-filtration. *Journal of the American Water Works Association*, 59 (9), setiembre, 1967, pp. 1149-1163.
- Harris, Kaufman, Krone. Orthokinetic flocculation in water purification. *Journal of Sanitary Engineering. Div. ASC*, diciembre, 1966, pp. 92-111.
- Hudson. Physical aspects of flocculation. *Journal of the American Water Works Association*, 57(1), julio, 1965, pp. 885-892.
- Kawamura, S. y Tanaka, Y. The application of colloid titration technique to coagulant dosage control. *Water & Sewage Works*, 113 (9), setiembre, 1966, pp. 348-357.
- Kawamura, S., Hanna, G. P. y Shumate, K. S. Application of colloid titration technique to flocculation control. *Journal of the American Water Works Association*, 59 (8), agosto, 1967, pp. 1003-1013.

- Langelier, W. F. y Ludwig, H. F. Mechanism of flocculation in the clarification of turbid waters. *Journal of the American Water Works Association*, 41 (2), febrero, 1949, pp. 163-181.
- Langelier, W. F.; Ludwig, H. F. y Ludwig, R G. Flocculation phenomena in turbid water clarification. *Transactions ASCE*, 118, 1953. Documento 2540, pp. 147-164.
- La Mer, V. K.; Smellie, R. H. y Lee, Pur-Kum. Flocculation, subsidence and filtration of phosphate slimes. *Journal of Colloid Science*, 12(6), diciembre, 1957, pp. 566.
- Ockershausen, R.W. *Control of coagulation processes utilizing aluminum sulfate*. Philadelphia, American Chemical Society, 1964.
- Packham, R. F. The coagulation process II. The isolation and examination of the fine suspended solids from nine English rivers, Water Research Association, 1960. Documento técnico 15.
- Packham, R. F. The coagulation process I. Effect of pH and the nature of turbidity. *Journal of Applied Chemistry*, 12, , diciembre, 1962, pp. 557-564.
- Shull, K. E. Filtrability techniques for improving water clarification. *Journal of the American Water Works Association*, 59 (9), setiembre, 1967, pp. 1164-1172.
- Smoluchowski, M. Versuch einer mathematischen theorie der koagulationskinetic Kolloid Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, abril, 92, 1911, pp. 129-168.
- Stumm, W. y O'Melia, C. R. Stoichiometry of coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, 60 (5), mayo, 1968, pp. 514-539.
- Villegas y Letterman. Optimizing flocculator power input. *Journal of the Environmental Engineering Division*, abril, 1976, pp. 251-262.

### **Decantación**

Anis, M. A.; Ahmad, S. y Middlebrooks, E. J. *Water supply engineering design*. Michigan, Ann Arbor Science, 1977.

Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima, CEPIS, OPS/OMS, 1973. Serie Técnica, 13.

Conway, R. A. y Edgards, V. H. How to design sedimentation systems from laboratory data. *Chemical Engineering* 68, 1.

McLaughlin, Ronald T. Settling properties of suspension. *Transactions ASCE*, 126, 1961, Documento 3275, pp. 1734-1786.

Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. Nueva York, McGraw-Hill Book Company, 1979. Segunda edición.

Zanoni, Alphonse E. y Blomquist, Marshall W. Column settling tests for flocculant suspensions. *Journal Environmental Engineering Division, ASCE*, 101(E3), junio, 1975, pp. 309-318.

