

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DE PLANTAS CONVENCIONALES Y DE TECNOLOGÍA APROPIADA

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo desarrolla los criterios y procedimientos para evaluar a fondo el comportamiento de los procesos y unidades que integran una planta de tratamiento de agua de tipo convencional clásica o de tecnología apropiada. Muchos de los procedimientos aquí expuestos son fácilmente adaptables a los sistemas de patente importada, como se verá en el capítulo 4.

A continuación iremos desarrollando los procedimientos de evaluación específicos para cada proceso que integra una planta de filtración rápida y para la unidad en la que se realiza.

2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN

Los principales factores que influyen en este proceso son los siguientes:

- Características de las aguas: especialmente, pH, temperatura, alcalinidad, contenido de turbiedad y color.
- Características de las sustancias químicas utilizadas: tipo, dosis, concentración de la solución.
- Características de las unidades de dosificación: tipo, exactitud, etcétera.
- Características de las unidades de mezcla rápida: lugar y forma de aplicación del coagulante, intensidad de mezcla y tiempo de retención.

A continuación se presenta una metodología de caracterización de dichas unidades.

2.1 Dosificación de sustancias químicas

Para evaluar la aplicación de sustancias químicas en una planta de tratamiento de agua, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: selección, manejo, almacenamiento y dosificación de estas sustancias.

2.1.1 Selección de sustancias químicas

Objetivo

Caracterizar las sustancias químicas y las condiciones óptimas de adición.

Procedimiento

Se requiere determinar en el laboratorio:

- el coagulante más efectivo;
- la dosis óptima de coagulante;
- el pH óptimo de coagulación;
- el modificador de pH más efectivo;
- la dosis óptima de modificador de pH;
- ayudante de coagulación y dosis óptima correspondiente;
- la concentración óptima del coagulante seleccionado;
- la secuencia de aplicación de sustancias químicas.

Estos ensayos se realizarán en el laboratorio y constituyen los parámetros óptimos de coagulación. La forma de ejecutar estos ensayos se describe en *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, capítulo 11, “Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades”.

2.1.2 Manejo y almacenamiento de sustancias químicas

Objetivo

Procedimientos y criterios para determinar las condiciones existentes de recepción, manejo y almacenamiento de sustancias químicas.

Procedimiento

En la planta de tratamiento que es materia de evaluación se requiere identificar lo siguiente:

- Si el diseño de la zona de entrada al almacén es adecuado para que el material sea correctamente recepcionado (ver figura 3-1).
- Las sustancias utilizadas en el tratamiento, así como su composición química. Comprobar que coincidan con las especificaciones técnicas originales.



Figura 3-1. Características correctas del ingreso al almacén (1)

- Rotulado, envases y forma de presentación de las sustancias. Comprobar que coincidan con las especificaciones originales de compra y licitación.
- Características de almacenamiento, lo cual debe incluir la evaluación estructural del almacén, la determinación de la capacidad total de almacenamiento, así como el lapso para el cual hay existencia de sustancias químicas, definidas por la ecuación:

$$V_T = \frac{Cd \times T_T}{d} \quad (1)$$

Donde:

V_T	=	volumen real o necesario (m^3)
Cd	=	cantidad media diaria de sustancias químicas (kg)
T_T	=	periodo (días)
d	=	densidad (kg/m^3)

La información obtenida debe compararse con la existencia real de sustancias químicas y el lapso en el cual esta se utilizará.

Adicionalmente, se debe evaluar el área de almacenamiento y su forma, el uso de tarimas adecuadas, la existencia de corredores entre ellas, (para que se pueda utilizar el material en forma cronológica; es decir, por orden de llegada), la presencia de humedad, etcétera, así como la forma de transferencia.



Figura 3-2. Forma correcta de almacenar sustancias químicas (1)

2.1.3 Dosificación de sustancias químicas

La dosis de coagulantes o de cualquier sustancia química empleada en el tratamiento de agua constituye uno de los parámetros más importantes del proceso de coagulación.



Figura 3-3. Forma incorrecta de almacenar sustancias químicas (1)

Objetivo

Caracterizar las sustancias químicas y las condiciones óptimas para su aplicación.

Equipo necesario

- Balanza de torsión.
- Recipiente para la toma de muestras (de acuerdo con la capacidad de dosificación).

Procedimientos de evaluación

- a) Determinación del grado de exactitud del dosificador

En cada dosificador, sea de vía húmeda o seca, se deberá:

- Llenar la tolva o depósito hasta 3/4 de su altura.
- Evaluar el dosificador en su punto actual de dosificación y luego con diferentes aperturas o velocidades. Tomar en cada caso tres muestras, pesarlas y determinar el valor medio (u obtener la concentración existente, si es un dosificador de vía húmeda).
- Graficar los valores teóricos (dados por el fabricante o utilizados en la planta) y los obtenidos en el ensayo, con fines comparativos.
- Adicionalmente, se requiere comparar la dosis que realmente se está utilizando en la planta con la dosis óptima obtenida en el laboratorio con el equipo de prueba de jarras, para lo cual:

$$P = \frac{Q \times D}{1000} \quad (2)$$

- D = dosis de coagulante (mg/L)
 Q = caudal tratado (m³/unidad de tiempo)
 P = peso dosificado (kg/unidad de tiempo)

Se ingresa a la curva con el peso dosificado correspondiente a la dosis óptima y ubicando la apertura en que se encontraba el dosificador, se determina la dosis que estaba aplicando la planta.

- b) Determinación de la flexibilidad del equipo

El rango de dosificación del equipo será igual a:

$$F = P. \text{ máx.} - P. \text{ mín.} \quad (3)$$



Figura 3-4. Forma incorrecta de almacenar el sulfato de aluminio (1)



Figura 3-5. Dosificadores de vía seca (1)

dosificadores de la figura 3-5 y se encontró que no tenían la flexibilidad necesaria para operar en esa planta, porque cuando la turbiedad del agua era menor de 500 UNT (70% del tiempo), estos equipos ya no tenían capacidad para dosificar. La figura 3-6 está mostrando el sistema de dosificación en solución que se debió instalar, en paralelo a los dosificadores en seco, para subsanar la falta de flexibilidad de los equipos.

c) Determinación del grado de concentración

Con el peso real dosificado y el caudal de agua que entra a la cámara de solución se puede determinar el grado de concentración existente, el cual será:

$$C = \frac{P \times 100}{q} \quad (3)$$

Donde:

P = peso dosificado (kg/s)
 q = caudal (L/s)
 C = concentración (%)

Donde:

$P. \text{máx.}$ = capacidad de dosificación máxima, al final del periodo de diseño, cuando el caudal y las dosis sean máximas.

$P. \text{mín.}$ = capacidad de dosificación mínima, al iniciar el periodo de diseño, cuando el caudal y las dosis son mínimas.

Se evaluó la batería de



Figura 3-6. Sistema de dosificación en paralelo (1)

d) Determinación del periodo de retención del tanque de disolución

- Determinar el volumen del tanque de solución.
- Con los caudales mínimo y máximo de agua que entra al tanque, se pueden determinar los tiempos de retención máximo y mínimo por medio de la siguiente ecuación:

$$T_o = \frac{V}{q \times 60} \quad (4)$$

Donde:

- V = volumen del tanque (litros)
 q = caudal del agua para solución (L/s)
 T_o = tiempo de retención (minutos)

e) Interpretación de resultados

El grado de exactitud (IE) de dosificación, conocidas las curvas teóricas y reales, se determina por la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{PR}{PT} \times 100 \quad (5)$$

Y depende de si el PR es mayor o menor que PT .

Donde:

- PT = peso teórico o el utilizado por la planta
 PR = peso real obtenido en la prueba de calibración

El grado de exactitud según el criterio indicado puede clasificarse de la manera ilustrada en el cuadro siguiente:

Cuadro 3-1. Exactitud de dosificadores (2)

Exactitud	Valor I (%)
Muy buena	< 5
Buena	5 - 10
Regular	10 - 15
Deficiente	> 15

- El dosificador debe ofrecer el suficiente rango de flexibilidad para operar en condiciones mínimas (con la mínima dosis al iniciar el funcionamiento de la planta) y máximas (con la máxima dosis al finalizar el periodo de diseño de la planta).
- Los estudios actuales relacionados con el grado de concentración ideal dan resultados y recomendaciones muy dispares con variaciones de valores inferiores a 1 a más del 10% y pH inferior a 4. Se recomienda determinar la concentración óptima con los respectivos ensayos de laboratorio para establecer la bondad de la concentración utilizada.
- Asimismo, diversos autores recomiendan periodos de retención de la solución mayores de 5 ó 10 minutos (esto último es lo preferible), para permitir la polimerización adecuada de los coagulantes y mejorar su eficiencia.

2.2 Aplicación práctica

En una planta de tratamiento de agua de América Latina se evaluó el sistema de dosificación, que consiste en dosificadores en seco de tipo volumétrico, y se obtuvieron los resultados indicados en el siguiente cuadro. Con esta información, se graficó la curva real de la figura 3-6.

Cuadro 3-2. Calibración del dosificador (2)

Abertura (%) (1)	Pesos obtenidos				
	Primer ensayo (kg/3 min) (2)	Segundo ensayo (kg/3 min) (3)	Tercer ensayo (kg/3 min) (4)	Promedio (5)	Real (kg/h) (6)
Mínima (6)	0,73	0,66	0,69	0,68	20,0
10	1,72	1,64	1,75	1,71	51,3
25	5,44	5,44	5,31	5,40	162,0
30	6,23	6,22	6,27	6,24	187,0
50	10,31	10,20	10,27	10,26	308,0
60	12,60	12,70	12,70	12,67	380,1
75	15,50	15,50	-	15,50	465,0
Máxima (90)	18,57	18,64	-	18,60	558,3

2.2.1 Exactitud

Para determinar la exactitud del equipo evaluado, se determinó la dosis óptima de coagulante, para una turbiedad de 200 UNT, y se obtuvo una dosis de 54 mg/L. Para ajustar esta dosis en el dosificador, se calculó el peso en kg/h y se obtuvo:

$$PT = \frac{Q \times D}{1.000} = \frac{0,920 \times 3,600 \times 54}{1.000} = 179 \text{ (kg/h)}$$

En la curva teórica de calibración del dosificador (figura 3-7), se determina que para aplicar un peso de 179 kg/h hay que graduar el equipo en la apertura 29. Para esta misma apertura en la curva de calibración real, se obtiene un peso de 160 kg/h.

$$E = \frac{PT}{PR} \times 100 = \frac{160}{179} \times 100 = 89\%$$

Un grado de exactitud de 89% nos indica que se está subdosificando en 11% y que el grado de exactitud de la dosificación tiende a ser regular.

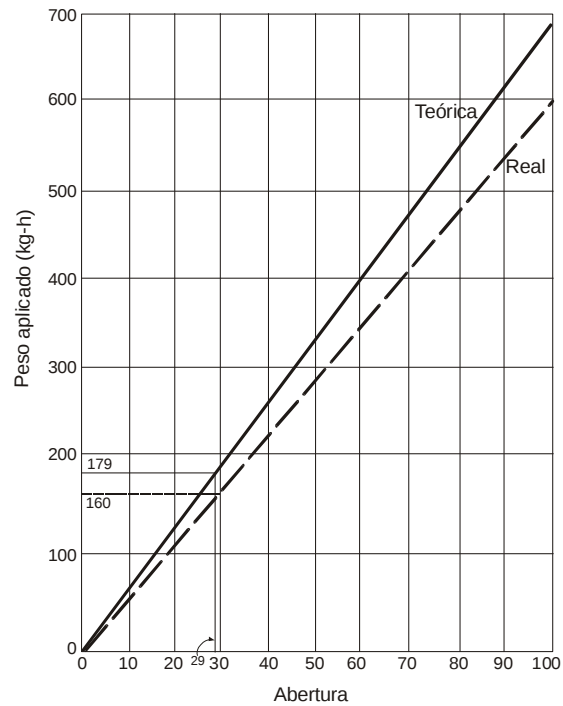


Figura 3-7. Calibración de dosificadores (2)

2.2.2 Concentración en el tanque de disolución del dosificador en seco

El caudal de agua que ingresaba al tanque en el momento de la evaluación era de 128 L/m y los caudales extremos que permitía la llave eran:

mínimo = 50 L/m, y
máximo = 220 L/m

Volumen del tanque de solución = 638,18 L
Caudal tratado = 920 L/s
Concentración ideal (laboratorio) = 4%



Figura 3-8. Tanque de solución del dosificador por vía seca (1)

La concentración real en el tanque de solución será de:

$$CR = \frac{PT \times 100}{q} = \frac{160 \times 100}{60 \times 128} = 2,08\%$$

que nos indica que la concentración real es 52% de la óptima.

$$E = \frac{CR}{CL} \times 100 = \frac{2,08}{4} \times 100 = 52\%$$

Sin embargo, la concentración real se encuentra dentro del rango recomendable (1 a 2%), por lo que se considera adecuada.

2.2.3 Tiempo de retención en la cámara de disolución

Los tiempos reales de retención serán:

Con el caudal mínimo, se produce un tiempo de retención alto de casi 14 minutos.

$$T_o(\text{maximo}) = \frac{V}{q} = 683/50 = 13,7 \text{ minutos}$$

Con el caudal máximo, el tiempo de retención es muy corto (3,1 minutos), menos del mínimo recomendable.

$$T_o(\text{mínimo}) = 683/220 = 3,10 \text{ minutos}$$

Con caudales inferiores a 137 L/min, el tanque tiene periodos de retención superiores a los 5 minutos. Con el caudal de 128 L/s que estaba ingresando al momento del ensayo, el periodo de retención del tanque de disolución era adecuado (5,34 minutos).

$$T_o(\text{al momento del ensayo}) = 683/128 = 5,34 \text{ minutos}$$

3. EVALUACIÓN DE MEZCLADORES

La eficiencia del proceso de mezcla rápida depende de lo siguiente:

- Variables químicas relacionadas con el tipo y la dosis de coagulantes, así como de su concentración, y con características de las aguas.
- Variables físicas, tales como el tiempo e intensidad de la mezcla provocada por la energía disipada, ya sea por medios mecánicos o hidráulicos.

A continuación se detalla una metodología simplificada para obtener los parámetros reales de mezcla existentes en la planta.

Para determinar el comportamiento de las unidades de mezcla rápida, se recomienda efectuar los siguientes ensayos:

- geometría de la unidad;
- punto de aplicación de las sustancias químicas;
- determinación del tiempo de mezcla;
- determinación de la intensidad de la mezcla;
- condiciones hidráulicas de las obras de interconexión.

A continuación se detalla cada una de las pruebas enunciadas.

3.1 Geometría de la unidad y punto de aplicación de las sustancias químicas

3.1.1 Geometría de la unidad

Consiste en determinar si la unidad fue correctamente proyectada. Al comprobar la geometría de la unidad en un mezclador tipo rampa, como el que se puede apreciar en la figura 3-9, debemos observar que el resalto se produzca al pie de la rampa y que el coagulante se esté distribuyendo uniformemente a todo lo ancho del resalto, exactamente en el punto en que este se inicia.



Figura 3-9. Mezclador tipo rampa operando correctamente (1)



Figura 3-10. Mezclador hidráulico operando correctamente (1)

En el mezclador de la figura 3-10 se puede observar que el funcionamiento es correcto. El resalto es estable y el coagulante se distribuye de manera uniforme a todo lo ancho de la zona en turbulencia, lo que asegura una mezcla homogénea e instantánea del coagulante con la masa de agua.

En la canaleta Parshall de la figura 3-11 se puede observar que el resalto no se está produciendo en la garganta de la canaleta y como consecuencia de este defecto de diseño, el coagulante se aplica en un punto donde no hay turbulencia. Además, la aplicación del coagulante se efectúa en forma puntual. En consecuencia, la mezcla no será homogénea y la eficiencia de remoción de turbiedad y color de la planta será menor.

3.1.2 Punto de aplicación del modificador de pH

Aguas que presentan baja alcalinidad o un pH que esté fuera del rango óptimo para coagular requerirán que se modifiquen estas condiciones, mediante el añadido de hidróxido de cal, de acuerdo con lo determinado en las pruebas de laboratorio.

En la garganta de la canaleta Parshall de la figura 3-12, lugar donde debe formarse el resalto hidráulico, se pueden apreciar tres canaletas de bordes dentados para distribuir las sustancias químicas. La primera aplicación corresponde a la cal, la segunda al coagulante y la tercera al polímero; por consiguiente, la secuencia de aplicación es correcta.

La figura 3-13 muestra otro mezclador tipo canaleta Parshall en el que el punto de aplicación es correcto, la secuencia es correcta (primero la cal y luego el coagulante), pero la aplicación es puntual.



Figura 3-11. Mezclador defectuoso (1)

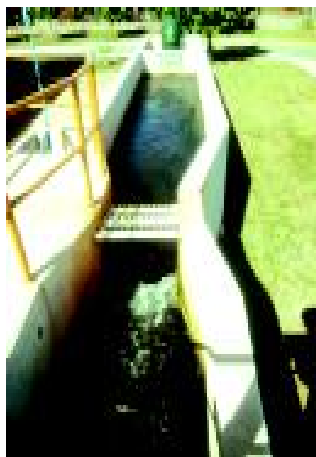


Figura 3-12. Mezclador tipo canaleta Parshall (1)



Figura 3-13. Secuencia de aplicación correcta (1)

3.2 Tiempo real de retención

Objetivo

Determinar el tiempo real de retención de la unidad de mezcla rápida.

Procedimiento

- El tiempo real de retención puede determinarse por medio del ensayo con trazadores. Corresponde al tiempo de presentación de la máxima concentración del trazador (ver capítulo 1, “Determinación del tiempo real de retención y características hidráulicas”).
- También se puede determinar obteniendo el volumen del resalto y el caudal real que está ingresando en ese momento a la planta. La relación de volumen (V) sobre caudal (Q) nos dará el tiempo de retención de la mezcla.

Interpretación de los resultados

El tiempo de mezcla debe tener relación con el tipo de proceso de coagulación que se desarrolla; así, si se produce coagulación por absorción, el tiempo de mezcla debe ser inferior a un segundo, pero si se produce coagulación de barrido, puede variar desde menos de uno hasta cerca de 7 segundos.

Cuadro 3-3. Relación de temperatura

Temperatura (°C)	$\sqrt{\gamma/\mu}$
0	2.337
4	2.502
10	2.737
15	2.920
17	2.998
20	3.115
25	3.267

3.3 Intensidad de la mezcla

Objetivo

Determinar el gradiente de velocidad de la unidad de mezcla rápida.

Procedimiento

Si la unidad es de tipo hidráulico, se requiere determinar:

- Directamente la pérdida de carga (H).
- El tiempo de retención (Tr), mediante trazadores o determinando el volumen del resalto (V) y el caudal de operación (Q).
- La temperatura del agua. Seleccionar en el cuadro 3-3 la relación $\sqrt{\frac{\delta}{\mu}}$.

Reemplazar estos datos en la ecuación del gradiente de velocidad:

$$G = \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{H}{T_R}} \quad (7)$$

Si la unidad es de tipo mecánico, se deben determinar:

- La velocidad de giro del agitador N , midiéndola directamente en el eje del agitador, por medio de un tacómetro.
- Las características geométricas del rotor: área (A) y radio de giro (R) de las paletas, así como el volumen del reactor (V). Con estos datos, se puede calcular el gradiente real de velocidad mediante la siguiente expresión:

$$G = K \sqrt{\frac{N^3 \cdot A \cdot \sum R^3}{\mu V}} \quad (8)$$

Interpretación de los resultados

Estudios realizados indican que la tasa de aglomeración máxima en un reactor depende del rango de gradiente de velocidad y el tiempo de retención en el que está operando; existe un rango óptimo para cada tipo de unidad (cuadro 3-4).

Cuadro 3-4. Gradientes óptimos de mezcla (2)

Unidad de mezcla	Valores de G (s^{-1})
Retromezclador	800–1,000
Salto hidráulico	$\approx 1,000$
Difusores	800–1,000
Mezcladores en línea	3,000–5,000

A su vez, el reactor adecuado para cada tipo de agua depende del mecanismo de desestabilización predominante en la coagulación. Es así que los retromezcladores solo son eficientes para los casos de coagulación por barrido y los difusores, salto hidráulico y mezcladores en línea para ambos casos: adsorción y barrido. Esto se fundamenta en el hecho de que los parámetros de mezcla son importantes en la coagulación por adsorción e indiferentes en la coagulación por barrido. En este último caso, lo más importante es la dosis de coagulante para conseguir el mecanismo de barrido.

3.4 Condiciones hidráulicas en las interconexiones

Objetivo

Determinar las condiciones hidráulicas existentes en las estructuras de interconexión entre las unidades de mezcla rápida y los floculadores.

Procedimiento

Medir el caudal, los tiempos reales de retención, así como la pérdida de carga, y con ellos determinar el gradiente de velocidad.

Interpretación de los resultados

Aparentemente, los gradientes de velocidad adecuados en las estructuras de interconexión entre unidades de mezcla rápida y floculación no deben exceder de $100 s^{-1}$. Valores superiores pueden ser perjudiciales.

Aplicación práctica

En una planta de tratamiento se evaluaron los parámetros de mezcla rápida. La planta tenía a la entrada la canaleta Parshall que se puede apreciar en la

figura 3-15. Esta canaleta estaba siendo usada como unidad de medición y mezcla rápida. De la canaleta salía una línea de 117 metros de longitud con diámetros de 12", 14" y 16".

3.4.1 Condiciones de la canaleta Parshall como medidor de caudal

Observando la vista de la figura 3-15, la canaleta está ubicada al lado derecho y también se puede apreciar, pintado de rojo, el inicio del tramo de tubería de 16" de diámetro.

La canaleta carece de canal de aproximación y de salida. No sigue las recomendaciones de Parshall y, por lo tanto, la medición no es confiable.



Figura 3-14. Canaleta Parshall como medidor y mezclador (1)

3.4.2 Condiciones en la canaleta Parshall como mezclador

- **Punto y forma de aplicación de las sustancias químicas**

En la figura 3-14 podemos apreciar que la aplicación de la cal y la del coagulante se efectúan sobre el resalto, pero en forma puntual, y ambas simultáneamente.



Figura 3-15. Ubicación de la canaleta Parshall de la figura 3-13 (1)

- **Tiempo de retención de la mezcla**

Se determinó el volumen del resalto ($0,128 \text{ m}^3$), y el caudal de operación el día de la evaluación era de 126 metros cúbicos. Con estos datos se determinó el tiempo de retención:

$$Tr - V/Q = 0,128/0,126$$

$$Tr = 1,02 \text{ segundos}$$

Gradiente de velocidad de la mezcla rápida

Se siguieron los siguientes pasos:

- a) Por nivelación se determinó la pérdida de carga en el resalto = 0,14 m
- b) Con un termómetro de laboratorio, se determinó la temperatura del agua = 12 °C
- c) Se determinó la relación de $\sqrt{\frac{\delta}{\mu}}$ para 12 °C = 2.800
- d) Se calculó el gradiente de velocidad:

$$G = 2.800 \sqrt{\frac{0,14}{1,02}} ; \quad G = 1.037 \text{ s}^{-1}$$

Se puede apreciar que los parámetros de la canaleta estaban dentro de los límites correctos.

Veamos ahora qué pasa entre la canaleta y el floculador. En el cuadro 3-5 se resume el análisis de los gradientes de velocidad en la línea de enlace entre la canaleta Parshall y la planta.

Cuadro 3-5. Gradientes de velocidad en la tubería de agua coagulada (1)

Tramos de tubería	Diámetro (m)	Área (m²)	Perímetro (m)	Radio hidráulico	Velocidad (m/s)	Gradiente de velocidad (s⁻¹)
16"	0,41	0,13	1,28	0,10	0,97	135
14"	0,36	0,10	1,12	0,09	1,27	214
12"	0,30	0,07	0,96	0,08	1,73	367

Antes de que el agua ingrese al floculador se encuentra la rampa de la figura 3-16, por lo que se consiguió la información necesaria para determinar el gradiente de velocidad:

$$\begin{aligned}
 \text{Caudal de operación} &= 0,126 \text{ m}^3/\text{s} \\
 \text{Pérdida de carga en la rampa} &= 0,40 \text{ m} \\
 \text{Valor de } \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} \text{ para } 12^\circ \text{C de temperatura} &= 2.800 \\
 \text{Volumen del resalto} &= 0,80 \text{ m}^3 \\
 \text{Tiempo de retención} &= V/Q = 0,80/0,126 = 6,35 \text{ seg.} \\
 G &= 2.800 \sqrt{\frac{0,40}{6,35}} = 703 \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

En el cuadro 3-6 estamos resumiendo el desarrollo de gradientes de velocidad, desde la mezcla rápida hasta la entrada al floculador.

Cuadro 3-6. Desarrollo de gradientes de velocidad en la interconexión mezcla-floculador (1)

Componentes de la interconexión	Gradientes de velocidad (s-1)
Canaleta Parshall	1.037
Tubería de 16"	135
Tubería de 14"	215
Tubería de 12"	367
Rampa	703



Figura 3-16. Mezclador tipo rampa en la entrada al floculador (1)

Interpretación de los resultados

El gradiente de velocidad de la mezcla rápida es adecuado. Se encuentra entre 700 y 1.200 s-1, pero la distribución de gradientes de velocidad en la interconexión es dañina para el flóculo.

En esta zona los gradientes de velocidad deberían variar en forma decreciente entre 100 y 70 s-1 y están a la inversa: varían en forma creciente por encima de 100 s-1.



Figura 3-17. Caja de entrada de la unidad tipo rampa (1)

En las últimas obras de mejoramiento efectuadas en la planta, la canaleta Parshall fue prevista solo como medidor de caudal y la aplicación del coagulante debía efectuarse en la rampa. El personal de operación había estado acostumbrado a dosificar en la canaleta Parshall y siguió haciéndolo así, sin seguir las recomendaciones del proyecto de mejoramiento. Esta evaluación sirvió para de-

mostrar la magnitud del impacto de esta operación en la calidad del flóculo y sobre todo en la eficiencia de la planta.

4. EVALUACIÓN DE FLOCULADORES

La unidad de floculación tiene la función de formar el flóculo, que debe reunir ciertas características —peso, tamaño y compacidad— y para lograrlo, esta unidad debe trabajar bajo determinados parámetros que están en función de la calidad del agua que trata.

A continuación se detallan los ensayos que es preciso llevar a cabo para evaluar las características del proceso de floculación.

- geometría de la unidad;
- caudal de operación;
- parámetros óptimos de floculación: gradientes de velocidad y tiempos de retención;
- tiempo de retención de la unidad de floculación;
- intensidad de floculación o gradientes de velocidad en la unidad;
- características hidráulicas de la unidad: tipo de flujo, espacios muertos y cortocircuitos;
- tiempo de formación del flóculo;
- tamaño del flóculo producido.

4.1 Geometría de la unidad

Consiste en determinar si la unidad fue correctamente proyectada y construida y si se encuentra en buen estado de mantenimiento.

4.1.1 Unidades hidráulicas

Unidad de pantallas de flujo horizontal

Debemos determinar si:

- Todas las pantallas se cruzan.
- El espaciamiento entre pantallas es uniforme en cada tramo de la unidad.
- El ancho de las vueltas es uniforme e igual a 1,5 el espaciamiento de las pantallas.
- La profundidad inicial y final de la unidad son iguales.



Figura 3-18. Unidad de pantallas de flujo horizontal (1)

4.1.2 Unidad de pantallas de flujo vertical

Determinar si:

- Las pantallas están completas y bien ubicadas.
- La unión entre la pantalla y la pared es estanca.
- Las pantallas se cruzan en todos los tramos.
- Las pantallas son estructuralmente adecuadas.



Figura 3-19. Floculador de pantallas de flujo vertical (1)

4.1.3 Aplicación práctica

A continuación se ha considerado una serie de ejemplos de unidades evaluadas cuya geometría no es apropiada para formar un buen flóculo.

El desorden de las placas del floculador de la figura 3-20 es consecuencia de un sistema de sujeción no apropiado. El movimiento del agua desplazaba a las pantallas, formando cortocircuitos entre los canales y rompiéndolas.



Figura 3-20. Floculador con un mal sistema de sujeción (1)

En la figura 3-21, en la parte superior izquierda, se puede apreciar que las últimas pantallas de la unidad no se cruzan y el agua pasa directamente por en medio, lo que genera espacios muertos en las zonas laterales limitadas por las pantallas. No se eligió el ancho adecuado para la unidad y en el último tramo las placas ya no se cruzan. También se puede apreciar el resalto que se forma a la salida de la unidad, consecuencia de una distribución no uniforme de caudales a varias unidades en paralelo.



Figura 3-21. Floculador de pantallas de flujo horizontal (1)

En la unidad de la figura 3-22 se puede apreciar que el agua da la vuelta a la pantalla con tanta velocidad que forma remolinos. También se puede observar que el borde libre es prácticamente 50% de la altura total de la unidad. Estos defectos se deben a que el perfil hidráulico de la planta no se hizo correctamente. El nivel del floculador baja hacia el final, la sección se reduce, la velocidad se incrementa y, por consiguiente, también lo hace el gradiente de velocidad.

En la unidad de la figura 3-23, al determinar los tirantes de agua al inicio y al final de la unidad, se encontró que al final las alturas eran menores. Si las secciones al final son más pequeñas y el caudal es constante, la velocidad se incrementa y también lo hace el gradiente de velocidad. En esta situación los gradientes de velocidad se desarrollaban de menor a mayor, condiciones muy adversas para la formación del flóculo. Observando los planos, se encontró que el fondo de la unidad era plano.



Figura 3-22. Floculador de pantallas de flujo horizontal (1)



Figura 3-23. Floculador de pantallas de flujo horizontal (1)

La unidad de la figura 3-24 está compuesta de tres tanques, en los que se han instalado los gradientes de velocidad de mayor a menor. En la parte media del tramo ubicado en la parte inferior de la foto se puede observar que las placas están de un mismo lado y una de ellas es muy corta. El agua pasa directamente por el lado derecho del tanque y se forman espacios muertos entre las placas.

El problema es de operación y mantenimiento. Los operadores colocaron maderas anchas para caminar por encima de las pantallas y las pantallas de asbesto-cemento, de un centímetro de espesor, no tienen suficiente resistencia para el peso de una persona.

La figura 3-25 muestra un floculador de flujo vertical, con las pantallas



Figura 3-24. Defectos de operación y mantenimiento (1)

desorganizadas y largos tramos de la unidad sin pantallas. En casos como este, pareciera que el objetivo de la unidad es pulverizar el flóculo. Ante descuidos como este, no hay tecnología que funcione.

En el floculador de pantallas de flujo vertical de la figura 3-26, las pantallas que se consideraron eran demasiado delgadas para la presión de 4 metros de profundidad de agua que soportan. Como se puede apreciar, la fuerza del agua las está doblando y sacando de los ángulos que las sujetan a las paredes.



Figura 3-25. Floculador de pantallas de flujo vertical (1)

Como consecuencia de este defecto de diseño, la geometría de la unidad se ha alterado y la distribución de gradientes de velocidad es muy irregular, lo que afecta la consistencia del flóculo.

En la unidad de la figura 3-27 el sistema de sujeción proyectado deja espacios entre las pantallas y las paredes y se forma un cortocircuito que altera el tiempo de retención de la unidad y la formación del flóculo.



Figura 3-26. Floculador de pantallas (1)



Figura 3-27. Sistema de sujeción defectuoso (1)

4.2 Caudal de operación

Para todos los cálculos que se van a efectuar, se requiere conocer el caudal de operación de la unidad. Cuando hay una sola unidad, el caudal de operación será igual al caudal de operación de toda la planta, pero cuando se tienen varias unidades operando en paralelo, será necesario efectuar una prueba de distribución de caudales aplicando trazadores (ver el capítulo 1).

4.3 Parámetros óptimos del proceso

Los parámetros óptimos —gradiente de velocidad y tiempo de retención— se determinan en el laboratorio con el agua que ingresa a la planta, según procedimientos descritos en el capítulo 11 de *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*.

4.4 Tiempo de retención real y características hidráulicas de la unidad

La determinación del tiempo real de retención se efectúa mediante la aplicación de trazadores. Ver los criterios y el procedimiento en el capítulo 1.

4.5 Intensidad de floculación

El procedimiento para determinar la intensidad de la floculación o gradiente de velocidad depende del tipo de unidad. A continuación se especifica un procedimiento para determinar el gradiente de velocidad en un floculador hidráulico y otro para efectuar la misma determinación en una unidad mecánica.

4.5.1 Unidad de floculación hidráulica

Propósito

La finalidad de esta prueba es determinar el gradiente de velocidad con que trabaja cada tramo del floculador.

Materiales

Cinta métrica y un teodolito o nivel.

Procedimiento

- Determinar la pérdida de carga (H) en cada tramo nivelando la superficie del agua.
- Determinar la temperatura del agua y seleccionar en el cuadro 3-3 el valor de $\sqrt{\frac{\delta}{\mu}}$
- Aplicar trazadores y determinar el tiempo de retención real en la unidad.

El gradiente de velocidad será:

$$G = \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} \times \sqrt{\frac{H}{T_R}} \quad (6)$$

Donde:

- H = pérdida de carga (cm)
 T_R = tiempo real de retención (seg.)
 $\sqrt{\frac{\delta}{\mu}}$ = función de temperatura

4.5.2 Unidad de floculación mecánica

Propósito

Determinar el gradiente de velocidad con que está operando cada una de las cámaras de la unidad.

Materiales

Una cinta métrica y un tacómetro.

Procedimiento

- Con una cinta métrica, tomar las dimensiones de las paletas: largo (l), ancho (b) y el radio de giro respecto del eje (r_l).
- Tomar las dimensiones de las cámaras y determinar el volumen (V) de cada cámara de la unidad.

- Determinar el gradiente de velocidad, mediante la ecuación 7:

$$G = K \sqrt{\frac{N^3 \cdot A \cdot \sum R^3}{\mu \cdot V}} \quad (7)$$

Siendo K un coeficiente que se puede considerar aproximadamente igual a 90 y 45 para las condiciones detalladas en la figura 3-28:

Conocidos N y G , se puede cambiar el gradiente de velocidad (G_0) determinando el valor de N_0 correspondiente, mediante la ecuación 8:

$$\frac{N}{N_0} = \left[\frac{G}{G_0} \right]^{2/3} \quad (8)$$

4.6 Tiempo de formación inicial del flóculo

Propósito

Este ensayo tiene como finalidad determinar el tiempo que demora el flóculo en empezar a formarse.

Materiales

Para la determinación de este ensayo, se requieren de 6 a 10 vasos de vidrio de un litro de capacidad.

Procedimiento

- Partiendo del inicio de la unidad, tomar muestras en el punto medio de cada tramo o cámara, a una profundidad de 50 centímetros aproximadamente.
- Cada muestra que se extrae se va observando a contraluz. El ensayo concluye en el momento en que se empiezan a observar los primeros indicios de formación de los flóculos.

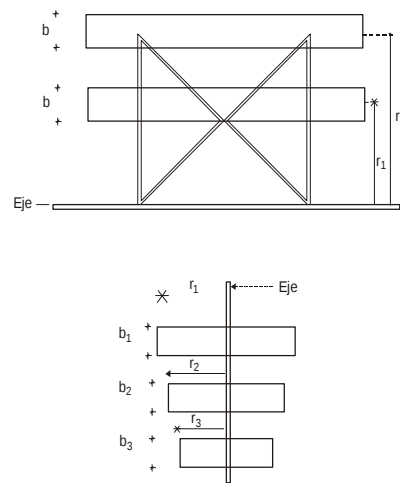


Figura 3-28. Tipos de paletas (2)

- Se determina el volumen ($\forall$) comprendido entre el inicio de la unidad y el punto en que se detectaron los primeros flóculos en formación.

El tiempo de formación del flóculo será:

$$Tp = \frac{\forall}{Q} \quad (9)$$

Interpretación de los resultados

Esta interpretación se realiza comparando el tiempo de formación obtenido en la planta (Tp) con el tiempo de formación determinado en el laboratorio (TL). El tiempo de formación (TL) se determina durante el ensayo de sedimentación en el laboratorio.

Cuando esta relación es aproximadamente igual a la unidad, el flóculo se está formando en el periodo de tiempo correcto. A medida que este valor se aleja más de la unidad, el proceso se hace más ineficiente y el flóculo puede terminar de formarse dentro de la unidad de sedimentación.

4.7 Tamaño del flóculo producido

Propósito

Determinar el tamaño del flóculo formado en la unidad de floculación.

Materiales

Dos vasos de vidrio de un litro de capacidad y la tabla 3-2 del índice de floculación de Willcomb o la figura de comparación para estimar el tamaño del flóculo producido (figura 3-29).

Procedimiento

- Tomar con los vasos de vidrio dos muestras a la salida de la unidad. Se toman dos muestras con la finalidad de promediar o comprobar los resultados.
- Determinar el tamaño del flóculo producido, por comparación con la figura 3-29 y el cuadro 3-7. Esta determinación es bastante subjetiva y depende

del criterio del observador. Sin embargo, la velocidad con la que aprecie-
mos caer el flóculo nos da un buen criterio sobre su calidad (tamaño, peso
y consistencia).

Interpretación del resultado

El resultado obtenido se compara con el tamaño del flóculo determinado
durante la etapa de floculación preliminar del ensayo de sedimentación en prueba
de jarras.

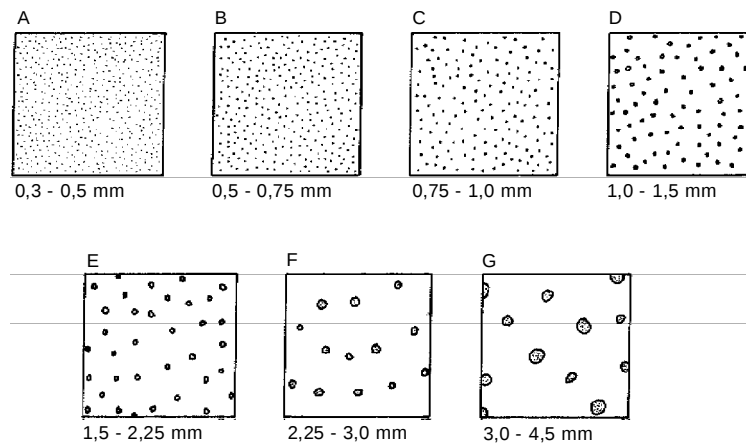


Figura 3-29. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la
coagulación según la Water Research Association (3)

Cuadro 3-7. Índice de floculación de Willcomb (3)

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 no 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 totalmente, dejando el agua cristalina.

4.8 Aplicación práctica

4.8.1 Floculador mecánico

Para evaluar los floculadores (figura 3-30) de una planta de tratamiento, se realizaron los siguientes ensayos:

Determinación de condiciones hidráulicas. Se realizó el ensayo de trazadores usando sal común y se obtuvieron los datos indicados en el cuadro 3-8 y en los gráficos de las figuras 3-31 y 3-32.

El tiempo de retención teórico de la unidad es:

$$\begin{aligned} Q &= 10,22 \text{ m}^3/\text{min} \\ V &= 104,44 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$T_o = V/Q = 104,44/10,22 = 10,22 \text{ min}$$

De la figura 3-31 se obtiene un tiempo real de retención de $T_R = 5,74 \text{ min}$.

De la figura 3-32 se deducen las siguientes conclusiones:

$$\text{Flujo de pistón} = P = \frac{\sum \text{Tag } \alpha}{\sum \text{Tag } \alpha + \sum \text{Tag } \beta} = 0,16\%$$

$$\text{Flujo mezclado} = M = 1 - P = 1 - 0,16 = 0,84\%$$

$$\text{Espacios muertos} = m = 1 - \theta / P = 0,73\%$$

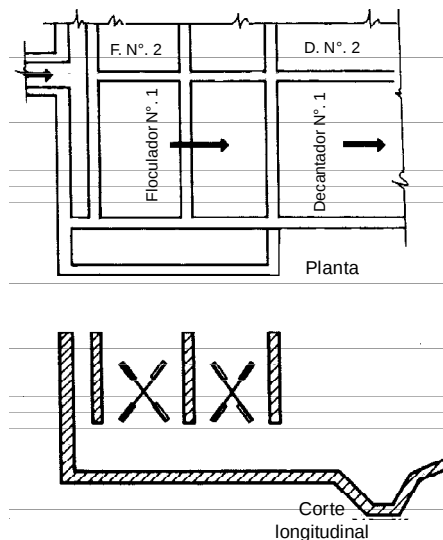


Figura 3-30. Esquema del floculador mecánico

Cuadro 3-8. Prueba de trazadores (2)
Co = 250

Muestras	Tiempo (min)	T/T _o	C	C-Ci	C-Ci	F (t)	1-F (t)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0	0	0	250	0	0	0	100
1	1	0,033	545	295	295	13,68	86,32
2	2	0,065	495	245	540	25,05	74,95
3	3	0,098	400	150	690	32,01	67,99
4	4	0,130	400	150	840	38,97	61,03
5	5	0,164	380	130	970	45,01	54,99
6	6	0,196	395	145	1.115	51,74	48,26
7	7	0,229	395	145	1.160	58,46	41,54
8	8	0,262	360	110	1.370	63,57	36,43
9	9	0,294	360	110	1.480	68,67	31,33
10	10	0,397	360	110	1.590	73,78	26,22
11	12	0,393	360	110	1.700	78,88	21,12
12	15	0,491	345	95	1,795	83,29	16,71
13	18	0,589	320	70	1,865	86,54	13,46
14	21	0,687	315	65	1,930	89,55	10,45
15	24	0,785	315	65	1,995	92,57	7,43
16	27	0,883	300	50	2,045	94,89	5,11
17	30	0,981	290	40	2,085	96,75	3,25
18	33	1,079	270	20	2,105	97,67	2,33
19	36	1,178	270	20	2,125	98,60	1,40
20	39	1,276	260	10	2,135	99,07	0,93
21	42	1,374	255	5	2,140	99,30	0,70

Características del flóculo

A la salida del floculador se midió un flóculo de 0,75 a 1,00 milímetros y en condiciones óptimas de laboratorio se obtuvieron flóculos de 2,50 a 3,00 milímetros.

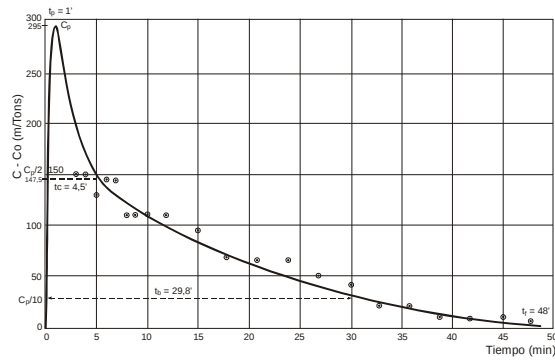


Figura 3-31. Curva de concentración del trazador (2)

Intensidad de floculación

$$V_R = V_o \times \frac{T_R}{T_o} \quad (10)$$

El volumen real de floculación será:

$$V_R = \frac{V_o \times T_R}{T_o} = \frac{118,60 \times 5,74}{10,22} = 66,61 \text{ m}^3$$

Se determinaron en el campo los siguientes datos:

Velocidad de rotación (N): 12,0 rpm = 0,20 rps

Area de paletas (A): 1,42 m²

Radio de giro (R): 0,73 m

Factor de forma: 90

los cuales nos permiten calcular el gradiente real en el floculador.

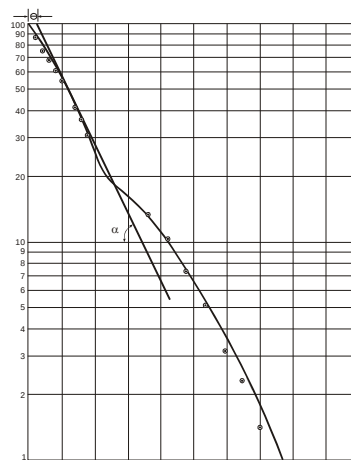


Figura 3-32. Porcentaje del trazador que permanece en la unidad de floculación en función del factor T/T_o .

$$G = 90 \sqrt{\frac{0,20^3 (1,42 \times 0,73^3)}{0,00011 \times 66,61}} = 70 \text{ s}^{-1}$$

Eficiencia comparativa del proceso

Turbiedad a la salida del floculador: $T_p = 10,0 \text{ UN}$

Turbiedad en el ensayo de jarras: $TL = 1,10 \text{ UN}$

$$I = \frac{TL}{Tp} \times 100 = \frac{1,10 \times 100}{10} = 11\%$$

Conclusiones

La eficiencia de esta unidad de floculación es muy baja (11%) debido a las grandes deficiencias de diseño que ocasionan grandes espacios muertos (73%), grandes cortocircuitos, tiempos reales de retención muy bajos (5,74 minutos en lugar de 10,22 minutos) y excesivos gradientes de velocidad (70 s^{-1} en lugar de 52 s^{-1}), lo que producirá flóculos sumamente compactos, que obstruyen la superficie del filtro.



Figura 3-33. Primer tramo del floculador sin pantallas (1)

4.8.2 Floculador hidráulico

Tiempo real de retención y características hidráulicas de la unidad

Se evaluó un floculador hidráulico de pantallas de flujo horizontal, de tres tramos (figura 3-33).

Se puede apreciar que el primer tramo de la unidad se encontraba sin placas (ver tanque de la parte inferior de la figura 3-33).

En el segundo tramo faltaban las primeras pantallas y algunas estaban rotas (figura 3-34).

Datos:

Caudal de proyecto = 45 L/s
 Caudal de operación en el momento de la prueba = 25 L/s
 Tiempo teórico de retención = 32,8 min

Se aplicó un trazador a la unidad y se obtuvo la curva de concentración del trazador ($C-C_0$) de la figura 3-35.



Figura 3-34. Segundo tramo del floculador evaluado (1)

El gráfico de la figura 3-36 indica que el trazador empezó a salir a partir de los 18 minutos y el tiempo de retención total en la unidad de mezcla lenta es de 22 minutos (máxima concentración de trazador). Por la forma de la curva, se puede deducir que en el primer tramo predomina el flujo de pistón y la forma del segundo tramo indica que existen zonas muertas.

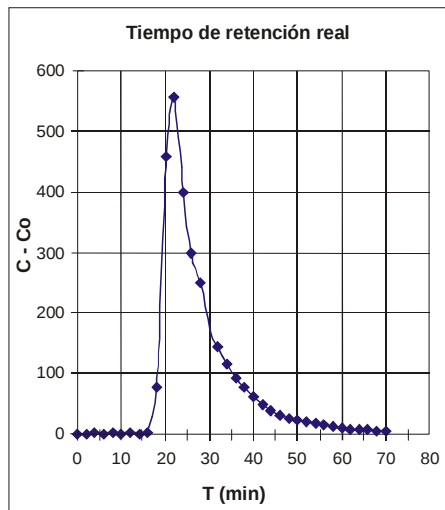


Figura 3-35. Tiempo de retención real

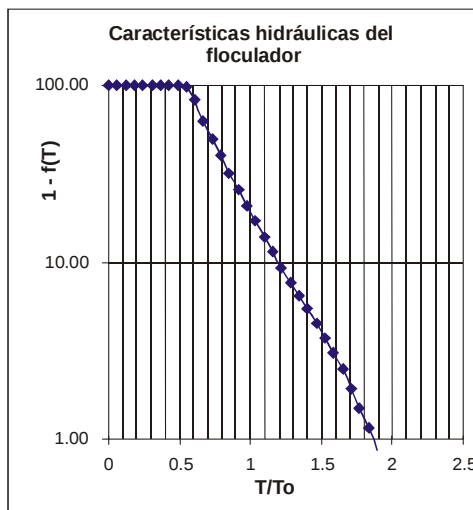


Figura 3-36. Características hidráulicas del floculador

Del análisis de la curva de $[1 - f(t)]$ versus $[T - T_0]$ de la figura 3-37, se obtienen las condiciones de flujo y las características hidráulicas de la unidad:

Flujo de pistón (p) = 66%

Flujo mezclado (M) = 34%

Espacios muertos (m) = 17%

Intensidad de floculación

Por nivelación se determinaron las pérdidas de carga en cada uno de los tramos de la unidad, así como la temperatura del agua cruda: 20 °C.

$$Y, \text{ por lo tanto, } \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} = 3.115$$

Reemplazando los datos de las columnas 2 y 3 del cuadro 3-9 en la ecuación del gradiente de velocidad para unidades hidráulicas, se obtienen los resultados de la columna 4. En la columna 5 se indican los gradientes de velocidad óptimos obtenidos en el laboratorio.

$$G = \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{H}{Tr}} \quad (11)$$

Cuadro 3-9. Determinación del gradiente de velocidad real en el floculador (1)

Tramos (1)	Pérdida de carga (m) (2)	Tiempo de retención promedio (seg) (3)	Gradiente de velocidad l s-1	
			Real (4)	Óptimo (5)
1	0,004	7,3	10	40
2	0,103	7,3	48	30
3	0,044	7,3	31	20

Tamaño del flóculo obtenido

Tipo 2 de la Escala de Willcomb: Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.

Evaluación de la unidad rehabilitada

Después de esta evaluación, se rehabilitó la unidad y un año después se volvió a evaluar.

La segunda vez el floculador estaba operando con un caudal de 29 litros por segundo y el tiempo de retención teórico en este caso fue de 28,3 minutos. Se aplicaron trazadores a la unidad y se obtuvieron las curvas de las figuras 3-37 y 3-38. Se puede observar que la forma de la curva de la figura 3-37 es diferente de la obtenida anteriormente (figura 3-35).

La curva es totalmente simétrica, lo que indica un flujo de pistón casi perfecto y la total ausencia de espacios muertos. El trazador empezó a salir a los 20 minutos y terminó de salir a los 23 minutos. El tiempo real de retención de la unidad fue de 22 minutos.

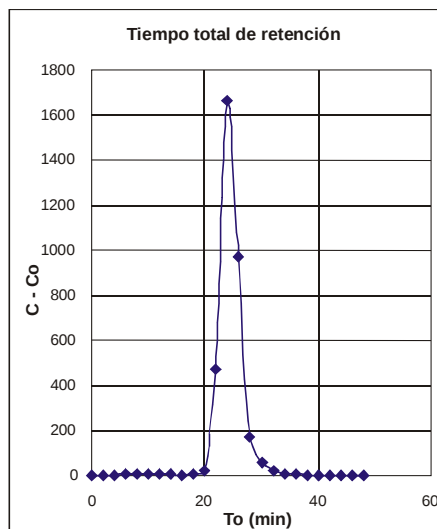


Figura 3-37. Tiempo total de retención

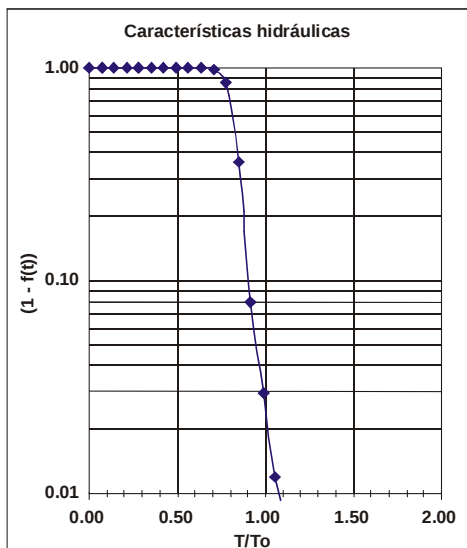


Figura 3-38. Características hidráulicas

Se analizó la curva de la figura 3-37 y se obtuvo un flujo de pistón de 94%.

Los gradientes de velocidad obtenidos esta vez fueron de 46, 25 y 16 s⁻¹, bastante cercanos a los óptimos (40, 30 y 20 s⁻¹).

La rehabilitación del floculador impactó en la eficiencia de todo el sistema, como se puede apreciar en el histograma de la figura 3-40.

Al aglomerarse mejor el flóculo, se elevó la eficiencia de remoción de la turbiedad de los decantadores. Cuando la unidad estaba en mal estado, durante el periodo lluvioso (de enero a marzo) se obtenía el agua decantada con una turbiedad de 3,8 a 6 UNT. Al rehabilitarse la unidad, se obtuvieron turbiedades de 2 a 3 UNT durante el mismo periodo.

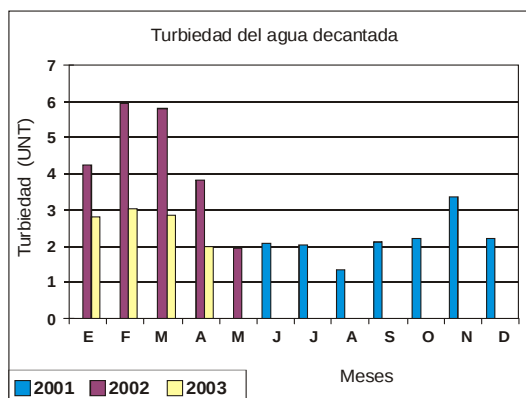


Figura 3-39. Turbiedad del agua decantada

También mejoró la remoción de coliformes fecales o termotolerantes en el agua decantada, como se puede apreciar en el histograma de la figura 3-40. Antes

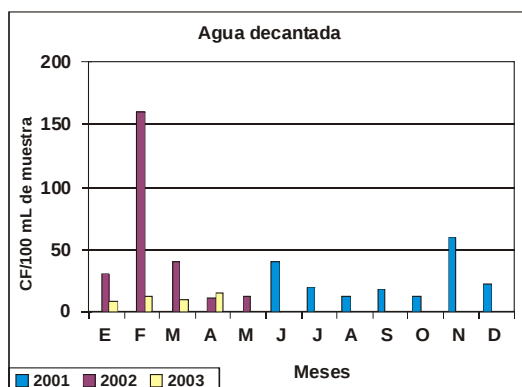


Figura 3-40. Agua decantada

de las obras de mejoramiento de esta unidad se identificaron NMP de coliformes fecales en el agua decantada de hasta 1,6 (10)², después de rehabilitada la unidad.

Conclusiones

Las condiciones de mantenimiento de un floculador de pantallas impactan en las características del flóculo y en la eficiencia total del sistema. En una unidad tan sencilla como

esta se puede obtener un flujo de pistón prácticamente puro y una eficiencia muy buena; sin embargo, por falta de mantenimiento se pierden estas ventajas.

5. EVALUACIÓN DE DECANTADORES

La decantación es el primer proceso de remoción y, debido a su gran eficiencia, en una planta de filtración rápida completa es el más importante mecanismo para separar sólidos de líquidos.

Los factores más importantes que afectan la eficiencia remocional de una unidad de sedimentación y/o decantación son los siguientes:

- Las características del proceso, y
- las condiciones del flujo hidráulico.

Estos factores, a su vez, dependen de:

- a) Las características fisicoquímicas de las aguas, especialmente turbiedad, color y temperatura.
- b) Las características del pretratamiento: mezcla-floculación.
- c) La configuración y diseño de las unidades y zonas de entrada, sedimentación, depósito de lodos y salida de agua decantada, los cuales dependen del tipo de unidad.
- d) Las características de las obras de interconexión.
- e) Operación y mantenimiento.

La evaluación de una unidad de sedimentación comprende:

- eficiencia;
- geometría de la unidad;
- comportamiento del canal de distribución;
- tiempo de retención;
- características hidráulicas;
- velocidad óptima de sedimentación;
- carga superficial real;
- características de las zonas de entrada y salida.

5.1 Eficiencia

Entre los diferentes factores que influyen en la eficiencia de una unidad de sedimentación y/o decantación, se han seleccionado los siguientes parámetros como los más importantes:

- calidad del agua sedimentada;
- calidad del agua cruda;
- carga superficial.

5.1.1 Eficiencia en función de la calidad del agua sedimentada

Los filtros rápidos mejoran apreciablemente su eficiencia al tratar aguas sedimentadas con bajas turbiedades, por lo que resulta crucial que los sedimentadores o decantadores produzcan agua de la mejor calidad posible.

Recientes investigaciones de la EPA recomiendan utilizar la turbiedad como índice para determinar la presencia de huevos de parásitos en el agua tratada e indican que para asegurar la remoción de estos huevos, los filtros deben producir agua con menos de 0,1 UNT. Esto implica que los decantadores hayan entregado un efluente con una turbiedad menor o igual a 2 UNT. Este es el nuevo reto. Debemos perfeccionar los diseños y optimizar la operación y mantenimiento para que los decantadores sean más eficientes.

Objetivo

Determinar, sobre la base de datos de operación de la planta, la calidad del agua producida en las unidades de sedimentación y/o decantación.

Procedimiento

Se agrupan los datos de turbiedad (o color) de agua sedimentada en rangos predeterminados y se calcula su frecuencia de presentación anual, con la cual se puede graficar la curva de frecuencia acumulativa.

Comentarios

Los decantadores se pueden clasificar con el siguiente criterio:

Cuadro 3-10. Clasificación en función de la calidad del agua producida (1)

Eficiencia	Turbiedad del agua decantada (UNT)
Excelente	< 5
Muy buena	5 - 10
Buena	10 - 15
Regular	> 15

Aplicación práctica

En el cuadro 3-11 se representan los datos de calidad de agua sedimentada (turbiedad) del primer año de funcionamiento de una planta de tratamiento de agua.

Los datos de las columnas 2 y 5 se representan en la figura 3-40.

Cuadro 3-11. Turbiedad del agua decantada (1)

Rango (1)	P.M. (2)	Frecuencia		
		Parcial (3)	Acumulada (4)	% (5)
0 – 1,99	1	66	66	18
2 – 3,99	2	105	171	47
4 – 5,99	5	81	252	69
6 – 7,99	7	38	310	85
8 – 9,99	9	37	347	95
10 – 11,99	11	14	361	99
12 – 13,99	13	4	365	100

Resultados

Turbiedad: mínima = 0,3 UNT

media = 3,20 UNT

máxima = 12,05 UNT

Conclusión

De la figura 3-41 se deduce que 95% del tiempo la planta presentó un efluente con menos de 7 UNT y solo 32% del tiempo fue menor de 2 UNT, por lo que el sistema necesita ser optimizado para que los decantadores alcancen esta meta.

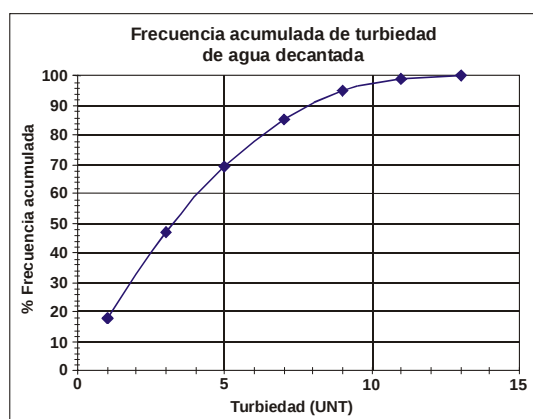


Figura 3-41. Frecuencia acumulada de turbiedad de agua decantada

5.1.2 Eficiencia en función de la calidad del agua cruda

La eficiencia del proceso de sedimentación depende sustancialmente de las características físicas, tanto de las aguas (temperatura) como de las partículas (turbiedad, color) y de su estado de presentación (coloidal, suspensión, tamaño y densidad). La eficiencia se incrementa en relación directa con el contenido de partículas en estado de suspensión hasta llegar usualmente a valores de 600 miligramos por litro, sobre los cuales disminuye por presentarse sedimentación interferida.

Objetivo

Determinar, a partir de datos de operación de la planta, la eficiencia de una unidad de sedimentación y/o decantación en función de la calidad del agua cruda.

Procedimiento

Agrupar los datos de calidad del agua cruda (turbiedad o color) en rangos predeterminados y encontrar los datos de calidad correspondientes al agua sedimentada.

A partir de estos datos se calculan las constantes y el correspondiente grado de correlación para la ecuación siguiente:

$$y = a + bx \quad (12)$$

Donde:

y = turbiedad (o color) del agua cruda

x = turbiedad (o color) del agua sedimentada

Se grafica en papel logarítmico, aritmético.

Comentarios

Se pueden obtener tres tipos de rectas como las indicadas en la figura 3-42.

Mientras menor es la pendiente (recta *A*), menor es la eficiencia del decantador. Mayores pendientes (recta *B*) indican mejores eficiencias.

Pendientes negativas (recta C) son representativas de decantadores de manto de lodos, los cuales, entre los límites indicados anteriormente, mejoran su eficiencia al desmejorar la calidad del agua cruda.

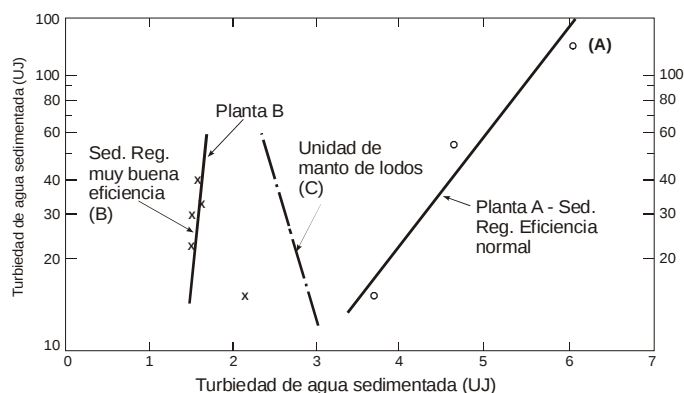


Figura 3-42. Agua cruda versus agua sedimentada para varios tipos de decantadores (1)

Si se comparan estos datos con los resultados obtenidos en ensayos de sedimentación ideal a nivel de laboratorio, puede determinarse el grado de eficiencia comparativa del proceso. Puede usarse el siguiente índice de comparación:

$$I = \frac{TL}{Tp} \times 100$$

Cuadro 3-12. Eficiencia comparativa (1)

Clasificación	Valor de I
Excelente	> 90
Muy buena	80 - 90
Buena	70 - 80
Regular	< 70

Aplicación práctica

Se evaluaron los decantadores laminares de una planta de tratamiento de agua y se obtuvieron los datos indicados en el cuadro 3-13.

Cuadro 3-13. Turbiedad del agua cruda y sedimentada (1)

Turbiedad del agua cruda (UNT)		3 Valores medios de turbiedad de agua decantada (UNT) (x)	4 $y = \log T_{AC}$
1 Rango	2 P. M.		
0 – 29,9	15	3,1	1,18
30 – 59,9	45	5,0	1,65
60 – 89,9	75	6,2	1,88
90 – 119,9	105	7,0	2,02
120 – 149,9	135	7,4	2,13
150 – 179,9	165	7,8	2,22
180 – 209,9	195	7,9	2,29
210 – 239,9	225	8,3	2,35
240 – 269,9	255	8,4	2,41
270 – 299,9	235	8,6	2,45
300 – 399,9	350	9,0	2,54
400 – 500	450	9,5	2,65

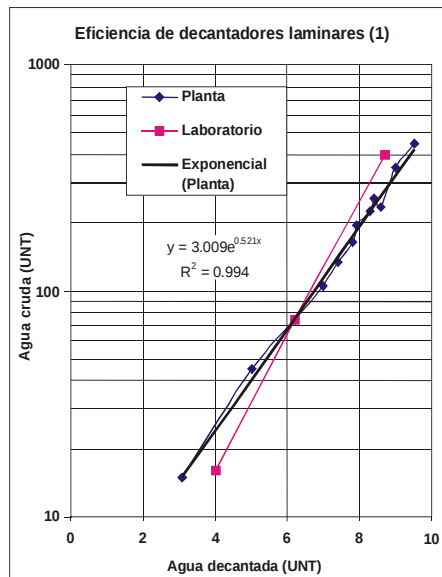


Figura 3-43. Eficiencia de decantadores laminares (1)

Analizando los datos de las columnas 3 y 4 y aplicando la teoría de los mínimos cuadrados a la ecuación de una recta, se determinó la correlación con un grado de ajuste de $r^2 = 0,99$.

Adicionalmente, en la figura 3-43 se representa la curva de correlación entre turbiedad de agua cruda y agua sedimentada a nivel de laboratorio. Se puede observar que con turbiedades de agua cruda inferiores a 100 UN, la eficiencia en el laboratorio es menor que la de la planta. Sin embargo, se aprecia que la unidad solo presenta un efluente con 2 UNT cuando la turbiedad del agua cruda es de 10 UNT.

5.2 Evaluación de las características de las unidades convencionales de flujo horizontal

Las unidades convencionales son las más antiguas de todos los tipos de decantadores y por ello suelen ser las más defectuosas.

Aunque actualmente este tipo de unidades casi no se emplean en las plantas de filtración rápida, por la enorme extensión que ocupan y porque son muy vulnerables a los factores ambientales, todavía hay un buen número de ellas en operación.



Figura 3-44. Decantador rectangular de flujo horizontal (2)

5.2.1 Geometría de la unidad

La eficiencia de estas unidades es tan buena como lo sean sus estructuras de entrada y salida, por lo que básicamente son estos los puntos los que más atención deben recibir en la evaluación.

Zona de entrada. A través de múltiples evaluaciones efectuadas, se ha encontrado que la mejor zona de entrada —esto es, la que evita la formación de cortocircuitos y con la cual se logra mayor porcentaje de flujo de pistón— es la que está constituida por la compuerta de aislamiento de la unidad, seguida de un vertedero a todo lo ancho de la unidad y la pantalla de distribución o cortina perforada, ubicada a una distancia mínima de 0,80 metros del vertedero, de modo de dar espacio suficiente para que las líneas de flujo se abran y distribuyan en toda la sección de la pantalla (ver figura 3-45).



Figura 3-45. Una sola compuerta de ingreso (2)

Al evaluar una unidad de este tipo, debemos determinar si la estructura de entrada tiene la conformación adecuada para atenuar el flujo turbu-

lento y distribuir de manera uniforme las líneas de flujo en toda la sección útil de la unidad.

La figura 3-46 muestra el vórtice que se forma en la entrada de un decantador convencional, que tiene una sola compuerta de entrada y que, además, está trabajando sobrecargado. El caudal entra en forma de chorro por la compuerta y produce un fuerte cortocircuito. Esta unidad también es fuertemente azotada por el viento, que lleva el flujo en sentido contrario a la salida. La eficiencia es de apenas 16%.



Figura 3-46. Ingreso con dos compuertas (2)

La estructura de entrada de la unidad de la figura 3-47 consta de dos compuertas de aislamiento, seguidas de una cortina de distribución. Carece de un vertedero que distribuya el caudal a todo lo ancho de la unidad, y los chorros que salen de las compuertas traspasan la cortina perforada, lo que causa cortocircuitos que afectan las condiciones de reposo de la zona de decantación.

El decantador convencional de la figura 3-48 no tiene estructura de entrada. El paso del floculador mecánico al decantador se efectúa a través de una



Figura 3-47. Decantador convencional sin estructura de entrada (2)



Figura 3-48. Decantador de vuelta en U (2)



Figura 3-49. Entrada del decantador de vuelta en U (2)

pantalla perforada, que transmite la agitación de las paletas del floculador a la zona de decantación, con lo que se modifican las condiciones de reposo.

La figura 3-49 muestra un tipo de decantador convencional denominado “de vuelta en U”, utilizado en Estados Unidos a principios del siglo XX, pero que, lamentablemente, por falta de información, aún se sigue proyec-

tando en nuestro medio. Este tipo de unidades produce un cortocircuito oblicuo entre la zona de entrada, el extremo del la pared divisoria y la zona de salida y, a la vez, un alto porcentaje de espacios muertos.

La figura 3-50 muestra la zona de entrada de la unidad de la figura 3-48.

Adicionalmente, se puede apreciar que el caudal de entrada se represa debido a que la pantalla difusora se ha colocado muy cerca de la entrada.



Figura 3-50. Estructura de salida de un decantador convencional (2)

Zona de salida. La zona de salida normalmente está conformada por vertederos o tuberías perforadas, que deben estar ubicados en el tercio final de la unidad. La longitud de los vertederos que la unidad debe tener depende de la calidad del flóculo y de la tasa de recolección de agua decantada, que varía entre 1,3 y 3,0 litros por segundo por metro de longitud de vertedero.

La figura 3-51 muestra una zona de salida que reúne los criterios expuestos y tiene un buen comportamiento. No se aprecia arrastre de flóculos hacia la sali-

da, índice de que la velocidad de salida esta muy alta o de que la coagulación tiene problemas.

La estructura de salida de la figura 3-51 solo consta de un vertedero a todo lo ancho de la unidad. Esto es muy común de encontrar en este tipo de unidades, que por lo general están operando con tasas de recolección varias veces mayores que la máxima aceptable. No se aprecia bien en la foto el fuerte arrastre de flóculos que había al paso del agua decantada por el vertedero.



Figura 3-51. Estructura de salida muy corta (2)

5.2.2 Determinación de condiciones hidráulicas

Zona de sedimentación. Hazen y Camp establecen como condiciones ideales tres principios básicos que se deben presentar en una unidad de sedimentación o decantación, los primeros de los cuales hacen referencia a las siguientes condiciones hidráulicas:

- Que la dirección de flujo sea horizontal y la velocidad sea la misma en todos los puntos de una sección vertical; y
- que la concentración de partículas de cada tamaño sea la misma en todos los puntos de una sección vertical al comienzo de la zona de sedimentación; estos conceptos conducen a la necesidad de obtener un flujo de pistón puro en las unidades de sedimentación y/o decantación.

Usualmente, en la práctica no se cumplen los criterios indicados y es necesario determinar las condiciones hidráulicas que se presentan en las unidades, para lo cual se sugieren los siguientes ensayos de caracterización de flujo:

- a) Determinación del porcentaje de flujos de pistón y mezclado;
- b) determinación de espacios muertos y cortocircuitos;
- c) determinación del tiempo real de retención;
- d) determinación de líneas de flujo;
- e) carga superficial real.

Los ensayos a, b y c ya han sido tratados en el capítulo 1 de este manual, por lo que se pasará a describir únicamente los dos últimos ensayos.

Determinación de líneas de flujo

Objetivo

Caracterizar las líneas de flujo en una unidad de decantación convencional.

Equipo necesario

- turbidímetro o colorímetro;
- cinta métrica;
- equipo para toma de muestras en profundidad.

Procedimiento

- Se divide el sedimentador en sentido vertical, transversal y longitudinal en partes iguales (no menos de cuatro en cada sentido).
- Se procede a la toma de muestras y análisis de turbiedad o de color según sea el caso.
- Se grafican las curvas de igual turbiedad (topogramas de turbiedad o color) en planos horizontal y vertical, y se analizan los resultados.

Interpretación de resultados

Si las turbiedades son bajas o el flujo es pulsante, no es posible obtener resultados lógicos, por lo cual puede recurrirse a utilizar trazadores, cloruro de sodio, rodamina, etcétera.

Por medio de este ensayo se podrá obtener una idea muy clara de las condiciones internas de flujo de una unidad y determinar los problemas hidráulicos ocasionados por las obras de entrada y salida.

Aplicación práctica

En una unidad de decantación de tipo convencional de una planta de tratamiento de agua de América Latina (figura 3-52) se evaluaron las condiciones de

flujo y de eficiencia en el proceso de decantación y se obtuvieron los datos de turbiedad que permitieron preparar los topogramas indicados en la figura 3-52.

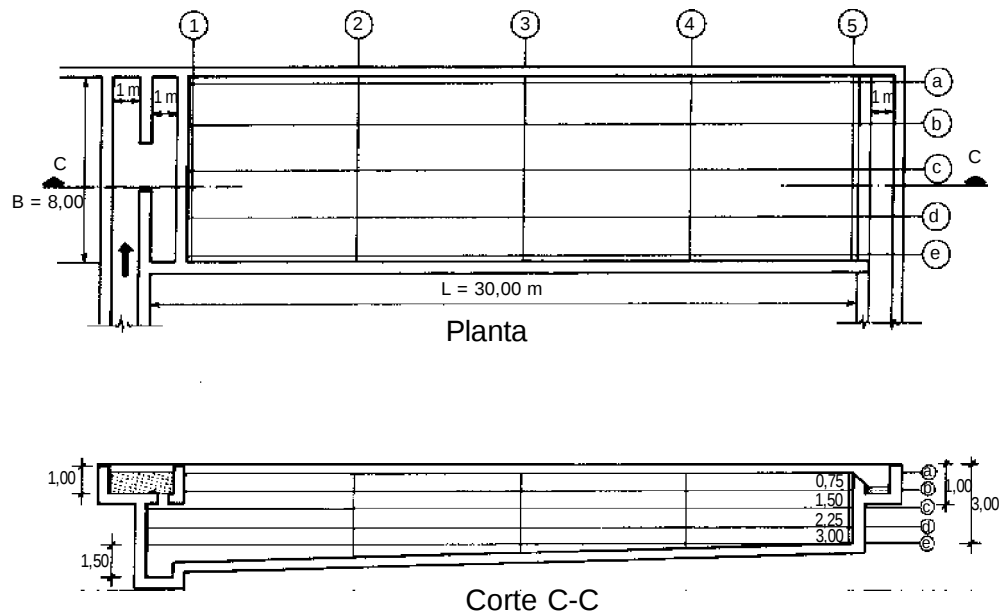


Figura 3-52. Esquema del decantador evaluado (1)

Analizando las curvas de la figura 3-53, se puede determinar que:

- Una sola compuerta de entrada da origen a un flujo preferencial. Se presenta un componente horizontal que origina una distribución no uniforme de flujo.
- Los orificios ubicados en el fondo del canal de entrada ocasionan un flujo vertical que orienta las líneas de flujo hacia abajo, lo que levanta el lodo del fondo.
- Una estructura de recolección tan corta da lugar a una velocidad de salida muy alta, que jala hacia arriba las líneas de flujo y ocasiona el arrastre de flóculos.

Características hidráulicas que ocasionan una eficiencia remocional de 64%.

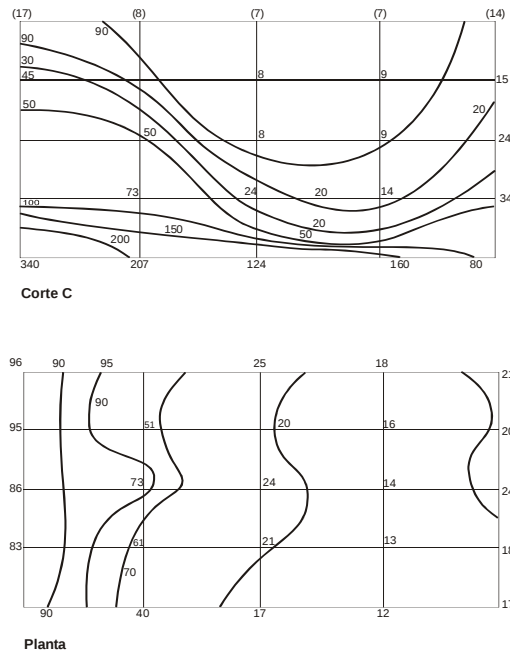


Figura 3-53. Curvas de igual turbiedad (1)

5.2.3 Determinación de carga superficial real

La carga superficial de un decantador convencional ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$) está dada por la siguiente relación:

$$q = \frac{H \times 100}{T_o \times 60} \times 864 \quad (13)$$

H = profundidad (m)
 T_o = tiempo de retención

Procedimiento

Por medio del ensayo de trazadores, se determina el tiempo real de retención de la unidad. Dividiendo la profundidad del decantador H (cm), por el tiempo T_o (s), se obtiene la carga superficial real.

Aplicación práctica

En el decantador estudiado en los primeros ejemplos se tienen las siguientes relaciones:

Teóricas

Profundidad del decantador: 3,00 m
Tiempo teórico de retención: 112 minutos
Carga superficial aparente:

$$\frac{3,00 \times 100}{112 \times 60} \times 864 = 38,57 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}$$

Reales

Tiempo de retención: 50 minutos (correspondiente al 50% del paso del trazador)

Carga superficial

$$\frac{3,00 \times 100}{50 \times 60} \times 864 = 86,40 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}$$

Como se puede apreciar, la carga superficial real es 2,24 veces mayor que la teórica, lo cual incide en que la eficiencia de esta unidad sea baja (64%).

Zona de entrada

Dos son las condiciones hidráulicas exigidas en las obras de conexión entre floculadores y decantadores:

- Suficiente velocidad para evitar el depósito de flóculos (generalmente sobre 0,15 m/s); y
- bajo gradiente de velocidad para evitar la ruptura de flóculos (generalmente, $G = 10 \text{ s}^{-1}$ a 15 s^{-1} o igual al que se tenga en el último tramo del floculador).

Una vez definido el caudal en cada estructura y la sección, es factible determinar la velocidad utilizando la ecuación de continuidad expresada en unidades homogéneas:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

El gradiente de velocidad en *canales, compuertas y orificios* puede calcularse utilizando el siguiente criterio:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{2\mu\mu}} \sqrt{\frac{f}{4Rh}} (Vm)^{1.5} \quad (15)$$

Donde:

- G = gradiente de velocidad (s^{-1})
- γ = densidad del agua (kg/m^3)
- μ = viscosidad absoluta ($kg\ masa/m^2 \cdot s$)
- f = coeficiente de Darcy-Weisbach varía entre 0,015 y 0,03
- Rh = radio hidráulico = A/P (m)
- Vm = velocidad media (m/s)

Zona de salida

En la zona de salida debe definirse la tasa de recolección de la unidad o la carga unitaria de los vertederos o tuberías recolectoras y el volumen perdido o la zona muerta causada por la mala ubicación del sistema de recolección de agua decantada:

Carga unitaria en vertederos

La carga unitaria o tasa de recolección en la estructura de salida se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$qa = \frac{Q}{L} \quad (16)$$

El rango aceptable de tasas de recolección varía entre 1,3 y 3 litros por segundo por metro de longitud de vertedero. El límite más bajo es adecuado para flóculos de color que son muy débiles y livianos y para partículas discretas (presedimentadores). En el caso de flóculos de turbiedad, normalmente más grandes y pesados, las tasas aceptables estarán alrededor del límite máximo del rango.

Puede determinarse el volumen perdido en la zona de sedimentación debido a obras de salida por medio de la siguiente ecuación:

$$V_i = K \frac{qa}{Va^2} \quad (17)$$

Donde:

K = 0,35 – 0,55
 qa = carga lineal en vertederos
 Va = velocidad de aproximación
 qa y Va en unidades homogéneas

Aplicación práctica

En el decantador evaluado anteriormente se presentan las siguientes condiciones:

Caudal tratado = 0,125 m³/s
 Longitud del canal colector = 12 m
 Va = 0,04 cm/s ó 0,14 m/h

$$qa = Q/L = 125/12 = 10,42 \text{ L/s.m}$$

Carga que es 3,5 veces mayor a la máxima permisible (3 L/s.m). Una velocidad de recolección tan alta levanta las líneas de flujo dentro de la unidad, las cuales jalan a los flóculos que están tratando de sedimentar. Todo ello deteriora la calidad del efluente. Al levantarse las líneas de flujo, también forman una zona muerta dentro de la unidad.

Zona de depósito de lodos

Dos son los principales parámetros que se deben determinar en la zona de depósito de lodos:

- Características de lodos; y
- características de las obras de desagüe y descarga.

La primera tiene relación directa con la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y sedimentación, y la segunda, con criterios de diseño.

Características de lodos

Teóricamente, al iniciarse el proceso de sedimentación en un reactor, se depositan las partículas más pesadas o más grandes y, posteriormente, las de menor tamaño y peso.

Objetivo

Determinar las características de lodos depositados como medida de la eficiencia y características del decantador.

Equipo necesario

- Disco con varilla o cable (figura 3-54a y b);
- tubo para toma de muestra de lodos (figura 3-54c);
- horno y balanza para medición de extracto seco.

Procedimiento

Incrementar la dosis de coagulante en 50% un día antes del ensayo y suspender el flujo en el decantador por lo menos 12 horas antes del ensayo.

- Dividir longitudinal y transversalmente el decantador.

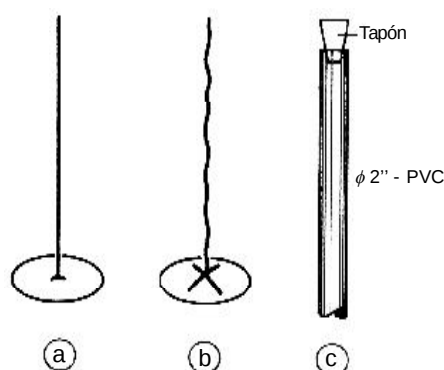


Figura 3-54. Equipo para caracterización de lodos (1)

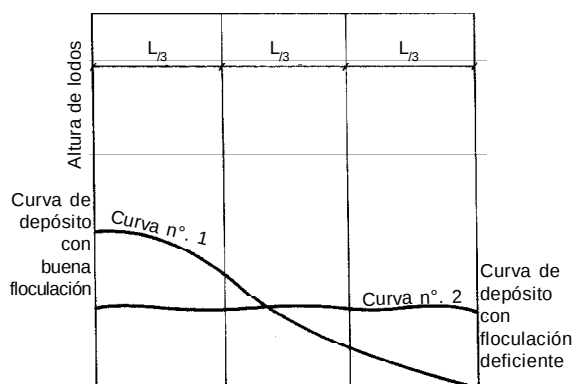


Figura 3-55. Depósito de lodos en función del tratamiento (1)

- Medir las profundidades del decantador y del lodo en cada punto.
- Tomar muestras de lodo para determinar la concentración o extracto seco.

Dibujar la topografía de lodos depositados y analizar los datos.

Interpretación de resultados

En un agua bien floculada, el número de partículas grandes es considerablemente mayor que el de flóculos pequeños, por lo cual de 75% a 90% de los lodos debe depositarse en el primer tercio del decantador formando un perfil longitudinal tal como el indicado en la curva 1 de la figura 3-55.

En cambio, cuando el agua no está bien floculada, se produce un depósito uniforme de lodos tal como indica la curva 2 de la misma figura.

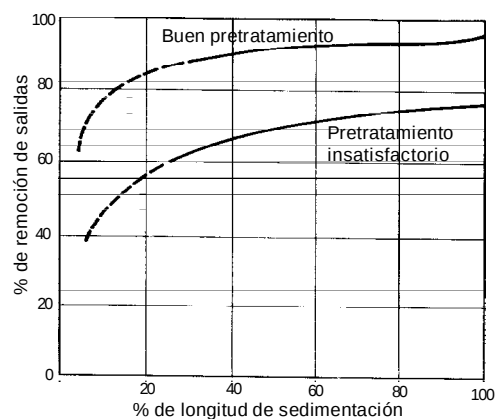


Figura 3-56. Distribución de lodos depositados (1)

En la figura 3-57 se han incluido los criterios de clasificación establecidos por Hudson en función del pretratamiento.

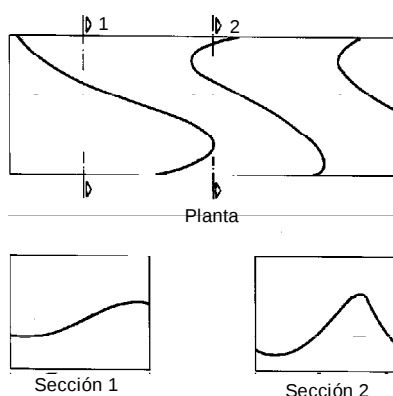


Figura 3-57. Depósito irregular de lodos debido a obras de entrada inadecuadas (1)

Obras de entrada defectuosas ocasionan flujos variables que, a su vez, producen depósitos no uniformes en sentido transversal, tal como se indica en la figura 3-57.

Asimismo, la proporción de sólidos secos debe ser mayor en el primer tercio del decantador para un buen proceso de floculación. La presencia de concentraciones uniformes de sólidos secos es sinónimo de floculación deficiente.

Aplicación práctica

Se evaluó una planta de tratamiento de agua de América Latina, compuesta de dos módulos conformados por una unidad de floculación, seguida de un decantador convencional (figura 3-58).

Las unidades eran del tipo de vuelta en U y la entrada del agua floculada se efectuaba por un orificio en la parte lateral derecha de cada decantador.



Figura 3-58. Decantadores del tipo vuelta en U (2)

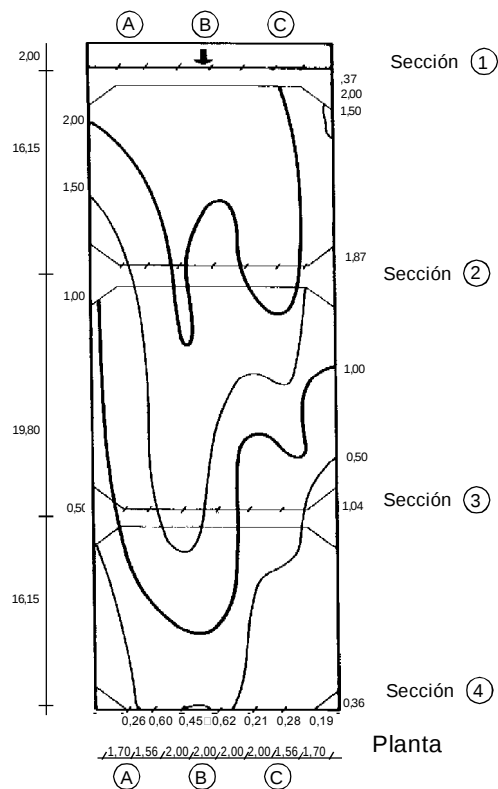


Figura 3-59. Topografía de los lodos (1)

Se realizó la prueba de depósito de lodos en uno de los decantadores y se obtuvieron los resultados que se presentan en la figura 3-59, a partir de la cual se obtienen los resultados indicados en el cuadro 3-14.

En la figura 3-57 se puede apreciar un depósito de lodos irregular en el sentido transversal, ocasionado por obras de entrada inadecuadas que producen un flujo preferencial cuyo camino es evidente por la forma en que se ha dispuesto el lodo en el fondo de la unidad.

Las curvas longitudinales de lodos (figura 3-58) muestran un trazo oblicuo del flujo a través del muro central de la unidad y los depósitos laterales de lodos que marca las zonas muertas. Los datos del

cuadro 3-14, obtenidos de las curvas, comparados con los criterios establecidos, indican que el proceso de acondicionamiento previo en esta planta es totalmente inadecuado.

Cuadro 3-14. Características de los lodos depositados (1)

Características	Tercios de longitud			Total
	1	2	3	
Volumen de lodos (m ³)	467	419	164	1.050
Porcentaje de volumen	44,5	40	15,5	100
Porcentaje de sólidos	15	16	8	

5.2.4 Estudio de caso

Se evaluó una planta de tratamiento de agua de América Latina, que tenía una batería de tres decantadores convencionales, de forma rectangular y flujo longitudinal (figura 3-60).

a) Distribución de caudales

Se efectuó una prueba de trazadores, aplicando una solución de sal común en el canal de salida del floculador y se tomaron muestras a la entrada de cada decantador, para medir la conductividad. Al momento de la prueba, la planta estaba operando con un caudal de 127 L/s. Ver los resultados en el cuadro 3-15.



Figura 3-60. Decantadores convencionales (2)

Cuadro 3-15. Resultados de la prueba de trazadores (Co = 440 μ mho) (2)

N.º	Tiempo	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
		C	C-Co	C	C-Co	C	C-Co
1	0	465	25	465	25	445	5
2	15	485	45	450	10	445	5
3	30	490	50	455	15	445	5
4	45	465	25	450	10	445	5
5	60	470	30	445	5	445	5
6	75	470	30	450	10	449	9
7	90	480	40	450	10	445	5
8	105	470	30	450	10	445	5
9	120	480	40	450	10	445	5
10	135	480	40	450	10	445	5
11	150	475	35	450	10	445	5
12	165	465	25	445	5	450	10
13	180	465	25	445	5	450	10
14	195	470	30	445	5	450	10
15	210	470	30	445	5	455	15
16	225	475	35	445	5	455	15
17	240	475	35	445	5	450	10
18	255	470	30	445	5	450	10
19	270	470	30	445	5	455	15
20	285	470	30	445	5	455	15
21	300	-	-	-	-	450	10
22	315	-	-	-	-	455	15
Totales			660		170		194

El total de trazador que ingresó a los tres decantadores es de = $660 + 170 + 194 = 1.024$.

Los porcentajes de trazador que pasaron por cada unidad fueron los siguientes:

Primera unidad: $660 \times 100/1.024 = 64,45\%$;

Segunda unidad: $170 \times 100/1.024 = 16,60\%$;

Tercera unidad: $194 \times 100/1.024 = 18,95\%$.

Como el flujo de agua se distribuye proporcionalmente al trazador, aplicando estos porcentajes a los 127 litros por segundo que se estaban produciendo el

día de la evaluación, se determinaron los caudales que estaba recibiendo cada decantador. Los resultados sintetizados en el cuadro 3-16 permiten apreciar que 64.45% del caudal (81,85 L/s) lo recibía la unidad 1.

Cuadro 3-16. Caudales de operación de los decantadores (2)

Parámetros	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
Trazador (%)	64,45	16,60	18,95
Caudal (L/s)	81,85	21,08	24,04

b) Evaluación de la estructura de entrada

El ingreso del agua floculada a cada unidad convencional (figura 3-61) se efectúa mediante dos compuertas de fondo tipo tapón y una cortina de distribución con 58 orificios de 4 pulgadas de diámetro. En el cuadro 3-17 se indican los gradientes de velocidad que se estaban produciendo en los componentes de la estructura de entrada de cada unidad.



Figura 3-61. Estructura de entrada del decantador (2)

Cuadro 3-17. Gradientes de velocidad en la estructura de entrada (2)

Componentes	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
Compuerta	538,0 s ⁻¹	73,0 s ⁻¹	85,5 s ⁻¹
Orificios de la cortina	5	4	30

c) Tiempo de retención y características hidráulicas de la unidad

Se aplicó el trazador en forma puntual a la unidad 1, que estaba recibiendo 64% del caudal. Cada decantador tiene un volumen útil de 652,82 metros cúbicos, por lo que el tiempo de retención teórico de la unidad 1 considerando el caudal de

operación de 81,5 litros por segundo es de 2,22 horas ó 133,20 minutos. En la figura 3-62 se puede observar cómo se recolectó la muestra a todo lo ancho de la unidad, para formar una muestra compuesta y determinar la conductividad. En el cuadro 3-18 se indican los datos obtenidos en la prueba de trazadores.



Figura 3-62. Tomando la muestra durante la prueba (2)

Cuadro 3-18. Aplicación de trazador en el decantador convencional (2)

($C_o = 400 \mu\text{mho}$ y $C'_o = 470 \mu\text{mho}$)

N.º	1 T (min)	2 T/ T_o	3 C (μmho)	4 C - C_o (μmho)	5 $\Sigma(C - C_o)$	6 F(t)	7 1 - F (t)
1	0	0,00	400	0	0	0,00	100,00
2	10	0,08	400	0	0	0,00	100,00
3	20	0,15	400	0	0	0,00	100,00
4	30	0,23	415	15	15	2,66	97,34
5	40	0,30	470	70	85	15,07	84,93
6	50	0,38	480	80	165	29,26	70,74
7	60	0,45	490	90	255	45,21	54,79
8	70	0,53	490	90	345	61,17	38,83
9	80	0,60	490	90	435	77,13	22,87
10	90	0,68	482	82	517	91,67	8,33
11	100	0,75	481	11	528	93,62	6,38
12	110	0,83	480	10	538	95,39	4,61
13	120	0,90	480	10	548	97,16	2,84
14	130	1,05	479	9	557	98,76	1,24
15	140	1,05	477	7	564	100,00	0,00

Graficando las columnas 1 y 5, se obtuvo el gráfico de la figura 3-63. Esta curva está indicando que el tiempo de retención real de la unidad es de 90 minutos.

Graficando los datos de las columnas 2 y 7, se obtuvo el gráfico de la figura 3-64. Del análisis de este gráfico se obtuvieron los siguientes resultados:

Flujo de pistón: 48%

Flujo mezclado: 52%

Espacios muertos: 58%

d) Estructura de salida

La estructura de salida está compuesta por un vertedero de 6,95 metros de largo, a todo lo ancho del extremo final de la unidad. Teniendo en cuenta que cada unidad está operando con un caudal diferente, al aplicar la ecuación 16 se determinó la tasa de recolección de cada unidad (ver cuadro 3-19).

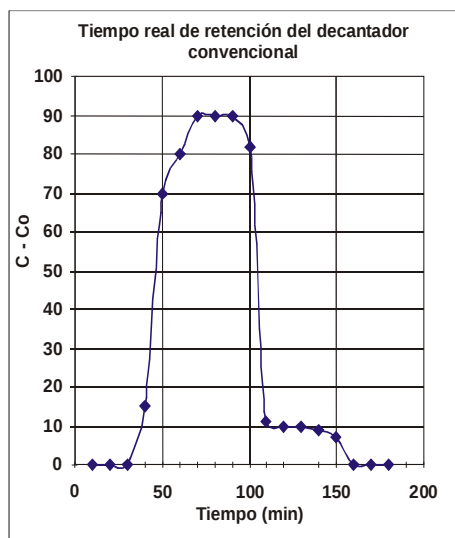


Figura 3-63. Tiempo real de retención del decantador convencional (2)

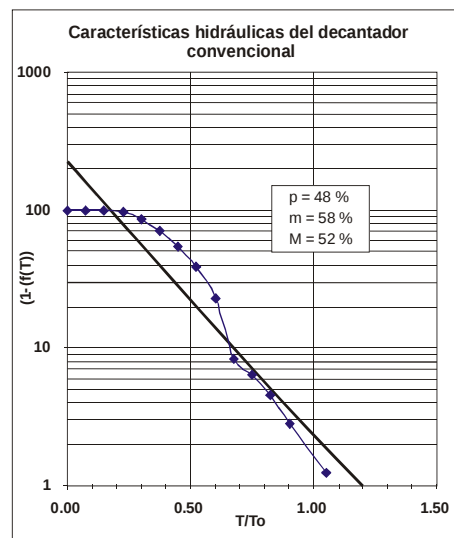


Figura 3-64. Características hidráulicas del decantador convencional (2)

Cuadro 3-19. Evaluación de la tasa de recolección (2)

Parámetros	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3
Caudal (L/s)	80,96	21,50	24,54
Tasa de proyecto (L/s.m)	6,09	6,09	6,09
Tasa de operación (L/s.m)	11,65	3,09	3,53

Interpretación de los resultados

El tiempo de retención teórico de la unidad es de 133 minutos, que se reducen a 90 debido a la forma en que el agua ingresa a la unidad. Como el ingreso se efectúa mediante dos orificios en el fondo de unidad y la salida a través de un vertedero en el otro extremo del decantador, se establece un flujo oblicuo entre estos dos puntos y la velocidad que se intensifica en la unidad 1 por efecto de la sobrecarga de caudal de 64%. Los triángulos que este flujo preferencial deja en la parte superior e inferior constituyen grandes espacios muertos, del orden de 46%.

La estructura de salida del agua decantada es muy corta, la tasa de recolección de proyecto es el doble de la máxima aceptable. Debido a la falta de uniformidad de la distribución del caudal, la unidad 1 opera con una tasa de recolección que es cuatro veces mayor que la máxima admisible. Las unidades restantes, que reciben un caudal menor que el de proyecto, están operando con la tasa máxima de recolección (3 L/s.m).

Finalmente, la eficiencia de remoción de turbiedad de la unidad 1 es de apenas 16%, y en las restantes, de 57 y 70%. Esto es consecuencia de los problemas identificados anteriormente.

5.3 Evaluación de las unidades de flujo laminar

Los decantadores laminares son unidades de alta tasa; es decir, que se proyectan con elevadas tasas superficiales, lo que significa menor área utilizada por cada L/s de agua producida y, por consiguiente, menor costo inicial. Por esta razón, los decantadores laminares son los más utilizados actualmente; en especial, la unidad de flujo ascendente.

Estos decantadores, por ser los de más moderna concepción, han pasado por una serie de etapas de evaluación-optimización, hasta llegar a la versión actual.

Sin embargo, todavía hay muchos proyectistas que siguen diseñando versiones antiguas de esta unidad, por lo que debemos evaluar la geometría de la unidad para ver si reúne todas las condiciones para operar correctamente.

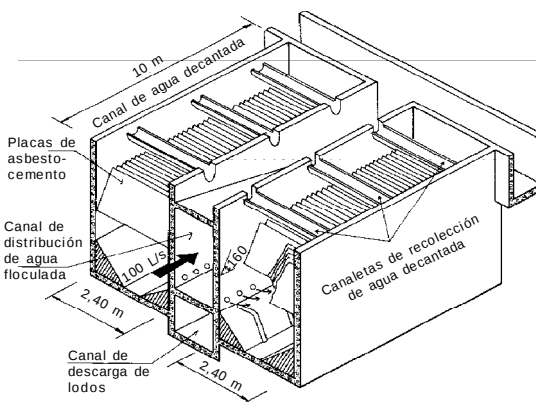


Figura 3-65. Decantador laminar de placas paralelas de última generación (4)

5.3.1 Zona de entrada

La evaluación siempre deberá iniciarse por la determinación del caudal de operación de cada decantador, por lo que se aplicarán trazadores para determinar cómo se está distribuyendo el caudal.

La estructura de entrada debe constar de:

- Compuerta para aislar la unidad, y
- canal longitudinal de distribución uniforme del agua floculada a lo largo del módulo de placas o módulos tubulares.

En la figura 3-65 el canal central intermedio es el canal de distribución uniforme del agua floculada por la parte inferior del módulo de decantación.

Compuerta de aislamiento. Esta estructura no debe producir un gradiente de velocidad mayor de 20 s⁻¹; preferentemente, no mayor de 15 s⁻¹.

Procedimiento:

- Determinar mediante medición la sección útil (área mojada) de la compuerta.
- Determinar mediante trazadores el caudal que ingresa al decantador.

- Determinar el gradiente de velocidad que se produce al paso del agua floculada mediante la ecuación (15):

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{2\mu g}} \sqrt{\frac{f}{4Rh}} (V_m)^{1,5}$$

Estructura de distribución, a lo largo del módulo de placas. Esta estructura puede ser un canal o una tubería instalada en la parte inferior del módulo de placas, con el propósito de distribuir uniformemente el agua floculada. Debe comprobarse:

- Si la estructura distribuye el caudal de manera uniforme. Se acepta un máximo de desviación del caudal de 5%. La relación que se debe aplicar para este fin es la siguiente:

$$n \, Al / Ac < R = 0,46 \quad (18)$$

Donde:

Al = área de un orificio en m^2
 n = número de orificios
 Ac = sección del canal o de la tubería

- Gradiente de velocidad en los orificios de paso aplicando las ecuaciones (17) y (18).

El gradiente de velocidad debe estar alrededor de 10 s^{-1} ó menos.

5.3.2 Zona de decantación

Constituida por módulos de decantación de las siguientes características:

- Pantallas planas paralelas, que pueden ser de asbesto-cemento, fibra de vidrio, plástico o lonas de vinilo reforzadas con fibras de poliéster, o
- módulos prefabricados de sección cuadrangular, hexagonal o circular, hechos de plástico o de fibra de vidrio.



Figura 3-66. Módulos de plástico deteriorados (2)

En todos los casos, los módulos deben estar instalados con una altura de agua sobre ellos, variable entre 0,65 y 1,0 metros. Alturas menores pueden ser causa de arrastre de flóculos previamente sedimentados, sobre todo en el caso de flóculos de color.

Los módulos prefabricados normalmente son de material muy delgado que fácilmente se quiebran al ser lavados con agua a presión. Cuando los módulos se rompen, el agua pasa por las aberturas que estos dejan, lo que produce un cortocircuito. La mayor parte del agua pasa por el forado que han dejado los módulos rotos y la eficiencia de la unidad se anula (ver figuras 3-66 y 3-67).



Figura 3-67. Pantallas de asbesto-cemento rotas (2)



Figura 3-68. Operador parado sobre las pantallas de asbesto-cemento (2)

Cuando el personal de operación camina sobre el módulo de placas mientras realiza el lavado con agua a presión, o cuando las sacan para ingresar a la tolva para extraer el lodo en forma manual, las placas se deterioran rápidamente (figura 3-68).

Cuando el decantador queda sin placas o sin módulos, ya no opera como una unidad de alta tasa y si sigue funcionando con el caudal de proyecto sin que el problema sea subsanado, su capacidad de remoción será prácticamente nula.



Figura 3-69. Decantador laminar operando sin pantallas (2)

Se comprobará la tasa de decantación con la que está operando la unidad:

- Determinar el área (A_s) del decantador cubierta con las pantallas o módulos de decantación.
- Determinar la separación entre placas en el plano horizontal (d'), el espesor de las pantallas (e), y calcular la separación normal entre placas (d):

$$d = 0,866 d' - e \quad (19)$$

- Determinar, mediante medición, el largo (l) y la separación (e) normal a las placas y calcular la longitud relativa (L) del módulo:

$$L = [lu - 0,5 e] / e \quad (20)$$

- Determinar el factor de forma del módulo (f):

$$f = 0,866 (0,866 + 0,5 L) \quad (21)$$

- Determinar la velocidad real de sedimentación entre las placas (V_s):

$$V_s \text{ (m/s)} = Q \text{ (m}^3\text{/s)} / [A_s \text{ (m}^2) \cdot f] \quad (22)$$

- Comparar con la tasa óptima obtenida en el laboratorio.

Zona de salida

La estructura de la zona de salida del decantador laminar debe abarcar toda el área de la unidad porque cada espacio entre placa y placa es un pequeño decantador, que debe tener encima su correspondiente zona de recolección del agua decantada. Cuando las líneas de flujo deben arquearse demasiado para alcanzar la salida, se produce arrastre de flóculos previamente retenidos entre las placas.

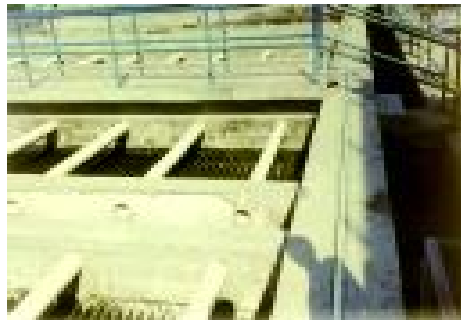


Figura 3-70. Sistema de recolección mediante tuberías (2)

La estructura de recolección del agua decantada puede estar constituida por canaletas o tubos perforados reparados de manera uniforme en toda la superficie de la unidad. En el caso de unidades pequeñas, también pueden ser vertederos perimetrales.

El sistema de recolección debe estar instalado idealmente a una altura de un metro sobre el módulo de placas, pero se puede aceptar una altura mínima de 0,65 metros. Alturas menores pueden ser causa de arrastre de flóculos previamente sedimentados; sobre todo en el caso de flóculos de color.



Figura 3-71. Sistema de recolección en funcionamiento



Figura 3-72. Sistema de recolección mediante canaletas (2)

En la figura 3-71 podemos observar el sistema completo en operación, con el canal central de la parte superior recolectando el aporte de las tuberías perforadas. Estas deben estar sumergidas y con una carga de agua de alrededor de 0,10 metros para aprovechar toda su capacidad.

La unidad de la figura 3-72 tiene un sistema de recolección mediante canaletas con orificios que aportan al canal central.

Para determinar si el número de canaletas o tubos es adecuado, se debe:

- Contar cuántos tubos o canaletas tiene el decantador y medir la longitud.
- Calcular la tasa de recolección de agua decantada (qa), mediante la ecuación (16):

$$qa = \frac{Q}{L}$$

- Comparar con el rango de tasas recomendadas de acuerdo con el tipo de flóculo.

Aplicación

Se evaluó una planta de tratamiento de agua proyectada para 30 litros por segundo y que de acuerdo con lo indicado en la memoria del proyecto, podía operar hasta con 40 litros por segundo. Se evaluó la planta durante la mañana operando con 29 litros por segundo, pero por la tarde, el caudal de operación era de 47 litros por segundo.

El sistema de decantación consta de tres unidades de placas paralelas. La evaluación se inició con una prueba de distribución de caudales para determinar el caudal de operación de cada unidad, y se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro 3-20.

Cuadro 3-20. Distribución de caudales a los decantadores (2)

Decantador	% de trazador	Caudal de operación (L/s)	
1	34,50	10,03	16,25
2	24,17	7,01	11,36
3	41,26	11,96	19,39
Total	100,00	29,00	47,00

Zona de entrada

Está compuesta por una compuerta de aislamiento a través de la cual ingresa todo el caudal al inicio de la unidad. No tiene canal longitudinal que distribuya uniformemente el flujo a lo largo del módulo de placas.

Las compuertas de aislamiento operan sumergidas, por lo que el área de la compuerta es igual al área mojada. Las dimensiones de las compuertas son



Figura 3-73. Vista de uno de los decantadores evaluados (2)

0,25 metros por 0,25 metros, el área, 0,0625 metros cuadrados, y el radio hidráulico (A/p), 0,083 metros.

Conociendo los caudales y el área mojada de cada compuerta, podemos determinar la velocidad de paso a través de cada una mediante la ecuación (16) y el gradiente de velocidad correspondiente mediante la ecuación (17).

El cuadro 3-21 resume los cálculos efectuados.

Cuadro 3-21. Evaluación de las compuertas de entrada (2)

Decantador	Q = 29 L/s		Q = 47 L/s	
	V (m/s)	G (s-1)	V (m/s)	G (s-1)
1	0,16	11	0,27	24
2	0,11	6,5	0,19	14
3	0,19	14,5	0,32	31

Se puede observar que los gradientes de velocidad que se producen al paso por las compuertas, con un caudal de 29 a 30 litros por segundo, son aceptables ($< 15 \text{ s}^{-1}$), pero con 47 litros por segundo exceden el límite aceptable e incluso el gradiente de velocidad del último tramo del floculador, por lo que este incremento de gradiente de velocidad justo a la entrada del decantador puede estar debilitando o rompiendo el flóculo.

Zona de decantación

Cada decantador tiene un área de placas de 2,45 metros de ancho y 4 metros de largo, por lo que el área superficial cubierta con placas es de $9,8 \text{ m}^2$. Se determinó en el laboratorio la tasa óptima de decantación entre las placas con una turbiedad de agua cruda de 430 UNT y se obtuvo una tasa de $30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

En el cuadro 3-22 se ha resumido el rango de tasas con los que opera cada unidad, por efecto de la desigual distribución de caudales a las unidades y por la variación de caudales con los que opera la planta durante el día.

Cuadro 3-22. Resultados de la evaluación de la zona de decantación (2)

Parámetros evaluados	Q = 29 L/s; To = 1,28 UNT			Q = 47 L/s; To = 1,34 UNT		
	1	2	3	1	2	3
Tasa superficial (m ³ /m ² .d)	88,4	62,0	105,4	145,6	100,2	172
Tasa real o entre placas (m ³ /m ² .d)	14,0	10,0	17,0	23,0	16,0	27
Tasa de recolección (L/s.m)	1,64	1,15	2,00	2,72	1,91	3,26
Caudal (L/s)	10,0	7,01	12,0	16,3	11,4	19,5
Turbiedad efluente (UNT)	1,58	1,34	1,73	1,61	1,94	1,87

Zona de salida

La estructura de recolección de las unidades está compuesta por un vertedero perimetral que tiene 6 metros de longitud. Debido a la variación de caudales, se puede apreciar que la tasa de recolección varía entre 1,15 y 3,26 m³/m².d (cuadro 3-22), que supera la tasa promedio recomendable para flóculos de turbiedad, que idealmente debe estar en alrededor de 2 y se admite como máximo 3 L/s.m.

Interpretación de los resultados

Se puede apreciar que en ningún caso se llega a exceder la tasa óptima de decantación para la época de creciente, que es la época en que deben operar los decantadores. Como la turbiedad del agua cruda que estaba ingresando a la planta durante la evaluación variaba entre 1,28 y 1,34 UNT, los decantadores deberían haber estado operando con la alternativa de filtración directa, pero no lo estaban haciendo porque el presedimentador estaba en mantenimiento. Al estar operando con filtración rápida completa, se puede apreciar que la turbiedad del agua decantada era mayor que la del agua cruda, debido a que es muy difícil decantar aguas tan claras.

Se puede optimizar la operación de estas unidades mejorando la distribución de caudales (modificando las características del canal y la posición de las compuertas) y colocando, además, una válvula a la entrada de la planta, para ajustar el caudal de proyecto y mantener un caudal de operación constante. De este modo, se impedirá que la planta reciba directamente las variaciones de la fuente.

6. EVALUACIÓN DE LAS BATERÍAS DE FILTROS DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO

El proceso de filtración es muy complejo y envuelve una serie de mecanismos, desde la simple acción de cernido hasta los fenómenos de impacto inercial, sedimentación, intercepción, potencial eléctrico, difusión, floculación, puente químico y, en algunos casos, actividad biológica. Aún no se ha definido cuál es el mecanismo más importante, pero no hay duda sobre la acción simultánea de todos ellos, con mayor o menor intensidad, a lo largo de la carrera de filtración. Esto hace sumamente difícil establecer un índice o patrón de eficiencia para evaluar este proceso.

Las características del agua aplicada a los filtros determinan la calidad del efluente, principalmente a través de la concentración, naturaleza, tamaño y propiedades de adherencia de las partículas. Estas características pueden influir en el índice de filtrabilidad, cuya determinación podría hacerse con el empleo de un filtro piloto o mediante el estudio de parámetros usualmente determinados y relativamente fáciles de ser medidos como la turbiedad y la pérdida de carga.

Las características del medio filtrante desempeñan, asimismo, un papel importante en la eficiencia del proceso, principalmente el diámetro y la granulometría del material filtrante.

Como consecuencia de las características de la suspensión, del medio filtrante, de la velocidad de filtración, la pérdida de carga y la calidad del agua filtrada son las variables del proceso más fáciles de controlar y posiblemente de mayor significado en la operación del filtro.

A continuación se describen los procedimientos para evaluar cómo influyen todas estas variables en una instalación de filtración rápida:

- características de la unidad;
- eficiencia del proceso;



Figura 3-74. Batería de tres filtros (1)

- características del proceso de filtración;
- características del medio filtrante;
- características del proceso de lavado.

6.1 Características de la unidad

El análisis consiste en comprobar si la batería de filtros fue bien concebida, si cumple con los requisitos básicos del proyecto para poder operar con tasa declinante y para que un filtro se pueda lavar con el flujo que produce el resto de unidades que componen la batería.

6.1.1 Requisitos para la operación de la batería con tasa declinante

Los requisitos básicos para que la batería pueda operar con tasa declinante son los siguientes:

- Debe estar integrada por un número mínimo de cuatro unidades. La figura 3-74 ilustra un caso en que se consideraron apenas tres filtros.
- Debe tener la carga hidráulica necesaria para que cuando un filtro recién lavado entre en operación, la tasa de filtración no sea mayor de 1,5 veces la tasa promedio de proyecto.
- Debe tener un aliviadero móvil en el canal de entrada (para que se pueda modificar el nivel de acuerdo con las necesidades). La función de este aliviadero es limitar la carga hidráulica para el proceso, de tal manera que la condición anterior no sea superada (tasa máx. = 1,5 tasa promedio).
- Los ingresos de agua decantada deben estar ubicados en un nivel inferior al nivel mínimo de operación de la batería.

6.1.2 Requisitos básicos para que la batería de filtros sea autolavable

Los requisitos básicos para que la batería de filtros sea autolavable —es decir, para que un filtro cualquiera de la batería pueda ser lavado con el flujo que producen las unidades restantes— son los siguientes:

- La sección de cada filtro debe ser tal que al pasar el caudal que producen los filtros restantes (como mínimo tres) por la sección del filtro que se está

lavando, se produzca la velocidad ascensional necesaria para expandir el medio filtrante entre 25% y 30%.

- La batería debe tener un canal que interconecte la salida de todos los filtros.
- Debe ubicarse un vertedero de salida sobre el canal de interconexión, que puede ser común a toda la batería (figura 3-76) o individual en cada filtro (figura 3-75). Este vertedero debe establecer la carga necesaria para compensar todas las pérdidas que se producen durante la operación de lavado.
- Este vertedero debe ser móvil, para poder modificar la carga durante la operación, hasta obtener la expansión deseada.



Figura 3-75. Vertedero individual en cada filtro (1)



Figura 3-76. Vertedero de salida común a toda la batería (1)

6.1.3 Geometría de la unidad

1) Estructura de entrada

En el caso de que se esté operando con la alternativa de filtración directa, la distribución del agua decantada o coagulada a la batería de filtros debe efectuarse mediante un canal o tubería. Los ingresos a cada filtro deben estar ubicados en un nivel inferior al mínimo de operación, de tal manera que cada filtro tome libremente el caudal que puede tratar, según el estado de colmatación en que se encuentra.

Las baterías con canales tienen la ventaja de que el almacenamiento disponible en los canales amortigua el impacto del movimiento del agua cuando se cierran o abren las válvulas (figura 3-77).

En los sistemas con tuberías y válvulas operadas eléctricamente o mediante aire comprimido, cuando el sifonaje originado por el accionamiento de las válvulas es muy fuerte, puede producirse el desprendimiento del sedimento retenido en el lecho filtrante (figura 3-78).



Figura 3-77. Batería de filtros con interconexiones mediante canales (1)



Figura 3-78. Batería de filtros con interconexiones mediante tuberías (1)

2) Caja del filtro

En la caja del filtro se encuentran:

- **El fondo falso.** Se llama así al canal o espacio ubicado debajo del drenaje. Este canal debe tener como mínimo 40 centímetros de altura.
- **Drenaje.** Estructura que permite el paso del

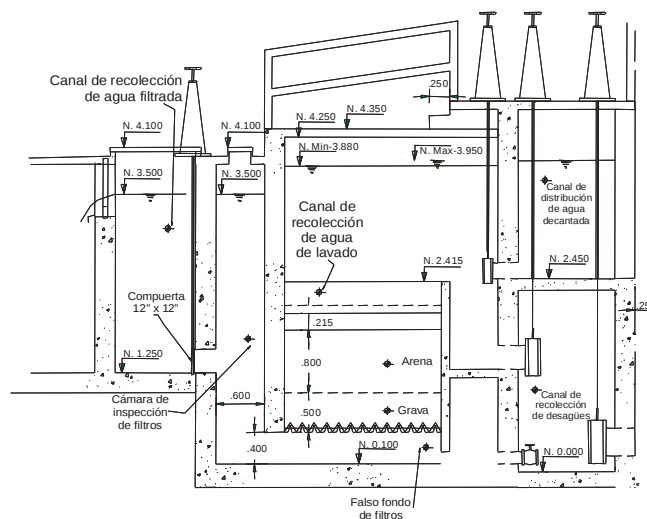


Figura 3-79. Vista en elevación de la caja del filtro (1)

agua en forma ascensional durante el lavado y en forma descendente durante el proceso de filtración. El drenaje característico de este tipo de filtros es la vigueta prefabricada de concreto, que durante el lavado distribuye el agua en forma muy pareja en todo el lecho y tiene gran resistencia estructural (ver figura 3-80).

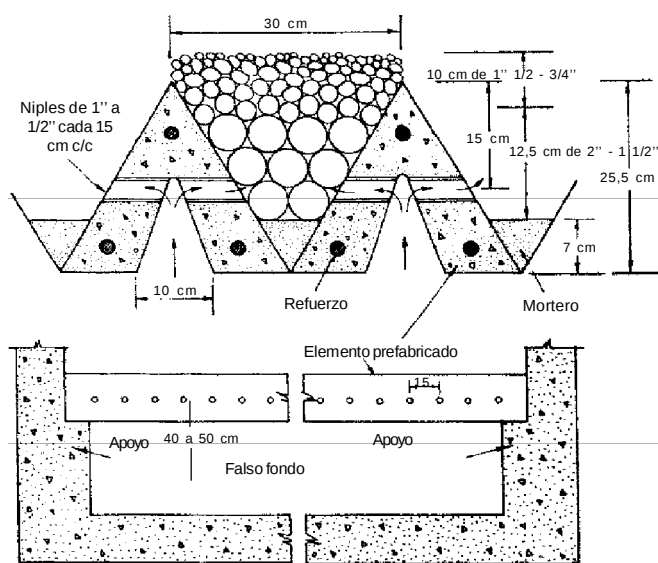


Figura 3-80. Drenaje de viguetas de concreto (2)

Encima del drenaje debe estar la capa soporte de grava. La función de la capa soporte es evitar que la arena se pierda a través del drenaje, por lo que se gradúa de manera que el tamaño mayor de grava sea un poco más grande que los orificios del drenaje, y el tamaño menor, apenas un poquito más grueso que el tamaño mayor de la arena. La altura y granulometría dependen del tipo de drenaje existente. En el caso de las viguetas prefabricadas, se recomienda una capa de 45 centímetros de altura mínima, con un tamaño de la grava variable entre 1/8" y 2" de diámetro. Véanse las especificaciones en el cuadro 3-23.

Cuadro 3-23. Capa soporte de grava para viguetas de concreto prefabricadas (2)

Capa	Espesor (cm)	Tamaño
1	7,5	1/8" - 1/4"
2	7,5	1/4" - 1/2"
3	7,5	1/2" - 3/4"
4	10,0	3/4" - 1 1/2"
Fondo	12,5	1 1/2" - 2"
Total	45,0	

- Solo cuando el drenaje es de placas porosas, no se coloca lecho de grava. En los casos en que se haya empleado un drenaje de patente, ver las especificaciones del fabricante para el lecho de grava correspondiente.
- Sobre la grava se encuentra el medio filtrante, que puede ser simple o doble. El medio filtrante simple generalmente es de arena o también puede ser solo de antracita. El medio doble normalmente es la combinación de una capa de arena situada en la parte inferior y una de antracita encima.

Cuadro 3-24. Características del medio filtrante (1, 2)

Características	Lecho simple	Lecho doble	
		Arena	Antracita
Altura (m)	0,60–0,80	0,25–0,30	0,45–0,50
Tamaño efectivo (mm)	0,55–0,70	0,50–0,60	0,75–0,90
Coef. de uniformidad (CU)	< 1,5	< 1,5	< 1,5
Tamaño mayor (mm)	1,41–1,65	1,41	2,0–2,38
Tamaño menor (mm)	0,42	0,42	0,70

- Por encima del lecho filtrante se ubican las canaletas de lavado. En el caso de filtros grandes, normalmente las canaletas secundarias vierten a un canal central recolector del agua de lavado (figura 3-81). Cuando el canal principal está en medio del filtro, se denomina *de filtro doble*. En filtros pequeños se puede encontrar una canaleta perimetral o un solo canal central para recoger el agua de lavado (figura 3-82).

**Figura 3-81.** Canaletas de lavado en filtros grandes (1)**Figura 3-82.** Canaletas de lavado en filtros pequeños (1)

- El agua filtrada sale del drenaje al falso fondo y puede pasar a un canal de aislamiento o directamente al canal de interconexión. Normalmente los filtros grandes deben tener canal de aislamiento para poder sacar un filtro a inspección o mantenimiento, mientras que los otros siguen operando. En los filtros pequeños por lo general no se considera canal de aislamiento e incluso puede darse el caso de que el falso fondo sea el canal de interconexión.

6.2 Eficiencia del proceso

Objetivo

Determinar si los filtros están produciendo un agua de bebida microbiológicamente apta para consumo humano.

Procedimiento

Este aspecto puede determinarse a través de curvas de frecuencia acumulada de turbiedad de agua filtrada, que se obtienen procesando los promedios diarios de turbiedad de agua filtrada de por lo menos un año. Tenemos dos criterios para analizar el resultado de estas curvas:

- 1) El filtro debe producir agua con menos de una UNT, para que se pueda garantizar la eficiencia de la desinfección.
- 2) Para que se pueda garantizar la ausencia de huevos de parásitos en el agua tratada, el efluente de los filtros no debe tener más de 0,10 UNT; pero para que el filtro pueda alcanzar esta meta, el agua decantada debe tener menos de 2 UNT el 95% del tiempo.

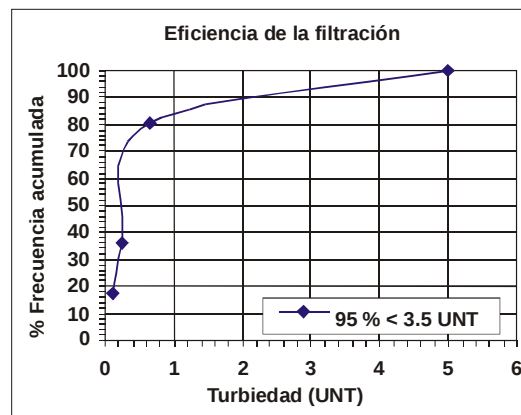


Figura 3-83. Eficiencia de la filtración (1)

Este criterio es especialmente importante cuando la planta se encuentra en una zona de parasitosis endémica.

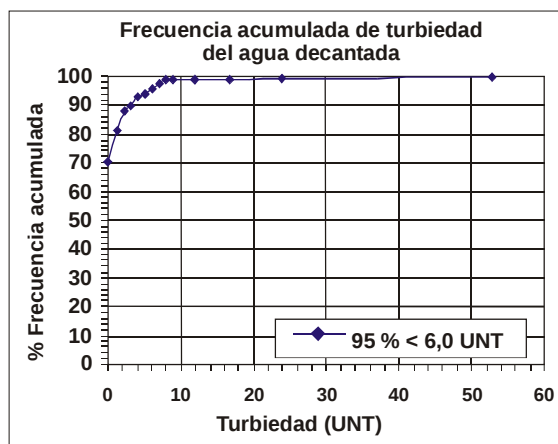


Figura 3-84. Eficiencia de la decantación (1)

tó menos de 3,5 UNT, el 100% del tiempo tuvo menos de 5,0 UNT, pero nunca dio agua con menos de 0,10 UNT, y la planta se encuentra en una zona de parasitosis endémica.

Analizando las causas de este comportamiento de la batería de filtros, se encontraron las siguientes:

- 1) Cuando el agua cruda presentaba menos de 5 UNT, no se aplicaba coagulante.
- 2) El agua decantada el 95% del tiempo tenía menos de 6 UNT (figura 3-84). Esto se debía a que la unidad no tenía un canal central de distribución, el agua floculada entraba toda por el inicio de la unidad y a un nivel muy bajo, levantando los lodos depositados en la tolva del decantador.
- 3) Los filtros no tenían la capa soporte de grava apropiada para el drenaje de viguetas prefabrica-



Figura 3-85. Se perdió la arena por falta de capa soporte (1)

Aplicación

Se tomó un año de información de turbiedad de agua filtrada de los archivos de control de procesos de una planta de América Latina. Con esta información se preparó la curva de la figura 3-83.

Interpretación de los resultados

De acuerdo con lo que indica la curva, el 95% del tiempo el agua filtrada presen-

das. Solo se habían colocado 15 centímetros de grava y una malla de mosquitero para contener la arena (figura 3-85).

- 4) La arena se encontraba casi toda en el falso fondo y en el canal de aislamiento de los filtros.

6.3 Características del proceso de filtración

Debemos evaluar principalmente las variaciones de la velocidad de filtración durante el proceso, la calidad del filtrado inicial que se obtiene y la duración de las carreras de filtración.

6.3.1 Velocidad y caudal de filtración

El caudal de filtración de cada filtro, así como la velocidad de filtración, son diferentes en cada unidad de la batería cuando se está operando con tasa declinante. Al instalar la tasa declinante, desfasando las condiciones de operación de los filtros, cada filtro tiene un diferente estado de colmatación del lecho filtrante, y como por su especial diseño no admiten más agua que la que el estado del medio filtrante les permite, todos se encuentran operando con diferentes condiciones de caudal y velocidad. Como se lavan siempre en estricto orden consecutivo, el último que se ha lavado es el que está tomando mayor caudal y tiene la velocidad más alta. En los anteriores van decreciendo tanto el caudal como la velocidad y el que tiene más tiempo operando, el más sucio, es el que tiene las condiciones mínimas de caudal y velocidad.

Objetivo

Determinar si la batería de filtros está operando con tasa declinante y si la relación de velocidad máxima de operación a velocidad promedio es la adecuada para que el filtro recién lavado produzca agua de buena calidad.

Procedimiento

- Comenzar por revisar la bitácora o el formulario de operación de filtros y determinar cómo se están lavando estos:
 - i) Si se están lavando todos los filtros juntos, normalmente durante la noche y sin tener en cuenta un orden correlativo, quiere decir que la tasa

declinante no está instalada. La prueba concluirá determinando la duración de las carreras de filtración. Uno de los efectos más negativos de operar con tasa constante una batería de filtros que fue proyectada para operar con tasa declinante es la reducida duración de las carreras por lo general de 4 a 10 horas, dependiendo de la calidad del agua. Esto se debe a que la carga que se considera para operar con tasa declinante es mucho más reducida que la necesaria para operar con tasa constante.

- ii) Si los filtros se están lavando en orden consecutivo y desfasados durante todo el día, es evidencia de que en alguna medida se está operando con tasa declinante. Para determinar si esta operación se efectúa correctamente, se debe preguntar al operador cuál es su criterio para tomar la decisión de lavar un filtro y cómo lo hace.

Iniciar la prueba lavando el filtro que toca, de acuerdo con el formulario de operación.

- Si cada filtro tiene un vertedero individual a la salida (figura 3-74), determinar directamente los diferentes caudales de operación q_1 a q_n en los vertederos de cada unidad.
- Determinar el área filtrante (A_f) de cada unidad mediante medición directa. Estas áreas debieran ser todas iguales.
- Tomando el caudal que corresponde al filtro que recién se lavó, calcular la velocidad de filtración máxima ($Vf_{m\acute{a}x}$):

$$Vf_{m\acute{a}x} \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{.d)} = q_{m\acute{a}x} \text{ (m}^3\text{/d)} / A_f \text{ (m}^2\text{)}$$

- Se determina la velocidad de filtración promedio ($Vf \text{ prom.}$) en la batería, que es la relación del caudal de operación de la batería Q en $\text{m}^3\text{/d}$, con el área total de filtración de la batería:

$$Vf \text{ prom.} = Q / A_t$$

$$\text{Comprobar la relación} = Vf_{m\acute{a}x} / Vf_{prom} = 1,5$$

- Si esta relación es mayor de 1,5, la calidad del agua producida por el filtro recién lavado podría estar deteriorándose.

- Si los filtros no tienen vertederos individuales, pero tienen canal de aislamiento accesible para fines de muestreo, la única forma de determinar cuánto caudal está pasando por cada unidad sería mediante una prueba de distribución de caudales mediante trazadores.



Figura 3-86. Punto de toma de las muestras de trazadores (1)

- El trazador se aplica en el inicio del canal de distribución a los filtros y se toman las muestras en el canal de aislamiento de cada unidad (ver la sección 5, “Ensayos complementarios”, del cap. 2). En la figura 3-86 se está indicando con una flecha el punto en que se deben tomar las muestras. En el caso que se ilustra, se dejaron niples de plástico con tapones sobre los canales de aislamiento para poder tomar muestras del efluente de cada filtro. En las plantas medianas y grandes normalmente se dejan registros con tapa sanitaria.
- Está sobreentendido que cuando los filtros no tienen canal de aislamiento ni vertedero individual, no será posible efectuar la prueba de distribución de caudales, ni determinar cómo está variando la tasa de velocidad entre los filtros; pero si se están lavando consecutiva y desfasada, los filtros estarán operando con tasa declinante, lo cual también se reflejará en la duración de las carreras.

6.3.2 Calidad del filtrado inicial

Después del proceso de lavado, el primer efluente que produce el filtro por lo general tiene una turbiedad mayor que la del resto de la carrera, debido a que una parte de las partículas que se desprendieron durante el lavado todavía permanecen en el filtro y salen al entrar en servicio. Normalmente, cuanto más descuidada sea la operación del filtro y peor se encuentre el medio filtrante, más turbio será el primer efluente que produzca el filtro.

Objetivo

Detectar el comportamiento del filtro al iniciar la carrera de filtración y determinar el tiempo que demora en alcanzar la turbiedad normal. Mediante esta prueba se puede determinar también el comportamiento del medio filtrante.

Materiales

15 recipientes de 150 mililitros o más y un turbidímetro.

Procedimiento

Abrir el acceso al canal de aislamiento del filtro.



Figura 3-87. Punto de muestreo para filtrado inicial

Utilizando un tomador de muestras de profundidad y a partir del momento en que se reinicia la operación de filtrado, comenzar a tomar muestras del efluente cada minuto hasta completar 15 minutos. En la figura 3-87 se pueden apreciar los ingresos delante de cada filtro en los cuales se tomaron las muestras.

Graficar turbiedad versus tiempo, en papel semilogarítmico de dos ciclos.

Interpretación de los resultados

Cuando las turbiedades iniciales son muy altas, se puede asumir que el filtro quedó mal lavado. Esto, por supuesto, no es una regla absoluta, pues cada filtro puede empezar la carrera con una cierta turbiedad que depende del estado del lecho filtrante, pero turbiedades por encima de las corrientes sí indican que faltó tiempo de lavado.

6.3.3 Duración de las carreras de filtración

En una batería de filtros que funcione correctamente, la duración de las carreras de filtración puede variar entre 30 y 50 horas o más, dependiendo de la calidad del agua coagulada o decantada que reciba. Se denomina *carrera de filtración* al intervalo entre lavados de un mismo filtro.

Esta determinación se efectúa analizando la bitácora o el formulario de operación de los filtros.

6.4 Características del sistema de lavado

Del comportamiento del sistema de lavado de la batería de filtros depende la conservación del lecho filtrante, por lo que las pruebas que se indican a continuación deben efectuarse durante la puesta en marcha de la planta, a fin de efectuar los ajustes necesarios para que los filtros se conserven en buen estado.

6.4.1 Expansión del medio filtrante

La expansión del lecho filtrante depende del caudal de lavado y del peso de los granos de arena. Este último varía de acuerdo con el diámetro del material granular.

En filtros de diseño americano, con arena fina de 0,45 a 0,55 milímetros de diámetro efectivo, el rango de expansión ideal es de 25% a 30%. Con porcentajes de expansión mayores, en lugar de mejorar, la limpieza de la arena desmejora, porque al distanciarse más los granos de arena, ya no se friccionan entre sí. En los filtros de diseño europeo, con arena gruesa de 0,80 a 1,0 milímetros de diámetro de tamaño efectivo y lavado con aire y agua, el porcentaje de expansión óptima es de 10%.

Objetivo

Determinar el porcentaje de aumento de espesor del lecho filtrante durante la operación de lavado.

Materiales

Varilla metálica con cajitas soldadas a una distancia de 5 centímetros entre los bordes de las cajitas. En el extremo final de la varilla, debe

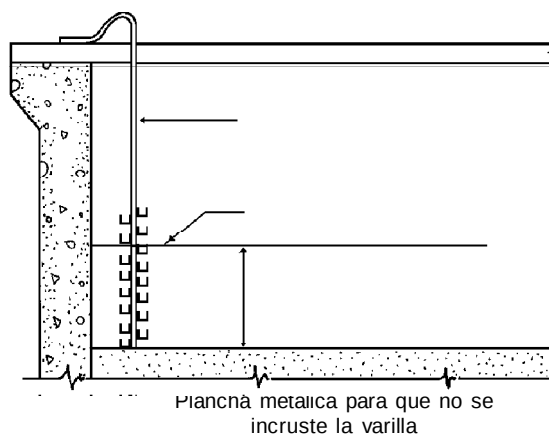


Figura 3-88. Medidor de expansión del lecho filtrante (2)

haber una planchita metálica para evitar que se introduzca en la superficie de la arena (figura 3-87).

Procedimiento

- Antes del inicio del lavado, situar la varilla dentro del filtro colocando el extremo inferior encima del lecho filtrante.
- Proceder a efectuar el lavado normalmente.
- Después de 3 minutos, retirar suavemente la varilla, verificar cuántas cajas están llenas del material filtrante y medir la distancia (Δh) entre la caja más alta que contenga arena y el extremo inferior de la varilla.
- Determinar la altura del lecho filtrante (h) en el punto de medición.
- Determinar el porcentaje de expansión (E) del lecho filtrante:

$$E = \frac{\Delta h}{h} \times 100$$

- Efectuar esta medición en varios puntos del lecho filtrante para determinar si la expansión es uniforme en toda el área del filtro.

Se recomienda medir en especial el punto opuesto a la salida del agua de lavado y el inmediato. Cuando hay una distribución defectuosa del agua de lavado, estos son los puntos en que hay mayor y menor expansión, respectivamente.

Para que el medio filtrante se lave bien, debe producirse una expansión de 25% a 30% de manera uniforme en toda el área del filtro.

6.4.2 Duración del proceso de lavado

Cuando se hace el lavado de un filtro, la turbiedad del agua de lavado aumenta rápidamente al principio y puede llegar a valores superiores a 1.000 UNT y luego, a medida que la arena se va limpiando, la turbiedad va disminuyendo. Analizando esta curva, se puede determinar el tiempo de lavado más conveniente.

El tiempo de lavado también varía con la calidad del agua cruda. En la época de lluvia, cuando la turbiedad es alta, el tiempo de lavado necesario suele ser mayor que en época de aguas claras.

Objetivo

Determinar el tiempo óptimo en que debe ejecutarse la operación de lavado.

Materiales

15 frascos de 150 mililitros, un cronómetro y un turbidímetro.

Procedimiento

- *Numerar los frascos.* El número de frascos dependerá de la época del año y de la forma de lavado; es decir, si el lavado se realiza con aire o con agua.
- Iniciar el lavado normal del filtro y tan pronto como caiga la primera agua de lavado en las canaletas, llenar el frasco 1 rápidamente. Continuar llenando los frascos cada minuto hasta completar los 15.
- Determinar turbiedades de las muestras y dibujar la curva de turbiedad versus tiempo en papel logarítmico-aritmético de tres ciclos (ver figura 3-89).
- Determinar en la curva el punto de inflexión inferior en donde esta tiende a ser asintótica con respecto al eje horizontal. El tiempo óptimo de lavado corresponderá al coincidente con el punto de inflexión. A partir de este momento no se gana nada con prolongar el proceso. Sería deseable que en este punto se obtuviera un agua con una turbiedad no mayor de 5 UNT.

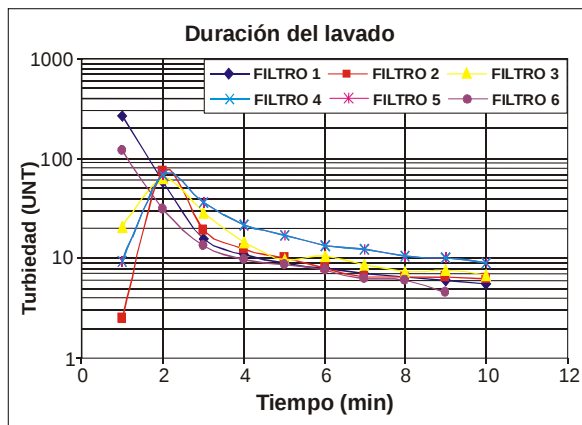


Figura 3-89. Duración de la operación de lavado (1)

Se aprovechará la etapa del lavado para obser-

var el comportamiento de esta operación. La figura 3-90 muestra zonas en que el agua expande demasiado, ha roto la boquilla y sale a borbotones. Se puede apreciar un sector del filtro en que el agua sale muy turbia, lo que indica que el lecho filtrante expande más que en el resto del área, donde el agua todavía es clara (figura 3-91). Este comportamiento se debe a una distribución no uniforme del agua de lavado en el drenaje.



Figura 3-90. Comportamiento durante el lavado (1)



Figura 3-91. Comportamiento durante la operación de lavado (1)

6.5 Características del medio filtrante

El medio filtrante es la parte más importante del filtro, constituye propiamente el filtro, y las características que tienen más influencia en la eficiencia del filtro son el tamaño y la forma de los granos, la porosidad del medio filtrante y su altura.

Cuadro 3-25. Características usuales de los lechos filtrantes (2)

Características	Simple de arena	Lecho doble	
		Arena	Antracita
Espesor del medio filtrante (m)	0,70–1,00	0,25–0,30	0,45–0,50
Tamaño efectivo (T. E.) (mm)	0,50–0,70	0,50–0,60	0,75–0,90
Coef. de uniformidad (CU)	< 1,5	< 1,5	< 1,5

En el caso de los lechos dobles, el diámetro de la capa de antracita más profunda (d_{90}) debe guardar una relación de 3 veces el diámetro de la capa de arena más fina (d_{10}), para que el grado de intermezcla (I_m) sea aceptable.

La porosidad de la arena se encuentra normalmente entre 0,40 y 0,45. Su determinación no es esencial para la evaluación del rendimiento del filtro. Mucho más importantes son el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad de los materiales que componen el lecho filtrante. Su determinación periódica, una o dos veces al año, proporciona información que permite saber si se está perdiendo material durante la operación de lavado, o si se está produciendo el crecimiento de los granos como consecuencia de la mala remoción de la película adherida a estos.

6.5.1 Granulometría del medio filtrante

Objetivo

Determinar el tamaño de los granos que componen una muestra del medio filtrante.

Materiales

Un juego de mallas de la serie Tyler

Procedimiento

- Lavar el filtro normalmente y vaciarlo para poder ingresar (ver figura 3-92).
- Obtener una muestra representativa de toda la profundidad del lecho filtrante.
- Secar y pesar la muestra de material filtrante.
- Colocar la muestra en el juego de mallas Tyler, en el recipiente superior de mayor abertura y agitar el conjunto mecánica o manualmente, hasta que los granos pasen a través de tantas mallas como su tamaño lo permita.

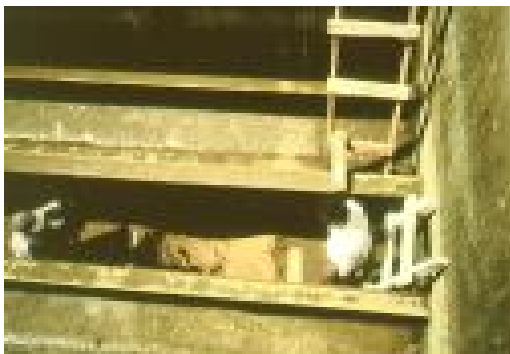


Figura 3-92. Extrayendo una muestra del medio filtrante (1)

- Pesar las porciones de muestra retenidas en cada malla y calcularlas como porcentajes de la muestra total.
- Graficar los porcentajes obtenidos en un papel logarítmico de probabilidades, colocando los porcentajes en peso acumulado en el eje de las ordenadas (escala logarítmica) y el tamaño de los granos en milímetros en el eje de las abscisas (escala de probabilidades).

Aplicación práctica

Del análisis granulométrico de la arena que conforma un filtro de lecho doble se obtuvieron los resultados que se indican en la curva 1 de la figura 3-93.

El diámetro efectivo y el coeficiente de uniformidad se obtienen de la curva indicada. Se determinan los tamaños correspondientes al 10% y 60%, de lo que resulta:

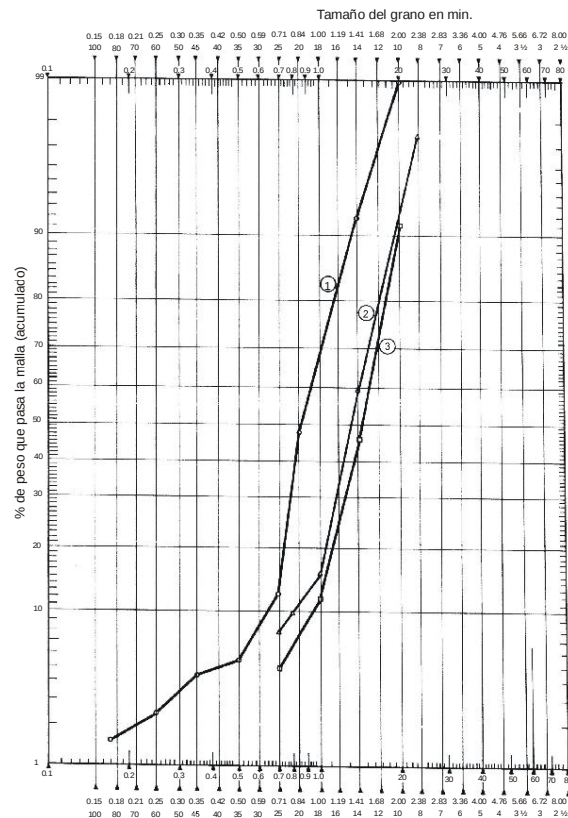


Figura 3-93. Curvas granulométricas de un lecho doble (2)

- diámetro efectivo (d_e) = $P_{10} = 0,64$ mm
- coeficiente de uniformidad

$$(CU) = P_{60}/P_{10}$$

$$(CU) = 0,94/0,64 = 1,46$$

Las curvas 2 y 3 fueron determinadas del mismo modo y corresponden al análisis de la antracita con 6 meses de intervalo entre ellas. Los resultados de la curva 2 son los siguientes:

$$\text{Tamaño efectivo} = P_{10} = 0,80 \text{ m}$$

$$\text{Ceficiente de uniformidad (CU)} = P_{60}/P_{10} = 1,40/0,80 = 1,75$$

La segunda muestra (curva 3), tomada después de nueve meses de operación continua, presentó los siguientes resultados:

$$\text{Tamaño efectivo} = P_{10} = 0,92 \text{ m}$$

$$\text{Coeficiente de uniformidad (CU)} = P_{60}/P_{10} = 1,50/0,92 = 1,63$$

$$\text{El grado de intermezcla es: } \frac{d_{90} \text{ antracita}}{d_{10} \text{ arena}} = \frac{2,38}{0,64} = 3,7$$

Los parámetros de la muestra de arena (curva 1) indican que el material es un poco grueso y bastante uniforme, la antracita (curva 2) es, por el contrario, ligeramente fina y poco uniforme. Sin embargo, el grado de intermezcla es aceptable.

Del análisis de la curva 3 se deduce que el material varió después de seis meses, lo cual se debe a que el proceso de lavado era defectuoso y se perdía material fino por exceso de velocidad, lo cual se vio corroborado por el desacomodo de la arena.



Figura 3-94. Cantidad de bolas de lodo en el lecho filtrante(1)

6.5.2 Estado del medio filtrante

Como consecuencia de un lavado deficiente del filtro (falta de expansión) o de una frecuencia inadecuada de retrolavados, el lodo se va acumulando dentro del lecho filtrante. Este grado de deterioro del lecho filtrante se puede visualizar a través de la presencia de bolas de lodo (figura 3-94).

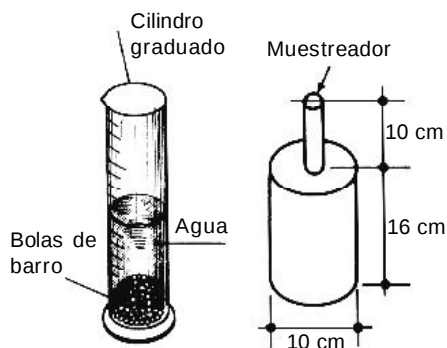


Figura 3-95. Equipo para prueba de bolas de lodo (2)

Objetivo

Determinar la cantidad de bolas de lodo presentes en el lecho filtrante.

Materiales

- Muestreador consistente en tubo metálico de 75 milímetros de diámetro y 0,15 metros de largo (véase la figura 3-95).
- Malla metálica número 10 (2 mm de abertura).
- Probeta de 500 mL.

Procedimiento

- Lavar normalmente el filtro y drenar el agua hasta 20 centímetros por debajo del nivel de la superficie de la arena.
- Determinar el volumen del muestreador y extraer cuatro muestras del lecho, incrustándolo hasta llegar a la grava. Extraer suavemente el muestreador para evitar que la muestra se pierda.
- Extender la arena sobre un plástico para separar con cuidado las bolas de lodo, dejándolas secar al sol.
- Colocar las bolas de lodo secas en una probeta en la cual se ha colocado un determinado volumen de agua. El volumen de las bolas es equivalente al incremento de volumen contenido en la probeta.

- El resultado se expresa en porcentaje con respecto al volumen de arena procesada.

$$\% \text{ de bolas de lodo} = \text{Incremento de volumen} \times 100 / \text{volumen de muestra}$$

Interpretación de los resultados

Un filtro bien conservado no debe contener bolas de lodo. Sin embargo, es posible que con el transcurrir de los años, puedan irse formando hasta llegar a 1% sin que afecten mayormente el funcionamiento de la unidad. Por encima de ese valor, la eficiencia se ve afectada cada vez en mayor grado. Porcentajes mayores de 5% están indicando la necesidad de reconstruir el lecho filtrante.

Se puede clasificar el filtro de acuerdo con el siguiente cuadro.

Cuadro 3-26. Clasificación de los filtros de acuerdo con el porcentaje de bolas de lodo (2)

% de volumen de bolas de lodo	Condiciones del medio filtrante
0 – 0,1	Excelente
0,1 – 0,2	Muy bueno
0,2 – 0,5	Bueno
0,5 – 1,0	Regular
1,0 – 2,5	De regular a malo
2,5 – 5,0	Malo
7,5	Muy malo

6.5.3 Espesor del medio filtrante

Cuando el lecho filtrante expande demasiado, la arena se pierde en cada retrolavado y se puede ver en las canaletas de recolección de agua de lavado, o se puede encontrar en el falso fondo del filtro o en el tanque de aguas claras cuando el drenaje se encuentra en mal estado y la arena se pierde a través de este. Se puede evitar la pérdida

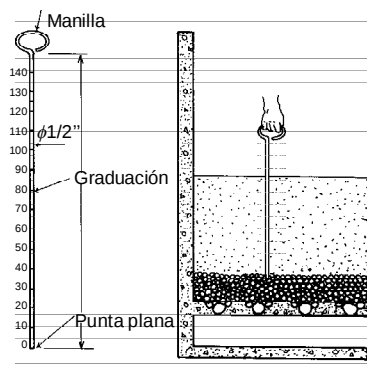


Figura 3-96. Profundidad del lecho filtrante (2)

del lecho si se controla cada seis meses su profundidad y se aplican medidas correctivas (figuras 3-96 y 3-97).

Objetivo

Determinar la profundidad del medio filtrante.

Materiales

Varilla de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y una cinta métrica (ver figura 3-93).

Procedimiento

- Después de lavar el filtro, se seca la superficie y se introduce la varilla metálica hasta encontrar la capa de grava.
- Determinar la longitud de la porción de la varilla introducida.
- Repetir esta operación en varios puntos del lecho.
- Comparar las alturas con las indicadas en el proyecto o con la que le correspondería de acuerdo con la granulometría de la arena.

La pérdida de la arena a través del drenaje normalmente ocurre cuando no se ha colocado la altura y granulometría apropiada de la capa soporte de grava para el drenaje de viguetas de concreto prefabricado (figura 3-96).



Figura 3-96. Arena en las canaletas de lavado (1)



Figura 3-97. Arena en el falso fondo del filtro (1)

También puede ocurrir esta situación cuando no se ha colocado el sello de mortero entre las viguetas de concreto del drenaje o cuando por causa del tiempo, este se ha perdido.

A menudo se encuentran filtros que solo están operando con la capa de arena más gruesa y la grava, debido a que por una exagerada expansión del medio filtrante, se ha perdido todo el material más fino (figura 3-98).

Esto se hubiera evitado si se hubiera efectuado una evaluación de los filtros por lo menos cada seis meses.

La figura 3-99 ilustra un caso extremo de desacomodo del medio filtrante, inicialmente debido a una mala distribución del agua de lavado. Con el tiempo y debido a la fuerte presión que ejerce el agua en un sector del drenaje, lo llega a romper y esta es ya la situación que se está ilustrando.



Figura 3-98. Solo quedaba material grueso en el filtro



Figura 3-99. Total desacomodo del medio filtrante

6.6 Caso de estudio

Se evaluaron las instalaciones de filtración de una planta de filtración rápida de América Latina de 840 L/s de capacidad (figura 3-100).

De acuerdo con los planos del proyecto, el sistema de filtración estaba compuesto por dos baterías de tasa declinante de cuatro filtros cada una, de 32,5

m² de área filtrante cada uno, con lecho doble de antracita y arena y lavado con aire y agua.

Los canales de interconexión de las baterías estaban intercomunicados por una abertura en la parte inferior.

Al momento de la evaluación, las dos baterías de cuatro filtros estaban siendo operadas como una sola batería de ocho filtros y los niveles de los filtros no eran uniformes a pesar de estar intercomunicados a través del canal de entrada y del canal de interconexión (principio de vasos comunicantes).



Figura 3-100. Vista de la batería de filtros evaluada (1)

6.6.1 Eficiencia

Las curvas de las figuras 3-101 y 3-102 muestran la calidad de la fuente y la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento.

Se puede apreciar que de junio a octubre el agua cruda es muy clara y de mejor calidad que el agua decantada y filtrada (figura 3-101).

La figura 3-102 muestra que los filtros no realizan una buena remoción microbiológica durante los meses lluviosos en que la contaminación es mayor.

A continuación analizaremos en qué condiciones se encontraban los filtros.

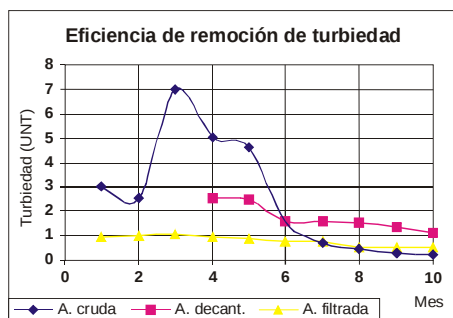


Figura 3-101. Eficiencia de remoción de turbiedad (1)

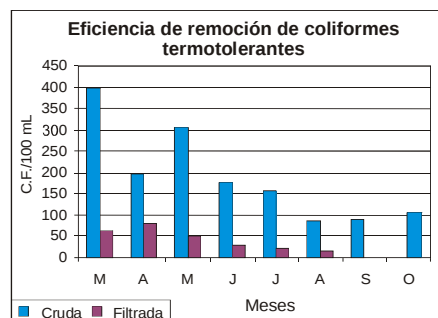


Figura 3-102. Eficiencia de remoción microbiológica (1)

6.6.2 Características del lecho filtrante

Se extrajo una muestra del lecho filtrante, separando la antracita de la arena. Se observó que estaban muy mezcladas y se encontró gran cantidad de bolas de lodo, principalmente en los filtros 1 y 2. Se lavó la muestra, se puso a secar y se efectuó la determinación del análisis granulométrico (ver el cuadro 3-27).

Cuadro 3-27. Granulometría del lecho filtrante (1)

Características	Arena	Antracita
Tamaño efectivo (T. E.), mm	0,46	0,90
Coefficiente de uniformidad	1,59	1,54
Tamaño máximo (mm)	1,17	2,38
Tamaño mínimo (mm)	0,30	0,59

- Los análisis granulométricos de la antracita y de la arena indican que la arena es fina. T. E. = 0,46 mm; tamaño mínimo = 0,30 mm.
- El grado de intermezcla de la antracita con la arena es de 5,2 y lo aceptable es 3,0. Este grado de intermezcla indica que la arena está muy revuelta con la antracita.

$$\text{Grado de intermezcla} = 2,38/0,46 = 5,17$$

Lo más negativo de esta situación es que la arena está relleno los poros de la antracita y se ha formado en esta zona una especie de tapón que ha incrementado la pérdida de carga, acortando las carreras.

6.6.3 Tasas de filtración y lavado

Determinación de la tasa de filtración promedio y la velocidad de lavado de proyecto:

$$V_f \text{ promedio} = (0,84 * 86.400) / (8 * 32,5) = 279 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

$$VL = [(0,84/2) * 60] / (32,5) = 0,775 \text{ m/min}$$

6.6.4 Carreras de filtración

Analizando el registro de operación de los filtros, se determinó que si bien la tasa declinante había sido instalada inicialmente, no estaba siendo correctamente operada, debido a que los filtros no se lavaban consecutivamente. El criterio que se estaba empleando era lavar el primer filtro que alcanzaba el nivel máximo marcado en la caja de los filtros. Esta forma de operación estaba produciendo carreras o intervalos de operación de 9 a 268 horas.

6.6.5 Eficiencia del sistema de lavado

Para evaluar el comportamiento de los filtros en las condiciones de diseño, se procedió a instalar nuevamente la tasa declinante en los ocho filtros. Se lavaron todas las unidades, una a continuación de la otra, y luego se desfasaron, lavando una cada tres horas. En esta etapa se determinó que la expansión del lecho filtrante durante el retrolavado con agua sola era de 18%.

Como durante la evaluación la planta estaba operando con un caudal de 756 L/s y considerando que cada batería recibía la mitad del caudal, la velocidad de lavado era:

$$VL = [(0,756/2) * (60)] / [(32,5) * 4] = 0,697 \text{ m/min}$$

Y de 0,73 m/min con un caudal de lavado de 378 L/s. Esta velocidad es suficiente para alcanzar una buena expansión (25% a 30%), con un material



Figura 3-103. Galería de operación de los filtros (1)

bastante fino como el que tienen los filtros, lo que hace suponer que lo que está faltando es mayor carga hidráulica disponible para el retrolavado; es decir que las pérdidas de carga que se están produciendo durante el retrolavado —como consecuencia de que los filtros están operando con una arena muy fina— son mayores que la carga disponible para compensarlas.

6.6.6 Relación tasa máxima/tasa promedio al inicio de la carrera del filtro recién lavado

Se aplicaron trazadores en la entrada a los filtros y se muestreó simultáneamente en los registros de los canales de aislamiento de cada unidad, para determinar los caudales de operación individuales. Los resultados obtenidos se indican en el cuadro 3-28.

Los resultados del cuadro 3-28 indican que los primeros cuatro filtros están tratando 67% del caudal y los otros cuatro, apenas 33%. Esta situación solo puede deberse a la forma en que los filtros están siendo operados, ya que la distribución del caudal se da de tal forma que cada filtro toma lo que puede, de acuerdo con el estado de colmatación o granulometría del medio filtrante. De acuerdo con este principio, los filtros que estaban con las carreras más largas (hasta de 268 horas) tenían que estar admitiendo un caudal muy pequeño, comparativamente con los que estaban con 9 horas.

Cuadro 3-28. Caudales y velocidades de filtración de las unidades de la batería (1)

Filtros	% de trazador que pasó	Q (L/s)	Área (m ²)	Tasa de filtración m ³ /m ² /día
F-1	19,67	167,16	29,173	495,07
F-2	14,67	124,72	29,366	366,96
F-3	12,48	106,08	29,946	306,05
F-4	20,06	170,55	29,077	506,76
F-5	9,95	84,58	29,125	250,92
F-6	7,88	67,00	29,801	194,26
F-7	8,06	68,53	29,366	201,62
F-8	7,22	61,38	29,125	182,09
		Total = 850,00		

El filtro 7 se acababa de lavar cuando se efectuó la prueba. Como se puede apreciar, la mayor tasa de operación la presenta el filtro 4 y no el filtro 7, que fue el recién lavado, y la relación es de:

$$T. \text{ máx.} / T. \text{ prom.} = 507/279 = 1,8 \text{ veces la tasa promedio}$$

La distribución de los caudales y de las tasas de filtración sugiere que los ocho filtros se comportan como dos baterías independientes de cuatro filtros cada una, aunque estén todos interconectados a través de un orificio en el canal de salida.

6.6.7 Profundidad y expansión del medio filtrante

Estas pruebas se efectuaron operando los filtros con una tasa promedio de filtración de $201 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ y una velocidad de lavado de $0,84 \text{ m/min}$. Los resultados se indican en el cuadro 3-29.

Al empezar el lavado, se determinó que un filtro tenía tres horas de carrera, mientras que había otro con 57 horas de carrera.

Durante el lavado con aire y agua, se pudo apreciar que el material se expande en forma brusca y exagerada y que se midieron expansiones de 80% a 100%. El lavado se estaba efectuando con los dos compresores operando simultáneamente.

Cuadro 3-29. Resultados de la evaluación del sistema de lavado (1)

Características	Filtros					
	1	2	3	4	5	6
Espesor de arena (m)	0,85	0,83	0,75	0,69	0,74	0,51
% de expansión	18 – 20	18 – 20	20 – 26	43 – 22	20 – 40	39 – 69

La expansión del medio filtrante no es uniforme entre los filtros, ni dentro del filtro mismo, lo que indica que la distribución del agua de lavado no es pareja. En los filtros 4 y 6 se midieron expansiones de 43% y 69%. Estas expansiones están ocasionando la pérdida del medio filtrante. Estos son los filtros que tienen menor profundidad de lecho filtrante. En los filtros 1 y 2, en cambio, se identificaron expansiones muy bajas de 18% a 20%. La altura del lecho es correcta, pero no se lava bien.

Se puede apreciar pérdida de material filtrante en el canal de evacuación del agua de lavado.

Interpretación de los resultados

Los filtros no están produciendo los resultados previstos, debido a las siguientes razones:

- La arena es muy fina y las cargas hidráulicas requeridas para el lavado y el filtrado superan las proyectadas.
- Los filtros están siendo operados como una sola batería y en realidad son dos.
- La arena se está perdiendo porque la aplicación del aire comprimido es exagerada. El lavado con aire debe efectuarse con un solo compresor; la otra unidad fue prevista como alterna.
- El caudal de operación de la planta varía constantemente. El caudal de lavado de los filtros es el caudal de operación y estas variaciones afectan la eficiencia del proceso. En ocasiones el caudal es muy bajo y el agua no logra acarrear el sedimento desprendido. La presencia de bolas de lodo es una prueba de ello.

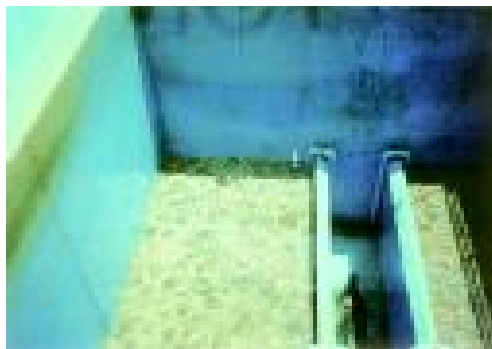


Figura 3-104. Se aprecia pérdida de material filtrante

7. EVALUACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE CLORACIÓN

Por lo general, la cloración es el proceso final utilizado para asegurar que las metas de calidad microbiológica del agua se alcancen, bajo el supuesto de que todos los procesos anteriores estén cumpliendo con sus objetivos; es decir que no podemos esperar que si los procesos de coagulación, decantación y filtración no están siendo eficientes, la cloración por sí sola remedie el problema produciendo buenos resultados.

La cloración solo debe servir para asegurar que la calidad del agua producida por la planta no desmejore al ser transportada a las viviendas de los usuarios. La remoción de la contaminación presente en la fuente debe ser mayormente efectuada por la decantación y completada en los filtros.

Los factores que modifican la eficiencia remocional de la cloración se relacionan con:

- Las características del agua.
- Las características del sistema de cloración.

Las características del agua que más influyen en la eficiencia del proceso son las siguientes:

- a. La temperatura y el pH.
- b. La concentración de la turbiedad, el color, la materia orgánica, el nitrógeno amoniacal, Fe, Mn, SO_2 , H_2S , etc.
- c. Tipo y concentración de microorganismos.

Las características del sistema que más influyen en la eficiencia de la cloración son:

- a. El tiempo real de contacto.
- b. La dosis de cloro aplicada.
- c. Las características del sistema de aplicación.
- d. Las características del compuesto de cloro utilizado.
- e. Las características de la caseta de cloración.

A continuación se indican algunos de los ensayos que se deben llevar a cabo para evaluar las características de estas instalaciones.

7.1 Tiempo real de contacto

Propósito

Determinar el tiempo real que el cloro permanece en contacto con la masa de agua, antes de que esta empiece a distribuirse.

Materiales

Los necesarios para determinar el cloro residual de acuerdo con los métodos estándar de la AWWA para análisis de agua.

Procedimiento

- Definir las estructuras que son atravesadas por el agua clorada antes de la primera conexión domiciliaria.
- En los tramos en que el agua atraviesa tuberías se produce flujo de pistón puro, por lo que el tiempo teórico de retención (T_o) y el tiempo de retención real (Tr), son similares.

$$T_o = Tr = \frac{\pi D^2 L}{4 Q}$$

D = Diámetro de la tubería (m)
 L = Longitud de tubería (m)
 Q = Caudal (m³/min)

- El tiempo de retención real en la cámara de contacto y en el reservorio se puede determinar de la siguiente manera:
 - 1) Tomar una muestra de agua clorada a la salida de la estructura y determinar el cloro residual presente.
 - 2) Incrementar súbitamente la dosis de cloro en 30%, y a partir de este momento, establecido como punto de partida para el ensayo, seguir tomando muestras cada minuto hasta que el incremento en la dosis se perciba en el cloro residual de las muestras extraídas.
 - 3) Tomar el tiempo correspondiente a la muestra en que se presentó el incremento de cloro residual.
 - 4) El intervalo de tiempo transcurrido entre el incremento de la dosis que estaba aplicando el clorador y la presentación del incremento de cloro residual

a la salida de la estructura estará indicando el tiempo de retención real (T_r) entre el punto de aplicación del cloro y el lugar en el que se tomaron las muestras.

Aplicación

Se determinó el tiempo de retención real para el contacto con el cloro en el reservorio de una planta. Se incrementó la dosis de cloro a la entrada de esta estructura, se tomó una muestra cada minuto y se determinó el cloro residual a la salida, mediante el método DPD. La curva de la figura 3-105 reproduce los resultados obtenidos. Se puede apreciar que el tiempo real de contacto es de 36 minutos.

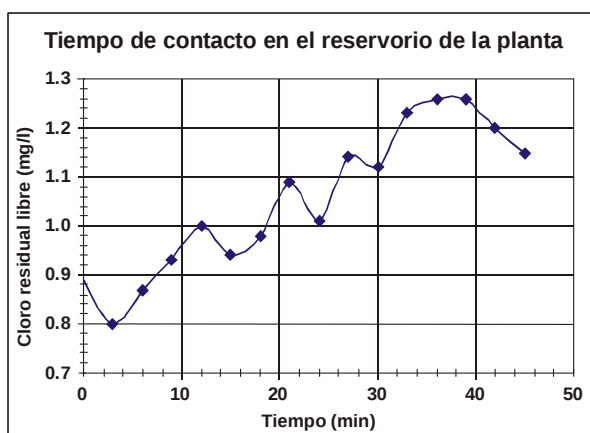


Figura 3-105. Tiempo de contacto en el reservorio de la planta (1)

7.2 Dosis óptima de cloro

Es la dosis que produce el residual de cloro estipulado por las normas en el punto más alejado de la red de distribución.

Objetivo

Determinar la dosis de cloro que satisface la demanda de todo el sistema produciendo el residual apropiado en el punto más alejado.

Procedimiento

- Determinar el tiempo de retención entre el punto de aplicación y el punto más alejado de la red de distribución (T_r).

- Graduar el clorador en la apertura correspondiente a la dosis calculada a nivel de laboratorio (curva de demanda de cloro al punto de quiebre), ver figura 3-106.
- Transcurrido el tiempo de retención medido (T_p), tomar tres muestras en el punto de aplicación y en el punto más alejado de la red, determinar el cloro residual y el residual promedio de las tres muestras.

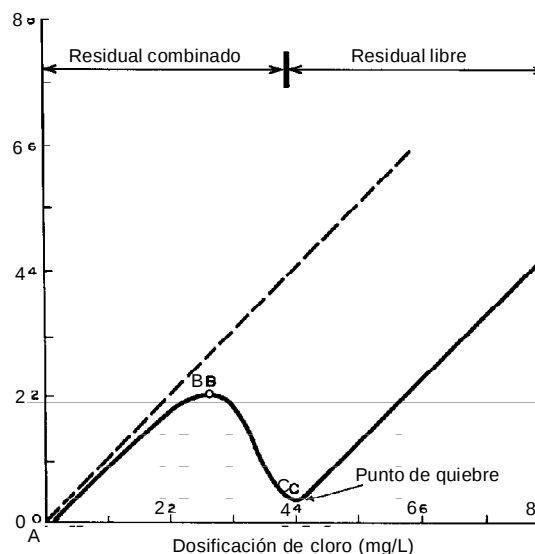


Figura 3-106. Demanda de cloro al punto de quiebre (2)

- Repetir el ensayo incrementando gradualmente la dosis, hasta encontrar en el punto más alejado de la red el contenido de cloro residual estipulado por las normas.

Comentarios

- La diferencia de cloro residual medido entre el punto de aplicación y el punto más alejado refleja la demanda de cloro del agua, más la demanda en la red de distribución.
- La demanda de cloro del agua varía con la calidad de esta. La demanda de cloro en la red de distribución suele ser constante en sistemas en los cuales se viene clorando por mucho tiempo. Cuando la cloración se implanta por primera vez, la demanda es muy alta, va disminuyendo a medida que pasa el tiempo y se satisface la demanda en la red, hasta volverse prácticamente constante.

- Si en un sistema de distribución se ha venido clorando durante mucho tiempo y la demanda de cloro en la red se incrementa súbitamente, se estaría poniendo de manifiesto la aparición de un nuevo foco de contaminación.

7.3 Características del sistema de aplicación

Para que el cloro se aplique en forma correcta, el sistema debe reunir las siguientes condiciones:

- Debe aplicarse en forma sumergida.

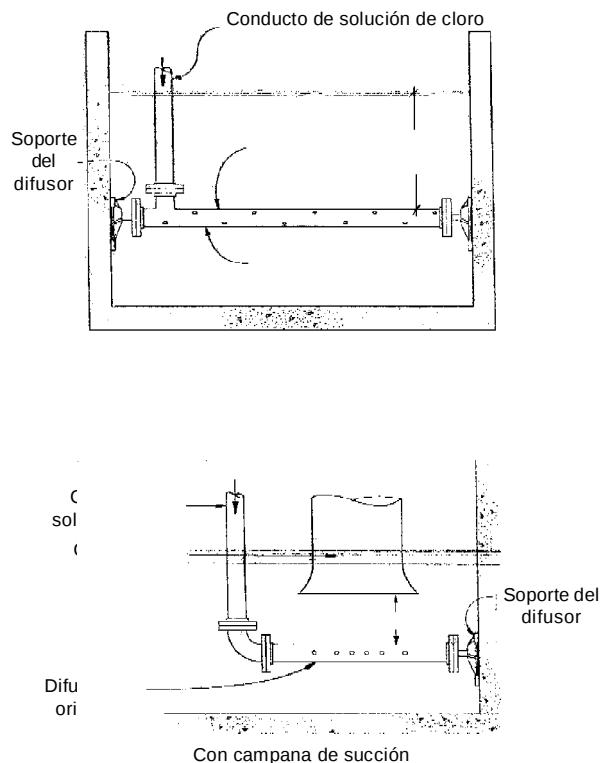


Figura 3-107. Difusores de cloro en tuberías y canales (1)

- Debe distribuirse de manera uniforme en toda la masa de agua mediante un difusor (figura 3-107).

- El difusor debe localizarse en un punto en que el agua esté generando turbulencia para que el cloro entre rápidamente en contacto con toda la masa de agua.

Objetivo

Determinar si el cloro está siendo aplicado en forma correcta.

Procedimiento

- Verificar si el cloro se está aplicando mediante un difusor.
- Comprobar si el difusor se encuentra totalmente sumergido.
- Comprobar si existe turbulencia en el punto de aplicación del cloro.

Comentarios

La figura 3-108 está ilustrando una forma correcta de aplicación. Se está aplicando en la turbulencia que produce el vertedero de entrada a la cámara de cloración y el difusor se encuentra sumergido con una altura mínima de agua de 1,50 metros, que es mantenida por la ubicación del vertedero de salida de la cámara.



Figura 3-108. Forma de aplicación correcta (1)

Normalmente, cuando la forma de aplicación es incorrecta, al destapar la cámara de cloración, el gas se percibe fuertemente en el ambiente porque no se está mezclando en el agua.

La figura 3-109 está ilustrando una situación así. La solución se está dejando caer a la cámara a través de un ingreso ubicado al inicio de la cámara y el gas del cloro está impregnando el ambiente que rodea el ingreso a ella.

7.4 Características de las instalaciones de cloración

Al evaluar las instalaciones o ambientes en los que se está efectuando la operación de este proceso, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios generales:

- a) Instalaciones en las que el consumo de cloro es mayor de 50 kg/d debieran emplear cilindros de cloro de una tonelada.
- b) En instalaciones con consumo de hasta 50 kg/d, los equipos de cloración y el almacén de los cilindros de cloro pueden compartir la misma área. En instalaciones de mayor capacidad, deben ubicarse en áreas separadas.

Tanto la sala o caseta de cloración como el almacén deben reunir una serie de características cuya finalidad es facilitar la operación del sistema en forma segura y evitar riesgos para el personal que lo opera.



Figura 3-109. Aplicación incorrecta de cloro (1)



Figura 3-110. Sala de cloración con ventilación forzada (1)

Existen dos tipos de instalaciones: las salas herméticas con sistema artificial de ventilación y extracción del aire, en las que la manipulación se efectúa siguiendo rígidas medidas de seguridad —esto es, con vestimenta apropiada, máscaras y balón de oxígeno— (figuras 3-111 y 3-112). Estos sistemas son utilizados en plantas muy grandes y son usuales en Estados Unidos y Europa.

La sala de cloración de la figura 3-112 ha sido proyectada con ventilación forzada, pero se puede apreciar un solo punto de ventilación (debajo de la ventana) y muy alto. El cloro quedaría depositado a nivel del suelo y esta ventilación por encima.

El almacén de cilindros de cloro que corresponde a la sala de la figura 3-112 también tiene ventilación forzada, la que se puede apreciar en la vista de la figura 3-113.

Del mismo modo que en la sala de cloración, hay un solo punto de ventilación, debajo de la ventana y por encima de los cilindros.



Figura 3-111. Sala de cloración hermética (1)

Se debe tener en cuenta que para que una fuga evacue rápidamente, toda la parte baja de los muros, a la altura del piso, debe estar cubierta de puntos de ventilación.

Cuando se emplea ventilación forzada, esta debe cubrir todo el contorno, como se muestra en la figura 3-110.

En América Latina son usuales las salas de cloración totalmente abiertas y con ventilación natural, donde se espera que las fugas se dispersen con rapidez en el ambiente circundante, por lo que generalmente se ubican bastante alejadas del resto de la planta, de tal manera que si se presentara una emergencia, el efecto corrosivo del cloro no cause daños a equipos e instalaciones.

7.4.1 Criterios para evaluar la sala de cloración y el almacén de cilindros de cloro

- Ventilación a la altura del piso, natural o forzada. La sala de la figura 3-115 no reúne estas condiciones. En caso de una fuga, ello no contribuirá en nada a desalojar el cloro acumulado a nivel del piso.



Figura 3-112. Sala de cloración con ventilación forzada (1)



Figura 3-113. Almacén con ventilación forzada (1)



Figura 3-114. Almacén con muy poca ventilación (1)

En la figura 3-116 se puede apreciar al fondo la sala de cloración.

- El almacén de cloro debe ser exclusivamente para este fin. No debe depositarse en este ambiente ningún otro tipo de materiales, porque se entorpecería la manipulación de los cilindros en caso de una emergencia (figuras 3-116 y 3-117).

El almacén de la figura 3-117 está siendo utilizado para depositar los módulos de fibra de vidrio de los decantadores. Se puede apreciar que estos se encuentran obstaculizando la circulación.



Figura 3-115. Sala de cloración sin ventilación a la altura del piso (1)



Figura 3-116. Almacén de cilindros de cloro (1)

- Debe haber un equipo de cloración y una bomba de agua alterna. La sala de cloración de la figura 3-118 no tiene equipo de cloración alterno. En estas condiciones, esta unidad está operando en permanente estado de emergencia y en cualquier momento puede presentar un desperfecto y la cloración se suspendería.

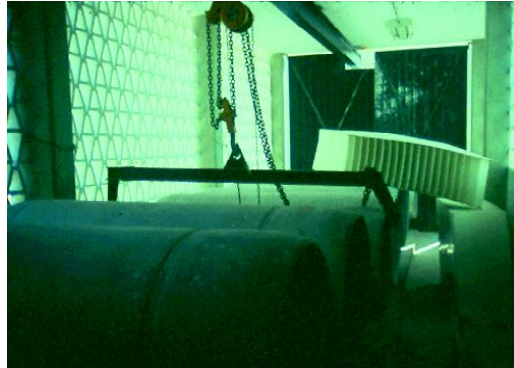


Figura 3-117. Almacén de cilindros de cloro (1)

- Las bombas deben estar en otro ambiente para que no se deterioren por efecto de las fugas.
- Verificar la existencia y estado de alarmas para indicar la presencia de fugas en el sistema (figura 3-119).

La mayoría de las salas de cloración en América Latina son abiertas; esto es, ventiladas en forma natural. Para que la operación sea segura, deberá comprobarse la existencia de las siguientes facilidades:



Figura 3-118. No hay equipo de cloración alterno (1)

- Ventilación apropiada. La ventilación debe ubicarse en la parte inferior de los muros (el gas cloro es más pesado que el aire y tiende a depositarse a nivel del piso) y las puertas o muros preferentemente deben ser de malla o de ladrillo hueco.

La figura 3-120 muestra una sala de cloración abierta. El ingreso tiene la altura de la plataforma del camión para facilitar el traslado.

La figura 3-121 muestra una sala y un almacén ventilados en forma natural correctamente ubicados, aislados del resto de la planta. Se puede alcanzar a ver el armario ubicado en la puerta de la sala con el equipo de protección.

- Comprobar la existencia de máscaras de protección en buen estado y correctamente ubicadas en un lugar exterior a la caseta de



Figura 3-119. Sistemas de alarmas (1)

cloración, conjuntamente con la botellita de amoníaco para detectar fugas y el equipo para reparar fugas. Este equipo debe estar siempre fácilmente accesible por los operadores.

- Comprobar si los operadores han sido capacitados para usar el equipo de protección para fugas correctamente (figura 3-122).



Figura 3-120. Almacén abierto con ventilación natural (1)

- Verificar las facilidades con que se cuenta para el traslado de cilindros dependiendo de la capacidad (150 ó 2.000 lb). Para cilindros de 2.000 libras, debe contarse con una grúa (figura 2-123).
- Existencia y estado de la balanza para controlar el peso del cilindro en uso.



Figura 3-121. Caseta de cloración y almacén de cloro (1)



Figura 3-122. Sistema de protección ubicado en la puerta de la sala



Figura 3-123. Cilindros en uso sobre una balanza (1)

El sistema de la figura 3-124 carece de balanza, de ventilación apropiada y de grúa para trasladar los cilindros de 2.000 libras del camión a la sala de cloración.

Cuando no hay grúa para trasladar los cilindros, el personal debe ingeniar formas de hacerlo y los riesgos que surgen son muy grandes (figura 3-125).

- Comprobar si la capacidad del almacén es adecuada, así como el número de cilindros llenos y vacíos que se mantienen almacenados y la forma en que se aseguran para evitar caídas en caso de sismos.
- Comprobar si hay un sistema alternativo de emergencia que opere por gravedad para cuando falta la energía eléctrica.

Los sistemas pequeños son por lo general los más defectuosos. El sistema de la figura 3-127 no tiene balanza, ventilación apropiada ni sistema de sujeción para los cilindros. Durante un sismo o explosión fuerte, los cilindros pueden caerse. El de mayor riesgo es el cilindro en uso, pues al caer, puede arrancarse la manguera y ocasionar una fuga.



Figura 3-124. Sistema incompleto, operación riesgosa (1)

El sistema de la figura 3-128 tiene buena ventilación, pero solo hay un clorador.

El sistema de la figura 3-129 tiene balanza, pero un solo clorador y la ventilación en la parte alta.

La figura 3-130 muestra un sistema de cloración improvisado en un corredor exterior de la planta. No hay caseta, no hay equipo alterno, no hay balanza ni equipo de seguridad.

La sala de cloración de la figura 3-131 tiene equipo alterno, balanza, sistema de sujeción para el cilindro en operación. El cilindro alterno no tiene sujeción y no hay ventilación a nivel del piso.



Figura 3-125. Operación de descarga de alto riesgo (1)

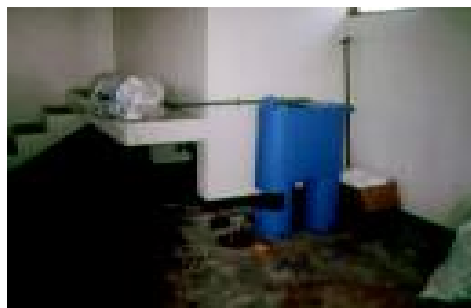


Figura 3-126. Sistema de cloración alterno que opera por gravedad (1)



Figura 3-127. Sala de cloración y almacén de planta pequeña (1)

El sistema de la figura 3-132 no tiene balanza, no hay sistema de sujeción para los cilindros en operación, no hay ventilación en la parte baja ni equipo de protección para el operador. Se puede apreciar un buen sistema de sujeción para los cilindros almacenados.

Los cilindros de 75 kg se almacenan en forma vertical (parados) y deben estar bien sujetos, para evitar que cualquier vibración fuerte ocasione caídas y pueda producirse fuga de cloro.

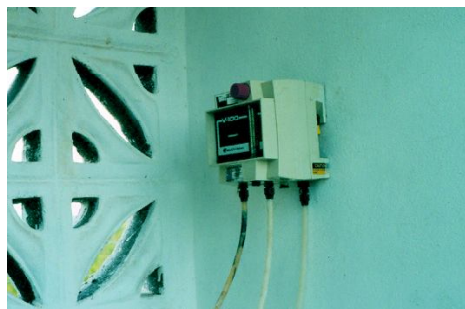


Figura 3-128. Sala de cloración con un solo equipo (1)



Figura 3-129. Sala de cloración con ventilación defectuosa

- Comprobar que el cilindro de cloro que está en uso no se encuentre escarchado o congelado por fuera.

El cilindro de la figura 3-134 se encontraba congelado (muy frío al tacto y chorreando agua). Esto ocurre cuando se está extrayendo más de lo que la capacidad máxima del cilindro permite.

El cuadro 3-30 indica las dosis que se pueden extraer a un cilindro dependiendo de su capacidad.



Figura 3-130. Sistema improvisado (1)



Figura 3-131. No tiene ventilación adecuada (1)



Figura 3-132. Sala de cloración incompleta (1)



Figura 3-133. Almacén de cilindros de 75 kg (1)

En estos casos deben colocarse más cilindros en operación unidos mediante una tubería matriz o *manifold*.

- Comprobar si existen carretillas para trasladar en forma segura los cilindros de cloro.

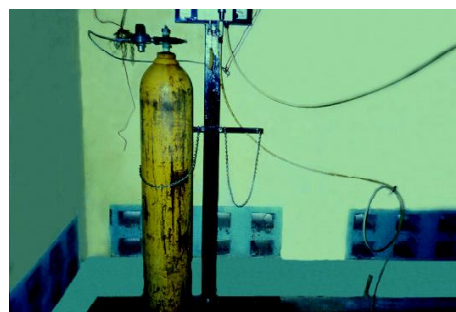


Figura 3-134. Extracción de cloro al máximo permisible

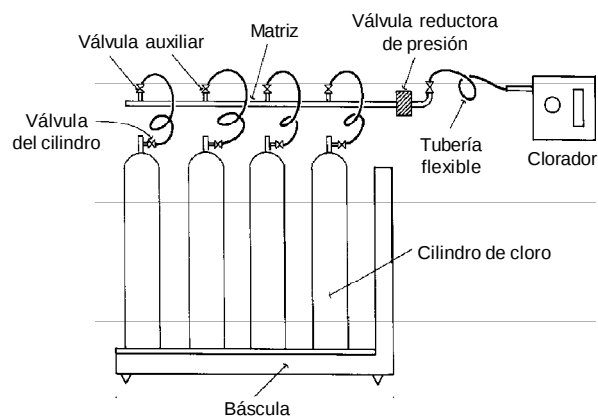


Figura 3-135. Sistema de conexión de cilindros de cloro (2)

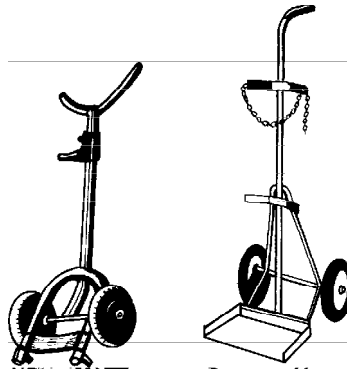


Figura 3-136. Carretillas para los cilindros de cloro (2)

Cuadro 3-30. Características de los cilindros de cloro (4)

Peso del contenido		Peso del cilindro		Peso total del cilindro lleno		Máximo flujo de cloro que se puede extraer de un cilindro	
kg	lb	kg	lb	kg	Lb	kg	lb
50	100	33	73	83	173	11,7	26
75	150	40-59	90-130	115-134	240-280	18,2	40
2.000	1.000	680	1.500	1.680	3.500	400	182

El cuadro 3-31 permite calcular el número de cilindros que deben estar almacenados, para comprobar si el almacén tiene la capacidad necesaria.

Cuadro 3-31. Número de cilindros necesarios, según la capacidad requerida (4)

Cilindro de 75 kg				Cilindros de 1.000 kg			
Capacidad requerida DGS/día	En servicio	Vacíos	Reserva mínima	Capacidad requerida (kg/día)	En servicio	Vacíos	Reserva mínima
0-18	1	2	3	54-180	1	1	2
18-36	2	4	6	180-360	2	2	4
36-54	3	6	9	360-540	3	3	6
54-72	4	8	12	540-720	4	4	8
72-90	5	10	15	720-900	5	5	10
90-100	6	12	18	900-1.000	6	6	12
				> 1.000	Usar evaporador		

7.5 Grado de contaminación ocasionada por el proceso

Es conocido que la aplicación de cloro en aguas con color y/o con gran cantidad de materia orgánica puede generar contaminación adicional al ocasionar la formación de trihalometanos. En aguas que presenten este tipo de contenido, sobre todo si se está efectuando precloración, o no se está tratando el agua en forma eficiente, puede esperarse que se esté dando este tipo de contaminación. En estos casos se debe determinar el grado de contaminación que está ocasionando la operación de este proceso y corregir el punto de aplicación. La precloración debe trasladarse después de la decantación, cuando la mayor parte del color y materia orgánica en general ha sido removida.



Figura 3-137. Caseta de precloración improvisada (1)

7.6 Estudio de caso

Con frecuencia se encuentran casos en que las instalaciones de pre- y poscloración en plantas relativamente grandes han sido improvisadas. El sistema que evaluamos a continuación corresponde a esta situación.

7.6.1 Descripción del sistema

Los cilindros de 2.000 libras se descargan tirándolos del camión proveedor sobre llantas y se ruedan hasta el punto de aplicación en el canal de entrada. La aplicación se efectúa a 40 centímetros del nivel del agua, en una zona sin turbulencia y en forma puntual. El gas cloro no se está mezclando totalmente con la masa de agua, gran parte de él se libera en la atmósfera y se percibe un fuerte olor a cloro en toda la planta.

La balanza se encuentra malograda y los dosificadores también (figura 3-138). Se está efectuando una aplicación directamente del cilindro. La caseta de poscloración no tiene plataforma ni grúa-puente para el ingreso de los cilindros; estos ingresan rodando.

El área del techo que protege al cilindro en operación es insuficiente. Al mediodía el sol incide directamente sobre el cilindro. No hay almacén para cilindros llenos y vacíos; estos se almacenan a la intemperie. No se cuenta con herramientas para reparar fugas y las máscaras de protección no tienen filtros.



Figura 3-138. Dosificadores malogrados (1)

7.6.2 Tiempo de contacto

El tiempo de contacto se determinó utilizando como trazador el cloro. Se incrementó bruscamente la dosis, determinando simultáneamente cloro residual a la salida de la cisterna de aguas claras. El tiempo real de retención obtenido es de 11 minutos, y el tiempo de retención teórico es de 37 minutos. Adicionalmente, el tiempo de retención en la tubería de impulsión al reservorio de la ciudad es de 5,4 minutos. El reservorio de

la ciudad opera como cámara de carga, y el periodo de retención real es nulo. Por consiguiente, el tiempo total de retención real disponible es de 16,4 minutos.



Figura 3-139. Caseta de poscloración improvisada (1)

7.6.3 Dosis aplicadas

Se estudió el consumo de cloro en el periodo de mayo a noviembre de 1994 y se obtuvo una dosis promedio de 1,43 mg/L en la precloración y de 1,17 mg/L en la poscloración. En el periodo de fe-

brero a abril de 1995, las dosis promedio fueron de 2,54 mg/L en la precloración y 1,4 mg/L en la poscloración (ver el cuadro 3-32).

Cuadro 3-32. Dosis de cloro aplicadas en las etapas de pre- y poscloración (1)

Año	Mes	Peso de cloro		Volumen del agua tratada (m³)	Dosis promedio del mes (ppm)	
		Precloración (kg)	Poscloración (kg)		Precloración	Poscloración
94	May.	1.858	1.679	1.239.319	1,5	1,35
94	Jun.	1.579	1.346	1.132.260	1,39	1,18
94	Jul.	1.295	1.224	971.788	1,33	1,25
94	Ago.	1.525	1.307	1.063.836	1,43	1,23
94	Set.	1.575	1.180	1.064.454	1,48	1,11
94	Oct.	2.126	1.126	1.250.332	1,7	0,9
94	Nov.	1.480	1.461	1.217.005	1,22	1,2
94	Dic.					
94	Ene.					
95	Feb.	3.538	1.530	1.176.624	3	1,3
95	Mar.	2.831	1.771	1.162.600	2,44	1,52
95	Abr.	2.413	1.541	1.093.704	2,19	1,4

En el cuadro anterior se observa que entre los meses de mayo y noviembre las dosis aplicadas en la pre- y poscloración variaron en promedio entre 1,43 mg/L y 4,17 mg/L respectivamente; asimismo, entre los meses de febrero y abril fueron de 2,54 mg/L y 1,40 mg/L.

7.6.4 Eficiencia de la cloración

De acuerdo con la información de los archivos de la planta, el efluente sale con una concentración de cloro residual variable entre 1,2 y 1,7 mg/L. Para comprobar los niveles de cloro residual, en el sistema de distribución se ubicaron seis puntos de muestreo, el primero de los cuales fue la cisterna de agua tratada de la planta.

El cuadro 3-33 indica los resultados del muestreo.

Cuadro 3-33. Resultados de las muestras de cloro residual en el sistema de distribución (1)

Puntos de muestreo	Primer muestreo		Puntos de muestreo	Segundo muestreo	
	Hora	Cloro residual (mg/L)		Hora	Cloro residual (mg/L)
2	9:30	0,30	2	9:00	1,6
* 5	9:45	1,00	* 4	9:15	1,1
* 6	10:00	1,00	* 5	9:35	0,1
3	10:37	0,10	* 6	10:10	1,1
3	10:50	< 0,10	3	10:23	1,5
2	11:00	< 0,10	2	10:27	1,6

- Se comprobó la existencia de conexiones cruzadas.

Interpretación de los resultados

Como los cloradores están malogrados y se está aplicando directamente del cilindro, las dosis varían en función de la presión que el cilindro tiene en ese momento.

Los resultados del muestreo del primer día indican el efecto en la dosificación cuando el cilindro de cloro está casi vacío (0,3 mg/L en el punto 2). En esta situación, la dosis en los puntos más alejados era < 0,1 mg/L. El segundo día de muestreo el cloro residual a la salida de la planta era de 1,6 mg/L, y en los puntos más alejados, 1,1 mg/L (cilindro lleno).

REFERENCIAS

- (1) Canepa de Vargas, Lidia. *Fotos de archivo y sistemas evaluados*. Lima, CEPIS.
- (2) Pérez Carrión, J. M. y Canepa de Vargas, L. *Manual IV. Evaluación. Tomo III Procesos tecnología convencional*. Lima, Programa HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, 1992.
- (3) ACODAL. *Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua*. Cali, 1987.
- (4) Pérez Carrión, J. M., M. L. Castro de Esparza y L. Canepa de Vargas. *Manual II. Criterios de selección*. Lima, Programa HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, 1992.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Serie Técnica 13. Lima, CEPIS, 1973.
- Arboleda Valencia, J.; Grinplatsch, B. S.; Kirchmer, C. J. *Métodos de evaluación de procesos en plantas de tratamiento de agua*.
- American Water Works Association (AWWA). *Vulnerability of Water Supply Systems*.
- Baumann, E. R. *Granular Media Deep Bed Filtration*. Comunicación presentada en la Quinta Conferencia de Ingenieros Ambientales "Water Treatment Plant Design". Montana, Montana State University, 1976.
- Degremont. *Manual técnico del agua*. Cuarta edición. Buenos Aires, 1979.
- Di Bernardo, L. "Filtración". En Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual III. Teoría*. Lima, CEPIS, 1992.

Hudson, H. E. *Water Clarification Process. Practical Designs and Evaluation*. Nueva York, Van Nostrand, 1981.

Hudson, H. E. "A Theory of Functioning of Filters". *Journal of the American Water Works Association* 40 (8), agosto, 1948.

Ives, K. J. *A New Concept of Filterability*. Londres, University College, Department of Civil and Municipal Engineering, s. f.

Mintz, D. M. *Modern Theory of Filtration*. Sétimo congreso de la International Water Supply Association. Barcelona, 3-7 de octubre, 1966.

Pérez Carrión, J. M.; Canepa de Vargas, L. *Evaluación de procesos de tratamiento de agua. Curso de Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua*. Lima, CEPIS, 1982.

Richter, C.A. *Avaliação dos processos de filtração*. Curitiba, SANEPAR, 1981.

Richter, C. y Canepa de Vargas, L. *Manual V. Criterios de Diseño. Tomo II. Criterios de Diseño para floculadores y decantadores*. Lima, Programa HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, 1992.

Richter, C. A.; Arboleda Valencia, J. "Filtração ascendente e descendente; aspectos operacionais e de projeto". Simposio "Estágio Atual de Tratamento de Água no Brasil". Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria. Belo Horizonte, 1977.

ANEXO A

ESTUDIO DE CASO

**FICHA TÉCNICA DE EVALUACIÓN FINAL
DE UNA PLANTA DE FILTRACIÓN RÁPIDA**

FICHA TÉCNICA DE EVALUACIÓN FINAL DE UNA PLANTA DE FILTRACIÓN RÁPIDA

UBICACIÓN

1. **País:** ...
2. **Nombre de la planta:** ...
3. **Localidades abastecidas:** capital del departamento
4. **Localización:**
 - a) Departamento: ...
 - b) Provincia: ...
 - c) Distrito: ...
 - d) Distancia de la capital del departamento: 24 km
 - e) Altura: 882 m. s. n. m.
5. **Institución propietaria o administradora:** ...



Figura A-1. Casa de química de la planta



Figura A-2. Vista panorámica de la planta de agua

El 80% del tiempo la planta recibe las aguas mezcladas de las dos fuentes; el resto del tiempo solo se abastece a partir de la quebrada del Río 2.

FUENTE DE ABASTECIMIENTO

6. **Fuente de abastecimiento**
 - a) Quebradas de los ríos 1 y 2.
 - b) Conducción de agua cruda: por gravedad del Río 2 y por bombeo del Río 1.

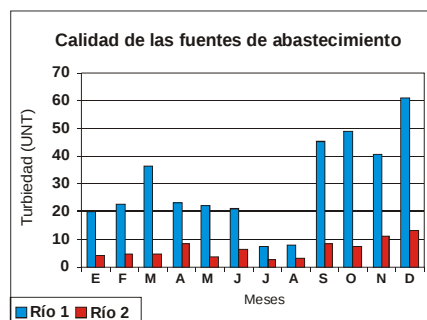


Figura A-3. Calidad de las fuentes de abastecimiento

CALIDAD DE LA FUENTE

a) Turbiedad

El gráfico de la figura A-3 permite apreciar que las aguas de la quebrada del Río 2 son de mejor calidad que las del Río 1.

Durante el año 2003 la turbiedad de las aguas del Río 1 variaron entre 7,4 y 61,0 UNT, mientras que durante el mismo intervalo, las aguas de la quebrada del Río 2 variaron entre 2,5 y 13,0 UNT.

El gráfico de la figura A-4 permite apreciar que el 95% del tiempo la turbiedad del agua cruda en el Río 1 fue menor de 600 UNT.

b) Color

Las fuentes tienen problemas de color muy similares a las del Río 2, pero no se dispone de información, ya que no se controla por falta de instrumental.

c) NMP de coliformes

Los histogramas de las figuras A-5 y A-6 muestran que el Río 1 está más contaminado que la quebrada del Río 2.

En las aguas del Río 1 el NMP de coliformes fecales varía entre 4,6 (10) y 3,7 (10)³.

En las aguas de la quebrada del Río 2 el NMP de coliformes fecales varía entre 0 y 5,75 (10)².

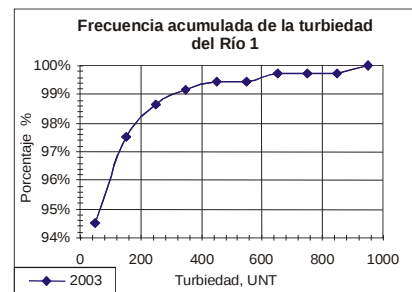


Figura A-4. Frecuencia acumulada de la turbiedad del Río 1

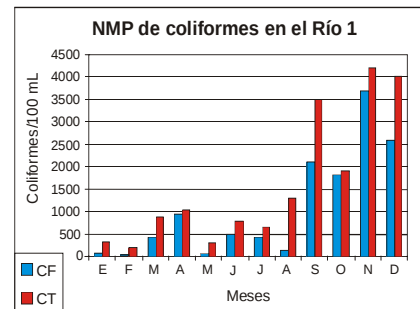


Figura A-5. NMP de coliformes en el Río 1

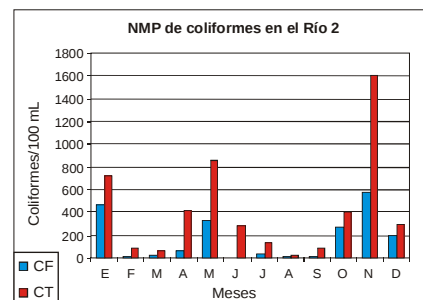


Figura A-6. NMP de coliformes en el Río 2

CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA

7. Caudal de la planta

- a) Caudal de diseño: 66 L/s
- b) Caudal de operación: 60 L/s

8. Tipo de planta

Filtración rápida completa

- a) La planta es mixta: de tecnología apropiada con decantadores convencionales.
- b) Año en que se diseñó: 1987.

9. Descripción de la planta

9.1 Medidor de caudal. Macromedidor

9.2 Mezcla rápida

- a) Tipo: hidráulico, vertedero rectangular.
- b) Punto de aplicación: puntual en el resalto hidráulico.

9.3 Floculadores

Tipo: hidráulico de pantallas de flujo horizontal



Figura A-7. Unidad de mezcla rápida



Figura A-8. Floculador hidráulico de flujo horizontal



Figura A-9. Decantadores convencionales

- a) Número de unidades: 1
- b) Número de tramos: 3
- c) Ancho de la unidad: 5,17 m
- d) Profundidad útil: 0,80 m
- e) Largo de cada tramo:
Tramo 1 = 5,08 m;
Tramo 2 = 5,20 m;
Tramo 3 = 5,02 m
- f) Tiempo de retención del proyecto: 16 min
- g) Tiempo de retención de operación: 17,5 min

9.4 Decantadores

- a) Tipo: convencional
- b) Número de unidades: 2
- c) Área de cada unidad: 78 m² por unidad
- d) Tasa superficial de proyecto: 32 m³/m².d
- e) Tasa superficial de operación: 29 m³/m².d
- f) Tasa óptima: 25 m³/m².d (para obtener 2,0 UNT en el efluente)
- g) Longitud de recolección: 18,9 m
- h) Tasa de recolección: 1,70 L/s.m

9.5 Filtros

- a) Tipo de filtro: es una batería de 4 filtros de tasa declinante
- b) Tipo de lecho filtrante: doble
- c) Área de cada filtro: 5,55 a 5,57 m²
- d) Tasa de filtración promedio de diseño: 247,50 m³/m².d
- e) Tasa de filtración promedio de operación: 232,70 m³/m².d

9.6 Dosificación

Sulfato de aluminio

- a) Volumen del tanque de solución: 2.575 m³
- b) Número de tanques: 1



Figura A-10. Dosificador de cal

- c) Tipo de dosificador: en solución por gravedad (en mal estado)
- d) Número de dosificadores: 1

Modificador de pH: cal

- a) Volumen del tanque de solución: 2.643 m³
- b) Número de tanques: 1
- c) Tipo de dosificador: por gravedad
- d) Número de dosificadores para la cal: 1



Figura A-11. Caseta de cloración

Cloración

- a) Tipo de dosificador: de inyección al vacío
- b) Número: 1

10. Análisis de la información

10.1 Capacidad potencial de producción de la planta

El gráfico de la figura A-12 permite apreciar que las capacidades de las diferentes unidades de la planta no son uniformes y, por tanto, no pueden tratar conjuntamente el caudal de proyecto.

El floculador tiene un volumen útil de 63 m³ y, considerando un tiempo de retención de 15 minutos (mínimo adecuado para aguas tropicales), cuenta con capacidad para tratar 70 L/s.

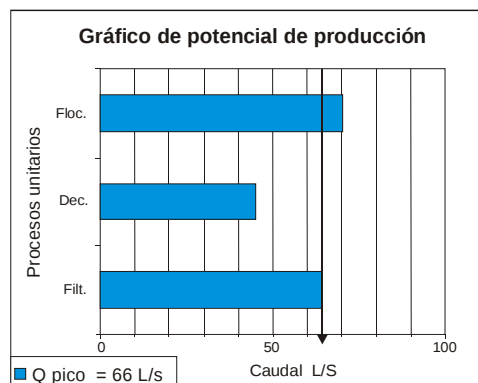


Figura A-12. Gráfico de potencial de producción

Los decantadores tienen una superficie de decantación total de 156 m² y, tomando en cuenta la tasa óptima de 25 m³/m².d determinada en el laboratorio, estas unidades podrían tratar como máximo 45 L/s.

El área total de filtros es de 23 m². Como tienen lecho doble de antracita y arena, estamos considerando una tasa de 240 m³/m².d y en estas condiciones pueden tratar un caudal de 64 L/s. Si el lecho fuera de arena sola, podrían tratar como máximo 45 L/s y estarían en concordancia con la capacidad de los decantadores.

10.2 Evaluación de la producción

a) Turbiedad

El histograma de la figura A-13 muestra la eficiencia de remoción de turbiedad de la planta y se puede apreciar que a pesar de que el agua de las fuentes es relativamente clara (en promedio, no sobrepasó de 61 UNT durante el 2003), el agua decantada varió entre 2,1 y 4,4 UNT y el agua filtrada entre 3,0 y 5,2 UNT.

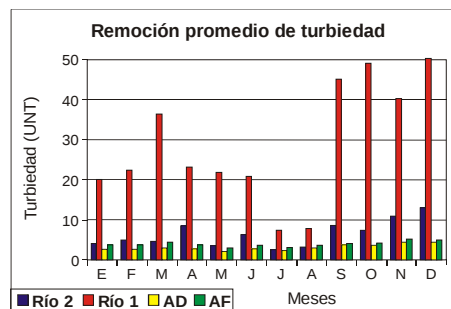


Figura A-13. Eficiencia de remoción promedio de turbiedad

El 95% del tiempo la turbiedad del agua decantada fue menor de 4,70 UNT (ver figura A-14).

El agua filtrada presentó el 95% del tiempo menos de 4,7 UNT (ver figura A-15). La información analizada está indicando que la eficiencia de los filtros es nula.

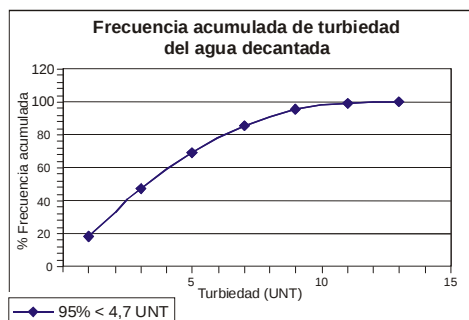


Figura A-14. Frecuencia acumulada de turbiedad del agua decantada

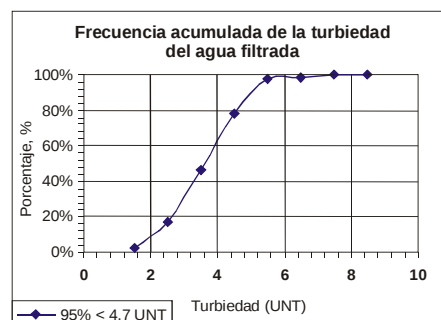


Figura A-15. Frecuencia acumulada de turbiedad del agua filtrada

El agua filtrada presentó el 95% del tiempo menos de 4,7 UNT (ver figura A-15). La información analizada está indicando que la eficiencia de los filtros es nula.

El gráfico de la figura A-16 reproduce la variación diaria de turbiedad en las fuentes, en el agua decantada y filtrada, durante el mes diciembre, mes en el que se registraron las turbiedades promedio más altas en las fuentes.

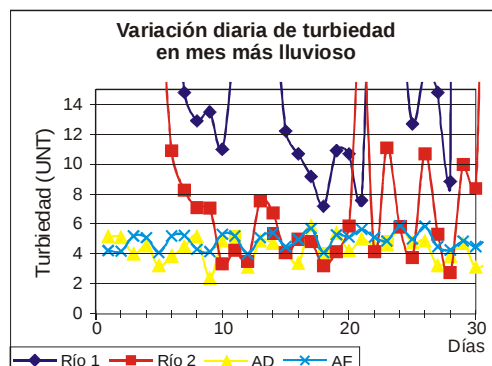


Figura A-16. Variación diaria de turbiedad en mes más lluvioso

También aquí se puede apreciar que la turbiedad del agua decantada es menor que la filtrada; es decir que el agua se deteriora al pasar por los filtros.

Asimismo, se puede observar que hay días en que las aguas de la fuente del Río 2 son más claras que el agua decantada y también que el agua filtrada.

El gráfico de la figura A-17 corresponde al mes de junio, uno de los meses más secos, y nuevamente se puede apreciar el mismo comportamiento: el agua decantada es más clara que la filtrada y a partir del día 22 se puede apreciar que la fuente del Río 2 tiene menos turbiedad que el agua filtrada y decantada.

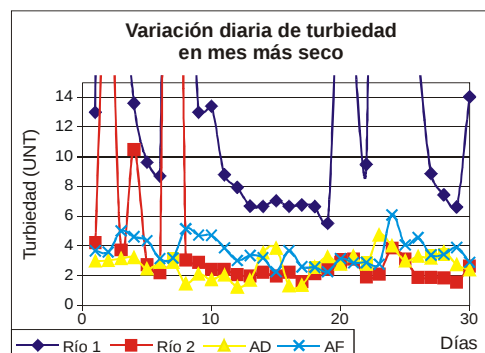


Figura A-17. Variación diaria de turbiedad en mes más seco

El gráfico de la figura A-18 permite apreciar que el pH promedio en el agua tratada se encuentra siempre alrededor de 7,0 o algo más.

El gráfico de la figura A-19 está indicando que durante el año 2003 el NMP de coliformes fecales en el agua tratada varió entre 0 y 575/100 mL de muestra.

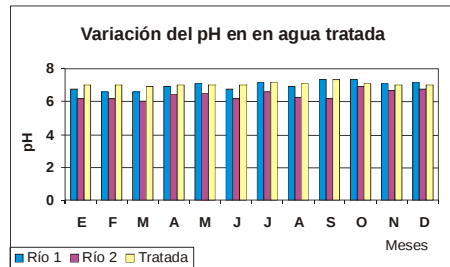


Figura A-18. Variación del pH en el agua tratada

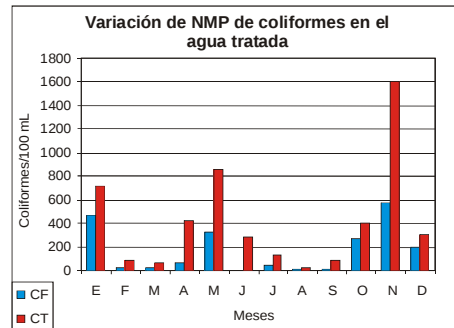


Figura A-19. Variación de NMP de coliformes en el agua tratada

11. Resultados de la evaluación de la planta

Se obtuvieron los siguientes resultados:

11.1 Coagulación

La dosificación de sustancias químicas en la planta no se realiza en función de los parámetros óptimos que la calidad del agua cruda requiere.



Figura A-21. Tanques de dosificación



Figura A-20. Tanques de preparación de la solución

No se efectúan ensayos de dosis óptima, los dosificadores no están en condiciones de asegurar una dosificación constante, por lo que la dosificación en la planta es variable. El primer día de la evaluación la turbiedad del agua cruda era de 177 UNT. El cuadro A-1 sintetiza los resultados de la evaluación de este proceso.

Cuadro A-1 Evaluación de la dosificación (To = 177 UNT)

Parámetros	Planta	Óptima
Dosis de s. de aluminio (mg/L)	25	70
Concentración del s. de aluminio (%)	1,94	1 a 2
Dosis de cal (mg/L)	9,11	15
Concentración de la cal (%)	11,35	5

Las sustancias químicas se dosifican en solución. El punto de aplicación del coagulante está en la zona de turbulencia, pero la aplicación se efectúa en forma puntual. La unidad de mezcla rápida es un vertedero rectangular.

11.2 Decantación

La planta tiene dos unidades convencionales de forma rectangular y de flujo horizontal. A simple vista se percibe que al decantador 1 ingresa mayor caudal que al decantador 2 y, por consiguiente, ambos operan con tasas diferentes. Esto se corrobora por la diferente eficiencia encontrada en ellos (ver cuadro A-5).

11.3 Filtración

El sistema de filtración está compuesto por una batería de cuatro filtros de tasa declinante y de lavado mutuo con lecho doble. Los filtros no están operando con tasa declinante y el lavado no se efectúa en forma secuencial.



Figura A-22. Estructura de salida de decantadores

Se tomaron las siguientes alturas:

- Altura de borde libre: 1,23 m
- Carga hidráulica de filtración: 1.067 m
- Carga hidráulica de lavado: 1.149 m

La capa soporte de grava está desacomodada. Observando el cuadro A-3, se puede ver que los filtros que tienen menos arena son los que están presentando mayor turbiedad efluente.

Cuadro A-2. Evaluación de los filtros

Características	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Altura promedio en el medio filtrante, m	0,415	0,22	0,195	0,12
Expansión	30%	-	-	-
Turbiedad efluente	6,63	8,05	10,60	12,10
Diámetro de las compuertas de entrada y salida	10"	10"	10"	10"

Durante la operación de lavado, el agua demora alrededor de 20 minutos para alcanzar la canaleta de agua de lavado.

Esta demora se debe a que la evacuación del agua de lavado del filtro desde el primer buzón de la planta hasta el punto de disposición final se realiza por medio de una línea de 8" de diámetro, que es insuficiente para la evacuación del agua de lavado (se ha observado que el agua se represa en el buzón) (figura A-23).



Figura A-23. El agua se represa durante el lavado

Después de ese tiempo, gran parte del material desprendido por el agua de lavado ha sedimentado en la superficie del lecho filtrante. Esto justifica la presencia de bolas de lodo (figura A-24).

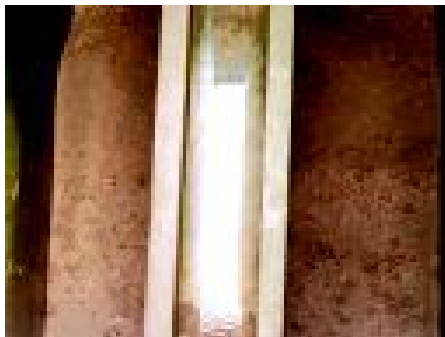


Figura A-24. Bolas de lodo en la superficie del lecho filtrante

En el filtro 4 se detectó una abertura entre el extremo de la vigueta y la pared, y se encontró arena y antracita en el falso fondo (figura A-25).

Observando el cuadro A-3, se puede ver que los filtros que tienen menos arena son los que están presentando mayor turbiedad efluente.

En los cuadros A-3 y A-4 se puede apreciar que las carreras de filtración no son uniformes. Se observa que el filtro 1 ha tenido mayor oportunidad de lavado que el filtro 4. Estos datos corroboran el hecho de que los filtros no se lavan en forma consecutiva.



Figura A-25. La arena está en el falso fondo del filtro

Cuadro A-3. Carreras de filtración de abril de 2004, en horas

Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
141:35	119:50	66:25	334:30
48:20	191:40	198	74:00
97:30	119:40	186	102:00
95:45	165:20	77	49:00
166:00	46:40		
31:40			
65:00			

Cuadro A-4. Carreras de filtración de mayo de 2004, en horas

Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
215:15	170:00	118:00	141:10
95:30	119:20	148:45	122:50
97:10	73:30	115:30	189
121:20	95:40	72:15	
101:00			

11.4 Cloración

La planta cuenta con un clorador Hidro del tipo de inyección, con una capacidad de 50 lb/día. El agua para el inyector normalmente es suministrada por una electrobomba, y alternativamente puede ser suministrada desde un tanque elevado.

Para situaciones de emergencia, la planta cuenta con un clorador del tipo de alimentación directa.

11.5 Eficiencia

Operando la planta con un caudal de 60 L/s, el 27 de mayo de 2004 se efectuó un muestreo y se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro A-5.

Cuadro A-5. Eficiencia puntual de los procesos

Punto de muestreo	Turbiedad(UNT)
Agua cruda	63,00
Efluente del decantador 1	17,70
Efluente del decantador 2	8,59
Efluente del filtro 1	6,63
Efluente del filtro 2	8,05
Efluente del filtro 3	10,60
Efluente del filtro 4	12,10

Se puede observar que la eficiencia de los decantadores es muy baja y la de los filtros prácticamente nula, sobre todo en las unidades 3 y 4, en que la turbiedad se incrementa al pasar por ellos.

CONCLUSIONES

Se han identificado problemas de diseño, operación y mantenimiento que se indican a continuación.

Dosificación y mezcla rápida

- No se opera en función de la calidad del agua cruda, ni se realizan pruebas de dosis óptima.
- Los equipos de dosificación requieren mantenimiento; no hay unidades alternas.
- El coagulante se aplica en forma puntual.

Decantadores

- No tienen capacidad para tratar los caudales de proyecto y de operación.
- La distribución del caudal a las unidades es desuniforme. A simple vista, el decantador 1 recibe mayor caudal. Durante la evaluación se constató que el decantador 1 producía un efluente con 18,0 UNT y el decantador 2, uno con 8,6 UNT.
- La eficiencia es baja. El 95% del tiempo es menor de 4,70 UNT.

Batería de filtros

- No se operan con tasa declinante.
- El retrolavado no se efectúa en forma consecutiva; algunos filtros se lavan más que otros.
- La altura de los lechos de arena varía entre 0,12 y 0,40 m y el material se encuentra en el falso fondo de los filtros.
- La eficiencia de las unidades varía entre nula y negativa.

Sala de cloración

- No hay equipos alternos.

RECOMENDACIONES

- Es necesario desarrollar el proyecto de rehabilitación del sistema, considerando:
 - a) Modificar el canal de entrada a los decantadores para distribuir el caudal de manera uniforme a las dos unidades.
 - b) Transformar los decantadores convencionales en decantadores de placas.

El estudio de parámetros óptimos efectuado en el laboratorio indicó que con una tasa óptima de decantación de $25 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, los decantadores estarían en capacidad de producir un efluente con 2 UNT. Un rápido cálculo de la capacidad de producción del área disponible indica que cada unidad transformada en decantador de placas podría producir 60 L/s, con una tasa de $17,65 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, con lo cual se obtendría una extraordinaria eficiencia en forma inmediata y permitiría en el futuro duplicar la producción de la planta, ampliando las demás unidades.

- c) Reconstruir el drenaje, capa soporte y colocar lechos dobles de antracita y arena a los filtros.
- El estudio efectuado indica que para operar la batería de filtros con un caudal de 60 L/s y obtener 30% de expansión con un lecho doble de antracita y arena, se requerirán las cargas hidráulicas y la granulometría del medio filtrante indicadas en el cuadro A-6.

Cuadro A-6. Características del medio filtrante recomendado, Q = 60 L/s

Características	Granulometría		Cargas hidráulicas (m)	
	Arena	Antracita	Lavado	Proceso
Altura (m)	0,30	0,45		
Tamaño efectivo (mm)	0,51	0,76		
C. U.	1,33	1,38		
Tamaño máximo (mm)	1,00	1,65	0,44	0,75
Tamaño mínimo (mm)	0,42	0,59		

- La colocación del nuevo lecho filtrante deberá efectuarse previa revisión de las viguetas del drenaje y habiendo repuesto el sello de concreto entre cada vigueta. Se colocará la capa soporte de grava de acuerdo con las especificaciones del cuadro A-7.

Cuadro A-7. Características de la capa soporte de grava

Capas	Espesor (m)	Tamaños (pgd)
1 (fondo)	0,10–0,15	1" a 2"
2	0,075–0,10	¾" a 1"
3	0,075–0,10	½" a ¾"
4	0,075–0,10	¼" a ½"
5 (superficie)	0,075–0,10	1/8" a ½"
Total	0,40–0,55	1/16" a 1/8"

- Preparar el manual de operación de la planta, capacitar a los operadores y establecer una frecuencia de supervisión por lo menos semanal.