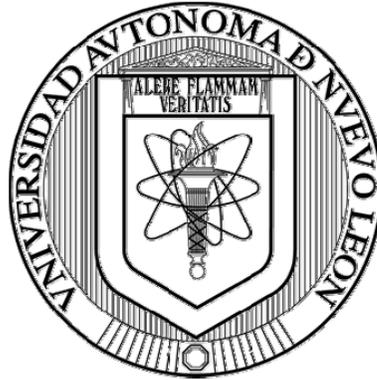


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE  
MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA  
POTABILIZADORA

Por

RENÉ ALBERTO HINOJOSA ALANÍS

Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Junio, 2012



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Oficio SDEPI-196-2012**

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**

Director del Departamento de Escolar y de  
Archivo de la UANL  
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **Ing. René Alberto Hinojosa Alanís**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,  
**"ALERE FLAMAM VERITATIS"**  
Cd. Universitaria a 21 de junio del 2012.

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.**  
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.  
Rtp.



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902  
[www.ingenieriacivil.uanl.mx](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)



# UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

## COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: RENÉ ALBERTO HINOJOSA ALANÍS

Tema de la tesis: DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA POTABILIZADORA.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA.  
Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales: (NINGUNA)

---

---

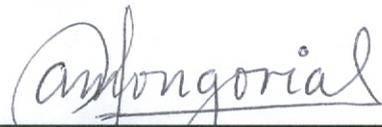
---

---

---

---

---

Nombre y firma de quien corrigió:   
**Arq. Ramón Longoria Ramírez**



**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ**  
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Universitaria, a 23 de MAYO de 2012



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902  
[www.ingenieriacivil.uanl.mx](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)

**DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE  
MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA  
POTABILIZADORA**

Aprobación de la Tesis:



---

**DR. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ**  
Director de tesis



---

**DRA. MARTHA LETICIA HERREJÓN FIGUEROA**  
Co-Directora de tesis



---

**DR. JUAN MANUEL ALFARO BARBOSA**  
Evaluador



---

**DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ**  
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación, FIC, UANL



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N.L. a 16 de mayo de 2012

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ**

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.  
Presente.-

Por este medio le comunico que el **Ing. René Alberto Hinojosa Alanís**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado ***"Diseño de un filtro piloto para detectar áreas de oportunidad de mejora en el proceso de filtración directa, en una planta potabilizadora"***, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado del Ing. Hinojosa, para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes.

Atentamente.-

**DR. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ**



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477  
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N.L. a 16 de mayo de 2012

**DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ**

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.

Presente.-

En atención a su oficio en el que me informa que fui designada Co Directora de la Tesis:  
***“Diseño de un filtro piloto para detectar áreas de oportunidad de mejora en el proceso de filtración directa, en una planta potabilizadora”***, que presenta el Ing. René Alberto Hinojosa Alanís, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente.-

**DRA. MARTHA LETICIA HERREJÓN FIGUEROA**

Co Directora de la Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels. 8352 4969 Fax: 8376 0477  
<http://www.fic.uanl.mx/esp/iic>



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

**DR. PEDRO L. VALDÉZ TAMÉZ**  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.  
Presente.-

**Estimado Dr. Valdéz Taméz:**

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis **“DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA POTABILIZADORA”** que presenta el Ing. **RENÉ ALBERTO HINOJOSA ALANÍS**, como requisito para obtener el grado de Maestría con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a Usted, que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, en el ámbito de competencia del suscrito dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

Atentamente,

15 JUNIO DE 2012

**DR. JUAN MANUEL ALFARO BARBOSA**  
PROFESOR-INVESTIGADOR

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido finalizar este proyecto de investigación.

Al Director de la Facultad de Ingeniería Civil, el M.I. Luis Manuel Aranda Maltez, por haberme ayudado con la beca para iniciar mis estudios de Posgrado.

A la Subdirección de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, por la ayuda que recibí en el transcurso de mi estudio de maestría.

Al personal del Departamento de Ingeniería Ambiental, por el apoyo en los diversos trabajos y proyectos en los que participé.

A Carol por ser alguien más que una compañera de trabajo, por ser una excelente persona y una excelente amiga.

Al Dr. Benjamín Limón y a la Dra. Martha Herrejón por sus enseñanzas y experiencias en el área de Ingeniería Ambiental, que han tenido a bien compartirme.

Al personal de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, por su excelente atención y ayuda para realizar esta investigación.

Al coach Arturo Ferriño por impulsarme a estudiar un posgrado.

A todos mis amigos, mis compañeros y otras personas que ayudaron y contribuyeron en forma directa o indirecta en este proyecto.

Muchas gracias a todos  
por ayudarme a salir adelante en este trabajo.

## DEDICATORIA

A mis padres, Raúl y Amanda, por ser mí ejemplo de vida, por los valores que me han inculcado, por la motivación que siempre me dan de salir adelante y por la fuerza que me brindan cada día, en cada paso que doy. Muchas gracias por todo.

A mi familia, por el gran apoyo que me han dado, por sus pláticas y consejos, por su amor y su cariño sin igual.

A mi welita Jovita (QEPD) y a mi Tía Alma (QEPD), por el amor que todos los días me dieron y porque sé que son dos ángeles que siempre me cuidan desde el cielo.

Y, en especial, a la mujer que me ha dado su tiempo y su apoyo incondicional; porque desde que la conocí supe que esto sería algo bello.....Gracias, Lesly Rodríguez.

*René Alberto Hinojosa Alanís*

## TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos .....	i
Dedicatoria .....	ii
Tabla de contenido.....	iii
Lista de tablas .....	vii
Lista de figuras .....	ix
Nomenclatura .....	xi
Acrónimos .....	xiii
Resumen .....	xiv

Capítulo	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes .....	4
1.2.1 Legislación en materia de agua para abastecimiento público .....	5
1.2.2 El agua en el Noreste de México .....	10
1.2.3 Problemas con el agua .....	11
1.2.4 La contaminación del agua .....	12
1.2.5 Enfermedades relacionadas con el agua.....	13
1.2.6 La calidad del agua .....	17
1.2.7 Generalidades sobre las fuentes de abastecimiento .....	19
1.2.8 Aspectos más importantes a considerar en el diseño de una planta potabilizadora .....	22
1.2.9 El proceso de potabilización .....	24
1.2.10 Tratamientos para la potabilización del agua .....	28
1.2.10.1 Coagulación y precipitación química .....	28
1.2.10.2 Filtración.....	30
1.2.10.2.1 Medio filtrante .....	32
1.2.10.2.2 Bajo drenes.....	34

1.2.10.2.3	Lavado de filtros .....	34
1.2.10.3	Desinfección.....	37
1.2.10.4	Tecnologías especiales o avanzadas para la potabilización del agua.....	38
1.2.10.4.1	Intercambio iónico.....	38
1.2.10.4.2	Osmosis inversa .....	38
1.2.10.4.3	Nanofiltración .....	39
1.2.10.4.4	Ultrafiltración.....	40
1.2.11	Problemas para el abastecimiento de agua en el Área Metropolitana de Monterrey .....	40
1.2.12	El abastecimiento de agua en el Área Metropolitana de Monterrey y la Planta Potabilizadora “San Roque”.....	41
1.2.12.1	Proceso de potabilización del agua en la planta “San Roque”. .....	43
1.2.13	Filtros Pilotos.....	46
1.3	Objetivos .....	47
1.3.1	Objetivo General .....	47
1.3.2	Objetivos Particulares .....	47
1.4	Hipótesis .....	48
1.5	Justificación.....	49
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>50</b>
2.1	Investigación bibliográfica.....	50
2.2	Inspección ocular en la Planta Potabilizadora para la colecta de evidencias ...	51
2.2.1	Líneas de conducción .....	52
2.2.2	Tanque de agua cruda .....	52
2.2.3	Medidores Parshall .....	53
2.2.4	Filtros .....	53
2.3	Revisión del proceso de filtración en filtros seleccionados .....	55
2.3.1	Proceso de selección de los filtros.....	55
2.3.2	Selección de los puntos de muestreo del material filtrante, en los filtros seleccionados.....	55
2.3.3	Toma de muestras de los cuatro filtros seleccionados.....	56
2.3.4	Determinación de los distintos espesores de cada lecho filtrante, en los filtros .....	56
2.3.5	Determinación de los porcentajes de bolas de lodos en los lechos filtrantes.....	57

2.3.6	Determinación de la granulometría de los medios filtrantes (arena y antracita) .....	58
2.3.6.1	Determinación de la granulometría de la arena .....	58
2.3.6.2	Determinación de la granulometría de la antracita.....	59
2.3.6.3	Corrección de la granulometría de los medios filtrantes .....	60
2.3.6.3.1	Procedimiento de corrección de la granulometría de la arena.....	60
2.3.6.3.2	Procedimiento de corrección de la granulometría de la antracita .....	62
2.4	Diseño, construcción y operación de un filtro piloto a escala del diseño original de la Potabilizadora .....	65
2.4.1	Diseño y construcción del filtro piloto.....	65
2.4.2	Pruebas de retrolavado en el filtro piloto .....	68
2.4.2.1	Homogenización de las muestras y carga en la columna de filtración.....	68
2.4.2.2	Retrolavado del filtro piloto mediante aire .....	69
2.4.2.3	Retrolavado del filtro piloto mediante agua .....	69
2.4.2.4	Expansión de los lechos filtrantes .....	69
2.4.2.5	Determinación de la turbiedad en el agua de retrolavado.....	69
2.4.2.6	Determinación del tiempo óptimo de lavado .....	70
2.4.2.7	Descarga del filtro.....	70
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
3.1	Colecta de información en la Planta Potabilizadora “San Roque”.....	71
3.2	Revisión del proceso de filtración .....	72
3.2.1	Espesores en los lechos filtrantes.....	74
3.2.1.1	Resultados obtenidos de los espesores del filtro 9 .....	74
3.2.1.2	Resultados obtenidos de los espesores del filtro 16 .....	75
3.2.1.3	Resultados obtenidos de los espesores del filtro 19 .....	76
3.2.1.4	Resultados obtenidos de los espesores del filtro 23 .....	77
3.2.1.5	Resultados obtenidos de los espesores del filtro 26 .....	78
3.2.2	Porcentaje de bolas de lodos.....	80
3.2.3	Granulometría .....	82
3.2.4	Resultados del análisis granulométrico de arena y antracita .....	84
3.2.5	Corrección de los medios filtrantes en la Planta .....	93
3.2.5.1	Granulometría Corregida Filtro 9 .....	93
3.2.5.1.1	Corrección de la Arena .....	93

3.2.5.1.2	Corrección de la Antracita .....	94
3.3	Diseño, construcción y operación del filtro piloto.....	95
3.3.1	Diseño y construcción del filtro piloto.....	95
3.3.2	Operación del filtro piloto .....	98
3.3.2.1	Medición de la expansión de los medios filtrantes .....	98
3.3.2.2	Medición de la turbiedad en el agua de retrolavado .....	100
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>108</b>
4.1	Conclusiones.....	108
4.2	Recomendaciones para mejorar la eficiencia de los filtros .....	110
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Enfermedades relacionadas con el agua.....	16
2. Objetivo del tratamiento y pruebas de tratabilidad .....	26
3. Cantidad de arena requerida de cada tamaño. ....	62
4. Cantidad de antracita requerida de cada tamaño.....	65
5. Retrolavado con agua .....	67
6. Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de lodos.....	81
7. Valores promedio de Coeficiente de Uniformidad y Tamaño Efectivo .....	83
8. Características del medio filtrante.....	83
9. Granulometría de la arena filtro 9 .....	84
10. Granulometría de la arena filtro 10 .....	86
11. Granulometría de la arena filtro 19 .....	87
12. Granulometría de la arena filtro 26 .....	88
13. Granulometría de la antracita filtro 9.....	89
14. Granulometría de la antracita filtro 10.....	90
15. Granulometría de la antracita filtro 19.....	91
16. Granulometría de la antracita filtro 26.....	92
17. Corrección de la arena en el filtro 9 .....	94
18. Corrección de la antracita en el filtro 9 .....	95
19. Características de los medios filtrantes. ....	96
20. Rangos de flujo de aire para retrolavado de filtro.....	97
21. Flujos de agua requeridos en el retrolavado del filtro piloto .....	97
22. Gasto y porcentaje de expansión del medio filtrante .....	99

23.	Datos de la turbiedad en el filtro 9 .....	102
24.	Datos de la turbiedad en el filtro 10 .....	103
25.	Datos de la turbiedad en el filtro 19 .....	104
26.	Datos de la turbiedad en el filtro 26 .....	105
27.	Tiempo óptimo de lavado.....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Corte de un filtro .....	31
2. Diagrama de operación de un filtro a gravedad, de tasa variable.....	33
3. Filtro a gravedad de medio dual .....	34
4. Sistema de bajo dren para lavado del medio granular con aire y agua .....	36
5. Vista aérea de la planta potabilizadora “San Roque”.....	51
6. Puntos de muestreo del material filtrante.....	56
7. Estratos del lecho filtrante .....	57
8. Gráfica de la arena corregida.....	61
9. Grafica de la antracita corregida .....	64
10. Esquema del filtro piloto .....	66
11. Fotografía del filtro piloto .....	68
12. Tanque de agua cruda. ....	71
13. Dosificación del sulfato de aluminio en el Medidor Parshall. ....	72
14. Vistas de un filtro durante el retrolavado. ....	73
15. Desnivel en los filtros y diferencias en la superficie de los lechos filtrantes. ....	73
16. Presencia de algas, bivalvos y arena.....	74
17. Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 9.....	75
18. Espesores de los lechos filtrantes en el filtro 16. ....	76
19. Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 19.....	77
20. Espesores de los lechos filtrantes en el filtro 23. ....	78
21. Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 26.....	79

22.	Esesor de diseño para los lechos filtrantes.....	79
23.	Colecta manual de las bolas de lodos y corte transversal de una bola .....	81
24.	Determinación de las bolas de lodos en el laboratorio .....	82
25.	Determinación de granulometría .....	82
26.	Gráfica de la arena del filtro 9 .....	85
27.	Gráfica de la arena del filtro 10 .....	86
28.	Gráfica de la arena del filtro 19 .....	87
29.	Gráfica de la arena del filtro 26 .....	88
30.	Gráfica de la antracita del filtro 9.....	89
31.	Gráfica de la antracita del filtro 10.....	90
32.	Gráfica de la antracita del filtro 19.....	91
33.	Gráfica de la antracita del filtro 26.....	92
34.	Presencia de bolas de lodos en el filtro piloto .....	100
35.	Determinación de la turbiedad en el laboratorio.....	101
36.	Tiempo óptimo de lavado del filtro 9. ....	106
37.	Tiempo óptimo de lavado del filtro 10 .....	106
38.	Tiempo óptimo de lavado del filtro 19 .....	107
39.	Tiempo óptimo de lavado del filtro 26 .....	107

## NOMENCLATURA

°C	Grados centígrados.
g	gramos.
g/mol	gramos por mol.
h	horas.
HP	Caballos de fuerza (Horsepower).
kg	kilogramos.
kg/m <sup>3</sup>	kilogramos por metro cúbico.
kg/cm <sup>2</sup>	kilogramos por centímetro cuadrado.
km <sup>2</sup>	kilómetros cuadrados.
l/min	litros por minuto.
l/s	litros por segundo.
m	metros.
m/s	metros por segundo.
m <sup>2</sup>	metros cuadrados.
m <sup>3</sup> /h	metros cúbicos por hora.
m <sup>3</sup> /s	metros cúbicos por segundo.
m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d	metro cúbico, por metro cuadrado, por día.
mL	mililitros.
mm	milímetros.
min	minutos.
nm	nanómetro.

NMP	Número más probable.
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez.
pH	Potencial de hidrógeno.
pie <sup>3</sup> /min	pie cúbico por minuto.
RPM	Revoluciones por minuto.
UTN	Unidades nefelométricas de turbidez.

## ACRÓNIMOS

AMM	Área Metropolitana de Monterrey
AWWA	American Water Works Association
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CRETI	Corrosivas, Reactivas, Explosivas, Tóxicas e Inflamables
CNA	Comisión Nacional del Agua
EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IMS	Integral Media Support
NOM	Norma Oficial Mexicana
NMX	Normas Mexicanas
OPS	Organización Panamericana de la Salud
OMS	Organización Mundial de la Salud
REDALYC	Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe
SADM	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey
UNEP	United Nations Environment Programme

## RESUMEN

René Alberto Hinojosa Alanís

Fecha de graduación: Mayo, 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

**Título del estudio:** DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA POTABILIZADORA

**Número de páginas:** 119

**Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**

**Área de estudio:** Ingeniería Ambiental

**Propósito y Método del Estudio:** En esta investigación se estudiaron las oportunidades de mejora de la Planta Potabilizadora San Roque, que produce  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ; cantidad inferior a su capacidad de diseño de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se investigó el proceso de potabilización y se detectó cierto crecimiento de maleza y sedimentos de arcilla en el tanque de agua cruda, además de deficiencias en la dosificación del coagulante y en el proceso de filtración. También se detectó en este proceso la obstrucción de los filtros, alguna pérdida de material filtrante y una disminución de los espesores de los lechos filtrantes, encontrando, además, deficiencias en la operación de este proceso. Se analizó la granulometría y la expansión de los medios filtrantes, el tiempo óptimo de lavado y el porcentaje de bolas de lodos. Con el objetivo de visualizar el proceso de retrolavado, se desarrolló un modelo hidráulico a escala, con los datos de diseño originales de la Planta; con la intención de simular las condiciones físicas y operativas de los lechos filtrantes. Se determinó el tiempo óptimo de lavado y el porcentaje de expansión de los lechos. El filtro se construyó con tubería de acrílico de 5,5 pulgadas de diámetro interno. El modelo se complementó con dispositivos para medición de flujo de aire y de agua, así como de bombas y compresores.

**Contribuciones y conclusiones:** Los conocimientos relacionados con el diseño y la construcción del filtro piloto podrán utilizarse para fines académicos, para que los estudiantes puedan observar el interior de un filtro y su funcionamiento. Este trabajo permitió detectar diversas áreas de oportunidad de mejora en el proceso general de potabilización, que se pudieron comprobar mediante el diseño, la construcción y la operación del filtro piloto construido a escala y descrito en este documento.

---

DR. BENJAMÍN LIMÓN RODRÍGUEZ  
Director de tesis

---

DRA. MARTHA HERREJÓN FIGUEROA  
Co-Directora de tesis

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

#### 1.1 Introducción

El agua es un recurso natural que no puede obtenerse fuera de la naturaleza. Es estratégico, es clave para la vida y para el desarrollo social, es lo más valioso e imprescindible para la vida en el Planeta Tierra. El agua debería ser un derecho humano y, sin embargo, existen millones de personas en el mundo que no tienen acceso al agua potable.

Como recurso vital, el agua es uno de los elementos fundamentales para todos los seres humanos (Campos, 2006). El agua es indispensable para la vida sobre la tierra, no tiene sustituto y no se conoce forma de vida que prescindiera de ella: bosques, ciudades, pastizales, ballenas, aviones y cohetes; todos, de una manera u otra, necesitan el agua. El agua dio origen a la vida y la mantiene; es un factor que regula el clima del planeta, esculpe y permite la existencia de los ecosistemas y de la humanidad (Martínez y colaboradores, 2009).

La aparente abundancia del agua en el mundo ha dado la impresión de que se trata de un bien que no se agota. El agua potable domiciliar, es una de las más grandes conquistas en nuestra sociedad; es difícil entender de forma justa lo que significa disponer a cualquier hora del día y de la noche de agua potable, libre de

patógenos y químicamente inocua.

El crecimiento de la población, la migración, la urbanización, el cambio de uso del suelo y la variabilidad climática, entre otras cuestiones, afectan sin duda la manera en que deben manejarse los recursos hídricos (Istanbul Water Guide, 2009).

Si bien, existe conciencia de que el tema del manejo del agua es de crucial importancia para el desarrollo sustentable de las comunidades en el nivel local, su conexión con otros temas críticos de nivel global, como la economía verde , la reducción de la pobreza (UNEP, 2012), el incremento de los precios del petróleo y de los alimentos y los desastres naturales relacionados al agua, entre otros, no está bien entendida entre la población en general y en algunos casos tampoco en las esferas políticas (Istanbul Water Guide, 2009).

En el año 2008, los programas de abastecimiento y protección de las fuentes de agua potable se identificaron como la máxima prioridad en América del Norte (Runge y Mann, 2008) y en México, el agua se ha considerado como un asunto de seguridad nacional.

El problema de abastecimiento de agua para el consumo de la población presenta dos vertientes: una, cuando las pequeñas comunidades se encuentran muy dispersas y ubicadas en zonas de montaña alejadas de fuentes permanentes de agua, ya sean éstas superficiales o subterráneas. Otra situación se presenta en las áreas urbanas, donde se concentra la población y la demanda de agua rebasa la capacidad de las fuentes de agua locales, por lo que se tiene que recurrir a la importación de este vital líquido de otras cuencas.

México presenta un desequilibrio entre la disponibilidad hídrica y la demanda. El 77 % de la población nacional se concentra en las regiones donde se cuenta sólo con el 31 % de la disponibilidad del recurso (CNA, 2011).

El Área Metropolitana de Monterrey no escapa a esta situación; pues en ella se concentra casi el 85 % de la población del Estado de Nuevo León, los acuíferos locales están sobre-explotados, existe una zona de veda para la extracción de agua subterránea y las fuentes superficiales consisten en tres presas de almacenamiento, construidas para el suministro de agua potable.

Para el abasto de agua del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), se ha recurrido a fuentes superficiales cada día más alejadas de la misma, teniéndose que recurrir al bombeo para superar el desnivel entre la fuente de abasto y la ciudad.

Desgraciadamente, las fuentes de abasto de agua superficial dependen de las precipitaciones pluviales, que en el norte del país cada vez son más erráticas y seguramente disminuirán por efecto del cambio climático.

El AMM se abastece de agua potable procedente de fuentes de agua superficial consistentes en tres presas, de donde se envía el agua a las plantas potabilizadoras denominadas: “San Roque” y la de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca), además de diversos manantiales y pozos profundos localizados en el AMM, Mina y la Huasteca. Como criterio de calidad, el agua suministrada debe cumplir los parámetros y estándares indicados en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

El presente trabajo se originó a solicitud de la empresa “Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey” quienes manifestaron su preocupación por la baja eficiencia en el proceso de potabilización de la Planta Potabilizadora San Roque, y presentaron al Departamento de Ingeniería Ambiental de la UANL, una solicitud de servicios de ingeniería para la detección de áreas de oportunidad de mejora en el proceso de potabilización.

Entre las actividades recomendadas se incluyó considerar el diseño de un filtro piloto a escala, de acuerdo con los parámetros con los que fue diseñada la Planta Potabilizadora, trabajo encomendado y desarrollado por el autor del presente documento.

## 1.2 Antecedentes

Se denomina agua potable al agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean éstos químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud, según aparece en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Para garantizar la potabilidad del agua suministrada para consumo humano, es indispensable disponer de: leyes, reglamentos, Normas Oficiales Mexicanas, Normas Mexicanas y Normas Técnicas, además de que los organismos públicos o privados responsables de los abastecimientos observen el estricto cumplimiento de las mismas.

El conocimiento y aplicación de las leyes y normas relativas al suministro de

agua potable es fundamental, en virtud de que en ellas se definen las funciones y responsabilidades de quienes prestan este servicio y forman la base para que la autoridad competente, determine si se está prestando adecuadamente o no el servicio debido.

### 1.2.1 Legislación en materia de agua para abastecimiento público

El Marco Normativo se encuentra conformado por:

- a) La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2011), en su Artículo 115, Título Quinto, en el que se refiere a las atribuciones y responsabilidades de los Estados de la Federación y del Distrito Federal. En el párrafo III, inciso a) se establece que los municipios tendrán a su cargo el otorgamiento de los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.
  
- b) El Reglamento de la Ley General de Salud, en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios (1984) se indican los artículos siguientes:
  - Artículo 101. “El responsable de un sistema de abastecimiento de agua deberá notificar de inmediato a la autoridad sanitaria, de cualquier incidente o accidente en los componentes del sistema, que da lugar a modificaciones en la calidad del agua, haciéndola impropia para consumo humano”.
  
  - Artículo 210. “Para considerar que el agua es potable, la investigación

bacteriológica será realizada de acuerdo a las normas respectivas y deberá dar como resultado que: I) el número de organismos coliformes totales, deberá ser como máximo, de dos organismos en 100 mL, según las técnicas del número más probable (NMP) o la del filtro membrana. II) no contendrá organismos fecales”.

- Artículo 211. “Los requisitos organolépticos y físicos se establecerán atendiendo a las siguientes características: aspecto, pH, sabor, olor, color, turbiedad del agua y en su caso, los demás que señale la norma”.
- Artículo 214. “En materia de agua para consumo humano, se determinará en la norma: I) el tratamiento a que deberá sujetarse en los sistemas públicos de abastecimiento, para asegurar su potabilidad. II) el tipo, contenido y periodicidad de los análisis y exámenes necesarios para vigilar su potabilidad. III) las técnicas para la toma, conservación, transporte y manejo de muestras, así como los métodos para realizar las determinaciones necesarias para verificar su potabilidad. IV) los métodos de prueba de equipos y aparatos purificadores de agua de tipo doméstico. V) Los demás aspectos, condiciones, requisitos y características que la Secretaría juzgue necesarios para que el agua pueda ser destinada para consumo humano”.
- Artículo 217. “Los Gobiernos de las Entidades Federativas otorgarán, de conformidad con los requisitos que fije la Secretaría, la autorización del responsable de control de calidad sanitaria del agua”.

- Artículo 218. “Los propietarios u organismos y entidades responsables de sistemas de abastecimiento, deberán cumplir con las disposiciones que emita la Secretaría sobre potabilidad, agua y control de la misma y con los requisitos sanitarios que establezca para los propios sistemas de abastecimiento”.
- Artículo 219. “El responsable de control de calidad sanitaria del agua, deberá cumplir con lo señalado en el artículo 101 de este Reglamento”.
- Artículo 220. “La autoridad sanitaria, en el ámbito de su competencia, vigilará la potabilidad y otorgará “Certificado de Condición Sanitaria de Agua” a los sistemas de abastecimiento en operación, sean públicos o privados, que reúnan los requisitos sanitarios y mantengan la condición del agua abastecida dentro de los límites permisibles. Dicho certificado tendrá vigencia de un año, pudiendo prorrogarse por periodos iguales, pero se cancelará si el agua resultara no apta para el consumo humano y hasta en tanto se alcancen de nuevo los límites permisibles autorizados”.
- Artículo 222. “Cuando el agua de algún sistema de abastecimiento no reúna las características de potabilidad, la autoridad sanitaria, a fin de proteger la salud de los usuarios, procederá a ordenar que el consumo se suspenda o se condicione, hasta que se le dé al agua el tratamiento adecuado, o se localice otra fuente apropiada”.
- Artículo 223. “Queda prohibido contaminar o modificar la composición bacteriológica y físico-química del agua de un sistema de abastecimiento,

haciéndola impropia para consumo humano”.

c) Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son responsabilidad del Sector Salud, quien las vigila en coordinación con la Comisión Nacional del Agua. Estas normas se desarrollaron con la idea de que el agua es un factor fundamental para reducir el riesgo de transmitir diversas enfermedades, particularmente las gastrointestinales y que para asegurar su calidad se requiere controlar el sistema de abastecimiento, así como a sus operadores. Se entiende por sistema de abastecimiento al conjunto intercomunicado de: fuente, construcciones, instalaciones y equipos, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción, redes de distribución y tomas domiciliarias.

- Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Fecha de Modificación en el Diario Oficial de la Federación del 22 noviembre del año 2000.
- NOM-004-CONAGUA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.
- NOM-179-SSA1-1998. Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano distribuida por sistemas de abastecimiento público.

- NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento, públicos y privados, durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.

La Comisión Nacional del Agua, a través de su Comité Consultivo Nacional de Normalización del sector agua, expide Normas Oficiales Mexicanas en la materia, mediante las cuales ejerce las atribuciones que le confiere la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, como son el aprovechar adecuadamente y proteger el recurso hídrico nacional. Dichas normas establecen las disposiciones, la especificación y los métodos de prueba que permiten garantizar que los productos y servicios prestados a los organismos operadores de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, cumplan el objetivo de aprovechar, preservar en cantidad y calidad el agua, además del manejo adecuado y la forma eficiente. Las Normas Oficiales Mexicanas, cuya emisión corresponde a la Comisión Nacional del Agua, se presentan a continuación:

- NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- NOM-013-CONAGUA-2000. Redes de distribución de agua potable, especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba.
- NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

- NOM-015-CONAGUA-2007. Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

### 1.2.2 El agua en el Noreste de México

Monterrey, a través de su historia, ha luchado contra las adversidades que implican encontrarse ubicada en una zona semidesértica, con períodos cíclicos de sequías prolongadas, por contraste, de abundancia de lluvias. El suministro de agua potable es un factor vital que contribuye a mejorar la calidad de vida y el desarrollo económico y social de una comunidad (SADM, 2011).

Es indiscutible que regiones como el Noreste de México, incluyendo los Estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con marcado clima semiárido en gran parte de su extensión, tienen la necesidad de regular los escurrimientos de sus ríos, no sólo con la intención del aprovechamientos del agua para uso y consumo humano, agrícola o generación de energía eléctrica, sino también para proteger a las poblaciones ribereñas de avenidas extraordinarias. La estructura climatológica, geomorfológica y geológica hacen del Noreste de México una región propicia para la construcción de presas y embalses en sus ríos, teniendo en cuenta la gran extensión que la agricultura y la ganadería ocupan en el Noreste de México y la importancia que el desarrollo industrial tiene para el progreso de la economía regional y nacional (de León y colaboradores, 2006).

Las presas de almacenamiento son, en su conjunto, las obras de ingeniería más grandes que el hombre ha realizado. La población mundial ha tenido un desarrollo exponencial en los últimos años y las demandas de uso del agua se han incrementado

continuamente. El diseño y la construcción de presas han sido acordes con la evolución de la tecnología y la disponibilidad de equipo de construcción, en las diferentes épocas en que esta actividad se ha desarrollado (Hernández, 2000). La calidad del agua cruda varía con la fuente y si es superficial, variará estacionalmente (Mora y Cedeño, 2006).

### **1.2.3 Problemas con el agua**

Los problemas del agua provocados por el hombre en su interacción con el medio natural, están determinados por la forma de aprovechar, usar y administrar, tanto el agua como otros recursos. Esto se hace crítico en los centros de mayor población (Juan-Martínez y Solorio, 2003).

La escases del agua y la mala distribución espacial y temporal de la misma imponen limitaciones a su uso; la contaminación se ha manifestado como otro factor restrictivo a la disponibilidad y empleo de agua. Las ciudades, las industrias, las actividades agropecuarias, la erosión del suelo y otras acciones humanas aportan grandes cantidades de contaminantes a los cuerpos de agua (Arreguín y colaboradores, 2004).

Los problemas de calidad del agua son muy variables entre las regiones y los países, son reflejo de condiciones económicas y sociales y se encuentran fuertemente vinculados con el agua dulce de los ríos, el agua subterránea, y la de los lagos (Toledo, 2002). Las fuentes superficiales de agua son, por lo general, las más utilizadas en las grandes ciudades. Los ríos con riveras habitadas suelen estar contaminados por la acción del hombre y los lagos, represas y embalses suelen tener una mejor calidad de

agua por sedimentación (Montoya, 2009). El grado de tratamiento y la combinación de los procesos de potabilización dependen tanto de la fuente de agua como de su calidad, variando según el contexto geográfico, hidrogeográfico y económico (de León, 2008).

El recuento de mayores necesidades de la población mundial se inicia con la disponibilidad de agua potable, para tener una calidad de vida óptima, fundamental para un desarrollo justo, sostenible y sano para cualquier país (Arango, 2004).

#### **1.2.4 La contaminación del agua**

Las fuentes de agua superficial son eje de desarrollo de los seres humanos que permiten el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales; pero muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas (Torres y colaboradores, 2009).

La contaminación del agua es el grado de impurificación, que puede originar efectos adversos a la salud de un número representativo de personas durante periodos previsibles de tiempo y se debe al crecimiento demográfico, al desarrollo industrial y a la urbanización. Estos tres factores evolucionan rápidamente y se dan uno en función del otro. En décadas recientes, miles de lagos, ríos y mares se han contaminado alarmantemente debido a las actividades humanas (Martínez y colaboradores, 2009).

La contaminación del agua puede ser de origen natural o antropogénico. La contaminación natural se genera por el ambiente, y la antropogénica por las actividades humanas. La importancia que ha cobrado la calidad del agua ha permitido

evidenciar que entre los factores o agentes que causan su contaminación se tienen: agentes patógenos, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, sedimento o material suspendido y el calor (Martínez y colaboradores, 2009).

Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los principales contaminantes del agua son: los agentes patógenos, las bacterias, los virus, los protozoarios y los parásitos que entran al agua, provenientes de desechos orgánicos (CONAGUA, 2004)

La contaminación del agua es un proceso que ha ido en aumento constante. La mayoría de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano presentan grados variables de contaminación con agua residual, lo que significa un riesgo para la población, principalmente por exposición a microorganismos como bacterias y patógenos.

Existen muy pocos datos sobre la contaminación viral del agua potable en países en vías de desarrollo; pero la información bacteriológica indica que es probable que exista el agua contaminada por bacterias. En el caso de México, hay pruebas de la presencia de virus patógenos en el agua para consumo humano en la Ciudad de Guadalajara (Enríquez, 1990).

### **1.2.5 Enfermedades relacionadas con el agua**

Existen dos tipos de enfermedades relacionadas con el agua, en función del tipo de elementos contaminantes presentes: las producidas por agentes biológico-infecciosos (microorganismos), que se manifiestan en forma rápida y las producidas

por agentes químicos que, en general, tardan en manifestarse.

a) Enfermedades de origen biológico-infeccioso.

Los microorganismos causantes de las denominadas “enfermedades hídricas” provienen principalmente de las heces humanas o animales. La infección ocurre por el contacto entre el hombre y el agente infeccioso, en alguna de las fases del ciclo del uso del agua; es decir, que puede presentarse durante las actividades cotidianas (bañarse, lavar, cocinar, etc.), las actividades agrícolas, durante la potabilización o bien, al consumirse. La presencia de estos microorganismos en el agua tiene diversas causas, entre las que se encuentran: la falta de protección de las fuentes de alcantarillado, la contaminación biológica por infiltración de aguas negras al sistema de distribución, los escurrimientos de agua contaminada hacia los mantos acuíferos, las deficiencias en el acondicionamiento del agua, o por la falta de higiene de los usuarios.

En los países como el nuestro, los agentes biológico-infecciosos son los que causan mayor preocupación, dado el nivel de salud de la población, la falta de tratamiento de las aguas residuales municipales y las diversas rutas de infección que intervienen a través del agua (alimentos, bebidas, etc.); por esto es esencial en la potabilización del agua la desinfección, independientemente de la fuente de suministro. En la Tabla No. 1 se observan las enfermedades relacionadas con el inadecuado uso del agua.

b) Enfermedades producidas por agentes químicos.

Éstas son provocadas por la ingesta de elementos y compuestos químicos que

entran al agua por vías naturales o antropogénicas y, dependiendo de la composición química, la dosis y el tiempo de exposición, provocan respuestas negativas de diversa magnitud, por el organismo. Cuando la respuesta ocurre de forma inmediata (24 h a 48 h, después de la exposición), se denomina efecto agudo; pero si sucede entre los 10 años y los 20 años; se debe a un efecto de exposición crónica.

De los tipos de efectos que se pueden presentar, resaltan: los carcinogénicos, los mutagénicos y los teratogénicos.

En México, este tipo de contaminación por tóxicos ha ido en aumento; los de mayor preocupación son los atribuidos a metales, a compuestos orgánicos volátiles, a pesticidas y a nitratos. Su presencia se debe a la lixiviación, a las fugas en el almacenamiento subterráneo de productos industriales, a la nitrificación del agua residual, al arrastre de contaminantes por el agua de lluvia, a escurrimientos agrícolas y a operaciones mineras.

El agua es esencial para la vida humana y también para la economía. Las enfermedades hidrotransmisibles repercuten directamente en la economía de las familias, tanto por la atención de la enfermedad, como por la ausencia laboral (Chacón y Leal, 2003).

En el mundo, alrededor de dos millones de personas mueren cada año debido a la diarrea, siendo la mayoría niños menores de 5 años (Morató y colaboradores, 2006).

El mayor impacto sobre la salud pública se da a través de los sistemas de

abastecimiento de agua; la alteración de las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la fuente de abastecimiento, incide directamente sobre el nivel de riesgo sanitario presente en el agua; este riesgo se define como el riesgo de transportar agentes contaminantes que pudiesen causar enfermedades de origen hídrico, a los humanos y a los animales o alterar el normal desempeño de las labores dentro del hogar o la industria (Torres y colaboradores, 2009).

**Tabla No. 1.** Enfermedades relacionadas con el agua

Grupo de enfermedades	Comentario	Enfermedades que se producen
Las transmitidas por el agua.	El agua actúa como vehículo pasivo del agente infeccioso, al ser ingerido en el agua contaminada. Se producen debido a una pobre calidad de la potabilización del agua para uso y consumo humano	Cólera, tifoidea, disentería bacilaria, hepatitis infecciosa, leptospirosis, giardiasis, gastroenteritis.
Por carencia de agua.	Se relacionan con la falta de higiene personal y el uso de agua de baja calidad en las actividades diarias como lavar y bañarse. También dependen de la insuficiencia de recursos para la disposición adecuada de los residuos humanos.	Infecciones en los ojos y la piel, conjuntivitis, salmonelosis, tracoma, fiebre paratifoidea, ascariasis.
Causadas por agentes infecciosos esparcidos por el contacto y/o ingestión de agua.	Estas enfermedades se producen cuando parte del ciclo de vida de un agente infeccioso tiene lugar en un medio acuático.	Fiebre amarilla, malaria, arbovirus, dengue.
Causadas por agentes infecciosos, ingeridos en diversos alimentos (pescado), que están en contacto con el agua.	Este grupo de enfermedades se producen al ingerir alimentos contaminados por la bioacumulación de ciertos contaminantes, o por microorganismos que habitan en el agua.	Clonorsiacis.

Fuente: AWWA (1990).

### 1.2.6 La calidad del agua

Como criterio de calidad, el agua suministrada por las plantas potabilizadoras de agua debe cumplir los parámetros y estándares indicados en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Trejo y colaboradores, 2004).

Para suministrar los recursos hídricos a una población se requiere contribuir a la preservación de los recursos naturales, tales como las cuencas, los ríos y arroyos, las presas y lagunas y, demás, otros acuíferos superficiales o subterráneos que sean una fuente potencial de abastecimiento de agua para una comunidad; por lo que se requiere especial atención en el crecimiento de las comunidades y la disposición de los residuos sólidos líquidos o de cualquier otro tipo que representan un riesgo para los acuíferos (Pavón y colaboradores, 1996).

La salud humana depende no sólo de la cantidad de agua suministrada, sino principalmente de su calidad (García y colaboradores, 2001). El agua es uno de los principales recursos para la vida; sin embargo, la calidad de la misma cada día se ve más afectada por las actividades humanas, las ciudades siguen expandiéndose y la población continúa creciendo y demandando mayores volúmenes del recurso. Ante esta situación, el abastecimiento de agua potable superficial representa una de las prioridades más importantes, a fin de atender, por una parte, las nuevas demandas y por otra, reducir gradualmente la severa sobreexplotación a que se han sometido los acuíferos.

Desafortunadamente, en la actualidad algunos de los lagos y presas se caracterizan por presentar altas concentraciones de materia orgánica y de nutrientes, lo que trae como consecuencia la eutroficación de los mismos (Flores y Domínguez, 2000).

A continuación, se mencionan algunos de los factores que contribuyen a deteriorar la calidad del agua, como son los siguientes: a) Los sistemas que funcionan de manera intermitente, b) Las plantas de tratamiento poco eficientes, c) La ausencia de desinfección o existencia de problemas en este proceso, d) Las redes de distribución precarias, e) Las conexiones domiciliarias clandestinas o mal hechas y f) La falta de higiene en el manejo del agua, por parte de los usuarios (Vidal, 2010).

El deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua incide directamente en el nivel de riesgo sanitario presente y en el tipo de tratamiento requerido para su reducción. La evaluación de la calidad del agua permite tomar acciones de control y mitigación del mismo, garantizando el suministro de agua segura (Torres y colaboradores, 2009).

La Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2007), define como agua segura: “el agua apta para el consumo humano, de buena calidad y que no genera enfermedades; es un agua que ha sido sometida a algún proceso de potabilización o purificación casera”.

Sin embargo, determinar que un agua es segura sólo en función de su calidad no es suficiente. La definición debe incluir otros factores como la cantidad, la cobertura, la continuidad, el costo y la cultura hídrica; es la conjugación de todos estos aspectos

lo que define el acceso al agua segura.

**Agua segura = Cobertura + Cantidad + Calidad + Continuidad + Costo + Cultura hídrica**

El uso de tecnologías sostenibles es indispensable para avanzar hacia una mayor cobertura mundial, desde la captación de agua, el tratamiento y su reúso (Morató y Cedeño, 2006).

Se denomina agua potable al agua "bebible", en el sentido del que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades. El término se aplica al agua que ha sido tratada para el consumo humano, según estándares de calidad determinados por las autoridades locales e internacionales. Al proceso de conversión de agua común en agua potable se le denomina "potabilización" (Romero, 2008).

### **1.2.7 Generalidades sobre las fuentes de abastecimiento**

Las fuentes de abastecimiento de agua convencionales son aguas superficiales y aguas subterráneas y las no convencionales son el agua de mar y el reúso de las aguas residuales. Las aguas subterráneas generalmente son de mejor calidad y de fácil tratamiento que las aguas superficiales, por lo que han sido preferidas como fuentes de abastecimiento para dotación de agua potable a las comunidades; cuando su cantidad y calidad son aceptables, de acuerdo con los distintos tipos de demanda de la población.

A continuación, en forma breve, se analizan las características del agua

contenida en los cuerpos de agua subterránea y de agua superficial y se los relaciona con las necesidades de tratamiento que implican.

a) El agua subterránea

El agua subterránea se forma a partir del agua que precipita y percola al suelo, por acción de la gravedad, hasta alcanzar un estrato impermeable y constituir el acuífero. Se caracterizan por tener un patrón de flujo relativamente estable, en términos de dirección y velocidad ( $10^{-10}$  m/s a  $10^{-3}$  m/s), en función de la porosidad y permeabilidad del material geológico; como consecuencia, el mezclado es pobre.

Por lo general, este tipo de agua es de buena calidad, libre de sólidos suspendidos, con excepción de las áreas donde la infiltración de aguas contaminadas ocurre muy rápidamente. También es común que se encuentre libre de patógenos. Por ello, no requieren grandes sistemas de potabilización y la simple desinfección suele ser suficiente.

También la calidad de los acuíferos depende de la capacidad del agua para disolver compuestos del suelo, mientras fluye al infiltrarse o durante su almacenamiento, por lo que el agua subterránea contiene un mayor número de iones disueltos, entre los que se encuentran los cationes calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro y manganeso y aniones como carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros.

Los acuíferos confinados son los más viejos (la edad se relaciona con la salinidad, el exceso de hierro y manganeso, los problemas de gases y la

ausencia de oxígeno disuelto) y se caracterizan por un menor contenido de nitratos y contaminantes orgánicos, como los pesticidas (Gray, 1994).

b) El agua superficial

El agua superficial se define como cualquier cuerpo de agua abierto a la atmósfera, susceptible de fluir o permanecer en reposo; formando corrientes, ríos, lagunas, lagos y embalses. Estas fuentes se alimentan de la precipitación directa, o por la descarga de agua de algún manto freático. Los lagos y embalses, pueden ser considerados como ríos de flujo lento, con velocidades entre 0,001 y 0,01 m/s. Esta retención del agua hace que sea más clara, debido a que la actividad microbiana actúa para remover materia orgánica y las fluctuaciones físicas y el proceso de sedimentación separan el material particulado.

El almacenamiento del agua implica mejoras en la calidad, lo que llega a reducir el tratamiento antes del suministro. Se tiene como desventaja que las aguas en reposo favorecen las poblaciones de algas y la profundidad puede generar un sistema estratificado térmicamente, en particular durante los meses de verano, con ausencia de oxígeno.

Las aguas superficiales son menos duras, tienen mayor concentración de oxígeno disuelto; en general, no contienen ácido sulfhídrico, su temperatura es variable en función de la estación del año y la profundidad de la captación, pero son fácilmente contaminables, tienen alta actividad biológica, color, turbiedad, sólidos en suspensión, materia orgánica y materia flotante, por lo que el

tratamiento principal que se les aplica es la remoción de partículas (Jiménez, 2001).

Para mantener la integridad de los cuerpos de agua, se debe calcular un flujo mínimo en época de escasez y mantenerlo para todo el año. El límite a dicha extracción se encuentra en función de: a) Protección de la calidad biológica del río. b) La dilución de las descargas municipales e industriales. c) Asegurar el uso normal del cuerpo. d) Permitir un adecuado flujo.

La potabilización del agua es el problema de ingeniería que requiere urgentemente atención y ser resuelto: Para hacer el agua apta para el consumo humano se requiere la eliminación de sabor, olor, color y turbiedad; además, debe estar libre de microorganismos que provoquen enfermedades en los seres vivos.

### **1.2.8 Aspectos más importantes a considerar en el diseño de una planta potabilizadora**

La potabilización del agua es el conjunto de procesos que hacen que el agua sea sanitariamente aceptable para el consumo humano. El agua para consumo humano se capta de un acuífero (río, presa, agua subterránea), se transporta mediante una línea de conducción a presión o por gravedad a una planta potabilizadora y luego se envía a los consumidores finales por medio de redes de distribución y tomas domiciliarias.

Los procesos para potabilizar el agua para el consumo humano dependerán de la calidad del agua de la fuente, y éstos serán diferentes si se trata de una presa, de un río o de agua subterránea. El tratamiento más complicado es aquel que trata de

potabilizar agua de un río donde la calidad es muy variable y se ve afectada por las condiciones ambientales de la cuenca que lo alimenta. En este caso generalmente se aplica: aereación, sedimentación primaria, coagulación, floculación, sedimentación secundaria, filtración y desinfección (Doménech, 2003).

Al contener el caudal de un río en una represa se consiguen los beneficios de la sedimentación; sin embargo, esto puede producir olor y sabor extraño, por la presencia de algas (Montoya, 2009). Durante el embalsamiento del agua, su calidad microbiana mejora considerablemente gracias a la sedimentación, el efecto letal de los rayos ultravioleta solares en las capas superficiales y la muerte de microorganismos debido a la inanición y predación (Barona, 2009).

Normalmente, el agua de mejor calidad se encuentra en una profundidad media, pues el agua de la parte superior es propensa a desarrollar algas, mientras que en el fondo puede tener un alto contenido de dióxido de carbono, hierro, manganeso y a veces sulfuro de hierro (de León, 2008).

El suministro de agua potable implica diversos aspectos entre los que se encuentra la adecuación de su calidad para consumo humano. Para ello se requiere encontrar la forma más conveniente de hacerlo, tanto desde el punto de vista técnico como del económico. Lo más común es efectuar el suministro de agua a partir de las denominadas fuentes convencionales, compuestas por las aguas subterráneas (acuíferos) y las superficiales (ríos, lagos y presas).

Para aguas superficiales se requieren plantas potabilizadoras más complejas, que incluyen procesos como coagulación-floculación, sedimentación, filtración y por

supuesto desinfección (CNA, 2007).

La turbiedad incrementa el color aparente del agua y se debe a la presencia de materia suspendida orgánica e inorgánica, como la arcilla, los sedimentos, el plancton y organismos microscópicos. Lo que se mide como turbiedad, es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas y por ello depende no sólo de su concentración sino también de su tamaño y forma.

Las partículas que producen turbiedad varían entre 1 nm a 1 mm, y provienen de la erosión de suelos y otros materiales. La importancia sanitaria de la turbiedad radica en sus componentes arcillosos y orgánicos que adsorben otros compuestos como plaguicidas, metales y microorganismos que ellos sí pueden ser dañinos. Particularmente la turbiedad fomenta un mayor desarrollo de los microorganismos, ya que sirve de superficie para que éstos se alimenten y reproduzcan.

Para remover la turbiedad se emplea el proceso de coagulación-floculación, seguida de sedimentación y filtración (CNA, 2007).

### **1.2.9 El proceso de potabilización**

El objetivo de un sistema de potabilización es producir, a partir de una fuente de suministro, agua con calidad acorde con la Modificación del la Norma NOM-127-SSA1-1994, en forma confiable y a un costo razonable. Para que esto suceda es conveniente combinar una serie de procesos y operaciones unitarias que remuevan los compuestos considerados como contaminantes y que se encuentren presentes en la fuente de

abastecimiento.

Un sistema de potabilización del agua depende de: a) La calidad original del agua, b) La suficiencia financiera del organismo operador, c) El nivel de capacitación de los operadores y d) La tratabilidad del agua.

En cuanto a calidad, el objetivo de la potabilización es producir agua:

- a) Segura, sin compuestos químicos y/o organismos patógenos que pongan en riesgo la salud de los consumidores.
- b) Aceptable, que no tenga un sabor o color desagradable.
- c) Clara, libre de materia suspendida y turbiedad.
- d) Razonablemente blanda; es decir, que los usuarios no requieran grandes cantidades de detergentes y jabones para la ducha, lavar la ropa y trastes.
- e) No corrosiva al sistema de distribución.
- f) Con bajo contenido orgánico, para evitar crecimiento biológico en el sistema de distribución y afectar la calidad del agua.

La Comisión Nacional del Agua (CNA, 2007), propone una serie de tratamientos a que debe ser sometida el agua para la remoción de parámetros indicados en la Tabla No. 2 y que no se consideran aptos para consumo humano.

**Tabla No. 2.** Objetivo del tratamiento y pruebas de tratabilidad.

Objetivo	Proceso/ Tecnología	Mecanismos de Remoción	Prueba de Tratabilidad
Remoción de coliformes fecales y totales	Cloración.	Oxidación	Determinación de la dosis de cloro y del tiempo de contacto.
	Ozonización	Oxidación	Determinación de la dosis de ozono.
	Luz ultravioleta	Recombinación del DNA.	Determinación de la dosis de luz en W/s.cm <sup>2</sup>
Remoción de color, olor y sabor	Filtración en carbón activado	Adsorción	Determinación de isotermas
	Ozonización	Oxidación	Determinación de dosis y tiempo de contacto
Remoción de sólidos suspendidos y de turbiedad	Filtración ascendente, descendente, en arena, multicapa, etc., microcribas	Filtración	Pruebas en filtro piloto para determinar la pérdida de carga máxima admitida, la distribución del perfil de pérdida de carga, la profundidad recomendable del lecho, la duración de la corrida y las condiciones de lavado.
	Coagulantes de lecho de lodos, coaguladores convencionales, flotación con aire disuelto	Coagulación-floculación	Pruebas de jarras para determinar dosis y tiempos óptimos tanto para el coagulante como para el floculante.
	Sedimentación convencional, sedimentación de alta tasa	Aceleración debida la gravedad	Es poco común realizar pruebas de tratabilidad para este proceso, en caso de hacerlo se usan los estudios en columna de sedimentación para determinar la carga másica aceptable, así como la carga hidráulica recomendable en combinación con la altura crítica de sedimentación
Remoción de dureza	Ablandamiento con cal, sosa y cal. Remoción selectiva de carbonato, tratamiento en partes	Precipitación	Determinación de dosis en pruebas de jarras.
	Intercambio iónico, desmineralización	Adsorción	Isotermas
	Filtración con zeolitas	Adsorción	Isotermas

**Tabla No. 2.** (Continúa)

Objetivo	Proceso/ Tecnología	Mecanismos de Remoción	Prueba de Tratabilidad
Remoción de hierro y manganeso	Aireación	Oxidación	Determinación de la tasa de aplicación de aire
	Filtración en zeolitas, intercambio iónico	Adsorción y oxidación	Determinación de las isothermas de Langmuir o de Freundlich para definir la cantidad de zeolitas por emplear
	Ablandamiento	Precipitación	Determinación de dosis para ablandar y remover Fe y Mn.
Ajuste del pH	Acidificación o basificación	Neutralización	Curvas de neutralización
Remoción de sólidos disueltos	Ósmosis inversa	Filtración en superficie selectiva	Determinar el índice de filtración en membranas, determinación de la membrana óptima en cuanto a la composición y durabilidad.
	Ultrafiltración	Filtración en superficies activas	Determinación del índice de filtrabilidad, rechazo y tipo de membrana
	Electrodialisis	Separación iónica	Comportamiento de los iones al pasar una corriente eléctrica y capacidad eléctrica de la solución
Remoción de compuestos orgánicos	Coagulación – floculación	Coagulación	Pruebas de jarras
	Ozonización	Oxidación	Dosis y tiempo de contacto
	Carbón activado	Adsorción	Isothermas de Freundlich o Langmuir
Remoción de metales	Precipitación	Precipitación	Prueba de jarras o precipitación
Remoción de trihalometanos	Carbón activado	Adsorción	Isothermas de Freundlich o Langmuir
Control de la corrosión	Ajuste de pH	Neutralización	Pruebas de neutralización
	Adición de CO <sub>2</sub>	Estabilización	Cantidad de CO <sub>2</sub> transmitido y tasa para estabilizar la solución
	Protección catódica	Estabilización eléctrica	Comportamiento en laboratorio del Fe y su deposición en electrodos
Remoción de gases	Aireación	Desorción	Pruebas de desorción en columnas para determinar la tasa de aireación

### 1.2.10 Tratamientos para la potabilización del agua

La potabilización del agua proveniente de una fuente, en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y en pruebas de tratabilidad, para obtener agua que reúna las características físicas, químicas y biológicas mencionadas en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Para lograrlo existen diferentes procesos de potabilización que dependerán de la calidad del agua cruda.

Para eliminar los sólidos suspendidos y la turbiedad en el agua superficial, se recurre al proceso de filtración; sin embargo, debido a la variabilidad en los valores de turbiedad, se recurre a la aplicación de diversos productos químicos para la eliminación de la turbiedad, proceso conocido como coagulación-floculación, con el objetivo de hacer más eficiente y rentable el proceso (CNA, 2007).

Entre los procesos utilizados para la potabilización del agua se encuentran:

- a) Coagulación y precipitación química.
- b) Filtración.
- c) Desinfección.

Y otros diversos procesos avanzados de tratamiento, como son:

- a) Intercambio iónico.
- b) Ósmosis inversa.
- c) Ultrafiltración.

#### 1.2.10.1 Coagulación y precipitación química

La coagulación y floculación son procesos en los que se agregan al afluente

sales metálicas o bien los óxidos metálicos, el uso de cal, o de algún polímero, con la finalidad de desestabilizar la materia en forma coloidal y provocar una aglomeración de pequeñas partículas, hasta alcanzar tamaños considerables para formar los flóculos o “flocs”, para que éstos sean removidos por la fuerza de la gravedad.

La formación de los “flocs”, se encuentra en relación directa con la concentración de aluminio, el mezclado, el tipo y concentración de aniones, el tiempo de contacto y el pH (Van-Benschoten y Edwald, 1990).

La coagulación es un proceso que implica muchas reacciones y etapas de transferencia de masa. El proceso se encuentra formado por tres pasos separados y fundamentales: a) La formación del coagulante, b) La desestabilización de las partículas y la interacción con el coagulante lo que sucede después de la dispersión de la mezcla rápida y c) Las colisiones entre las partículas que forman los flóculos durante la mezcla.

Durante la coagulación se eliminan compuestos organoclorados, utilizando un pretratamiento por adsorción en carbón activado, pudiendo utilizarse cal, sulfato de aluminio o policloruros de aluminio, con rendimientos comparables.

En la coagulación se emplean derivados de aluminio y de hierro, cal y diversos polímeros. Los derivados de aluminio y/o hierro, se hidrolizan rápidamente, formando precipitados insolubles. Pero el sulfato de aluminio incrementa la concentración de sulfatos en el agua y forma flóculos difíciles de sedimentar, mientras que el hierro aumenta la concentración de iones cloruro en el agua y causa problemas de pH ácido.

La cal forma un flóculo muy denso y fácilmente sedimentable, pero es difícil de manipular.

El sulfato de aluminio es el reactivo más utilizado; su forma comercial se conoce como alumbre o sulfato de aluminio. Es un sólido cristalino de color gris que contiene aproximadamente un 17 % en masa de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) soluble en agua. Se presenta en costales de gránulos o polvo y como solución concentrada. El aluminio en gránulos se dosifica con equipos gravimétricos a tanques que preparan una solución que se transporta al punto de aplicación.

La solución de sulfato de aluminio es un líquido translúcido; se recomienda no utilizar disoluciones con concentraciones mayores que el 8 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , en masa, a temperaturas de  $0^\circ\text{C}$ , para evitar la sedimentación. Esta solución se aplica mediante bombas dosificadoras.

Con frecuencia la coagulación no resulta en un proceso eficiente de separación, debido a que los coágulos formados tienen velocidades muy lentas de sedimentación o son muy frágiles y se rompen en los procesos. Para controlar estos problemas se emplean ayudas de coagulación denominados floculantes. Estos compuestos aceleran el proceso y disminuyen la dosis de coagulantes. Son materiales que se usan en concentraciones pequeñas y de mayor costo que el coagulante principal.

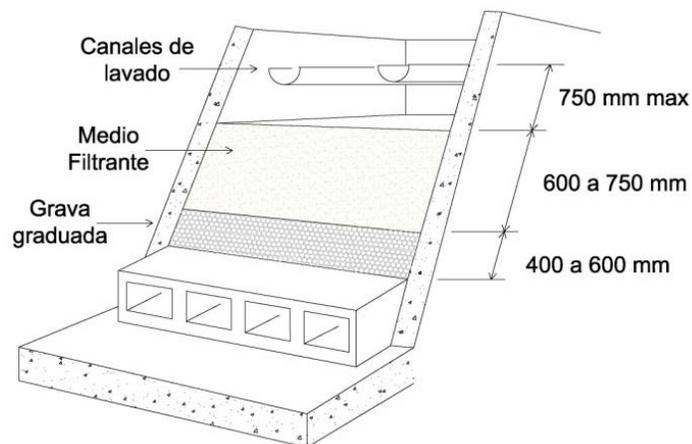
### **1.2.10.2 Filtración**

El proceso de filtración es uno de los más empleados para potabilizar aguas superficiales. Se emplea con o sin pretratamiento de coagulación y sedimentación

(filtración directa), para eliminar los sólidos presentes originalmente en el agua, o los sólidos precipitados.

Un filtro típico, como se observa en la Figura No. 1, es una estructura de concreto en forma de caja rectangular en la que se colocan los medios filtrantes sobre soporte de grava y un bajo dren o falso fondo para captar el agua filtrada. Los medios filtrantes pueden ser de lechos mixtos, arena sílica y antracita.

Para la filtración, el agua pasa por el filtro en sentido descendente, por la fuerza que ejerce la columna de agua sobre el lecho, así como la succión del bajo dren. Los filtros se lavan por medio del cambio de la dirección del flujo (en sentido ascendente), en un proceso que se denomina retrolavado. La canaleta colocada sobre el filtro, a una altura determinada, recoge el agua de lavado.



**Figura No. 1.** Corte de un filtro (Hammer, 1986).

Los filtros más comunes para plantas de potabilización de flujo mayor que 500 L/s son de flujo descendente (por gravedad) y de medio dual arena-antracita. Los filtros por gravedad no funcionan adecuadamente, a menos que se haya adicionado un

reactivo coagulante, y removido los flóculos muy gruesos por sedimentación (CNA, 2007).

La coagulación es esencial para remover las partículas muy finas, que de otra forma lograrían salir del filtro. Si se emplea una cantidad excesiva de floculante se forman aglomerados muy gruesos que recubren y se depositan en la parte superior del filtro, tapando el paso del agua. Los flóculos muy pequeños pueden atravesar el filtro, por esto la operación adecuada de un filtro debe analizarse en forma conjunta con la coagulación.

La filtración óptima ocurre cuando los flóculos coagulados no sedimentables se retienen en los poros de todo el filtro, para lograr la filtración “en profundidad”.

Si por alguna razón se incrementa la velocidad de filtración en un filtro que contiene sólidos depositados, las fuerzas hidráulicas de corte también se incrementarán y llevarán los sólidos retenidos hasta el efluente, con pérdida de material filtrante.

#### **1.2.10.2.1 Medio filtrante**

El medio filtrante, para que realice su función, debe poseer las siguientes características:

- a) Ser lo suficientemente grueso para tener intersticios entre los granos, con gran capacidad de almacenamiento.
- b) Pero, a la vez, suficientemente fino para retener el paso de los sólidos suspendidos.

- c) Tener una altura suficiente, para proporcionar la duración de corrida deseada.
- d) Con una graduación adecuada, para permitir un lavado eficiente.

Los esquemas básicos de operación son filtración a tasa constante o tasa declinante. El principio de operación se muestra en el Figura No. 2 en la que se abren inicialmente las válvulas 1 y 4, mientras se mantienen cerradas la 2, la 3 y la 5 para realizar la filtración. El sobrenadante que sale de los sedimentadores pasa a través del lecho filtrante y de bajo dren. La profundidad del agua sobre el lecho filtrante varía entre 0,9 m y 1,2 m.

El bajo dren se encuentra conectado a la caja donde se almacena el agua filtrada, en un circuito cerrado, para evitar que entre aire al sistema. La máxima carga admisible es igual a la diferencia entre la altura del agua en el filtro y el nivel libre del bajo dren, y comúnmente es entre 2,7 m y 3,7 m. Cuando el filtro está limpio se debe mantener medio abiertas las válvulas de salida del bajo dren, para que el agua no pase muy rápido. Esto se logra mediante un sistema compuesto de un medidor Venturi y una válvula de control que, a medida que el lecho filtrante se ensucia, la resistencia al paso del flujo se incrementa y la válvula de control se abre poco a poco para mantener un flujo constante.

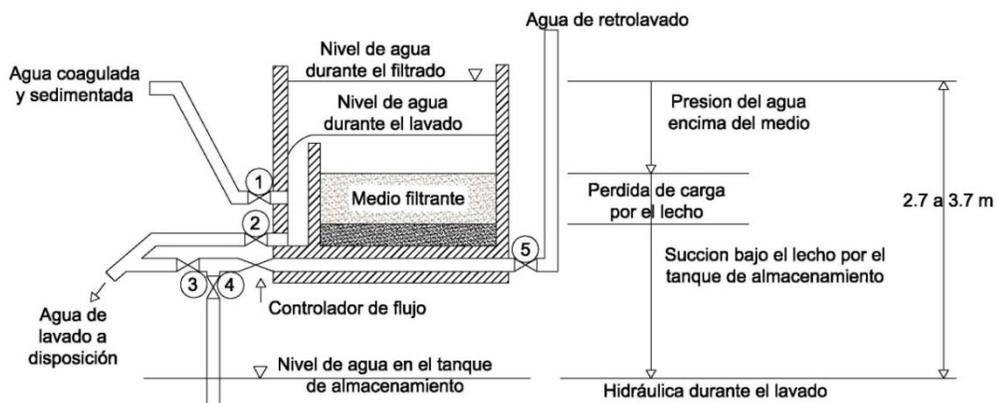
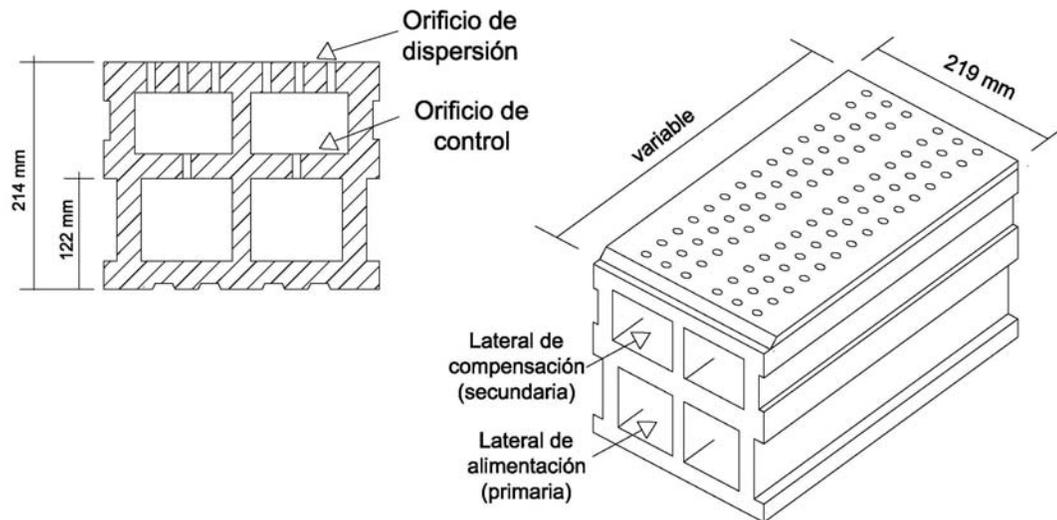


Figura No. 2. Diagrama de operación de un filtro a gravedad, de tasa variable (Hammer, 1986).

### 1.2.10.2.2 Bajos drenes

Existen diversos bajos drenes que abarcan placas porosas, bloques y boquillas. Se coloca grava entre el bajo dren y el medio filtrante con un espesor de 0,20 m a 0,30 m y graduación entre 3 mm y 20 mm. Por ejemplo, en la Figura No. 3 se muestran bloques vitrificados, con laterales superiores e inferiores perforados. El agua entra por el dren central hacia el alimentador lateral y sube a través de los orificios. Mediante este procedimiento se iguala la presión de entrada del fluido, para tener una distribución homogénea del mismo en todo el filtro.



**Figura No. 3.** Filtro a gravedad de medio dual. a) corte mostrando el bajo dren, la capa de grava de soporte, el medio filtrante, el agitador de superficie y las canaletas de lavado. b) detalle del bajo dren de arcilla vitrificada (Hammer, 1986).

### 1.2.10.2.3 Lavado de filtros

Los filtros se lavan para restablecer su capacidad, cuando la calidad del efluente se degrada, o cuando la caída de presión a través del filtro alcanza un valor predeterminado. Para los filtros de gravedad, la pérdida de carga terminal seleccionada

es generalmente la carga real disponible. En algunos casos, los filtros se lavan en un ciclo regular de tiempo, basado en la experiencia.

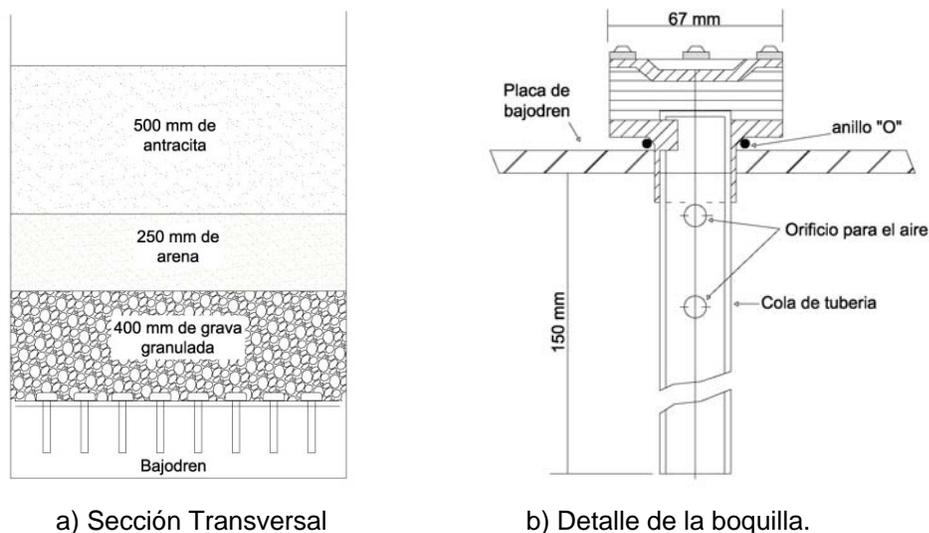
El lavado es en contracorriente, con un caudal suficiente para expandir los granos del medio formando una suspensión. El material retenido es transportado por el agua a través del lecho expandido, hasta descargarlo al desagüe. La colisión entre las partículas (abrasión) y las fuerzas hidráulicas cortantes es la causante del desprendimiento de los sólidos del medio granular. El suministro de aire, previo o durante el lavado, es una práctica común que tiene como propósito incrementar la colisión entre las partículas.

Para el lavado, de acuerdo con la Figura No. 2, se abre la válvula 2 y se mantienen cerradas la 1 y la 4. El agua de lavado sale por arriba del filtro, en el nivel de la canaleta. Si se aplica aire, éste se introduce por un bajo dren. Al abrir la válvula 5, el agua limpia del bajo dren emigra hacia el interior del filtro y expande los lechos filtrantes, hasta un 50% de su altura inicial.

El agua sucia producto del retrolavado se colecta en la canaleta central del filtro, la que se conecta a una tubería que la conduce a un decantador, con el fin de remover los sólidos y recuperar el agua que se retorna al influente de la planta para evitar desperdicio del vital líquido. El filtro nuevamente se pone en servicio, y el agua que fluye al inicio del proceso de filtración se desecha, hasta que el filtro madure y recupere su eficiencia de operación. Esto se logra al abrir la válvula 3, con la válvula 1 abierta y cerradas la 2, la 4 y la 5. Al cerrar la válvula 3 y abrir la 4, el proceso de filtración se reanuda.

Es un problema común la pérdida de material de los lechos filtrantes (arena o antracita) durante el lavado, y se presenta en el mayor número de casos cuando se emplean arenas finas. Para solucionarlo se especifican arenas más gruesas y mayor espesor de la cama filtrante. También es común que se usen arenas con coeficientes de uniformidad bastante elevados, ya que con ello reduce la cantidad de finos que pueden ser arrastrados durante el retrolavado; sin embargo, cuanto mayor es el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), mayor será el costo de la arena, ya que se debe cribar una gran cantidad de ésta para obtener el producto deseado.

En la Figura No. 4 se presenta un sistema de boquillas, las que están instaladas en una plataforma y cada una de las boquillas separadas entre sí. Los fabricantes proporcionan información para que éstas sean instaladas y también para su operación, pues se necesita que distribuyan el agua y el aire de manera uniforme.



**Figura No. 4.** Sistema de bajo dren para lavado del medio granular con aire y agua (Hammer, 1986).

Los sistemas de filtración que operan por gravedad regulan la tasa de filtración

al controlar la velocidad con que el agua sale por los bajo drenes. El influente que entra a cada tanque de filtración se controla en forma automática o manual, de forma que se mantiene un nivel constante sobre el lecho del filtro.

El control se hace para cada filtro en una consola que registra, cuando se obtiene una expansión del 15 al 50 %, el flujo y la tasa de filtración. El control de la tasa de filtración permite evitar variaciones de flujo importantes, que promuevan el deterioro de la calidad del efluente y evite que el filtro caiga en presiones negativas, por acumulaciones de bolsas de aire en el medio filtrante.

### **1.2.10.3 Desinfección**

La cloración se utiliza en la potabilización para destruir patógenos, controlar problemas de olor, remover hierro y manganeso y para eliminar nitrógeno amoniacal. La aplicación más común del cloro es para desinfectar. Esta acción sucede como producto de la reacción entre el ácido hipocloroso (HOCl) y las estructuras de las bacterias y virus, que inactivan procesos básicos para la vida. La tasa de desinfección depende de la concentración y la forma en que se encuentre el cloro disponible, el tiempo de contacto, el pH, la temperatura y otros factores.

El ácido hipocloroso (HOCl) es más eficiente que el ión hipoclorito, por lo que el poder del cloro residual disminuye conforme se incrementa el pH. La acción bactericida del cloro combinado es mucho menor que la del cloro residual libre, en términos de velocidad de reacción.

#### **1.2.10.4 Tecnologías especiales o avanzadas para la potabilización del agua**

Existen otras tecnologías para el tratamiento del agua, generalmente utilizadas en algunos procesos industriales, generalmente tecnologías limitadas a bajos caudales y costos elevados, tales como:

##### **1.2.10.4.1 Intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso químico que consiste en la remoción de los iones indeseables en el agua cruda, transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador iónico, que los acepta y cede en un número equivalente de iones de una especie deseable, que se encuentran almacenados en el esqueleto del intercambiador de iones.

Los intercambiadores iónicos se usan para la separación de sales (cationes y aniones) del agua, las aplicaciones en la potabilización del agua son:

- a) Ablandamiento, para separar iones de calcio y magnesio.
- b) Desmineralización, para separar parte de los iones del agua.
- c) Cambiador de cationes, para separar metales pesados.

Las sustancias intercambiadoras de iones son exclusivamente resinas, que las hay de tipo gel y de tipo macroporos.

##### **1.2.10.4.2 Ósmosis inversa**

La ósmosis inversa forma parte de las tecnologías de membrana, junto con la nanofiltración, la ultrafiltración y la microfiltración, en donde la membrana funciona

como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella.

La ósmosis es un fenómeno físico-químico que tiene lugar cuando dos soluciones acuosas de diferente concentración entran en contacto a través de una membrana semipermeable. Esta membrana permite sólo el paso del agua, así el agua tiende a atravesar la membrana en el sentido de menor a mayor concentración, para igualar ambas. La presión que hace que este fenómeno tenga lugar es la presión osmótica.

#### **1.2.10.4.3 Nanofiltración**

La nanofiltración es un proceso de filtración por membranas, operadas bajo presión en la que los solutos de bajo peso molecular (1000 g/mol) son retenidos; pero las sales pasan total o de forma parcial a través de la membrana con el filtrado. Esto provee un intervalo de selectividad entre las membranas de ultrafiltración y de ósmosis inversa, permitiendo simultáneamente concentración y desalado de solutos orgánicos. La membrana de nanofiltración retiene solutos que la ultrafiltración pasaría y deja pasar las sales que la ósmosis inversa retendría.

Las aplicaciones para los sistemas de nanofiltración son:

- a) Ablandamiento.
- b) Separación específica de metales pesados por proceso de chorro para la reutilización del agua.
- c) Reducción de contenidos de sales del agua salobre ligera.

#### 1.2.10.4.4 Ultrafiltración

La ultrafiltración se aplica principalmente como pretratamiento de la ósmosis inversa, tanto para potabilización como para la desalación del agua de mar. Las ventajas de la ultrafiltración como tratamiento son:

- a) Una buena protección de las membranas de ósmosis inversa.
- b) No requiere productos químicos.
- c) Tratamiento de choque químico, para una desinfección.
- d) Diseño compacto.
- e) Operación continua y fácilmente automatizable.

Generalmente se aplica en:

- a) Desalar el agua.
- b) Producir agua potable a bajo costo.

#### 1.2.11 Problemas para el abastecimiento de agua en el Área Metropolitana de Monterrey

El Área Metropolitana de Monterrey abarca aproximadamente el 5,66 % de la superficie total del Estado de Nuevo León, que es de 64 081 km<sup>2</sup> y se ubica entre los 25°15' y 26°30' de latitud norte y entre los 99°40' y 101°10' de longitud oeste, en los límites de la llanura costera del Golfo Norte y la Sierra Madre Oriental; esta particularidad geográfica, aunada a la topografía, determina la variabilidad del régimen de lluvias y la climatología general de la región. La altura sobre el nivel del mar se encuentra desde los 680 m, en el Municipio de Santa Catarina, hasta los 380 m en el Municipio de Ciudad Juárez, Nuevo León.

Conforme al Censo General de Población y Vivienda (INEGI, 2000), en el área conurbada se concentraba casi el 85 % de la población total del Estado de Nuevo León. En este documento se indica que en el Municipio de Monterrey se concentra un 29 % de la población de todo el Estado, seguido por el Municipio de Guadalupe, con un 18 %.

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM), se estima en aproximadamente 332 200 hectáreas, considerando los Municipios de Apodaca, Escobedo, San Pedro, Guadalupe, Monterrey, San Nicolás, Santa Catarina y García; de la superficie total se estima que el área urbanizada correspondía a 72 000 hectáreas hasta el año de 1997, lo cual representa aproximadamente el 22 % del área total estimada.

En los últimos tres quinquenios, el Área Metropolitana de Monterrey ha experimentado un crecimiento poblacional exponencial; pues para el año 2000, la población era de 3 243 466 habitantes; en el año 2005 fue de 3 598 597 habitantes y en el año 2010 fue de 3 930 388 habitantes (INEGI, 2010).

El crecimiento poblacional ejerce una fuerte presión de demanda habitacional y de servicios, entre los que se incluye la demanda de: viviendas, energía eléctrica, centros educativos, hospitales, centros comerciales y, desde luego, que cada uno de ellos demanda cantidades cada vez mayores de agua, en cantidad y calidad suficiente para satisfacer los diversos usos requeridos por los demandantes.

#### **1.2.12 El abastecimiento de agua en el Área Metropolitana de Monterrey y la Planta Potabilizadora “San Roque”**

El suministro de agua potable en el AMM, históricamente, ha estado a cargo de

la Empresa descentralizada estatal denominada Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), la que mediante Convenios y Acuerdos con la Comisión Nacional del Agua, obtiene la llamada “agua en bloque”, mediante el pago correspondiente de acuerdo con la Ley General de Aguas y su Reglamento, pudiendo ser esta agua superficial o subterránea, y las obras requeridas para la captación, conducción, tratamiento para potabilización, la distribución y la administración de este recurso corren a cargo de los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Parte del agua en bloque suministrada por la Comisión Nacional del Agua debe ser sometida a un proceso de Potabilización en La Planta Potabilizadora denominada “San Roque”, ubicada en San Roque, en el Municipio de Benito Juárez, Nuevo León y operada por personal de la Empresa Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. En teoría esta Planta potabiliza aproximadamente el 80 % de la demanda que requiere la población del AMM. Esta Potabilizadora inició su operación el 27 de julio de 1984 y fue diseñada para una capacidad de operación de 12 m<sup>3</sup>/s y adaptada para recibir 2 líneas de conducción de agua superficial cruda; una línea procedente de la presa El Cuchillo y otra línea de la presa Cerro Prieto. Esta última línea recibe, mediante interconexión, otro acueducto de la presa Rodrigo Gómez (La Boca).

La planta potabilizadora San Roque opera actualmente por filtración directa, a gravedad, con previa adición de polímero, sulfato de aluminio y mezcla rápida del agua, que es conducida a 36 filtros rápidos, a gravedad de flujo descendente, con un rendimiento total de 8 m<sup>3</sup>/s, valor inferior a los 12 m<sup>3</sup>/s para lo cual fue diseñada, debido posiblemente a deficiencias en la operación y en las condiciones de los lechos filtrantes, que limitan la capacidad de diseño de cada uno de los filtros. Existen oportunidades de mejora en los procesos de potabilización de la planta, para lograr los

12 m<sup>3</sup>/s indicados en el diseño de la misma.

#### **1.2.12.1 Proceso de potabilización del agua en la planta “San Roque”**

La calidad del agua de las fuentes superficiales que abastecen esta Planta, proceden de presas que actúan como sedimentadores; por lo que en el diseño de la Planta se consideró que podría ser una planta potabilizadora de filtración directa y, en algunos casos, con ayuda de productos químicos para la formación de flóculos que pudiesen ser retenidos en los filtros rápidos de flujo descendente.

El agua procedente en la mayoría de los afluentes llega en forma simultánea al tanque de recepción de agua cruda, mediante dos líneas de conducción procedentes de las fuentes mencionadas en el párrafo anterior. Del tanque de agua cruda se conduce el fluido a gravedad, hacia unos canales, donde se ubican medidores de tipo Parshall, donde se dosifican los productos químicos y, aprovechando la turbulencia en los medidores Parshall, se logra la mezcla rápida, entre el agua y los productos químicos.

Se denomina “mezcla rápida” a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas correspondientes al mecanismo de coagulación predominante (Vargas, 2004). La mezcla rápida, en este caso, se efectúa mediante la turbulencia, provocada en los medidores Parshall.

El coagulante de mayor uso en las plantas potabilizadoras es el sulfato de

aluminio, debido a su bajo costo y a su fácil manejo. La utilización del sulfato de aluminio implica la eliminación del color y la formación de un surtido de especies químicas, llamadas productos de hidrólisis de alúmina, que produce la desestabilización de las partículas propiciando la coagulación. La desestabilización es el proceso de neutralización de las cargas de las partículas en suspensión propiciando que estas se adicionen al colicionar unas con otras formando partículas más grandes, llamadas “flocs”, para finalmente sedimentar (la Corte, 2006).

La filtración es la operación final que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad. La filtración, como se indicó en párrafos precedentes, consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso (Maldonado, 2004).

El sistema de filtrado se introduce en un sistema de potabilización con la intención de retener los “flocs” que han escapado del proceso de sedimentación. Las propiedades de adsorción del medio filtrante retendrán el “floc” y algunos sólidos disueltos que no fueron retenidos por el dispositivo de sedimentación de alta tasa.

El principio básico de la filtración es la remoción de microorganismos y materia particulada. La ventaja de este proceso, ante otras alternativas de desinfección, se debe a que la filtración, en ciertos casos, no requiere el uso de reactivos químicos para lograr la desinfección del agua (Jarrín y colaboradores, 2009). La filtración elimina los sólidos en suspensión; en el caso de partículas de alta densidad, éstas también se pueden separar por asentamiento o anticipadamente por floculación.

En general, un filtro puede operar con agua hasta de 15 unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) (Etienne, 2009).

En la norma NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de Agua-Determinación de Turbiedad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas-Método de Prueba, se define a la turbiedad como: “una expresión de la propiedad óptica de una muestra, que origina que al pasar un haz de luz a través de ella, la luz se disperse y se absorba en vez de transmitirse en línea recta”.

La turbiedad debe ser baja, para que la desinfección sea eficaz (OMS, 1998) y que bajen también los riesgos de que el agua potable contenga tóxicos, que pudieran manifestarse en diversas enfermedades crónicas (Marco y colaboradores, 2004).

Posterior a la filtración, continúa el proceso de desinfección con base en la aplicación de soluciones de hipoclorito de sodio y, posteriormente, el agua es conducida hacia el tanque de agua tratada; para ser enviada, mediante líneas maestras de conducción, a la red de distribución de agua del Área Metropolitana de Monterrey.

El motivo del presente trabajo es la revisión del proceso de filtración, para detectar áreas de oportunidad de mejoras en el mismo y para la determinación de que la eficiencia de los filtros puede hacerse de varias maneras, entre las que se encuentran: a) La medición de la turbiedad del efluente, b) El control de las partículas, c) El control del aluminio residual en el efluente, d) La filtración utilizando filtros pilotos (Arboleda, 1981).

### 1.2.13 Filtros Pilotos

Arboleda (1981) menciona que los modelos de filtros pilotos pueden construirse para: a) Obtener información que puede usarse en el diseño de nuevas instalaciones y b) Controlar la operación de filtros existentes en funcionamiento.

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó la búsqueda de información bibliográfica entre la que destaca la realizada por Ríos y colaboradores (2006), en el estudio de “Determinación de los parámetros de diseño de una batería de filtración de tasa declinante, para un caudal de 10 000 m<sup>3</sup>/h, mediante estudios realizados en la planta de filtros piloto”. El objetivo de ese trabajo consistió en determinar los principales parámetros de diseño para la nueva batería de filtros, que son: la tasa de filtración, el espesor del manto filtrante y la granulometría del mismo, a partir de sucesivas campañas de trabajo desarrolladas en una planta piloto, diseñada y construida específicamente para ese fin. Dichos parámetros son necesarios para luego efectuar un diseño óptimo y racional de los filtros.

Vázquez y colaboradores (2000) en el estudio de “Remoción de plancton en el proceso filtración rápida” realizaron ensayos de filtración en un filtro piloto, divididos en dos etapas: laboratorio y campo. Los objetivos procuraron determinar la influencia de la velocidad de filtración en la remoción de organismos planctónicos y la evaluación del conteo de microorganismos, como herramienta de control del proceso de filtración.

Ahumada y Opazo (2006) en el estudio de “Diseño e implementación de una planta piloto de tratamiento de agua potable con fines docentes”, trataron de describir el diseño y la implementación de una planta piloto de agua potable, con fines docentes,

para un caudal máximo de 1 L/s. La planta piloto se implantó en el laboratorio de hidráulica “Francisco Javier Domínguez” de la Universidad de Chile, considerando diferentes configuraciones de lecho y sistemas de lavado.

Pavón y colaboradores (1996) en el estudio: “Planta potabilizadora para pequeñas comunidades”, presentaron una planta piloto de desarrollo empírico, con un sistema integrado de tratamiento de agua, (Diseñado por el Dr. Ignacio Allende Abreu) con aplicación para pequeñas comunidades, con el fin de obtener agua para consumo humano a un bajo costo de operación y de mantenimiento.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluación de los lechos filtrantes en una planta potabilizadora de filtración directa, con lechos mixtos, de flujo descendente y retrolavado de flujo ascendente, para evaluar el proceso de retrolavado, por medio del diseño, construcción y operación de un filtro piloto a escala, elaborado de acuerdo con los parámetros de diseño original de la Planta San Roque, que opera Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, con el fin de detectar áreas de oportunidad, para optimizar el proceso de potabilización.

#### **1.3.2 Objetivos Particulares**

- a) Inspeccionar y coleccionar evidencias para la detección de mejoras en áreas de oportunidad, en el proceso de potabilización.
- b) Revisar la operación real del proceso de filtración y compararlo con lo recomendado en el diseño original de los filtros.

- c) Realizar un levantamiento de las condiciones físicas del estado estructural de los filtros, de los lechos filtrantes y del falso fondo.
- d) Comparar los espesores de los lechos filtrantes en el momento de la inspección con los recomendados en el diseño original.
- e) Tomar muestras representativas de los materiales filtrantes en el 10 % de los filtros, seleccionados al azar de entre los 36 existentes en la planta potabilizadora.
- f) Tomar muestras del material filtrante en los filtros seleccionados.
- g) Determinar la granulometría de las muestras del material filtrante de cada uno de los filtros seleccionados.
- h) Revisar la operación de retrolavado de los filtros en la Planta y determinar los tiempos de lavado de los mismos.
- i) Diseñar, construir y operar un filtro piloto a escala, con similitud geométrica e hidráulica acorde con las especificaciones del diseño original de la planta potabilizadora San Roque.
- j) Determinar el tiempo óptimo de retrolavado en el filtro piloto.
- k) Determinar las expansiones de los lechos filtrantes.

#### 1.4 Hipótesis

Mediante el diseño y la operación del filtro piloto construido a escala con los parámetros de diseño de la planta potabilizadora San Roque, se podrá visualizar el comportamiento de los distintos lechos filtrantes y se obtendrá información que servirá de base para mejorar el proceso de retrolavado y la reformulación de la granulometría de los materiales filtrantes, así como también de los tiempos de retrolavado óptimos, lo que permitirá un incremento en la capacidad de filtración; con lo cual se obtendrá un

rendimiento próximo a la capacidad de diseño de producción de la Planta Potabilizadora, con el consiguiente ahorro de agua en el proceso de retrolavado.

### **1.5 Justificación**

Las plantas potabilizadoras que utilizan filtración directa y que son abastecidas de fuentes de agua superficial, generalmente presentan problemas de baja eficiencia en el tratamiento; principalmente en las unidades de filtración, debido a varios factores: formación de bolas de lodos, formación de interfases, pérdidas significativas de material filtrante, modificación en la topografía de los lechos y formación de canales o grietas en los mismos; debidas a la deficiente distribución del agua de retrolavado. Algunas de estas deficiencias son consecuencia de una operación y mantenimiento deficiente en los filtros.

Para el estudio de las deficiencias mencionadas en el párrafo anterior, se propuso el diseño, la construcción y operación de un filtro piloto a escala, de acuerdo con los datos originales de diseño de la Planta.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1 Investigación bibliográfica

En este trabajo, la búsqueda de información de procesos de potabilización de agua se enfocó a la investigación del proceso de filtración y la utilización de filtros piloto; como temas expuestos en los libros: “Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del Agua” de Jorge Arboleda Valencia, “Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano” del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), “Water Treatment Plant Design” de American Water Works Association (AWWA), en las revistas “Opflow” y “Journal” de AWWA, “Revista Lasallista” de la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe (REDALYC), en información expuesta en diversas tesis realizadas en México, Colombia, Guatemala y otros países, en páginas de internet de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM).

Además de lo mencionado en el párrafo anterior se consultaron otros artículos de diversas publicaciones sobre el tema de potabilización, información que se incluye en la bibliografía que se anexa al presente documento.

La información histórica de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento

de la planta San Roque y sus efectos en el proceso de potabilización, fueron proporcionados por el personal de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

## 2.2 Inspección ocular en la planta potabilizadora para la colecta de evidencias

La evaluación de los procesos de potabilización del agua en la planta, se realizó con la revisión detallada de los procesos a los que el agua es sometida desde el influente hasta el efluente y se efectuaron varias visitas para la colecta de información relativa a cada parte del proceso. Para este trabajo se dio especial atención al proceso de filtración.

Las diversas estructuras de la planta que recorre el agua para su potabilización, se aprecian en la Figura No. 5. Éstas son: Líneas de conducción, Tanque de recepción de Agua Cruda, Canales de distribución de agua, Medidores de flujo Parshall, Filtros de flujo descendente, Desinfección y Tanque de agua tratada.



Figura No. 5. Vista aérea de la planta potabilizadora "San Roque".

### **2.2.1 Líneas de conducción**

Provenientes de las fuentes de abastecimiento, a la planta potabilizadora llegan dos líneas de conducción, con un diámetro de 80": una procedente de la Presa El Cuchillo y otra de la Presa Cerro Prieto, la cual recibe, mediante interconexión, otro acueducto de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca).

El gasto máximo en cada línea de conducción es: presa El Cuchillo 4,5 m<sup>3</sup>/s, presa Cerro Prieto 5,0 m<sup>3</sup>/s, presa La Boca 2,3 m<sup>3</sup>/s.

La planta potabilizadora se abastece durante el día de las presas El Cuchillo y Cerro Prieto, y en las horas pico de demanda de energía eléctrica, que se presenta entre las 18:00 a las 22:00 horas; los sistemas de bombeo de la presa el Cuchillo y la presa Cerro Prieto se reprograman para suspender parcialmente el bombeo durante el lapso mencionado y es cuando se inicia el suministro de agua de la presa La Boca, que es por gravedad, con lo que se logra un ahorro considerable en el consumo de la energía eléctrica.

### **2.2.2 Tanque de Agua Cruda**

El tanque de recepción de agua cruda es una caja rectangular de 30 m x 52 m y 2,5 m a 3 m de profundidad; en ella se recibe el flujo de las líneas de conducción y se realiza una pre-cloración. Esta unidad está provista de un dissipador de energía, una pantalla uniformizadora de flujo, un vertedor de 30 m de cresta, un canal de demasías y 6 compuertas de 1,52 m x 1,52 m, para distribuir el agua hacia las canaletas, para la medición del flujo y su distribución hacia los filtros.

El agua que sale del tanque de agua cruda, se conduce mediante 6 canales de 3,20 m de ancho, hacia la entrada a los filtros. En los canales de distribución se localizan los medidores Parshall.

### **2.2.3 Medidores Parshall**

Un Medidor Parshall tiene un ancho de garganta de 2,25 m, donde se aplican los productos químicos y en este punto se efectúa la mezcla rápida; la mezcla se produce mediante el salto hidráulico.

Después de los medidores Parshall, el canal se bifurca, dando lugar a 2 canales de 1,50 m de ancho, los que se abren formando dos ramas de 6 canales cada una, que alimentan el canal de agua clarificada, a través de las entradas de filtración directa. El canal de agua clarificada mide 148,90 m x 2 m y abastece a las dos baterías de filtros de 18 unidades cada una.

### **2.2.4 Filtros**

Los filtros de la Planta en estudio son los conocidos como filtros rápidos de flujo descendente, con tasa declinante, con lechos mixtos de arena y antracita, y con dispositivos para retrolavado, con agua y/o aire.

La entrada del agua clarificada se controla mediante una válvula de mariposa de 1,22 m de diámetro. El área de filtración, en este caso, es de 101,63 m<sup>2</sup>, distribuidos en dos lechos filtrantes de 3,05 m x 16,66 m, y una canaleta para recepción de agua de retrolavado, la cual se encuentra colocada entre los dos lechos filtrantes y tiene un ancho de 1,35 m. La salida del agua de retrolavado que se recibe en la canaleta central

se controla mediante una válvula de mariposa de 1,22 m de diámetro; el agua que sale se conduce hacia otra parte del proceso, para su recuperación.

De acuerdo con los datos de diseño de los filtros para esta Planta, los lechos filtrantes están formados por bajodrenes de tipo Leopold, de 0,30 m de altura; sobre ellos está una capa de grava de 0,30 m y sobre ésta una capa de arena sílica especial para filtración, de 0,25 m y, por último, una capa de antracita de 0,50 m de espesor.

El agua filtrada en los 36 filtros de la planta se concentra en un canal de interconexión que mide 153 m x 8,5 m, cuyas funciones son: recibir el agua filtrada, regular el gasto del agua para retrolavado y conducir el agua tratada hacia el ducto de agua clara. Este canal se complementa con cajas de salida para recibir el agua de los filtros y cuenta con un canal de cresta vertedora de agua filtrada y compuerta.

El ducto de agua clara es un ducto de 8,5 m x 2,17 m x 1,53 m situado debajo del canal de interconexión de filtros y que reduce su ancho de 8,5 m a 4,9 m, por la presencia de las cajas de salida de los filtros. Este ducto recibe el agua de la cresta vertedora del canal de interconexión y la conduce a dos vertedores de 5 m de largo en la salida. En este ducto se efectúa la post-cloración.

Posteriormente, el agua llega al tanque de agua clara, para después ser enviada mediante bombeo a los tanques reguladores, ubicados en distintos puntos del Área Metropolitana de Monterrey y de ahí a las redes de distribución en la Ciudad, mediante gravedad o bombeo, según sea el caso.

## **2.3 Revisión del proceso de filtración en filtros seleccionados**

La Planta Potabilizadora cuenta con un proceso de filtración directa, teniendo como último paso la post-cloración, antes de llegar el agua a los usuarios.

### **2.3.1 Proceso de selección de los filtros**

Para la presente investigación se decidió seleccionar el 10 % de los filtros (cuatro filtros de 36) para el estudio, cantidad que se consideró representativa del total de los filtros en operación en esta Planta. La finalidad de la selección fue la de estudiar las características granulométricas y otras especificaciones de los medios filtrantes, utilizados en la Planta, del acomodo de los mismos en cada filtro seleccionado, la detección de bolas de lodos, las grietas en los lechos, el desacomodo de los mismos y la observación de los tiempos de lavado reales en los filtros seleccionados.

De acuerdo con la numeración asignada en la Planta, los filtros seleccionados fueron el 9, el 10, el 19 y el 26. En cada uno de los filtros se procedió a tomar muestras del material filtrante, acción que coincidió con el día que se tenía programado el lavado del filtro en la Planta.

### **2.3.2 Selección de los puntos de muestreo del material filtrante, en los filtros seleccionados**

Para que los muestreos fueran representativos, dentro de los filtros se tomaron cuatro muestras, dos en cada cama filtrante, localizadas longitudinalmente en el centro de cada cama filtrante, y a 3 m de los extremos de los muros transversales, como se observa en la Figura No. 6.



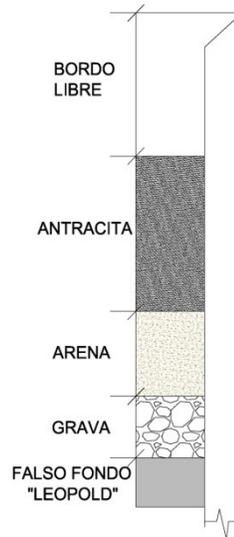
Figura No. 6. Puntos de muestreo del material filtrante.

### 2.3.3 Toma de muestras de los cuatro filtros seleccionados

De cada uno de los filtros seleccionados se colectaron de 10 a 15 kg de material filtrante, tanto de arena como de antracita, colocando las muestras en costales de tela de 50 kg de capacidad.

### 2.3.4 Determinación de los distintos espesores de cada lecho filtrante, en los filtros

La medida de los espesores del lecho se realizó con base en mediciones físicas con cinta métrica, realizando excavaciones y midiendo el espesor de los estratos de cada medio filtrante; midiendo también la distancia entre la parte superior de la antracita y la cresta del canal de lavado, como se muestra en la Figura No. 7.



**Figura No. 7.** Estratos del lecho filtrante.

### 2.3.5 Determinación de los porcentajes de bolas de lodos en los lechos filtrantes

La determinación de los porcentajes de bolas de lodo y la obtención de las muestras de bolas de lodos, se realizó mediante el análisis denominado “prueba de bolas de lodo”, descrita en el libro de Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua (Arboleda, 1981).

La prueba de bolas de lodos se llevó a cabo en los filtros 16, 23 y 26, los que fueron seleccionados por ser los que a simple vista se apreciaba en ellos las bolas de lodos en la superficie de la antracita. En cada filtro se tomaron dos muestras de material filtrante, uno en cada cama del filtro. La muestra se colocó en una bolsa de plástico para su remisión al laboratorio. Cada muestra fue analizada por separado, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Se colocó la muestra en la malla No. 10, la que fue sumergida en un recipiente con agua, y se agitó manualmente para que se desprendiera el material adherido a las

bolas de lodos, en este caso generalmente fueron antracita y arena, dejando a la vista las bolas de lodo retenidas en la malla, las que se transfirieron a una probeta de plástico de 1000 mL, previamente aforada con agua, a 500 mL.

El aumento del volumen de agua desplazado por las bolas de lodo colocadas en la probeta fue el volumen ocupado por las bolas de lodo; este aumento de volumen se divide entre el volumen original de 500 mL de agua, para calcular el porcentaje de bolas de lodo en cada uno de los análisis efectuados.

### **2.3.6 Determinación de la granulometría de los medios filtrantes (arena y antracita)**

Las cuatro muestras tomadas en cada filtro fueron homogenizadas separadamente; tanto las de antracita como las de arena, y a cada una de ellas se le determinó la granulometría. De cada medio filtrante se tomaron tres muestras representativas, obtenidas mediante cuarteo. Se identificó el origen de cada una de ellas y posteriormente se procedió a secarlas, por veinticuatro horas, en una estufa de laboratorio, a una temperatura controlada de 103°C.

Las muestras secadas fueron sometidas a cuarteo, con la finalidad de obtener una muestra mínima de 250 g de cada una.

#### **2.3.6.1 Determinación de la granulometría de la arena**

La granulometría de la arena se realizó mediante diversos tamaños de mallas, recomendadas B100-53 (AWWA, 1966). La muestra de arena obtenida por cuarteo se hizo pasar a través de las mallas 10 (2,00 mm), 12 (1,65 mm), 16 (1,18 mm), 20 (0,841

mm), 30 (0,589 mm), 40 (0,420 mm), 50 (0,297 mm) y 70 (0,208 mm) mediante agitación manual. Posteriormente, se retiró la malla No. 10 y las mallas restantes se colocaron en un agitador mecánico denominado Ro-Tap, durante cinco minutos.

Al terminar el tamizado mecánico se retiró el material retenido en cada malla, obteniendo el peso de cada uno de ellos, el cual se registró en una tabla y se determinaron los porcentajes: el de arena retenido en cada malla, el acumulado y el que pasa en cada uno de los tamices.

Con los valores del % que pasa y con la abertura se elaboraron las gráficas de distribución del tamaño de los granos, para obtener las características de la arena analizada y comparar los valores con las especificaciones que debe cumplir la arena utilizada para el proceso de filtración en las plantas potabilizadoras.

### **2.3.6.2 Determinación de la granulometría de la antracita**

La granulometría de la antracita se realizó mediante diversos tamaños de mallas, recomendadas B100-53 (AWWA, 1966). La muestra de antracita obtenida por cuarteo se hizo pasar a través de las mallas 4 (4,76 mm), 8 (2,38 mm), 10 (2 mm), 12 (1,65 mm), 16 (1,18 mm), 20 (0,841 mm), 30 (0,589 mm), 40 (0,420 mm), 50 (0,297 mm) y 70 (0,208 mm) mediante agitación manual. Posteriormente, se retiraron las mallas 4, 8 y 10 y las mallas restantes se colocaron en un agitador mecánico denominado Ro-Tap, durante cinco minutos.

Al terminar el tamizado mecánico se retiró el material retenido en cada malla obteniendo el peso de cada uno de ellos, el que se registró en una tabla y se

determinaron los porcentajes: el de antracita retenido en cada malla, el acumulado y el que pasa en cada uno de los tamices.

Con los valores del % que pasa y con la abertura se elaboraron las gráficas de distribución del tamaño de los granos, para obtener las características de la antracita analizada y comparar los valores con las especificaciones que debe cumplir la antracita utilizada para el proceso de filtración en las plantas potabilizadoras.

Después se retiraron las mallas del Ro-Tap y se pesó el material retenido en cada malla, y este valor se depositó en una tabla, y con estos valores se determinó el % retenido, el % porcentaje acumulado y el % que pasa.

### **2.3.6.3 Corrección de la granulometría de los medios filtrantes**

Después de haber realizado las pruebas granulométricas se encontró que no cumplían las especificaciones granulométricas recomendadas en el diseño, por lo que para su corrección se siguió el procedimiento que a continuación se indica.

#### **2.3.6.3.1 Procedimiento de corrección de la granulometría de la arena**

Para la corrección de la granulometría de la arena y con la finalidad de considerarla bien graduada, para que cumpla las especificaciones de diseño, para su corrección se siguió el siguiente procedimiento.

Se tomaron los valores del Cu y el Te recomendados en el diseño, considerando que el Te es 0,65 mm, que corresponde a una abertura del tamiz que permite el paso del 10% de la muestra y el Cu de 1,35 es la abertura del tamiz que

pasa el 60% de la muestra, dividido entre la abertura del tamiz que pasa el 10% de la muestra. (Ecuaciones No. 1 y No. 2)

$$T_e = D_{10} = 0,65 \text{ mm}$$

$$C_u = D_{60} / D_{10} \text{ ..... (Ec. No. 1)}$$

$$D_{60} = C_u * D_{10} \text{ ..... (Ec. No. 2)}$$

$$D_{60} = 1,35 * 0,65 = 0,88 \text{ mm}$$

Con los datos de  $D_{10}$  y  $D_{60}$  se entra a la gráfica de granulometría de la arena, y se marcan los dos puntos, y se trazó una línea entre ellos, prolongándola hasta los márgenes del área del gráfico. Después se trazaron líneas horizontales de las mallas 12, 16, 20 y 30 hasta topa con la línea de granulometría corregida y se tomaron los valores de % que pasa para esos puntos, como se muestra en la Figura No. 8.

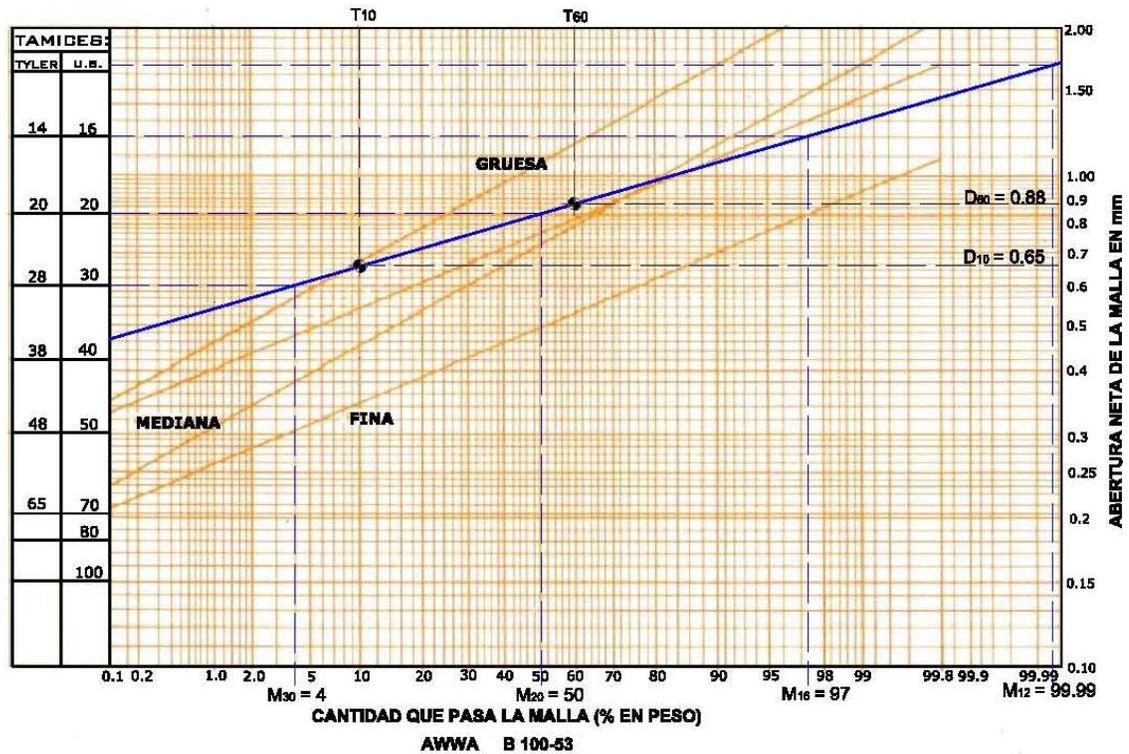


Figura No. 8. Gráfica de la arena corregida.

### Corrección de la arena:

Espesor recomendado de arena: 0,25 m

Área de filtración: 102 m<sup>2</sup>

Volumen de arena requerido  $0,25 \text{ m} * 102 \text{ m}^2 = 25,5 \text{ m}^3$

### Peso en la arena del filtro:

Densidad de la arena: 2 600 kg/m<sup>3</sup>

Peso = 2 600 kg/m<sup>3</sup> \* 25,5 m<sup>3</sup>

Peso = 66 300 kg

De la gráfica No. 8, se extrajeron de cada malla, los valores del % que pasa y se tomaron los valores del % acumulado y del % retenido, el % retenido se multiplicó por el peso y se obtuvieron los kilogramos de material por malla que se requerían para tener una granulometría de la arena, de acuerdo con las características especificadas en el diseño de los filtros estudiados (Tabla No.3).

**Tabla No. 3.** Cantidad de arena requerida de cada tamaño.

Malla	%Pasa	% Acumulado	% Retenido	kg Material
12	99,99	0,01	0,01	6,63
16	97	3	2,99	1 982,37
20	50	50	47	31 161
30	4	96	46	30 498

#### 2.3.6.3.2 Procedimiento de corrección de la granulometría de la antracita

Para la corrección de la granulometría de la antracita y con la finalidad de considerarla bien graduada, para que cumpliera las especificaciones de diseño, para su corrección se siguió el siguiente procedimiento.

Según los datos del proyecto, la antracita debe tener un Coeficiente de Uniformidad (Cu) de 1,55 y un Tamaño Efectivo (Te) de 1,05 mm. El Tamaño Efectivo es la abertura del tamiz que pasa el 10 % de la muestra; y el Coeficiente de Uniformidad es la abertura del tamiz que pasa el 60 % de la muestra entre la abertura del tamiz que pasa el 10 % de la muestra. (Ecuaciones No.3 y No.4)

$$Te = D_{10} = 1,05 \text{ mm}$$

$$Cu = D_{60} / D_{10} \dots\dots\dots (\text{Ec. No. 3})$$

$$D_{60} = Cu * D_{10} \dots\dots\dots (\text{Ec. No. 4})$$

$$D_{60} = 1,55 * 1,05 = 1,63 \text{ mm}$$

Con los datos de  $D_{10}$  y  $D_{60}$  se marcaron los dos puntos en la gráfica de granulometría de la antracita, trazando una línea recta entre ellos, prolongándola hasta los márgenes del área de la gráfica. Después se trazaron líneas horizontales correspondientes a las mallas 8, 10, 12, 16, 20 y 30, hasta encontrar la línea de granulometría corregida, y se tomaron los valores del % que pasa para esos puntos, como se muestra en la Figura No. 9.

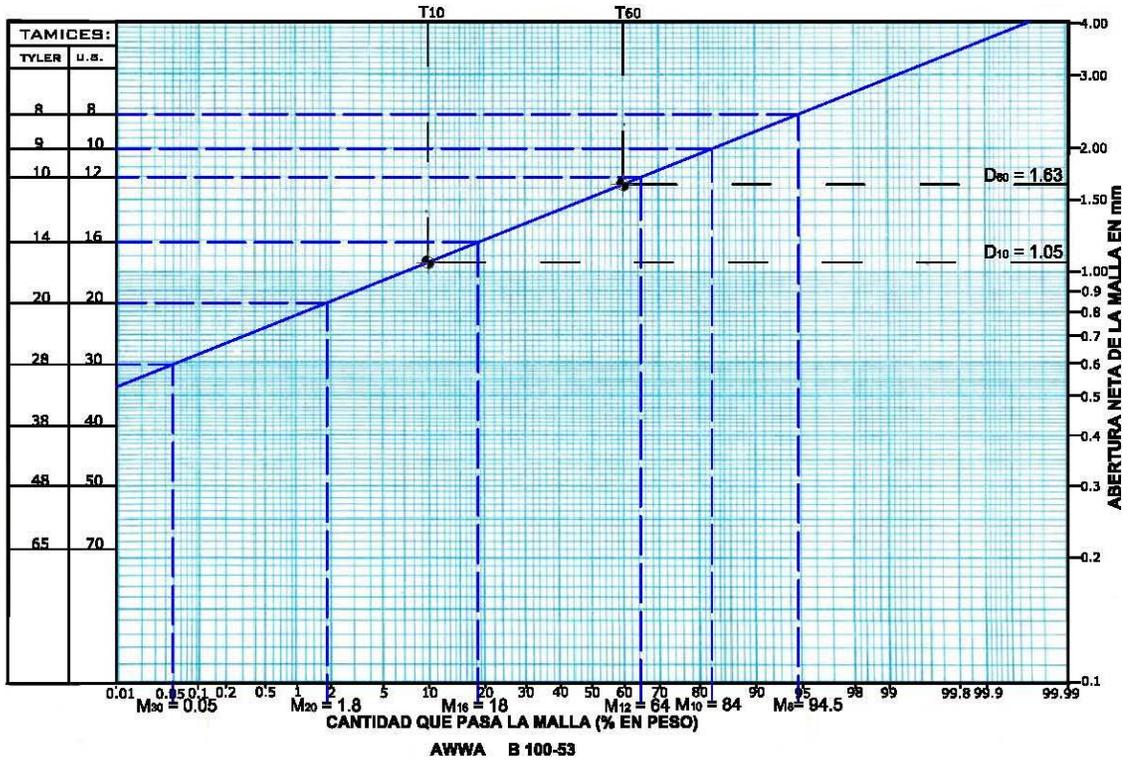


Figura No. 9. Grafica de la antracita corregida.

**Corrección de la antracita:**

Espesor recomendado de antracita: 0,50 m

Área de filtración: 102 m<sup>2</sup>

Volumen de la antracita = 0,50 m \* 102 m<sup>2</sup> = 51 m<sup>3</sup>

**Peso de la antracita del filtro:**

Densidad de la antracita: 1 550 kg/m<sup>3</sup>

Peso de la antracita en el filtro: 1 550 kg/m<sup>3</sup> \* 51 m<sup>3</sup> = 79 050 kg

De la gráfica No. 9, se tomaron los valores de % que pasa en cada malla y se determinaron el % acumulado y el % retenido, este último valor se multiplicó por el peso y se obtuvieron los kilogramos de antracita por cada tamaño requeridos para

cumplir las especificaciones en el diseño para la antracita (Tabla No.4).

**Tabla No. 4.** Cantidad de antracita requerida de cada tamaño.

Malla	%Pasa	%Acumulado	%Retenido	kg Material
8	94,5	5,5	5,5	4 347,75
10	84	16	10,5	8 300,25
12	64	36	20	15 810
16	18	82	46	36 363
20	1,8	99,2	17,2	13 596,6
30	0,05	99,95	0,75	592,88

## 2.4 Diseño, construcción y operación de un filtro piloto a escala del diseño original de la Potabilizadora

### 2.4.1 Diseño y construcción del filtro piloto

El diseño del filtro piloto se realizó siguiendo los lineamientos y criterios recomendados por Arboleda (1981). El diseño del filtro piloto se llevó a cabo de acuerdo con los datos de diseño original de la Planta, dimensionando el filtro piloto de acuerdo con el gasto de producción de cada filtro, al área total de cada filtro, los espesores de los lechos filtrantes y los gastos de aire y agua para efectuar el retrolavado.

Los datos y planos de diseño de la Planta fueron proporcionados por personal de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, información indispensable para el diseño y construcción del filtro piloto motivo de esta investigación. En la Figura No. 10 se muestra un croquis del filtro diseñado.

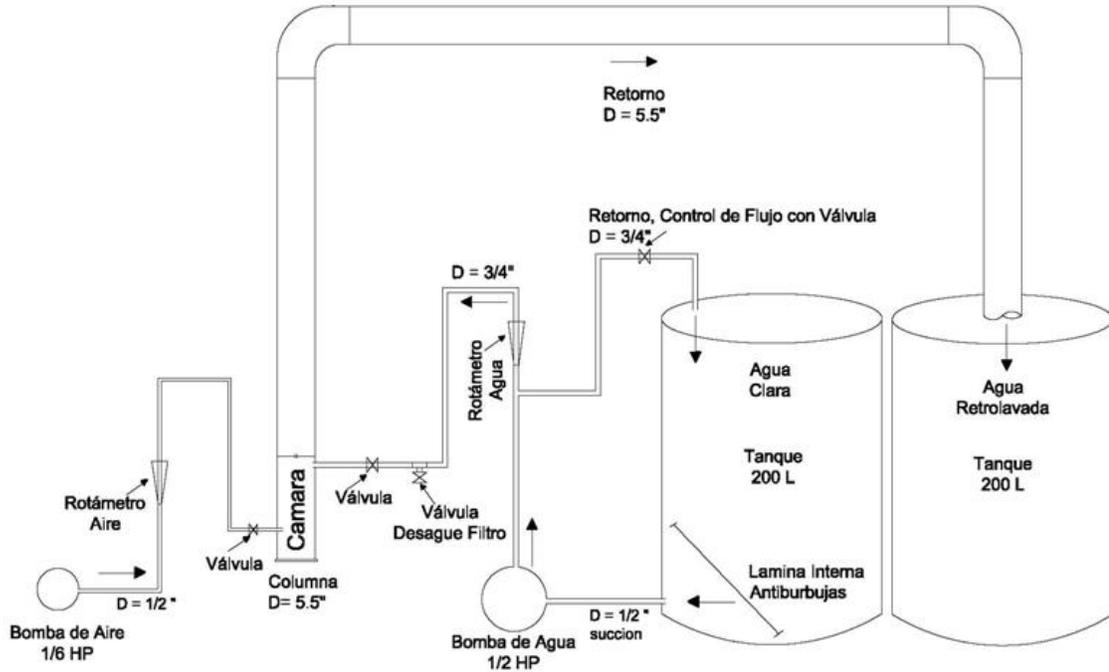


Figura No. 10. Esquema del filtro piloto.

La columna de filtración del filtro piloto se construyó con un tubo de acrílico transparente, el cual permitió observar lo que ocurría en la columna al momento de realizar el proceso de retrolavado, primero con aire y después con agua. Para el resto de las tuberías y accesorios del filtro piloto se utilizó PVC.

Para el lavado con aire se utilizó un compresor con capacidad de 1/6 HP y 1725 RPM; además, una bomba centrífuga de 1/2 HP y 3460 RPM, para la inyección del agua de retrolavado. También se utilizó una bomba sumergible de 1/3 HP y 1750 RPM. En la parte inferior del filtro se instaló un dren, a fin de eliminar el agua entre un lavado y otro, o cuando hubiese necesidad de cambiar los lechos filtrantes.

Para el control de flujo del aire utilizado al inicio del retrolavado se instaló en la línea de aire un rotámetro modelo F-550 con 1,2 pie<sup>3</sup>/min y para el control de flujo del

agua de retrolavado se utilizó un rotámetro para agua marca “BlueWhite” modelo F-400 con un flujo máximo de 20 L/min.

En la planta potabilizadora “San Roque” se maneja un gasto para lavar los filtros con agua de 830 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día. Se recomiendan gastos para retrolavado que oscilan entre 580 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día y 1 440 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día. En las pruebas realizadas en el filtro piloto se utilizaron los gastos proporcionales correspondientes a 864 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día, 1 080 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día y 1 296 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día, los cuales corresponden a 9,20 L/min, 11,50 L/min y 13,80 L/min respectivamente en el filtro piloto.

**Tabla No. 5.** Retrolavado con agua.

Potabilizadora m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Recomendado m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	Filtro Piloto L/min
830	580	6,15
	792	8,47
	864	9,20
	1 080	11,50
	1 296	13,80
	1 440	15,36

El área de filtración de los filtros de la potabilizadora se escaló al área interna del filtro piloto de 5,5”, para ajustar el gasto que se hizo pasar a través de la columna de filtración, para tener similitudes en los filtros de la planta San Roque. Para la prueba de retrolavado con aire, el flujo utilizado fue de 0,58 pie<sup>3</sup>/min, el cual se ajustó a 0,60 pie<sup>3</sup>/min por limitaciones del rotámetro usado.

Como complemento del filtro, se incluyeron soportes metálicos para sujetar las diversas tuberías y accesorios, pintando las tuberías de diversos colores para identificar las líneas, de acuerdo con el fluido que contenían, como se puede apreciar en la Figura No. 11.



Figura No. 11. Fotografía del filtro piloto.

#### 2.4.2 Pruebas de retrolavado en el filtro piloto

A las muestras de material filtrante obtenidas de los filtros 9, 10, 19 y 26 se les efectuaron tres pruebas de retrolavado con tres flujos diferentes: la primera a 9,20 L/min, la segunda a 11,50 L/min y la tercera a 13,80 L/min.

##### 2.4.2.1 Homogenización de las muestras y carga en la columna de filtración

Antes de colocar las muestras de grava, arena y antracita en la columna de filtración, éstas fueron sometidas a un proceso de homogenización, cada una por separado; colocando primero la capa de arena sobre el lecho de grava, y sobre la arena la capa de antracita, con los espesores recomendados en el diseño del filtro piloto (0,30 m de grava, 0,30 m de arena y 0,60 m de antracita).

#### **2.4.2.2 Retrolavado del filtro piloto mediante aire**

El filtro se cargó inicialmente con agua hasta una altura de 0,20 m por encima de la antracita, paso seguido, se inició la inyección con aire por la parte inferior del filtro durante un lapso de cinco minutos, con un flujo preestablecido en el diseño del filtro y se observó el comportamiento de los diversos lechos filtrantes durante esta maniobra, que se repitió con tres diferentes gastos.

#### **2.4.2.3 Retrolavado del filtro piloto mediante agua**

Pasados dos minutos de la suspensión de flujo de aire, se inició el retrolavado con agua, aplicando un gasto preestablecido, durante veinte minutos; proceso que se repitió en tres ocasiones, con gastos diferentes, de acuerdo con el diseño del filtro y se observó el comportamiento de los lechos filtrantes y la expansión de los mismos.

#### **4.2.2.4 Expansión de los lechos filtrantes**

Durante el proceso de retrolavado con agua, los distintos medios del material filtrante se expandieron y al principio se observó un comportamiento inestable; después de cierto tiempo se estabilizó la expansión y se tomó la lectura inicial y final del tramo expandido.

#### **4.2.2.5 Determinación de la turbiedad en el agua del retrolavado**

Las determinaciones de la turbiedad del agua de retrolavado se realizaron de acuerdo con la norma NMX-AA-038-SCFI-2001, que está basada en la comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo, condiciones definidas, y la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia. Bajo las mismas

condiciones, a mayor dispersión de luz, corresponde una mayor turbiedad. Para la realización de estas pruebas se utilizó un Nefelómetro previamente calibrado.

Para la determinación de la turbiedad en el agua de retrolavado, se tomaron muestras con intervalo de un minuto, durante veinte minutos. Correspondió la primera muestra a la primera agua producto de retrolavado. Inmediatamente después de tomar cada muestra, se procedió a su análisis.

#### **4.2.2.6 Determinación del tiempo óptimo de lavado**

El tiempo óptimo de retrolavado se determinó de acuerdo con los lineamientos recomendados por Arboleda (1981).

Con los valores obtenidos en las determinaciones de turbiedad se procedió a elaborar gráficas de valores de turbiedad contra tiempo. Se observó en dichas curvas que la turbiedad disminuye con el tiempo de lavado y que el tiempo óptimo es aquel valor de turbiedad en el que la curva empieza a ser horizontal y el valor de turbiedad se mantiene constante. El tiempo seleccionado se debe a que valores de tiempo mayores ocasionan un gasto innecesario del agua utilizada para el retrolavado.

#### **4.2.2.7 Descarga del filtro**

Cuando se tenía necesidad de cambiar los materiales filtrantes para realizar otras pruebas, se utilizó una manguera de plástico de  $\frac{3}{4}$ " que se introducía por la parte superior de la columna de filtración y se provocaba un sifón que permitió extraer el agua, la antracita y la arena, dejando la columna lista para otras pruebas.

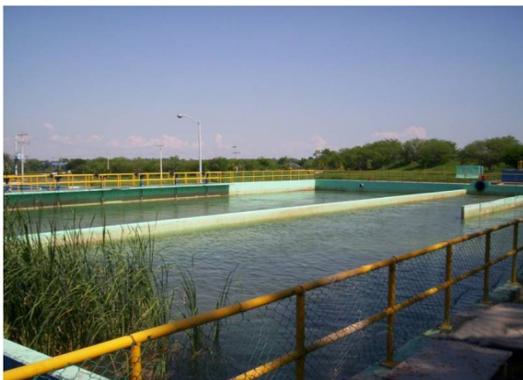
## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 Colecta de información en la planta potabilizadora “San Roque”

Para obtener información general de la planta potabilizadora se realizaron varias visitas guiadas que permitieron detectar diversas áreas de oportunidad de mejora en el proceso de potabilización. La atención principal se enfocó en el proceso de filtración. Se consideró conveniente detectar áreas de oportunidad de mejora en las diversas partes del proceso de potabilización localizadas antes de la llegada del agua a los filtros.

El primer punto del proceso revisado fue el tanque de agua cruda, donde se detectó la presencia de maleza, y abundante sedimento arcilloso, principalmente en las esquinas de dicho tanque, como se puede observar en la Figura No. 12.



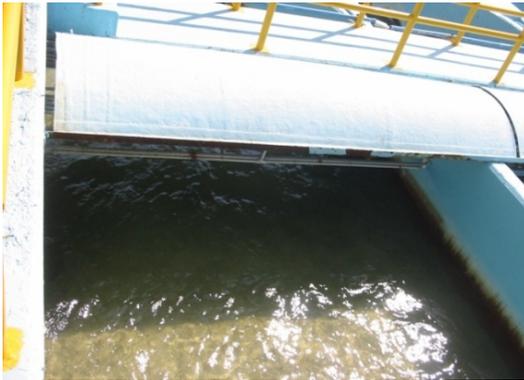
a) Abundante maleza.



b) Sedimento arcilloso.

**Figura No. 12.** Tanque de agua cruda.

El segundo punto como oportunidad de mejora fue el área de aplicación del coagulante, pues dicho reactivo se aplicaba mediante tubos perforados que descargaban el líquido en el Medidor Parshall; sin embargo, en algunos canales no se apreciaba la descarga del reactivo, aparentemente por obstrucción del dispensador del producto químico. Dicha situación originaba que los canales de distribución hacia los filtros presentaran agua de diferente calidad (Ver Figura No. 13).



a) Vista del Canal Parshall.



b) Tuberías de alimentación del coagulante.

**Figura No. 13.** Dosificación del sulfato de aluminio en el Medidor Parshall.

### 3.2 Revisión del proceso de filtración

En el área de filtración se observaron algunas deficiencias en la operación de los filtros, principalmente en el proceso de retrolavado, ya que en el diseño de la Planta, se indicaba que se debía iniciar el retrolavado con aplicación de aire, lo cual en la práctica no se realizaba. El proceso de retrolavado con agua, generalmente y a juicio del operador, se llevaba a cabo cada 24 horas, y el tiempo de lavado se definía a criterio del operador en turno; criterio definido a ojo, de acuerdo con la turbiedad observada por el operador y, además, no se tenían evidencias del control de gasto del agua de retrolavado, por deficiencias en la operación de las válvulas de mariposa instaladas en los filtros (Ver Figura No. 14).



a) Agua de retrolavado.



b) Burbujas de aire atrapado.

**Figura No. 14.** Vistas de un filtro durante el retrolavado.

Al descender totalmente el agua en los filtros, éstos quedaban vacíos, pudiéndose observar desniveles hasta de 0,40 m de diferencia entre una cama de filtración y otra del mismo filtro, como se puede observar en la Figura No. 15.



a) Capa de arena sobre la antracita.



b) Diferencias entre los niveles de las camas filtrantes.

**Figura No. 15.** Desnivel en los filtros y diferencias en la superficie de los lechos filtrantes.

En la Figura No. 16 se observa la presencia abundante de algas y bivalvos en la superficie del lecho filtrante. También se observa arena sobre la antracita, lo cual indica una operación y mantenimiento deficiente en este filtro (Ver Figura No. 16).



a) Presencia de algas y sedimento arcilloso sobre la antracita.



b) Antracita contaminada con arena en la superficie.

**Figura No. 16.** Presencia de algas, bivalvos y arena.

### 3.2.1 Espesores de los lechos filtrantes

Una parte medular para el buen funcionamiento de los filtros rápidos por gravedad de flujo descendente lo constituyen los espesores correctos de los distintos lechos filtrantes. Estos deben ser acordes al diseño, cumplir las especificaciones de granulometría, densidad, desgaste, etc. (AWWA, 1966).

En este caso de estudio, se revisaron varios filtros que posteriormente en este trabajo se detallan, destacándose algunas deficiencias significativas en cuanto a los espesores de los lechos filtrantes, a la pérdida de los mismos, a la presencia de bolas de lodos, abundancia de algas, grietas y desniveles en el material filtrante, y otros de menor importancia para el proceso.

#### 3.2.1.1 Resultados obtenidos de los espesores del filtro 9

Los espesores de los distintos lechos filtrantes, en el filtro 9, fueron muy irregulares, con espesores de antracita, en una de las camas, cercanos a los 0,26 m mientras que en la otra cama del mismo filtro fue de 0,54 m lo cual indicó pérdida de

antracita. En este filtro no se observó la interfase de lodos entre la arena y la antracita, como se observa en la Figura No. 17.

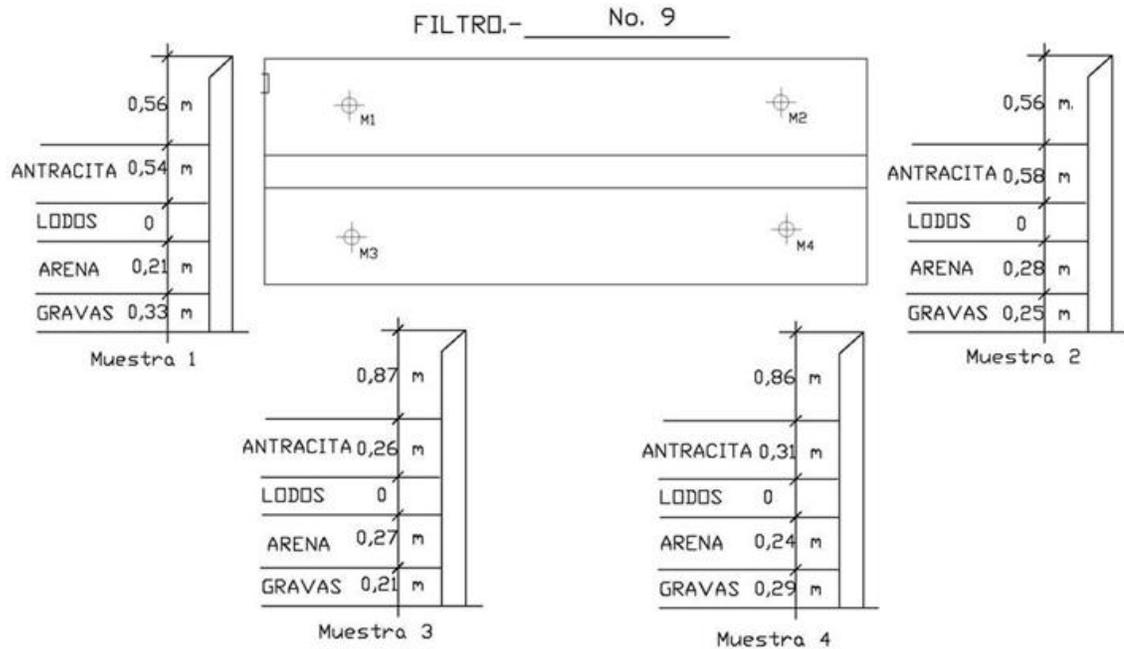


Figura No. 17. Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 9.

### 3.2.1.2 Resultados obtenidos de los espesores del filtro 16

En el filtro 16, los espesores de los lechos filtrantes se aproximaron a lo especificado en el diseño; sin embargo, presentó una interfase arcillosa entre la arena y la antracita, cuyo espesor fue, en este filtro, entre 0,02 m y 0,05 m, como se observa en la Figura No. 18.

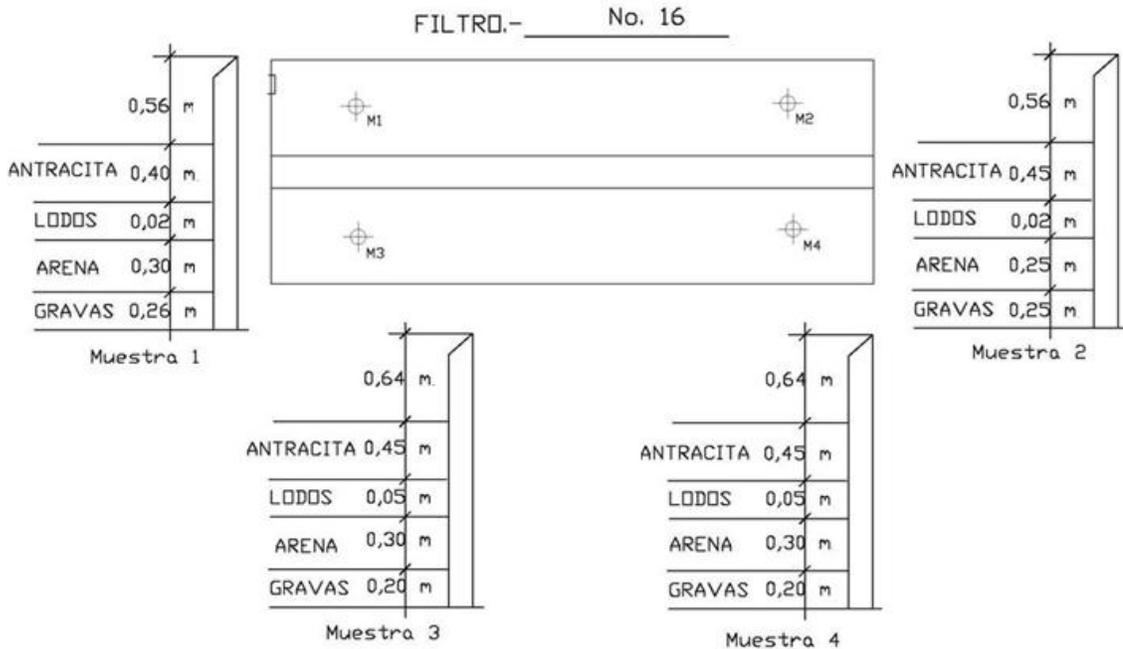
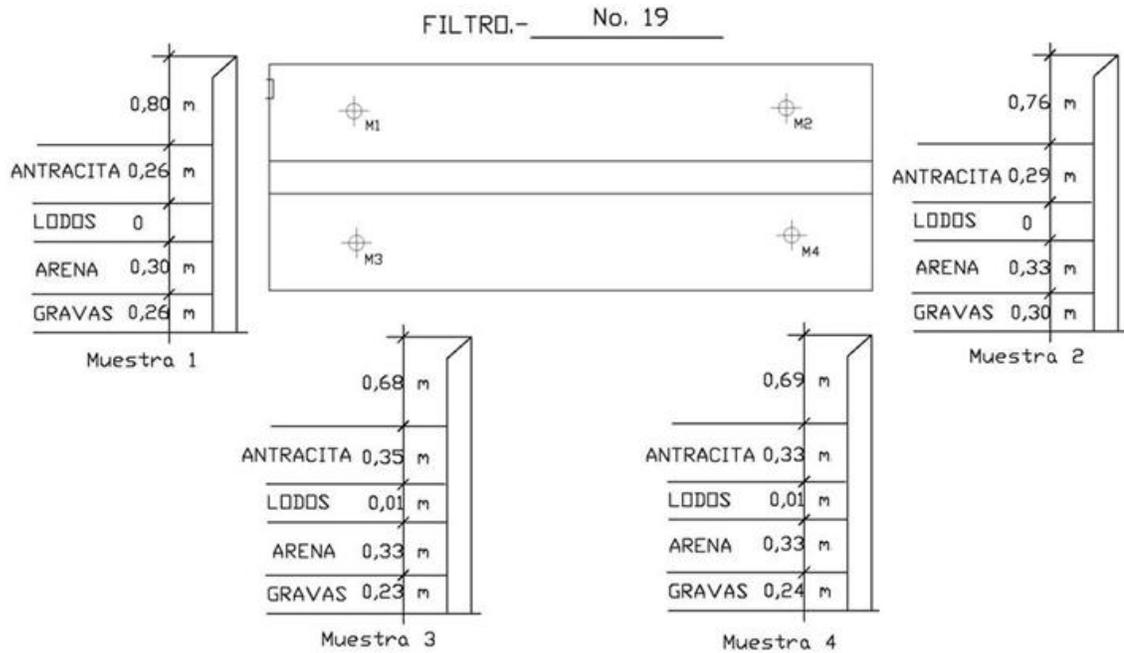


Figura No. 18. Espesores de los lechos filtrantes en el filtro 16.

### 3.2.1.3 Resultados obtenidos de los espesores del filtro 19

En este filtro se presentaron diferencias significativas en los lechos filtrantes, como se observa en la Figura No. 19. En este filtro, el espesor de la antracita indica pérdida de la misma y también se observó la interfase de arcilla entre la antracita y la arena.



**Figura No. 19.** Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 19.

### 3.2.1.4 Resultados obtenidos de los espesores del filtro 23

En la Figura No. 20 se observan los distintos espesores en los lechos filtrantes determinados en cuatro puntos seleccionados en el Filtro 23, en el que se indican las diferencias entre un lecho filtrante y otro. Comparando una cama con otra, se observan diferencias significativas entre los espesores de los materiales filtrantes; mientras que en una cama filtrante el espesor de la antracita es de 0,52 m, en la otra cama del otro filtro el espesor es de 0,25 m, lo que indica pérdida muy significativa en una de las camas de filtración.

En la misma Figura No. 20 se observa una interfase de lodos entre la arena y la antracita, cuyo espesor de la capa de lodos varía entre 0,02 m y 0,05 m.

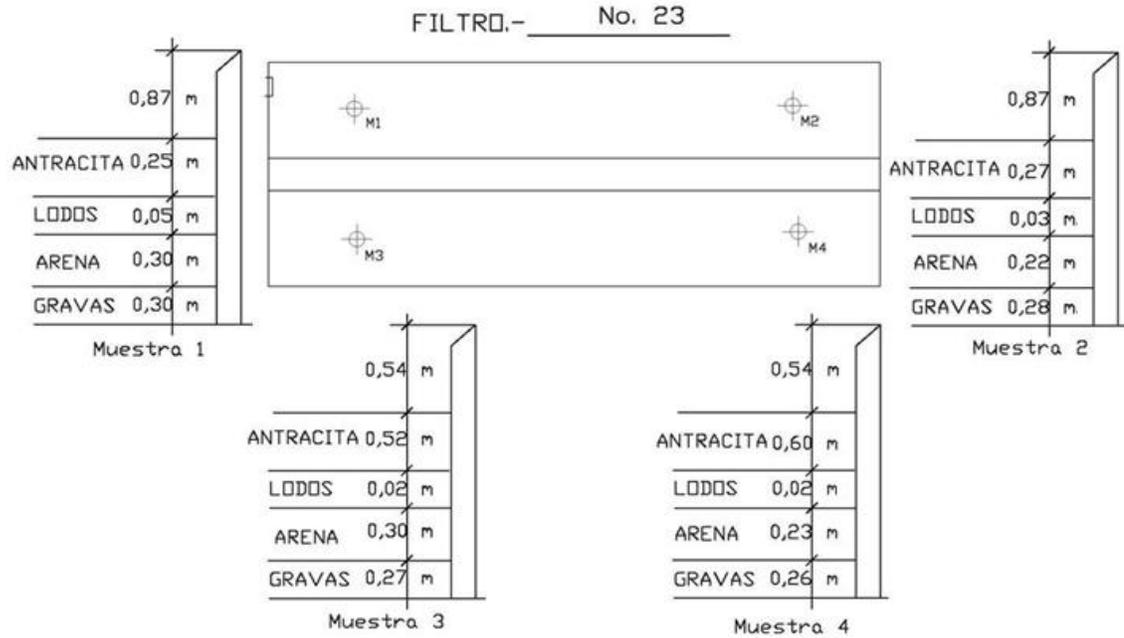
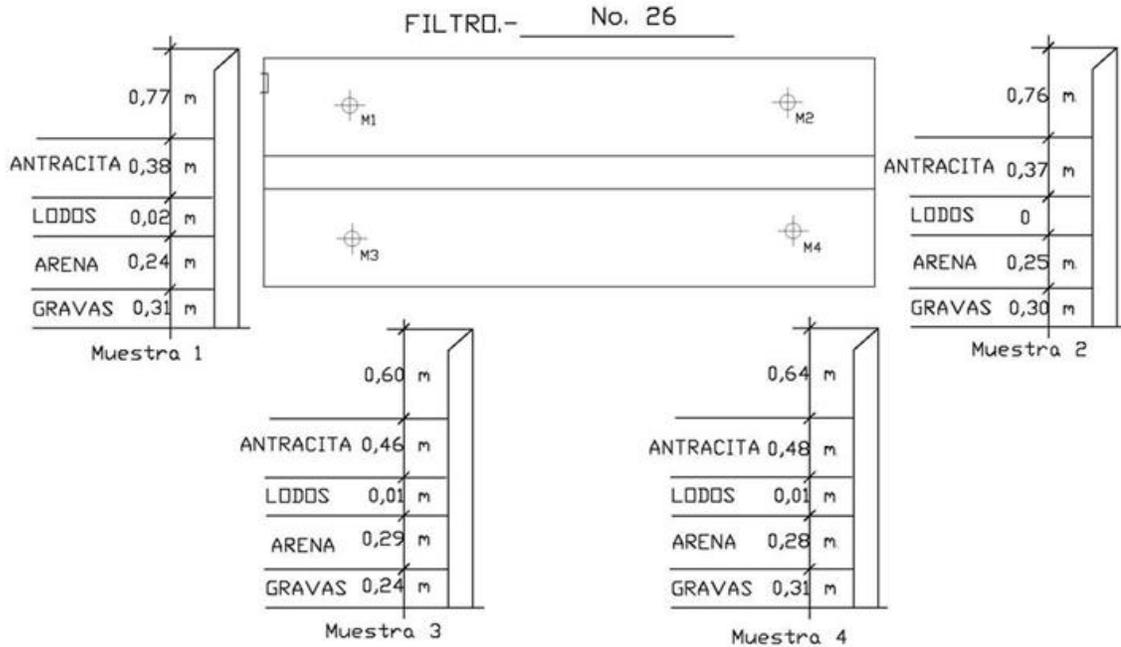


Figura No. 20. Espesores de los lechos filtrantes en el filtro 23.

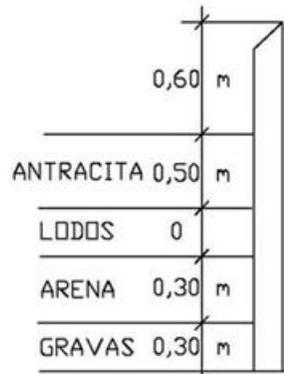
### 3.2.1.5 Resultados obtenidos de los espesores del filtro 26

El estudio del filtro 26 presentó resultados muy similares al resto de los filtros. En este también se detectó la interfase arcillosa con lodos entre la arena y la antracita, con espesores entre 0,01 m y 0,02 m y el espesor de la antracita menor al especificado en el diseño (0,50 m) lo que indica que en este filtro, en una de las camas se tiene pérdida de antracita, como se puede observar en la Figura No. 21.



**Figura No. 21.** Distintos espesores de los lechos filtrantes en el filtro 26.

Para obtener conclusiones con respecto a los distintos espesores de los lechos filtrantes, es necesario comparar dichos resultados con los espesores de diseño que se indican en la Figura No. 22.



**Figura No. 22.** Espesor de diseño para los lechos filtrantes.

Comparando los espesores de cada lecho filtrante en los filtros estudiados, con respecto a los espesores de diseño, se observó que estos filtros no muestran la

eficiencia de filtración esperada por el diseño, en virtud de que los espesores del material filtrante son menores que los especificados en el diseño, que presentan interfases de material arcilloso (lodos) entre la arena y la antracita. Se observó pérdida significativa de antracita, que en ocasiones fue hasta del 50 %, en algunas de las camas de los filtros estudiados.

La irregularidad en los espesores de los materiales filtrantes, la rotura de partes del falso fondo, las deficiencias en el control del retrolavado, la falta de aplicación de aire al inicio del retrolavado y la abundancia de algas, son factores que dificultan la buena operación de los filtros, entre otras causas.

### **3.2.2 Porcentaje de las bolas de lodos**

Una evidencia significativa del mal funcionamiento de un filtro rápido a gravedad de flujo descendente lo constituye la presencia de bolas de lodo, generalmente formadas por materiales arcillosos, partículas de arena, de antracita y de materia orgánica.

En todos los filtros estudiados se detectó una gran cantidad de bolas de lodo de diferentes tamaños; algunas de unos cuantos milímetros de diámetro y otras hasta de 0,15 m de diámetro, a las bolas más grandes se les sometió a un corte transversal y en su interior se encontró materia orgánica en descomposición, según se puede observar en la Figura No. 23, percibiéndose olor característico a materia orgánica en descomposición.



a) Colecta manual de bolas de lodos.



b) Corte transversal de una bola de lodos.

**Figura No. 23.** Colecta manual de las bolas de lodos y corte transversal de una bola.

La determinación del porcentaje de bolas de lodos se realizó en los filtros 16 y 23, obteniéndose valores de 14,97 % y 19,24 %, respectivamente. Las determinaciones se realizaron en el Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil y los resultados permiten clasificar al medio filtrante como condición de muy malo, de acuerdo con CEPIS (1992).

En la Tabla No. 6 se indica la clasificación de los filtros, según el porcentaje de bolas de lodos.

**Tabla No. 6.** Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de lodos.

% Volumen de bolas de lodo	Condiciones del medio filtrante
0,0 – 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

Fuente: Filtración Rápida, Manual IV Evaluación CEPIS (1992).

En la Figura No. 24 se observa parte del procedimiento para la determinación de bolas de lodos en el laboratorio.



a) Probeta graduada para medir el volumen de bolas de lodos.



b) Separación de las bolas de lodos.

**Figura No. 24.** Determinación de las bolas de lodos en el laboratorio.

### 3.2.3 Granulometría

Las pruebas para la determinación de la granulometría de la arena y la antracita se realizaron en las instalaciones del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Ambiental, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la UANL, y en la Figura No. 25 se observan algunos pasos de estas pruebas.



a) Proceso de cuarteo del material filtrante.



b) Tamizado, del material filtrante con equipo Ro-Tap.

**Figura No. 25.** Determinación de la granulometría.

Las pruebas de granulometría de la arena y la antracita se realizaron por triplicado en cada uno de los filtros y en la Tabla No. 7 se indican los valores promedio del Coeficiente de Uniformidad (Cu) y del Tamaño Efectivo (Te).

**Tabla No. 7.** Valores promedio de Coeficiente de Uniformidad y Tamaño Efectivo.

Filtro No.	Granulometría de la Arena		Granulometría de la Antracita	
	Coeficiente de Uniformidad (Cu)	Tamaño Efectivo (Te) mm	Coeficiente de Uniformidad (Cu)	Tamaño Efectivo (Te) mm
9	1,55	0,66	1,68	0,84
10	1,55	0,64	1,70	0,80
19	1,75	0,64	1,54	0,96
26	1,72	0,64	1,63	0,92

Para fines de comparación y clasificación de los materiales filtrantes, en la Tabla No. 8 se observan los valores del Coeficiente de Uniformidad y del Tamaño Efectivo recomendados en las especificaciones para medios filtrantes, como la arena y la antracita.

**Tabla No. 8.** Características del medio filtrante

Medio Filtrante	Coeficiente de Uniformidad (Cu)	Tamaño Efectivo (Te) mm
Arena	1,35	0,65
Antracita	1,55	1,05

Fuente: Datos para diseño de los filtros en la Planta Potabilizadora.

En este trabajo se tomaron las especificaciones de la AWWA (1966) para la clasificación de la arena, la cual indica que un Tamaño Efectivo mayor que 0,55 mm corresponde a una **Arena Gruesa**.

Para la clasificación de la granulometría de la antracita, se tomó como referencia un Tamaño Efectivo de 1,05 mm, tamaño recomendado por las especificaciones del diseño de los filtros estudiados, en esta Planta.

### 3.2.4 Resultados del análisis granulométrico de arena y antracita

En los filtros 9, 10, 19 y 26, seleccionados para la determinación de la granulometría de la arena y la antracita, se encontraron resultados que se muestran en las tablas y gráficas que a continuación se presentan.

De acuerdo con la gráfica de la Figura No. 26, elaborada con los datos de la Tabla No.9, se observa que la arena analizada de este filtro se clasifica como **Arena Gruesa**, debido a que el Tamaño Efectivo es mayor que 0,55 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios del AWWA (1966).

**Tabla No. 9.** Granulometría de la arena filtro 9.

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
10	2,00	3	0,9	0,9	99,1
12	1,65	3,4	1	1,9	98,1
16	1,18	24,4	6,9	8,8	91,2
20	0,84	248,5	70	78,8	21,2
30	0,59	72,1	20,3	99,1	0,9
40	0,42	2,5	0,7	99,8	0,2
50	0,30	0,3	0,08	99,88	0,12
70	0,21	0,2	0,06	99,94	0,06
P - 70	--	0,2	0,06	100	0
		354,6	100		

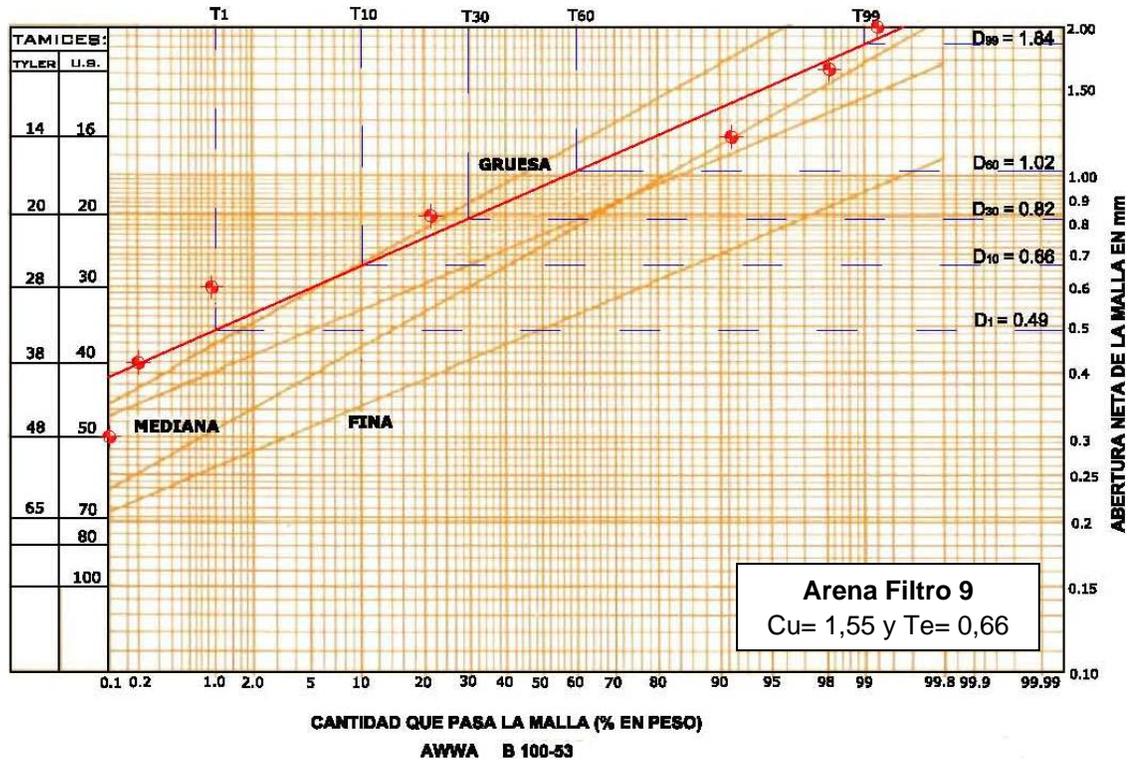


Figura No. 26. Gráfica de la arena del filtro 9.

La arena del filtro 10 se clasifica como **Arena Gruesa**, por tener un Tamaño Efectivo mayor que 0,55 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios del AWWA (1966), lo cual se puede observar en la Tabla No. 10 y la Figura No. 27.

Tabla No. 10. Granulometría de la arena filtro 10.

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
10	2,00	1,8	0,5	0,5	99,5
12	1,65	2,2	0,6	1,1	98,9
16	1,18	15,8	4,3	5,4	94,6
20	0,84	233,9	63,7	69,1	30,9
30	0,59	107,8	29,3	98,4	1,6
40	0,42	5,3	1,4	99,8	0,2
50	0,30	0,2	0,06	99,86	0,14
70	0,21	0,3	0,10	99,96	0,04
P - 70	--	0,1	0,04	100	0
		367,4	100		

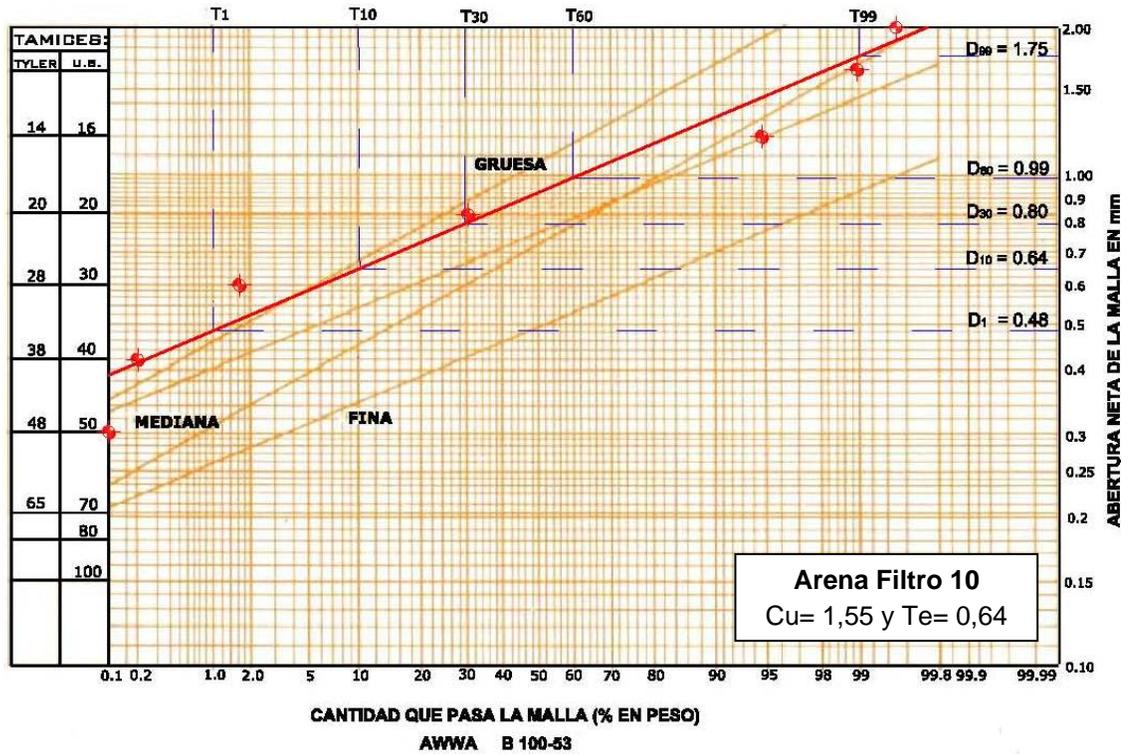


Figura No. 27. Gráfica de la arena del filtro 10.

La arena del filtro 19 se clasifica como **Arena Gruesa**, por tener un Tamaño Efectivo mayor que 0,55 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios del AWWA (1966), lo cual se puede observar en la Tabla No. 11 y la Figura No. 28.

Tabla No. 11. Granulometría de la arena filtro 19

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
10	2,00	19,5	5,1	5,1	94,9
12	1,65	5,8	1,5	6,6	93,4
16	1,18	26,6	7	13,6	86,4
20	0,84	230,4	60,4	74	26
30	0,59	96,9	25,4	99,4	0,6
40	0,42	1,8	0,5	99,9	0,1
50	0,30	0,3	0,06	99,96	0,04
70	0,21	0,1	0,02	99,98	0,02
P - 70	--	0,1	0,02	100	0
		381,5	100		

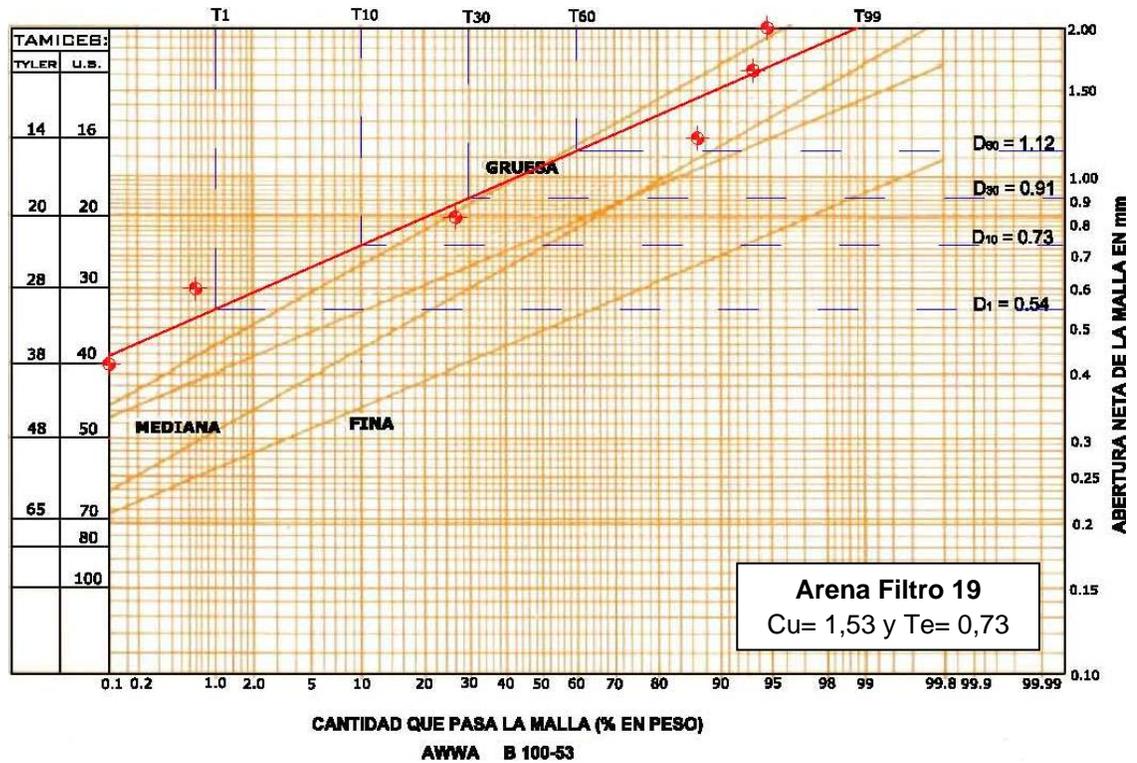


Figura No. 28. Gráfica de la arena del filtro 19.

La arena del filtro 26 se clasifica como **Arena Gruesa**, por tener un Tamaño Efectivo mayor que 0,55 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios del AWWA (1966), lo cual se puede observar en la Tabla No. 12 y la Figura No. 29.

Tabla No. 12. Granulometría de la arena filtro 26

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
10	2,00	16	3,6	3,6	96,4
12	1,65	3,8	0,8	4,4	95,6
16	1,18	33,8	7,6	12	88
20	0,84	269,1	60,8	72,8	27,2
30	0,59	112,9	25,5	98,3	1,7
40	0,42	6,4	1,5	99,8	0,2
50	0,30	0,6	0,13	99,93	0,07
70	0,21	0,2	0,05	99,98	0,02
P - 70	--	0,1	0,02	100	0
		442,9	100		

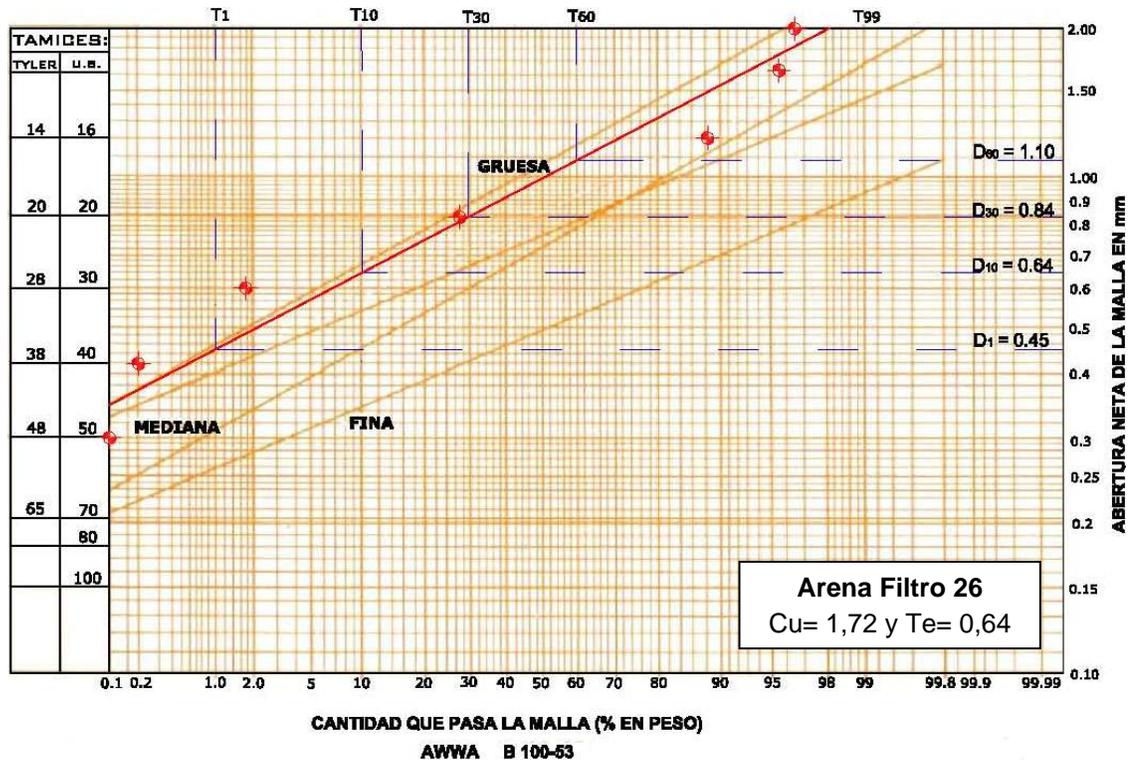
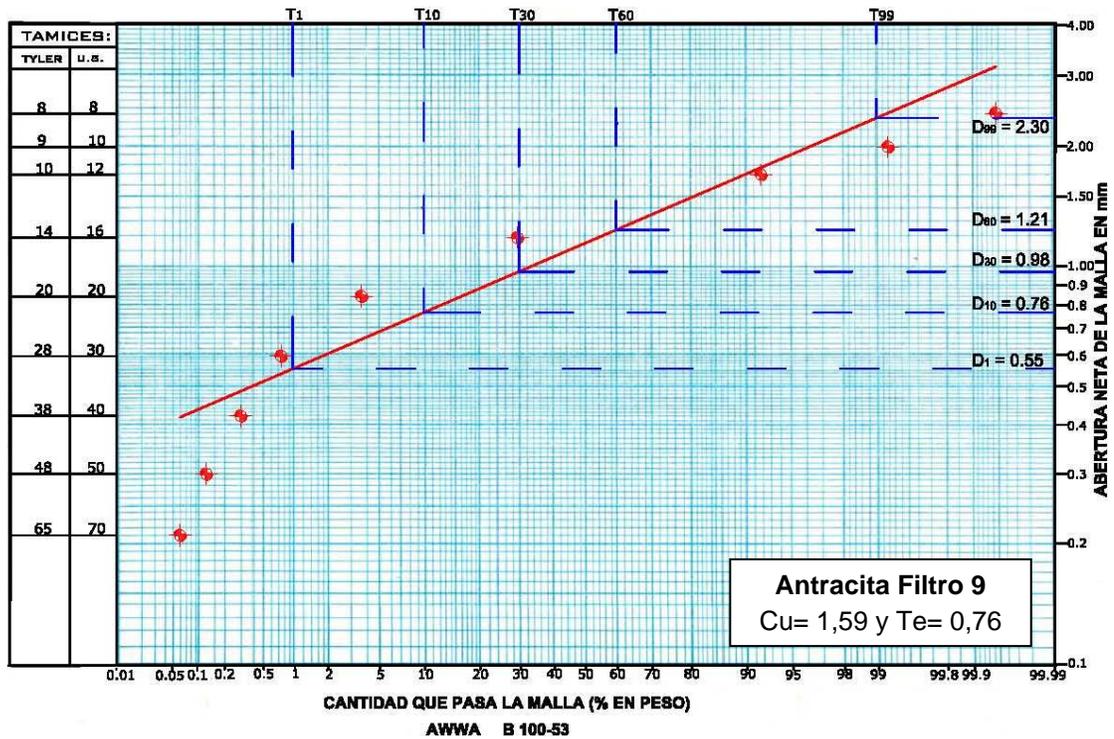


Figura No. 29. Gráfica de la arena del filtro 26.

La antracita del filtro 9 se clasifica como **Antracita Fina**, debido a que su Tamaño Efectivo es menor que 1,05 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios de diseño, lo cual se puede observar en la Tabla No. 13 y la Figura No. 30.

**Tabla No. 13.** Granulometría de la antracita filtro 9

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,76	0,1	0,03	0,03	99,97
8	2,38	0,1	0,03	0,06	99,94
10	2,00	2,6	0,8	0,86	99,14
12	1,65	24,9	7,6	8,46	91,54
16	1,18	201,7	61,7	70,16	29,84
20	0,84	85,1	26	96,16	3,84
30	0,59	10,1	3,1	99,26	0,74
40	0,42	1,4	0,44	99,7	0,3
50	0,30	0,5	0,15	99,85	0,15
70	0,21	0,3	0,09	99,94	0,06
P - 70	--	0,2	0,06	100	0
		327	100		



**Figura No. 30.** Gráfica de la antracita del filtro 9.

La antracita del filtro 10 se clasifica como **Antracita Fina**, debido a que su Tamaño Efectivo es menor que 1,05 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios de diseño, lo cual se puede observar en la Tabla No. 14 y la Figura No. 31.

Tabla No. 14. Granulometría de la antracita filtro 10

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,76	0	0	0	100
8	2,38	1,1	0,4	0,4	99,6
10	2,00	4,3	1,5	1,9	98,1
12	1,65	18,2	6,3	8,2	91,8
16	1,18	163	56,2	64,4	35,6
20	0,84	82,8	28,5	92,9	7,1
30	0,59	11,7	4	96,9	3,1
40	0,42	4,7	1,6	98,5	1,5
50	0,30	2,2	0,8	99,3	0,7
70	0,21	1,6	0,6	99,9	0,1
P - 70	--	0,3	0,1	100	0
		289,9	100		

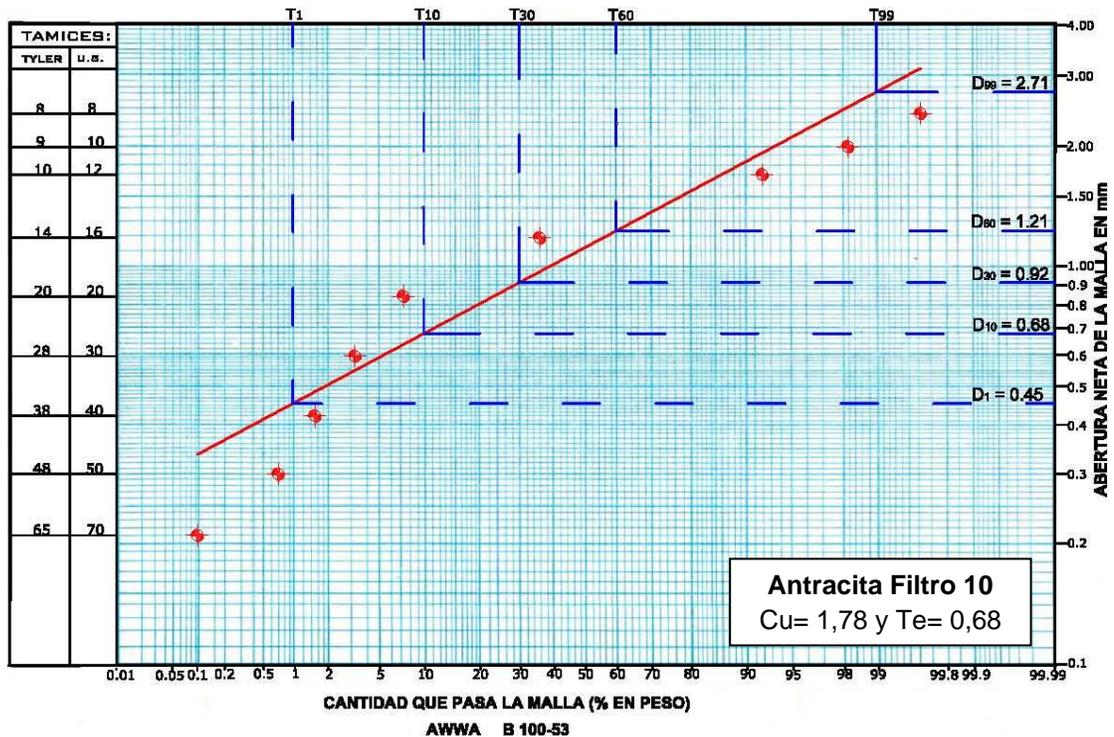


Figura No. 31. Gráfica de la antracita del filtro 10.

La antracita del filtro 19 se clasifica como **Antracita Fina**, debido a que su Tamaño Efectivo es menor que 1,05 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios de diseño, lo cual se puede observar en la Tabla No. 15 y la Figura No. 32.

Tabla No. 15. Granulometría de la antracita filtro 19

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,76	10	3,2	3,2	96,8
8	2,38	6,9	2,2	5,4	94,6
10	2,00	5,4	1,7	7,1	92,9
12	1,65	50,3	16,1	23,2	76,8
16	1,18	177,9	57	80,2	19,8
20	0,84	53,5	17,1	97,3	2,7
30	0,59	5,9	1,9	99,2	0,8
40	0,42	1,7	0,5	99,7	0,3
50	0,30	0,4	0,13	99,83	0,17
70	0,21	0,3	0,10	99,93	0,07
P - 70	--	0,2	0,7	100	0
		312,5	100		

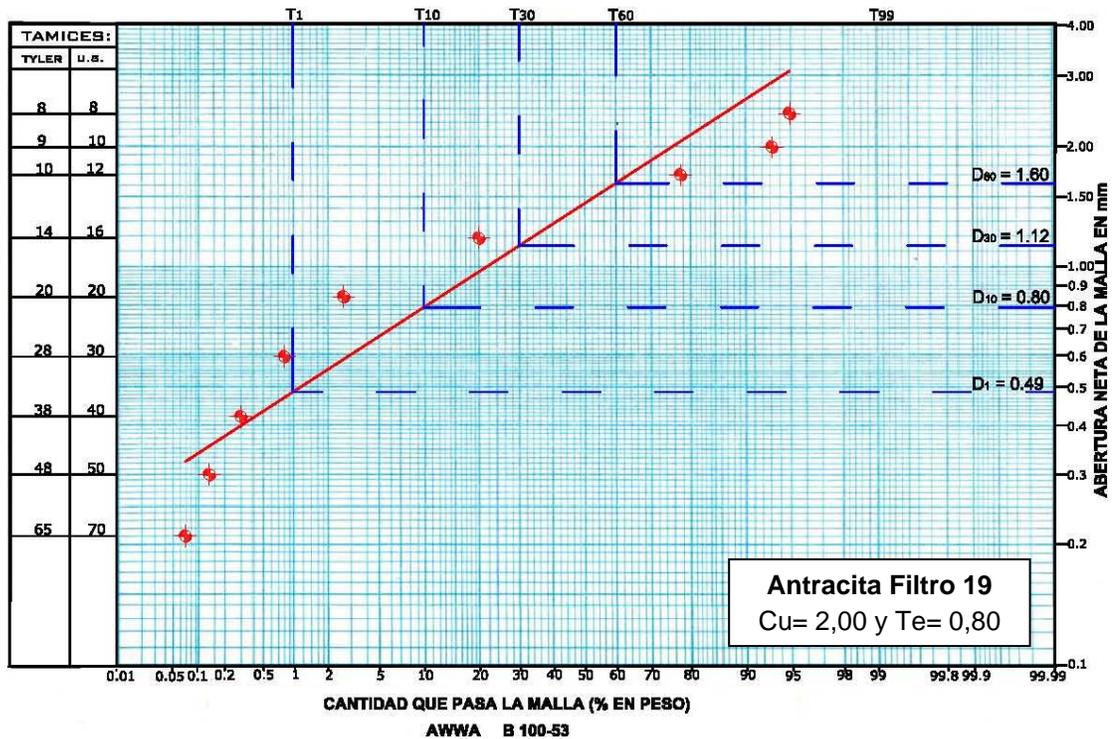
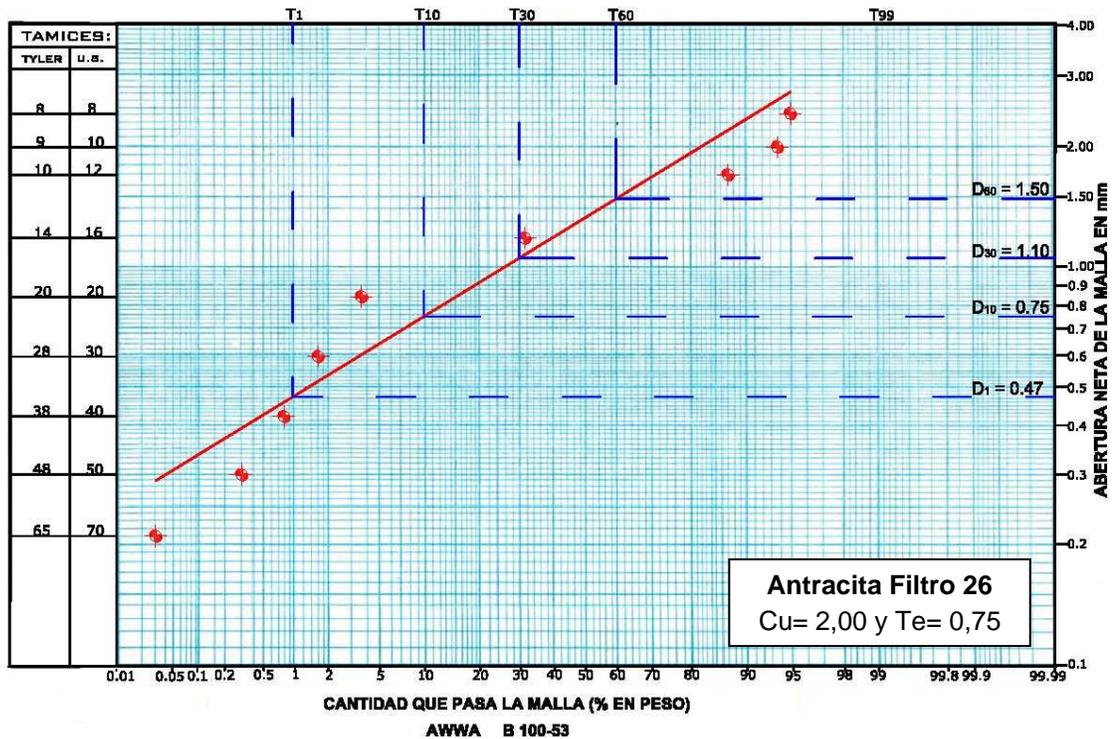


Figura No. 32. Gráfica de la antracita del filtro 19.

La antracita del filtro 26 se clasifica como **Antracita Fina**, debido a que su Tamaño Efectivo es menor que 1,05 mm y se clasifica como mal graduada, según los criterios de diseño, lo cual se puede observar en la Tabla No. 16 y la Figura No. 33.

**Tabla No. 16.** Granulometría de la antracita filtro 26.

Malla No.	Abertura mm	Granos Retenidos	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,76	8,6	2,9	2,9	97,1
8	2,38	7,7	2,6	5,5	94,5
10	2,00	3,6	1,2	6,7	93,3
12	1,65	19,2	6,4	13,1	86,9
16	1,18	166,8	55,9	69	31
20	0,84	78	26,2	95,2	4,8
30	0,59	9	3	98,2	1,8
40	0,42	3,1	1	99,2	0,8
50	0,30	1,6	0,5	99,7	0,3
70	0,21	0,8	0,27	99,97	0,03
P - 70	--	0,1	0,03	100	0
		298,5	100		



**Figura No. 33.** Gráfica de la antracita del filtro 26.

### 3.2.5 Corrección de los medios filtrantes en la Planta

De acuerdo con los resultados obtenidos en la determinación de las granulometrías de la arena y de la antracita, se consideró conveniente realizar cálculos de corrección granulométrica, considerando los datos de diseño con respecto a los espesores de cada lecho filtrante y su densidad. En este caso de estudio se procedió a calcular la granulometría corregida en el filtro 9, procedimiento que deberá seguirse en cada uno de los filtros que presente deficiencias granulométricas en los medios filtrantes.

#### 3.2.5.1 Granulometría corregida del filtro 9

##### 3.2.5.1.1 Corrección de la Arena

##### Volumen de arena, localizado en la Planta

Espesor del lecho de arena: 0,25 m

Área de filtración: 102 m<sup>2</sup>

Volumen de arena: 0,25 m \* 102 m<sup>2</sup> = 25,5 m<sup>3</sup>

##### Peso de la arena en el filtro

Densidad \* Volumen= 2 600 kg/m<sup>3</sup> \* 25,5 m<sup>3</sup> = 66 300 kg

En la Tabla No. 17 se indican los valores corregidos de la arena correspondientes a las mallas 12, 16, 20 y 30, valores necesarios para lograr la curva granulométrica deseada, pudiendo en ocasiones utilizarse el material disponible en los filtros previo lavado y cribado, con la adición o el retiro de los tamaños que estén fuera de las especificaciones.

**Tabla No. 17.** Corrección de la arena en el filtro 9.

Malla No.	% Retenido	Arena (kg)		Corrección	
		Actual	Corregida	kg	m <sup>3</sup>
10	0,9	596,7	-	- 596,7	- 0,23
12	1	663	6,63	- 656,37	- 0,25
16	6,9	4 574,7	1 982,37	- 2 592,33	- 1
20	70	46 410	31 161	- 15 249,5	- 5,87
30	20,3	13 458,9	30 498	+ 17 194,4	+ 6,61
40	0,7	464,1	-	- 464,1	- 0,18
50	0,08	53,04	-	- 53,04	- 0,02
70	0,06	39,78	-	- 39,78	- 0,02
P - 70	0,06	39,78	-	- 39,78	- 0,02

### 3.2.5.1.2 Corrección de la antracita

#### Volumen de antracita, localizado en la planta

Espesor del lecho de antracita: 0,50 m

Área de filtración: 102 m<sup>2</sup>

Volumen de antracita: 0,50 m \* 102 m<sup>2</sup> = 51 m<sup>3</sup>

#### Peso de la antracita en el filtro

Densidad \* Volumen = 1 550 kg/m<sup>3</sup> \* 51 m<sup>3</sup> = 79 050 kg

En la Tabla No. 18 se indican los valores corregidos de la antracita correspondientes a las mallas 8, 10, 12, 16, 20 y 30, valores necesarios para lograr la curva granulométrica deseada. La corrección de la antracita que se tiene que realizar en el filtro, para conseguir que este material cumpla la granulometría especificada en el diseño del filtro, pudiendo utilizarse la antracita existente, previo lavado y descartando los tamaños de este material que no cumplan los tamaños necesarios.

**Tabla No. 18.** Corrección de la antracita en el filtro 9

Malla No.	% Retenido	Antracita (kg)		Corrección	
		Actual	kg	kg	m <sup>3</sup>
4	0,03	23,72	-	- 23,72	- 0,02
8	0,03	23,72	4 347,75	+ 4 324,03	+ 2,79
10	0,8	632,4	8 300,25	+ 7 667,85	+ 4,95
12	7,6	6 007,8	15 810	+ 9 802,2	+ 6,34
16	61,7	48 773,85	36 363	- 12 410,85	- 8,01
20	26	20 553	13 596,6	- 6 956,4	- 4,49
30	3,1	2 450,55	592,88	- 1 857,67	- 1,20
40	0,44	347,82	-	- 347,82	- 0,22
50	0,15	118,58	-	- 118,58	- 0,08
70	0,09	71,15	-	- 71,15	- 0,05
P - 70	0,06	47,43	-	- 47,43	- 0,03

### 3.3 Diseño, construcción y operación del filtro piloto

#### 3.3.1 Diseño y construcción del filtro piloto

El diseño del filtro piloto se realizó a escala, con los datos de diseño original de la Planta Potabilizadora. Los datos fueron proporcionados por el personal operativo de la Empresa Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Datos tomados del diseño original de la Planta Potabilizadora:

- a) 36 unidades de filtración.
- b) Gasto de diseño por unidad de filtración = 333 L/s.
- c) Área de cada filtro = 10 m<sup>2</sup>.
- d) Velocidad de filtración media = 283 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d.
- e) Flujo de retrolavado = 830 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d.
- f) Velocidad del aire de retrolavado = 1 300 m<sup>3</sup> m<sup>2</sup>/d.
- g) Carrera media de filtración = 36 h.
- h) Tiempo de lavado = 15 min.

- i) Gasto de lavado = 1 m<sup>3</sup>/s.

En la Tabla No. 19 se mencionan las características de los medios filtrantes recomendados en el diseño de las mismas.

**Tabla No. 19.** Características de los medios filtrantes.

ARENA		ANTRACITA	
Diámetro efectivo	0,65 mm	Diámetro efectivo	1,05 mm
Coefficiente de uniformidad	1,35	Coefficiente de uniformidad	1,55
Peso específico	2,6	Peso específico	1,55
Espesor del lecho	0,25 m	Espesor del lecho	0,50 m

Con los datos de diseño se dimensionó un modelo de filtro piloto, ajustando los datos al diámetro del tubo de acrílico transparente de 5,5". La altura del filtro se decidió de suficiente altura, tomando en cuenta el porcentaje de expansión de los lechos filtrantes, para evitar pérdida de material, especialmente de antracita, durante el proceso de retrolavado.

Se determinaron los rangos de flujos de aire requeridos para el proceso, así como también se determinaron los tiempos de aplicación de aire y de agua para el retrolavado.

En la Tabla No. 20, se muestran los datos obtenidos para el dimensionamiento del filtro piloto, referidos a los datos originales de diseño de los filtros de la Planta Potabilizadora.

**Tabla No. 20.** Rangos de flujo de aire para retrolavado de filtro

m/min	L/min para columna de 5,5 " de diámetro
0,3	4,596
0,5	7,66
0,6	9,193
0,7	10,73
0,9	13,79
1,2	18,40
1,5	23,02

Para aplicar el aire a la columna de filtración se instaló un compresor conectado a las tuberías de PVC de ½", que suministrarían el aire por la parte inferior de la columna, y para controlar el flujo se instaló un rotámetro en la tubería mencionada. El tiempo de aplicación de aire de acuerdo con las especificaciones de diseño, fue entre uno y tres minutos, según los datos de diseño de los filtros de la Planta Potabilizadora.

En la Tabla No. 21 se indican los gastos de diseño en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, tanto para la filtración como para el retrolavado, información utilizada para escalarla a la columna de filtración de 5,5" de diámetro.

**Tabla No. 21.** Flujos de agua requeridos en el retrolavado del filtro piloto.

	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	L/s en tubo de acrílico de 5,5"
FILTRACIÓN	240	0,21
	360	0,044
	480	0,0849
	580	0,1025
RETROLAVADO	792	0,1412
	864	0,1533
	1 080	0,192
	1 296	0,230
	1 440	0,256

El flujo máximo para retrolavado recomendado por los diseñadores de los filtros de la Planta Potabilizadora fue de  $1\ 440\ \text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , correspondiendo dicho valor a  $0,256\ \text{L/s}$ . Con el flujo mencionado se logra una expansión máxima de los medios filtrantes del  $70\ \%$  utilizándose dicho valor para definir la distancia entre la parte superior de la antracita y el bordo libre del canal colector de agua de lavado.

Para el suministro de agua de lavado a la columna de filtración se instaló y operó un equipo de bombeo, con una compresión de descarga de  $0,5\ \text{kg}/\text{cm}^2$ , pues de acuerdo con los datos de diseño, el proceso de retrolavado debe oscilar entre  $10\ \text{min}$  y  $15\ \text{min}$ , ya que tiempos mayores ocasionan fallas en el proceso, principalmente en la distribución de los materiales filtrantes durante este proceso. El gasto suministrado por la bomba se conducía por tuberías de  $\frac{3}{4}\ \text{''}$  controlándose mediante un rotámetro.

### **3.3.2 Operación del filtro piloto**

#### **3.3.2.1 Medición de la expansión de los medios filtrantes**

El retrolavado de los filtros tiene por objeto la remoción de material particulado retenido en los lechos filtrantes, debiendo poner especial atención en esta maniobra para evitar la pérdida de material filtrante, sobre todo cuando uno de éstos es antracita.

Los valores de expansión observados en este trabajo se muestran en la Tabla No. 22, observándose que los valores de expansión aumentaban conforme se incrementaba el gasto de lavado con agua, fenómeno observado en todos los filtros estudiados.

**Tabla No. 22.** Gasto y porcentaje de expansión del medio filtrante.

<b>Gasto (L/min)</b>	<b>Filtro</b>	<b>Expansión (m)</b>
<b>9,20</b>	10	0,11
	26	0,14
	9	0,155
	19	0,14
<b>11,50</b>	10	0,20
	26	0,17
	9	0,19
	19	0,19
<b>13,80</b>	10	0,22
	26	0,23
	9	0,24
	19	0,225

Durante la aplicación del agua de retrolavado se observó que cuando este proceso no se realizaba lentamente, los lechos filtrantes ascendían en forma de pistón y no se lograba agitación entre las partículas, lo que ocasionaba que no se removieran las bolas de lodos entremezcladas en los lechos filtrantes, formándose además canales de circulación de agua entre las paredes de la columna y del material filtrante.

Al aumentar el gasto se observaba que el arrastre de las bolas de lodo y el material arcilloso era mayor; observándose, además, la formación de capas de arcilla intermedias (lodos): una entre la grava y la arena y otra entre la arena y la antracita; y sobre ésta última se formaron depósitos de bolas de lodos de diversos tamaños difíciles de remover, como se puede observar en la Figura No. 34.



a) Bolos de lodos entre la arena y la antracita.



b) Bolos de lodos sobre la antracita.

**Figura No. 34.** Presencia de bolas de lodos en el filtro piloto.

### 3.3.2.2 Medición de la turbiedad en el agua de retrolavado

Para la medición de la turbiedad se procedió a tomar muestras de agua de retrolavado, a intervalos de un minuto, durante veinte minutos. Cada una de esta muestra se tomó en un frasco de plástico, y al finalizar la toma de las veinte muestras se remitieron éstas debidamente identificadas, al Laboratorio Central de los Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), cuyo laboratorio está acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

En la Figura No. 35 se observan los frascos que contienen las muestras y la determinación de turbiedad.



a) Determinación de turbiedad.



b) Frascos que contienen las muestras.

**Figura No. 35.** Determinación de la turbiedad en el laboratorio.

La determinación de turbiedad se realizó durante el proceso de retrolavado, en los filtros 9, 10, 19 y 26 y los valores de turbiedad obtenidos se muestran en las Tablas No. 23, 24, 25 y 26. Con los valores obtenidos se elaboraron las curvas de valores de turbiedad contra tiempo en minutos y en el punto donde la curva tiende a ser asintótica con respecto al eje horizontal, se determina el tiempo considerado como tiempo óptimo de lavado. Éste osciló entre los 9 y los 10 minutos, en los cuatro filtros analizados (Tabla No. 27) y se observa en las Figuras No. 36, 37, 38 y 39.

**Tabla No. 23.** Datos de la turbiedad en el filtro 9.

<b>Filtro 9, Gasto 13,8 L/min</b>	
<b>Laboratorio SADM</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Turbiedad (UTN)</b>
1	994,5
2	176,5
3	55,0
4	42,9
5	36,7
6	33,0
7	28,9
8	26,6
9	23,7
10	23,8
11	21,2
12	19,9
13	19,3
14	17,7
15	17,9
16	15,7
17	15,1
18	14,7
19	14,4
20	13,2

**Tabla No. 24.** Datos de la turbiedad en el filtro 10.

<b>Filtro 10, Gasto 11,5 L/min</b>	
<b>Laboratorio SADM</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Turbiedad (UTN)</b>
1	5 389
2	998
3	172
4	71,1
5	43,2
6	29,5
7	25,3
8	22,0
9	19,4
10	17,9
11	17,35
12	15,5
13	13,8
14	13,6
15	13,6
16	12,2
17	12,3
18	10,9
19	11,4
20	10,5

**Tabla No. 25.** Datos de la turbiedad en el filtro 19

<b>Filtro 19, Gasto 9,20 L/min</b>	
<b>Laboratorio SADM</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Turbiedad (UTN)</b>
1	2 719
2	272
3	117
4	28,1
5	20,1
6	15,2
7	11,4
8	15,2
9	11,8
10	10,9
11	9,8
12	7,11
13	6,63
14	6,77
15	8,78
16	7,28
17	7,18
18	8,19
19	4,71
20	4,85

**Tabla No. 26.** Datos de la turbiedad en el filtro 26

<b>Filtro 26, Gasto 11,5 L/min</b>	
<b>Laboratorio SADM</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Turbiedad (UTN)</b>
1	3 888
2	678
3	155
4	65,6
5	40,5
6	29,4
7	26,1
8	22,7
9	21,9
10	19,2
11	17,9
12	16,4
13	17,9
14	15,5
15	13,8
16	13,2
17	11,8
18	12,2
19	11,1
20	11,3

**Tabla No. 27.** Tiempo óptimo de lavado.

<b>Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey</b>	
<b>Filtro</b>	<b>Tiempo Óptimo de lavado (min)</b>
9	10
10	10
19	9
26	9

La turbiedad residual que queda en el filtro al suspender el flujo ascendente no parece tener relación directa con la calidad del agua en el efluente, cuando se inicia de nuevo la operación de filtración (Arboleda, 1981).

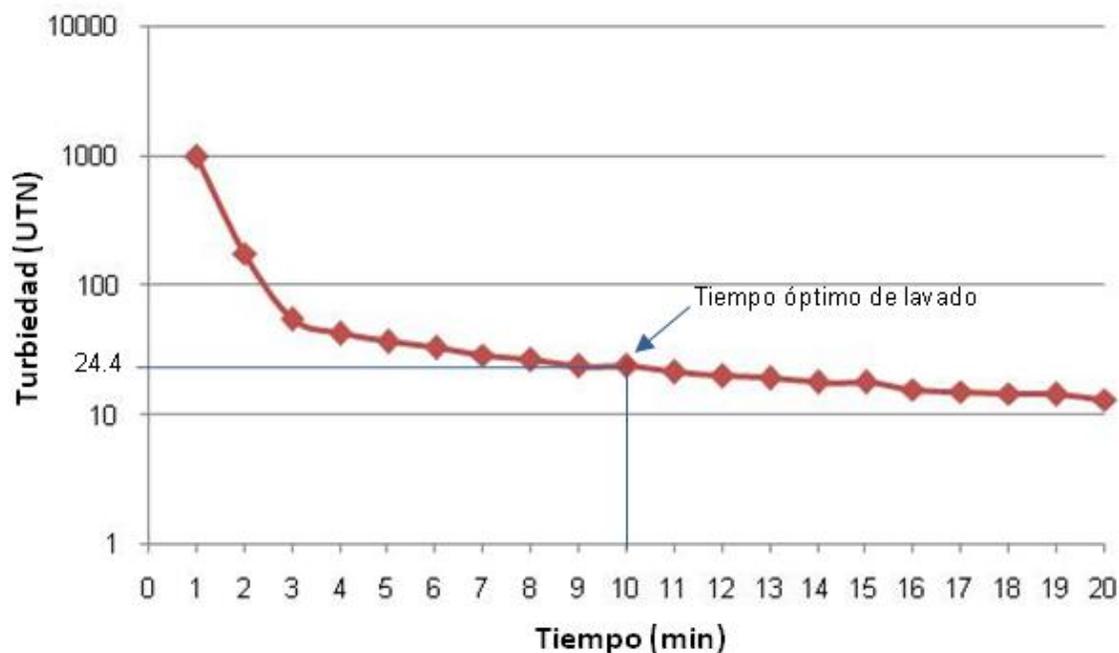


Figura No. 36. Tiempo óptimo de lavado del filtro 9.

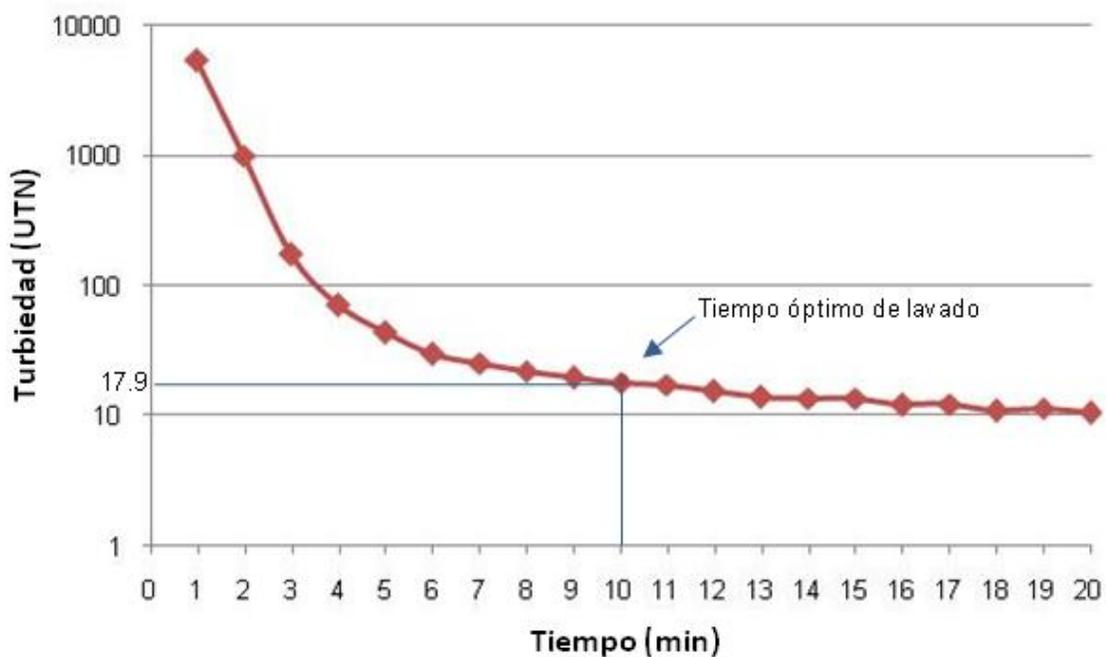


Figura No. 37. Tiempo óptimo de lavado del filtro 10.

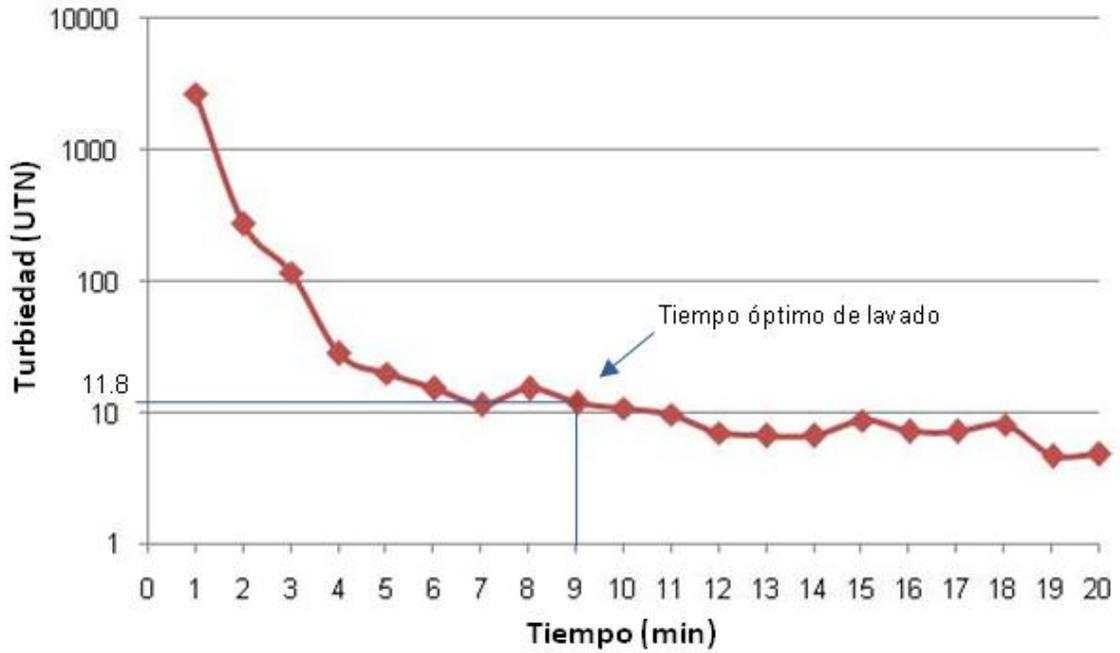


Figura No. 38. Tiempo óptimo de lavado del filtro 19.

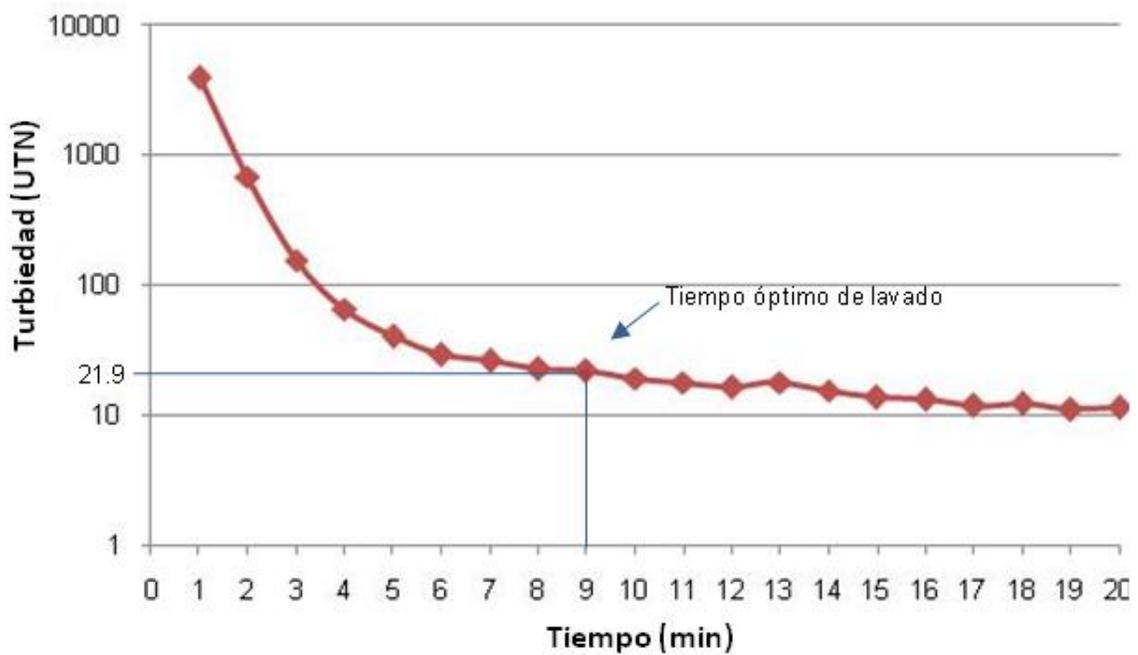


Figura No. 39. Tiempo óptimo de lavado del filtro 26.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- a) El diseño, la construcción y operación del filtro piloto propuesto en este trabajo sirvió para visualizar la formación de bolas de lodos, el comportamiento de los medios filtrantes en el interior de la columna de filtración y los efectos de movilidad de los lechos filtrantes, cuando se aplicaba aire antes de iniciar el retrolavado y cuando se aplicaba agua.
- b) La determinación del tiempo óptimo de lavado en el filtro piloto resultó estar dentro de los tiempos óptimos de lavado, lo que indica que cuando existe un buen control en este proceso se obtienen estos valores; lo que en la práctica, en la Planta Potabilizadora, los tiempos de lavado se determinaban a juicio del operador y en la mayoría de los casos de hasta veinte minutos.
- c) La aplicación de aire previo al retrolavado con agua favorece la remoción de material retenido en el medio filtrante, ya que la agitación entre las partículas del material filtrante ayuda a desmenuzar el material retenido y facilita su arrastre por el agua de lavado, con lo que se logra la minimización en el volumen final de agua requerido para el retrolavado.

- d) La operación real de los filtros, en general, se hace de acuerdo con la experiencia de los operadores; sin embargo, se detectaron áreas de oportunidad para la capacitación de éstos y para mejorar el mantenimiento general de la Planta Potabilizadora, con especial atención en aquellas partes del proceso que tengan influencia sobre el proceso de filtración.
  
- e) Se detectaron deficiencias significativas en el control de la operación general de la Planta Potabilizadora, destacándose como oportunidad de mejora el acondicionamiento general de las tuberías y boquillas de dosificación de los productos químicos y de los dispositivos dosificadores.
  
- f) Se presupone que la abundancia de algas, sedimentos y materiales arcillosos, en su mayoría, provienen del agua suministrada a través del acueducto procedente de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca), debido a que la obra de toma ubicada en la Presa arrastra sedimentos que a veces hasta presentan mal olor, según dijeron los operadores.
  
- g) La formación de canales en los lechos filtrantes durante el proceso de lavado en los filtros observados fue causada por roturas en el falso fondo.
  
- h) La falta de control en la velocidad y el gasto de lavado ocasionó pérdida de material filtrante; especialmente de antracita, ocasionando, además, la mezcla entre la antracita y la arena.
  
- i) No se encontraron evidencias sobre el control de los espesores de los materiales filtrantes y de la granulometría de los mismos.

- j) No se encontró documentación o información relativa a las pruebas periódicas a las que se deben someter los filtros, tales como: topografía de las superficies de los lechos filtrantes, granulometría de cada uno de ellos, espesores de los mismos, determinación de bolas de lodos, porcentaje de expansión y características físicas y químicas de los materiales filtrantes.
  
- k) No se encontraron evidencias de la existencia de una bitácora de control de operación general de la Planta Potabilizadora o una bitácora específica para el proceso de filtración.
  
- l) En las pruebas de expansión de los medios filtrantes se encontraron valores entre 11 y 24 cm, siendo aceptables estos valores debido a que la expansión máxima permisible, antes de perder material filtrante por retrolavado con agua en los filtros, es de 60 cm.

## 4.2 Recomendaciones

- a) Revisar la altura de las compuertas de la obra de toma de la Presa Rodrigo Gómez (La Boca) ya que es posible que se arrastren sedimentos y abundancia de algas, lo que es probable que sea una razón para la abundancia de sedimento en el tanque de recepción de agua cruda en la Planta Potabilizadora.
  
- b) Efectuar una limpieza periódica cada vez que se aprecien sedimentos en el tanque de agua cruda y evitar el crecimiento de malezas en el mismo.
  
- c) Revisar el sistema de aplicación de los coagulantes, ya que se tenían deficiencias

en la dosificación de los mismos y no se realizaba de manera uniforme en todos los canales alimentadores de los filtros.

- d) Efectuar una revisión exhaustiva de las todas las maniobras de operación del proceso de filtración y disponer de un manual de operación de los filtros.
- e) Programar evaluaciones periódicas (cada 6 meses) de cada uno de los 36 filtros. Se deberán realizar mediciones de topografía de los lechos filtrantes, de los espesores de los mismos, de la granulometría, de la expansión de los lechos filtrantes, la determinación del tiempo de lavado, de las bolas de lodos, del estado del falso fondo, y de la medición del gasto de agua para el retrolavado.
- f) Reparar las válvulas de mariposa ubicadas a la entrada y a la salida de los filtros, para lograr un cierre hermético durante su operación.
- g) Reacondicionar el sistema de suministro de aire desde los compresores, las líneas de conducción de aire y las válvulas de control de alimentación de aire a los filtros, previo al retrolavado con agua.
- h) Controlar el gasto y la velocidad del agua de retrolavado, ajustándose a lo recomendado en el diseño de los filtros.
- i) Llevar una bitácora con datos diarios de operación de los filtros y reportar de inmediato las anomalías.
- j) Elaborar un manual de operación, considerando cada parte del proceso de

potabilización.

- k) Determinar las características físico-químicas (CRETI) de los lodos generados en la Planta y llevar una bitácora donde se consigne el destino final de los mismos.
- l) Reparación de las fallas estructurales y de corrosión que se observaron en la Planta durante el desarrollo del presente trabajo.
- m) Se deberá reclasificar la granulometría de los lechos filtrantes, ya que ésta no cumplió las especificaciones de diseño.
- n) Revisar los falsos fondos de los filtros, ya que en uno de los filtros donde fue posible el acceso a los mismos, se detectaron roturas, lo que ocasionaba flujos de retrolavado irregulares en el fondo del filtro y pérdida de grava y materiales filtrantes.
- o) Es conveniente cambiar los falsos fondos actuales, instalando en el lugar el fondo poroso Leopold especial “IMS” (Integral Media Support de marca “Leopold”) con espesor de 0,04 m. Esto permitiría eliminar la capa de grava y se incrementaría el bordo libre entre la parte superior de la antracita y el vertedor de agua de retrolavado, evitándose pérdida de material filtrante durante el proceso de retrolavado.
- p) Establecer sistemas de control de medición de los flujos de aire y agua, aplicados durante el retrolavado y ajustarlos a los gastos y velocidades de aplicación de aire y agua en este proceso.

- q) Operar la apertura/cierre de válvulas de cada filtro, en forma gradual, para el control de los flujos y para evitar pérdida de materiales filtrantes o alteraciones en la topografía de los medios filtrantes.
  
- r) Programar cursos de capacitación y actualización para todos los operadores de la Planta Potabilizadora, para convencerlos de la importancia de su trabajo e inculcándoles apego a las recomendaciones de diseño de la Planta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, T. G. y Opazo, C. R. (2006). "Diseño e implementación planta piloto de tratamiento de agua potable con fines docentes". Expuesto en el XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del 26 al 30 de noviembre de 2006, Punta del Este – Uruguay.
- Arango, R. A. (2004). "La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua". Revista Lasallista de Investigación, vol. 1, núm. 002 pp.61-66.
- Arboleda, V. J. (1981). Teoría, Diseño y Control de los procesos de clarificación del agua. Capítulo 9 Control de los procesos de filtración. Tema Filtro Piloto
- Arreguin, C. F.; Martínez, A. P. y Trueba, L. V. (2004). El agua en México. Una visión Institucional. Ed. Academia Mexicana de Ciencias. 1era Edición. pp. 251-270
- AWWA STANDARDS (1966). American Water Works Association Standards. B100-53 AWWA STANDARD for filtering material. pp. 1-16.
- AWWA. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. (1990). Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies. Ed. American Water Works Association, 5th Edition pp. 1194. Kansas City, EUA.
- Barona, R. W. (2009). "Diseño de una planta para la producción de agua apta para el consumo humano en la planta de producción de la familia Sancela S.A." Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Tesis.
- Campos, T. T. (2006). "Agua y enfermedades entre algunos grupos mayas durante la colonia Antípoda". Revista de Antropología y Arqueología, julio-diciembre, No. 3 pp. 152-174.

- CEPIS (1992). Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Ciclo: Tratamiento. Serie: Filtración Rápida. Manual IV: Evaluación. Tomo III: Procesos y Tecnología Convencional pp. 1-117.
- Chacón, C. J. y Leal, A. M. (2003). "Impacto socio-económico por las enfermedades hidrotransmisibles en el estado de Morelos, México". Expuesto en el XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del 26 al 30 de noviembre de 2006, Punta del Este – Uruguay.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. pp. 329.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2011). Agenda del agua 2030. pp. 16.
- CONAGUA (2004). Estadísticas del agua en México. Situación de los recursos hídricos. CONAGUA. México pp. 22-50.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2011). Última reforma publicada en el DOF 13/Octubre/2011.
- De León, G. H.; Medina, B. F. y Lizárraga, M. L. (2006). "Elaboración de la matriz de geindicadores ambientales en la presa José López Portillo (Cerro Prieto), fuente de abastecimiento de agua potable de Monterrey, N.L., México". Revista Ciencia UANL vol. IX no. 1 enero-marzo 2006 pp. 65-72.
- De León, H. E. (2008). "Disponibilidad y características del agua potable en el área urbana del municipio de Huehuetenango. Universidad de San Carlos de Guatemala". Tesis. Agosto 2008.
- Doménech J. (2003). "Depuración y potabilización del agua". Revista Sanidad Ambiental, vol. 22 núm. 9 Septiembre 2003 pp. 110-116.
- Enríquez, E. C. (1990). "Virus en el Agua". Revista Ingeniería Hidráulica en México, enero-abril 1990 pp. 63-73.
- Etienne G. (2009). Potabilización y tratamiento del agua. 1era Edición electrónica, enero 2009.

- Flores, O. P. y Domínguez, M. E. (2000). "Estrategia para el mejoramiento de la calidad del agua en fuentes de abastecimiento de agua potable". Expuesto en el XII Congreso Nacional de la federación mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales del 21 al 24 de marzo de 2000, Morelia, Michoacán.
- García, P. D.; Díaz, D. C.; y Solís M. C. (2001). "Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas". Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. pp. 15-22.
- Gray, N. F. (1994). Drinking water quality: problems and solutions. Ed. J.-Wiley & Sons. pp. 315, New York, E.U.
- Hammer, M. J. (1986). Water and Wastewater Technology. 2nd Edition. John Willey and Sons. USA.
- Hernández, S. F. (2000). "Desarrollo de Presas en México". Universidad Autónoma Metropolitana Proyecto Final julio 2000 pp. 1-40.
- INEGI (2000). XII Censo General de Población y Vivienda.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda.
- Istanbul Water Guide. (2009). en: Outcomes of the 5Th World Water Forum.
- Jarrin, P. F.; Ramos, M. P. y Matamoros, C. D. (2009). "Proyecto Semilla: Evaluación de Sistemas de Filtración Agua de Bajo de Costo para Consumo Humano" Facultad de Ciencias de la Tierra. Artículo de tesis de grado.
- Jiménez, C. B. (2001). La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa, pp. 980. México.
- Juan-Martínez, J. y Solorio, E. N. (2003), "Diseño de un tren de tratamiento terciario avanzado para obtener agua embotellada". Universidad Autónoma de Chapingo. Tesis. Marzo 2003.
- La Corte, V. V. (2006). "Modelado y Simulación del proceso de potabilización del agua". Universidad de los Andes. Tesis. Septiembre 2006.

- Maldonado, Y. V. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. CEPIS Capítulo 9 Filtración pp. 81-145.
- Marco L.; Azario R.; Metzler C. y García M. (2004). "La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales". Revista Higiene y Sanidad Ambiental pp. 72-82.
- Martínez, R.; Fonseca K.; Ortega J. y García C. (2009). "Monitoreo de la calidad microbiológica del agua en la cuenca hidrológica del Rio Nazas, México". Revista Química Viva, Vol. 8, Núm. 1 Abril, 2009 pp. 35-47.
- Montoya, P. P. (2009). "Planta piloto potabilizadora de agua de mar con energía solar". Escuela Politécnica Nacional. Proyecto para obtención de título. Febrero 2009
- Mora V. y Cedeño J. (2006). "Determinación fisicoquímica y bacteriológica del agua en las etapas de tratamiento en la planta de potabilización". Revista Universidad Ciencia y tecnología vol. 10 núm. 37 marzo 2006 pp. 41-45.
- Morató J.; Subirana A.; Gris A.; Carneiro A. y Pastor R. (2006). "Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales". Revista Lasallista de Investigación, enero-junio, vol.3 núm. 001 pp. 19-29.
- NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de Agua - Determinación de Turbiedad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.
- NOM-004-CONAGUA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.
- NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- NOM-013-CONAGUA-2000. Redes de distribución de agua potable, especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba.
- NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

- NOM-015-CONAGUA-2007. Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.
- NOM-127-SSA1-1994, Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.
- NOM-179-SSA1-1998. Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano distribuida por sistemas de abastecimiento público.
- NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- OMS Organización Mundial de la Salud (1998). Guías para la Calidad del Agua Potable. 2da Edición. Volúmenes 1 y 3. Ginebra.
- OPS Organización Panamericana de la Salud (2007). Guía para mejorar la calidad del agua. Ámbito rural y pequeñas ciudades. Lima 2007.
- Pavón, S. T.; Chávez, C. y Garrido, H. S. (1996). "Planta potabilizadora para pequeñas comunidades". Universidad Autónoma del Estado de México. Tesis.
- Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios (1984). Publicada el 7 de febrero de 1984 en el Diario Oficial de la Federación, entrando en vigor el 1 de julio del 1984.
- Ríos D.; Manion I.; Pintos M.; Azuriz K.; Michelena, A.; Martínez M. (2006). "Determinación de los parámetros de diseño de una batería de filtración de tasa declinante, para un caudal de 10000 m<sup>3</sup>/h, mediante estudios realizados en planta de filtros pilotos". Expuesto en el XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del 26 al 30 de noviembre de 2006, Punta del Este – Uruguay.
- Romero, M. (2008). "Tratamientos utilizados en potabilización de agua". Universidad Rafael Landívar Boletín electrónico no. 8 pp. 1-12.

- Runge, J. y Mann, J. (2008). State of the industry report 2008: "Charting the course ahead". J. AWWA 10, 61-74.
- SADM, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2011). Portal de Internet visitada el día 20 de mayo de 2011 a las 10:20 am. <http://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/seccion.jsp?id=143&sadm=28>
- Trejo, M. C.; Echeverría, V. S.; Malagón, D. J.; Patiño, P. F.; y Montoya, A. A. (2004). "Aseguramiento metrológico de la planta potabilizadora de agua del sistema Cutzamala". Comisión Nacional del Agua. Simposio de Metrología 2004.
- Toledo, A. (2002). "El agua en México y el Mundo". Gaceta Ecológica, Julio-Septiembre, No.64: pp. 9-18.
- Torres, P.; Hernán, C. C. y Patiño, P. (2009). "Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica". Revista de Ingenierías, Universidad de Medellín Vol. 8, Núm. 15 Julio - Diciembre 2009 pp. 79-94.
- UNEP (2012). "Water in the transition to a Green Economy". A UNEF Brief. [www.unep.org/greeneconomy](http://www.unep.org/greeneconomy)
- Van-Benschoten, J. E., y Edwald, J. K. (1990). "Chemical aspect of coagulating using aluminum salts. Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride". J. Water Research, 24, 1519-1526.
- Vargas L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. CEPIS Capitulo 5 Mezcla Rápida pp. 225-262.
- Vázquez H.; Contento L.; Ingallinella A.; Sanguinetti G.; Bachir J. y Matiuzzi M. (2000). "Remoción de plancton en el proceso de filtración rápida". Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. No. 36.
- Vidal, H. S. (2010). "Evaluación de la efectividad del filtro a base de arcilla y plata coloidal en la potabilización de agua, medida por pruebas fisicoquímicas y microbiológicas". Universidad Tecnológica de Pereira. Requisito para obtener el título.

---

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

René Alberto Hinojosa Alanís

Candidato para el grado de

Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

**Tesis:** DISEÑO DE UN FILTRO PILOTO PARA DETECTAR ÁREAS DE OPORTUNIDAD DE MEJORA EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DIRECTA, EN UNA PLANTA POTABILIZADORA

**Campo de estudio:** Ingeniería Ambiental. Potabilización del agua.

**Biografía:**

Nacido en Cd. Reynosa, Tamaulipas, el 27 de octubre de 1987, hijo de Raúl Hinojosa Hinojosa y Amanda Lesvia Alanís Barrera.

**Educación:**

Agosto 2004 – Junio 2009  
Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Grado obtenido: Ingeniero Civil

**Experiencia Profesional:**

Agosto 2009 – Mayo 2012  
Becario. Departamento de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería Civil.  
Jefe Directo: Dr. Benjamín Limón Rodríguez

Febrero 2009 – Julio 2009  
Supervisor de Obra. Proyecto de Torre de Gobierno.  
Jefe Directo: Arq. Edgar Acosta Hinojosa

**Contacto:**

Correo electrónico: [raha87\\_mx@hotmail.com](mailto:raha87_mx@hotmail.com)  
[rhinojosa1987@gmail.com](mailto:rhinojosa1987@gmail.com)