

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

Evaluación y optimización del funcionamiento de la Planta Potabilizadora  
Xochimilco en Mexicali, B.C.

TESIS

Para obtener el grado de  
MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

Julio César Juárez Vázquez

Directora de tesis:

Dra. M. Socorro Romero Hernández

Co-Directora:

Dra. Aseneth Herrera Martínez

MEXICALI, B.C

DICIEMBRE DE 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por los apoyos recibidos para la realización de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca que me otorgó para realizar mis estudios de Maestría en Ingeniería en el programa de Maestría y Doctorado Ciencias e Ingeniería de la UABC.

A mi directora y co-directora de tesis, Dra. M. Socorro Romero Hernández y Dra. Aseneth Herrera Martínez respectivamente, por su paciencia, dedicación y motivación. Ha sido un privilegio contar con su guía y apoyo brindados durante la realización de este proyecto de investigación.

A la Ingeniera Química Luz Estela Salazar Escalante por su paciencia y el apoyo brindado dentro del laboratorio de Química Ambiental.

Agradezco a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), por el apoyo brindado y por permitirme el acceso a las instalaciones de la planta potabilizadora Xochimilco para realizar este proyecto de investigación.

## **DEDICATORIA**

Un agradecimiento especial a mi familia:

A mi madre que es lo mejor que Dios me ha regalado, por todas sus dedicaciones, esfuerzos, apoyo incondicional y confianza que deposita en mi vida.

A mi padre por todo su apoyo y conocimiento, el cual me brindó para poder realizar mis estudios.

A mi hermana, por estar siempre aportando cosas buenas a mi vida, por la gran felicidad y diversas emociones que siempre me ha causado.

A mi novia, por estar siempre conmigo brindándome todo su apoyo hasta donde sus alcances lo permitían.

## Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Importancia de la potabilización del agua y plantas potabilizadoras de Mexicali.....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	10
1.4 Justificación.....	11
1.5 Objetivos.....	11
1.6 Hipótesis.....	11
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Importancia de la potabilización del agua.....	12
2.2 Tipos de plantas de potabilizadoras.....	14
2.2.1 Plantas de filtración rápida .....	14
2.2.2 Plantas de filtración lenta.....	14
2.2.3 Plantas potabilizadoras convencionales antiguas.....	15
2.2.4 Plantas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS.....	15
2.2.5 Tecnología importada o de patente.....	15
2.3 Procesos unitarios y equipos comúnmente utilizados en la potabilización de agua.....	17
2.3.1 Coagulación.....	17
2.3.2 Mezcla rápida.....	21
2.3.3 Parámetros operacionales de la mezcla rápida.....	21
2.3.4 Mezcladores.....	22
2.3.5 Mezcladores Hidráulicos.....	23
2.3.6 Mezcladores Mecánicos.....	29
2.3.7 Ventajas y desventajas de los mezcladores hidráulicos y mecánicos.....	30
2.4 Floculación.....	30
2.4.1 Parámetros operacionales en los floculadores.....	32

2.4.2 Tipos de floculadores.....	32
2.4.4 Floculadores hidráulicos.....	32
2.4.5 Floculadores Mecánicos.....	35
2.4.3 Floculadores de contacto de sólidos.....	37
2.4.4 Floculadores de potencia.....	38
2.5 Sedimentación.....	38
2.5.1 Sedimentación de partículas discretas.....	38
2.5.2 Sedimentación de partículas floculentas.....	39
2.5.3 Sedimentación por caída libre e interferida.....	39
2.5.4 Clasificación de unidades de sedimentación.....	39
2.5.5 Sedimentadores y decantadores estáticos .....	39
2.5.6 Componentes de una unidad.....	40
2.5.7 Desarenadores.....	41
2.5.7.1 Tipos de desarenadores .....	41
2.5.8 Tipos de sedimentadores y decantadores estáticos.....	43
2.5.9 Decantadores dinámicos.....	45
2.5.10 Decantadores laminares.....	49
2.6 Filtración.....	50
2.6.1 Tipos de unidades de filtración.....	51
2.6.2 Filtración por gravedad.....	52
2.6.3 Filtración ascendente.....	52
2.6.4 Filtración descendente.....	52
2.6.5 Filtración ascendente-descendente.....	52
2.6.6 Clasificación de filtros de acuerdo a su forma de operación.....	53
2.6.6.1 Filtros de tasa constante y nivel variable.....	53
2.6.6.2 Filtros de tasa y nivel constantes.....	54

2.6.6.3 Filtros de tasa declinante.....	55
2.6.7 Filtros a presión.....	57
2.7 Desinfección.....	57
2.7.1 Fundamentos de la desinfección del agua.....	57
2.7.2 Características de un desinfectante ideal.....	59
2.7.3 Tipos de desinfectantes.....	60
2.7.4 Desinfección física mediante luz ultravioleta.....	61
2.7.5 Desinfectantes químicos.....	61
2.7.6 Cloración.....	62
2.7.7 Mecanismos de la desinfección con cloro.....	63
METODOLOGÍA.....	65
3.1 Revisión bibliográfica.....	65
3.2 Determinación de la calidad del agua en la salida de cada proceso unitario.....	65
3.2.1 Muestreo .....	65
3.2.2 Medición de parámetros en el sitio de estudio.....	65
3.2.3 Análisis de laboratorio.....	65
3.3 Metodología de evaluación del funcionamiento de la planta potabilizadora Xochimilco.....	66
3.3.1 Determinación de parámetros óptimos para la evaluación del funcionamiento de los procesos unitarios.....	66
DESARROLLO PARA LA EVALUACIÓN DE UNIDADES DE PROCESO DE LA PLANTA POTABILIZADORA XOCHIMILCO.....	68
4.1 Presedimentador.....	68
4.1.1 Tiempo de retención.....	68
4.1.1.1 Preparación del trazador.....	68
4.1.1.2 Aplicación del trazador en el presedimentador.....	68
4.2 Mezcla rápida.....	70

4.2.1 Determinación de la dosis óptima de reactivos.....	70
4.2.1.1 Preparación de coagulante.....	70
4.2.1.2 Preparación de floculante.....	71
4.2.1.3 Prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio) y de floculante (polímero catiónico).....	71
4.2.2 Determinación del porcentaje de exactitud en bomba dosificadora de coagulante en la planta .....	74
4.2.3 Tiempo de retención.....	75
4.2.4 Gradiente de velocidad.....	76
4.3 Floculación.....	76
4.3.1 Tiempo de retención.....	76
4.3.2 Gradiente de velocidad.....	77
4.3.3 Distribución de flujos en cada floculador.....	78
4.4 Sedimentador.....	78
4.4.1 Tiempo de retención.....	78
4.5 Filtros.....	79
4.5.1 Tiempo de lavado de filtros.....	79
4.5.2 Filtrado inicial.....	79
4.5.3 Granulometría del medio filtrante.....	80
4.5.4 Porcentaje de expansión del medio filtrante.....	81
4.5.5 Espesor del medio filtrante.....	82
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
5.1 Presedimentador.....	82
5.1.1 Tiempo de retención.....	82
5.2 Mezcla Rápida.....	85
5.2.1 Dosis óptima de reactivos.....	85

5.2.2 Aplicación en planta de dosis óptima de reactivos.....	92
5.2.2 Exactitud de dosificador.....	95
5.2.3 Tiempo de retención.....	98
5.2.4 Gradiente de velocidad.....	98
5.2.5 Gradiente de interconexión.....	100
5.3 Floculador.....	101
5.3.1 Tiempo de retención.....	101
5.3.2 Gradientes de velocidad.....	102
5.3.3 Gradiente de interconexión Floculador- Sedimentador.....	104
5.3.3 Distribución de flujos.....	105
5.4 Sedimentador.....	107
5.4.1 Tiempo de retención.....	107
5.5 Filtros.....	110
5.5.1 Tiempo de lavado.....	110
5.5.2 Filtrado inicial.....	111
5.5.3 Expansión del medio filtrante y altura del medio filtrante.....	112
5.5.5 Granulometría del medio filtrante.....	115
5.6 Cloración.....	123
5.6.1 Tiempo de contacto.....	123
CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	124
5.1 Conclusiones.....	124
5.2 Recomendaciones.....	124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
Anexo 1.....	130
Anexo 2.....	135
Anexo 3.....	136

Anexo 4.....	139
Anexo 5.....	146
Anexo 6.....	150
Anexo 7.....	155

## Lista de Figuras

Figura 1. Diagramas de flujo de los trenes de tratamiento utilizados en la ciudad de Mexicali.....	5
Figura 2. Ubicación de plantas potabilizadoras de la ciudad de Mexicali.....	6
Figura 3. Vista aérea de la POT-Xochimilco.....	8
Figura 4. Esquema del tren de tratamiento de la POT-Xochimilco.....	8
Figura 5. Sistema de floculación operando a un flujo de: a) 750 L/s y b) 1,100 L/s.....	10
Figura 6. Tren de tratamiento para remoción de hierro y mangneso.....	17
Figura 7. Tren de tratamiento de una planta de filtracion directa.....	18
Figura 8. Tren de tratamiento de una planta convencional.....	18
Figura 9. Tren de tratamiento de una planta de ablandamiento.....	18
Figura 10. Modelo esquemático del proceso de coagulación.....	21
Figura 11. Resalto hidráulico. ....	26
Figura 12. Canal rectangular con fondo inclinado o rampa.....	26
Figura 13. Canaleta Parshall.....	27
Figura 14. Mezcladores hidráulicos en línea. Difusores.....	29
Figura 15. Mezcladores hidráulicos en línea. Inyectores.....	30
Figura 16. Mezclador hidráulico en línea. Estático.....	30
Figura 17. Mezclador en línea mecánico.....	31
Figura 18. Unidades de mezcla mecánica por medio de retromezclado.....	32
Figura 19. Floculador de pantallas de flujo vertical.....	35
Figura 20. Floculador tipo alabama.....	35
Figura 21. Floculador tipo helicoidal. ....	36
Figura 22. Floculador de medio poroso. ....	37
Figura 23. Floculador mecánico de eje horizontal del tipo paletas.....	38
Figura 24. Floculador mecánico de eje vertical del tipo paletas. ....	38
Figura 25. Floculador mecánico de turbina. ....	39

Figura 26. Clasificación de floculadores.....	39
Figura 27. Floculadores de contacto de sólidos. ....	40
Figura 28. Trayectoria ideal de partículas discretas. ....	43
Figura 29. Zonificación de un sedimentador. ....	43
Figura 30. Desarenador rectangular. ....	45
Figura 31. Sedimentador horizontal de forma rectangular. ....	46
Figura 32. Sedimentadores o decantadores estáticos circulares.....	47
Figura 33. Sedimentador estático de flujo vertical. ....	48
Figura 34. Componentes de un decantador de manto de lodos.....	49
Figura 35. Unidad de manto de lodos con agitación simple. ....	51
Figura 36. Unidades de separación dinámica.....	52
Figura 37. Decantador de láminas horizontales. ....	53
Figura 38. Decantador de placas. ....	53
Figura 39. Esquema de un filtro ascendente-descendente Biflow. ....	57
Figura 40. Arreglo típico de entrada y salida de los filtros de tasa constante y nivel variable.....	58
Figura 41. Filtro de tasa y nivel constante. ....	59
Figura 42. Esquema de un sistema de filtración con tasa declinante. ....	60
Figura 43. Variación de la tasa de filtración, pérdida de carga y nivel de agua durante el funcionamiento del filtro. ....	61
Figura 44. Curva del punto de quiebre.....	68
Figura 45. Tanques con la solución de trazador. ....	74
Figura 46. Vista del punto de aplicación del trazador. ....	74
Figura 47. Vista del punto de medición de CE en el efluente del presedimentador.....	74
Figura 48. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio.....	77
Figura 49. Toma simultánea de muestras en cada jarra. ....	77
Figura 50. Aforo de bomba dosificadora. ....	79

Figura 51. Toma de muestra de coagulante. ....	79
Figura 52. Adición de trazador. ....	81
Figura 53. Medición de conductividad eléctrica. ....	81
Figura 54. Preparación de trazador. ....	82
Figura 55. Adición de trazador. ....	83
Figura 56. Toma de muestra en canaleta de lavado. ....	83
Figura 57. Punto de muestreo de efluente de filtros. ....	84
Figura 58. Adición de medio filtrante a juego de mallas. ....	85
Figura 59. Medidor de expansión de medio filtrante. ....	85
Figura 60. Medición del espesor del medio. ....	86
Figura 61. Curva de CE medida en el presedimentador.....	88
Figura 62. Estructura de entrada del presedimentador. ....	88
Figura 63. Estructura de salida del presedimentador. ....	89
Figura 64. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante.....	94
Figura 65. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de polímero.....	95
Figura 66. Comportamiento de la turbiedad obtenida de prueba de jarras para determinación de dosis óptima de polímero.....	96
Figura 67. Comportamiento de turbiedad antes y después de modificar la dosis de reactivos químicos. ....	97
Figura 68. Comportamiento horario de turbiedad en el efluente al cambiar dosis de reactivos químicos. ....	98
Figura 69. Curvas real y teórica del dosificador. ....	101
Figura 70. Dimensiones de la caja de mezcla rápida. ....	102
Figura 71. Zona de entrada de la mezcla rápida. ....	103
Figura 72. Vista de la unidad de mezcla rápida. ....	105
Figura 73. Dosificación incorrecta de coagulante. ....	105
Figura 74. Curva de CE del agua en el floculador. ....	107

Figura 75. Floculador a 1100 L/s. ....	109
Figura 76. Dimensiones del gradiente de interconexión Floculador – Sedimentador.....	109
Figura 77. Cantidad de trazador que pasa por cada unidad. ....	111
Figura 78. Curva de conductividad eléctrica en el sedimentador. ....	114
Figura 79. Cortos circuitos y espacios muertos. ....	114
Figura 80. Tiempo de lavado de filtros. ....	115
Figura 81. Filtrado inicial de cada filtro. ....	117
Figura 82. Puntos de muestreo de expansión de medio filtrante en filtros.....	117
Figura 83. Curva granulométrica de antracita en filtro 1. ....	121
Figura 84. Curva granulométrica de arena en filtro 1. ....	121
Figura 85. Curva granulométrica de antracita en filtro 2. ....	121
Figura 86. Curva granulométrica de arena en filtro 2. ....	122
Figura 87. Curva granulométrica de antracita en filtro 3. ....	122
Figura 88. Curva granulométrica de arena en filtro 3. ....	122
Figura 89. Curva granulométrica de antracita en filtro 4. ....	123
Figura 90. Curva granulométrica de arena en filtro 4. ....	123
Figura 91. Curva granulométrica de antracita en filtro 5. ....	123
Figura 92. Curva granulométrica de arena en filtro 5. ....	124
Figura 93. Curva granulométrica de antracita en filtro 6. ....	124
Figura 94. Curva granulométrica de arena en filtro 6. ....	124
Figura 95. Curva granulométrica de antracita en filtro 7. ....	125
Figura 96. Curva granulométrica de arena en filtro 7. ....	125
Figura 97. Curva granulométrica de antracita en filtro 8. ....	125
Figura 98. Curva granulométrica de arena en filtro 8. ....	126
Figura 99. Tiempo de lavado de filtro No. 1. ....	152
Figura 100. Tiempo de lavado de filtro No. 2. ....	152

Figura 101. Tiempo de lavado de filtro No. 3. ....	153
Figura 102. Tiempo de lavado de filtro No. 4. ....	153
Figura 103. Tiempo de lavado de filtro No. 5. ....	154
Figura 104. Tiempo de lavado de filtro No. 6. ....	154
Figura 105. Tiempo de lavado de filtro No. 7. ....	155
Figura 106. Tiempo de lavado de filtro No. 8. ....	155
Figura 107. Filtrado inicial de filtro No. 1. ....	156
Figura 108. Filtrado inicial de filtro No. 2. ....	156
Figura 109. Filtrado inicial de filtro No. 3. ....	157
Figura 110. Filtrado inicial de filtro No. 4. ....	157
Figura 111. Filtrado inicial de filtro No. 5. ....	158
Figura 112. Filtrado inicial de filtro No. 6. ....	158
Figura 113. Filtrado inicial de filtro No. 7. ....	159
Figura 114. Filtrado inicial de filtro No. 8. ....	159

## Lista de tablas

Tabla 1. Plantas potabilizadoras del estado de Baja California.....	3
Tabla 2. Listado de plantas potabilizadoras en la ciudad de Mexicali. ....	4
Tabla 3. Información general de la POT-Xochimilco. ....	6
Tabla 4. Procesos unitarios que componen la POT-Xochimilco. ....	7
Tabla 5. Clasificación de las unidades de mezcla rápida. ....	24
Tabla 6. Valores de $\delta/\mu$ . ....	25
Tabla 7. Características de decantadores de manto de lodos. ....	48
Tabla 8. Clasificación de filtros. ....	54
Tabla 9. Patógenos transmitidos a través del agua. ....	62
Tabla 10. Agentes inactivantes o inhibidores del crecimiento microbiano. ....	63
Tabla 11. Listado de parámetros medidos en el sitio de estudio. ....	68
Tabla 12. Análisis de parámetros en laboratorio. ....	69
Tabla 13. Comparación de técnicas para evaluación de procesos unitarios. ....	69
Tabla 14. Procesos y parámetros evaluados.....	70
Tabla 15. Formato para registro de lecturas de conductividad.....	72
Tabla 16. Gradientes de velocidad y tiempos para pruebas de jarras.....	75
Tabla 17. Exactitud de dosificadores. ....	79
Tabla 18. Turbiedad del agua cruda en el cárcamo de bombeo. ....	89
Tabla 19. Turbiedad del agua a la salida de los sedimentadores. ....	90
Tabla 20. Turbiedad del efluente. ....	92
Tabla 21. Parámetros de calidad de agua cruda de junio 2015. ....	93
Tabla 22. Prueba de jarras con aplicación de sulfato de aluminio.....	93
Tabla 23. Resultados de turbiedad con diferentes dosis de floculante.....	95
Tabla 24. Resultados de aforo de bomba dosificadora. ....	99
Tabla 25. Valores determinados en el floculador central. ....	106

Tabla 26. Resultados de prueba de expansión de medio filtrante. ....	116
Tabla 27. Comparación de porcentajes de expansión promedios con esperados.....	117
Tabla 28. Alturas de medio filtrante. ....	118
Tabla 29. Resultados de análisis granulométrico y comparativa con valores. ....	126
Tabla 30. Resultados de prueba de trazadores en presedimentador. ....	134
Tabla 31. Resultados de prueba de trazadores en floculador. ....	139
Tabla 32. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador norte. ....	140
Tabla 33. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador central. ....	141
Tabla 34. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador sur. ....	142
Tabla 35. Resultados de prueba de trazadores en sedimentador. ....	143
Tabla 36. Análisis granulométrico de antracita en filtro 1. ....	159
Tabla 37. Análisis granulométrico de arena en filtro 1. ....	159
Tabla 38. Análisis granulométrico de antracita en filtro 2. ....	160
Tabla 39. Análisis granulométrico de arena en filtro 2. ....	160
Tabla 40. Análisis granulométrico de antracita en filtro 3. ....	161
Tabla 41. Análisis granulométrico de arena en filtro 3.....	161
Tabla 42. Análisis granulométrico de antracita en filtro 4. ....	162
Tabla 43. Análisis granulométrico de arena en filtro 4. ....	162
Tabla 44. Análisis granulométrico de antracita en filtro 5. ....	163
Tabla 45. Análisis granulométrico de arena en filtro 5. ....	163
Tabla 46. Análisis granulométrico de antracita en filtro 6. ....	164
Tabla 47. Análisis granulométrico de arena en filtro 6. ....	164
Tabla 48. Análisis granulométrico de antracita en filtro 7. ....	165
Tabla 49. Análisis granulométrico de arena en filtro 7. ....	165
Tabla 50. Análisis granulométrico de antracita en filtro 8. ....	166
Tabla 51. Análisis granulométrico de arena en filtro 8. ....	166



## RESUMEN

El deterioro o los diseños deficientes de las plantas potabilizadoras de agua municipales pueden afectar negativamente la calidad del agua producida, lo cual genera un riesgo para la salud de los consumidores. El monitoreo continuo de la calidad del agua en las plantas potabilizadoras tienen por objeto asegurar que se cumplan los límites permisibles para los parámetros que establece la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994. Esta norma regula la calidad del efluente de la planta pero no así la calidad del agua en cada proceso de tratamiento.

En el presente estudio se evaluaron los procesos de tratamiento de la planta potabilizadora Xochimilco ubicada en la ciudad de Mexicali B.C., siguiendo la metodología de evaluación indicada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Se determinaron los parámetros de operación de cada proceso y se compararon con los valores óptimos indicados en el manual de operación de dicha planta. Los resultados obtenidos muestran que la planta potabilizadora contaba con deficiencias en algunos de sus procesos y se propusieron soluciones o recomendaciones para lograr que los procesos trabajen de manera más eficiente.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La ciudad de Mexicali es la capital del estado de Baja California. Se ubica en la frontera norte de México; al fundarse en el año de 1903, nace como el centro de la región algodonera más grande del mundo, para luego adquirir una marcada vocación industrial. En la actualidad se le conoce como “La ciudad que atrapó el sol”, debido a su característico clima extremoso que en verano alcanza los 50 °C a la sombra. Es una ciudad de 988,417 habitantes (INEGI, 2015). Para atender la creciente demanda de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, el 18 de diciembre de 1967 se publicó en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado, el decreto No. 99 de la V Legislatura, mediante el cual se crea la Comisión Estatal de Servicio Públicos de Mexicali (CESPM), como un organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio (CESPM 2010).

Históricamente, la fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de Mexicali, ha sido el Río Colorado; el cual irriga a siete estados de la Unión Americana y a dos en México (Sonora y Baja California), recorre 2,350 km desde su nacimiento en las montañas Rocallosas de Wyoming, hasta su desembocadura en el Golfo de California. Se estima que el volumen anual promedio del Río Colorado es de 22,075 millones de m<sup>3</sup> (700 m<sup>3</sup>/s). En el tratado firmado el 3 de febrero de 1994 entre Estados Unidos y México, se garantiza que del Río Colorado, se entregará un volumen anual a México de 1,850 millones de m<sup>3</sup>. El abastecimiento de agua del Río Colorado para la ciudad de Mexicali, se hace desde la presa derivadora Morelos hasta las tres plantas potabilizadoras a través de la red mayor de canales del Distrito de Riego 014 (CESPM, 2010).

## **1.2 Importancia de la potabilización del agua y plantas potabilizadoras de Mexicali**

El agua es el principal componente de las células humanas y el medio de transporte de elementos químicos que aseguran las actividades de todos los organismos vivos. Los principales objetivos de la potabilización del agua son: mejorar la calidad del agua para proteger la salud de la humanidad, de los animales y para su uso en la agricultura y la industria por lo que la ciencia y la tecnología trabajan en conjunto para realizar investigaciones al respecto. El tratamiento del agua debe incidir en tres aspectos básicos:

- a) Higiene. Eliminar o reducir del agua las bacterias, protozoos, quistes, huevos de parásitos y en especial aquellos organismos capaces de producir enfermedades.
- b) Estético. Hay factores físicos característicos de las aguas, tales como color, olor, turbiedad y sabor, que son los que más impresionan al público consumidor; y aunque no constituyen realmente un problema de salud pública, debe reducirse su concentración para que el público no la rechace, hagan críticas o busquen otras fuentes de agua.
- c) Económico. El efecto corrosivo o incrustante del agua hace que las cañerías metálicas tengan menor duración útil. La dureza ocasiona mayor consumo de jabón, obstruye los sistemas de calefacción, tuberías y cuerpos de calderas, y sarro en útiles de cocina (Unda, 2003).

En la Tabla 1 se presenta el listado de plantas potabilizadoras que se encuentran instaladas en el estado de Baja California.

Tabla 1. Plantas potabilizadoras del estado de Baja California

<b>Municipio</b>	<b>Localidad</b>	<b>Nombre de la Planta</b>	<b>Procesos</b>	<b>Capacidad Instalada [L/s]</b>	<b>Caudal Potabilizado [L/s]</b>
Ensenada	Ensenada	Presa Emilio López Zamora	Filtración directa	150	63.9
Mexicali	Ejido Cucapah Mestizo	Ej. Cucapah Mestizo	Clarificación convencional	11	2.0
Mexicali	Ejido Durango	Ej. Durango	Clarificación convencional	30	11.4
Mexicali	Ejido Hipólito Rentería	Hipólito Rentería/San sán Flores	Clarificación convencional	18	5.4
Mexicali	Ejido Lázaro Cárdenas (La Mosca)	Lázaro Cárdenas (Sistema)	Filtración directa	40	6.4
Mexicali	Ejido Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo (Fundidora)	Filtración directa	20	0.5
Mexicali	Guadalupe Victoria (Km. 43)	Guadalupe Victoria	Clarificación convencional	250	98.6
Mexicali	Mexicali	Adolfo López Mateos	Filtración directa	5	1.7
Mexicali	Mexicali	Benito Juárez	Filtración directa	5	1.3
Mexicali	Mexicali	Cerro Prieto #6	Filtración directa	5	0.6
Mexicali	Mexicali	Chiapas II	Filtración directa	11	2.0
Mexicali	Mexicali	Col. La Puerta	Clarificación convencional	12	5.1
Mexicali	Mexicali	Cucapah El Mayor	Filtración directa	5	0.8
Mexicali	Mexicali	Ejido Irapuato	Filtración directa	10	3.2
Mexicali	Mexicali	Jalapa	Filtración directa	11	3.6
Mexicali	Mexicali	Mexicali II Col. Calles	Filtración directa	2,500	1,668.8
Mexicali	Mexicali	Mexicali No. 1, Río Culiacán	Clarificación convencional	1,250	480.9
Mexicali	Mexicali	Silva Sur	Filtración directa	3	0.4

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Procesos	Capacidad Instalada [L/s]	Caudal Potabilizado [L/s]
Mexicali	Mexicali	Xochimilco No. 3	Clarificación convencional	1,250	640.9
Mexicali	Nuevo León	Ej. Nuevo León	Clarificación convencional	50	34.8
Tecate	Tecate	Cuchumá	Filtración directa	125	25.4
Tecate	Tecate	El Hongo	Filtración directa	40	13.9
Tecate	Tecate	Las Auras o Nopalera	Filtración directa	175	161.4
Tijuana	Tijuana	El Florido	Filtración directa	5,300	2,919.3
Tijuana	Tijuana	Monte los Olivos	Remoción de fierro-manganeso	130	95.5
Tijuana	Tijuana	Presa Rodríguez	Clarificación convencional	600	200.2
<b>Total de Plantas:</b>			<b>26</b>	<b>12,006</b>	<b>6,448</b>

Fuente: Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2009.

Muchas operaciones unitarias y procesos pueden ser combinadas dentro de un tren de tratamiento para alcanzar el nivel deseado y cumplir con las normas de agua para uso y consumo humano, este nivel puede ser tan simple como remover turbiedad o tan complejo como hacer una desmineralización completa del agua (IMTA, 2007).

La ciudad de Mexicali cuenta con tres plantas potabilizadoras principales las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Listado de plantas potabilizadoras en la ciudad de Mexicali.

Nombre de la Planta	Procesos	Capacidad Instalada [L/s]	Caudal Potabilizado [L/s]
Mexicali No. 1, Río Culiacán	Clarificación convencional	1,250	480.9
Mexicali No. 2, Col. Calles	Filtración directa	2,500	1,668.8
Xochimilco No. 3	Clarificación convencional	1,250	640.9

Fuente: CONAGUA, 2009.

Las plantas potabilizadoras de la ciudad de Mexicali están instaladas de manera estratégica para poder servir a toda la población, de manera que si alguna llegara a fallar las demás puedan servir a la población. Estas plantas cuentan con trenes de tratamiento de clarificación convencional y filtración directa como se muestra en la Figura 1.

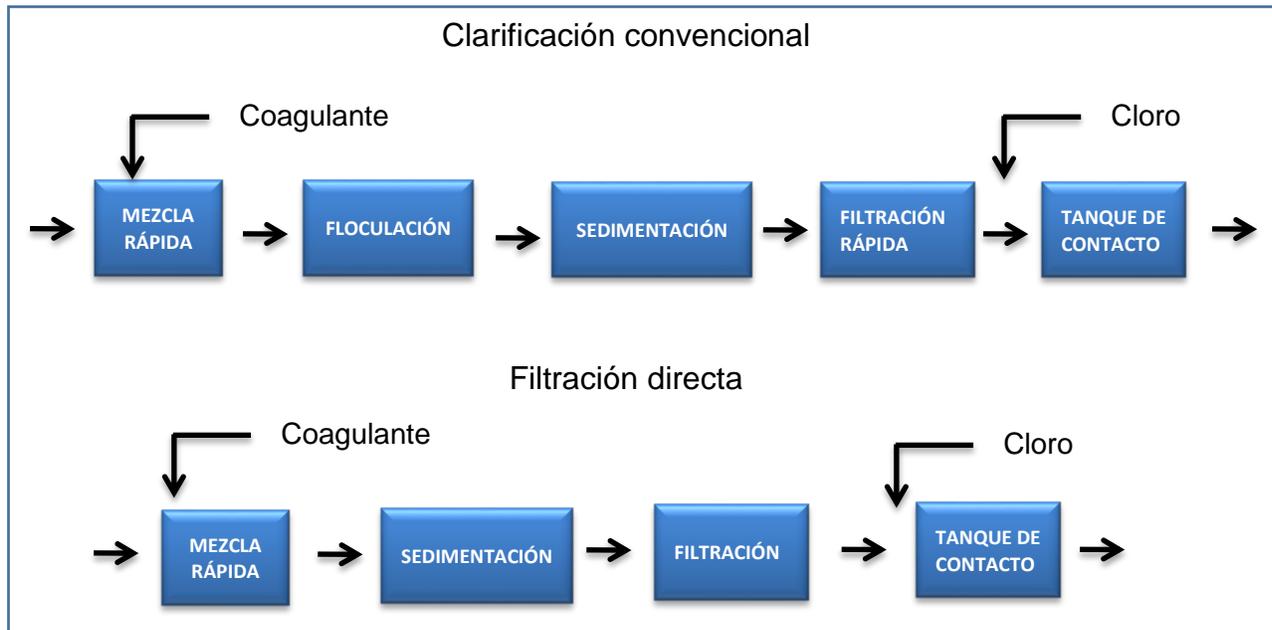


Figura 1. Diagramas de flujo de los trenes de tratamiento utilizados en la ciudad de Mexicali. Fuente: IMTA, 2007.

En la Figura 2, se puede apreciar la ubicación de las plantas potabilizadoras que se encuentran en la ciudad de Mexicali. La planta potabilizadora No. 1 se localiza entre las Calles Río Culiacán y Plan de Ayutla, s/n Col. Pro-Hogar, la No. 2 se en Prolongación Calle Novena # 1901, Fracc. Plutarco Elías Calles y la No. 3 en Calle del Polen y Laguna San Cristóbal, Fracc. Villas del Rey.

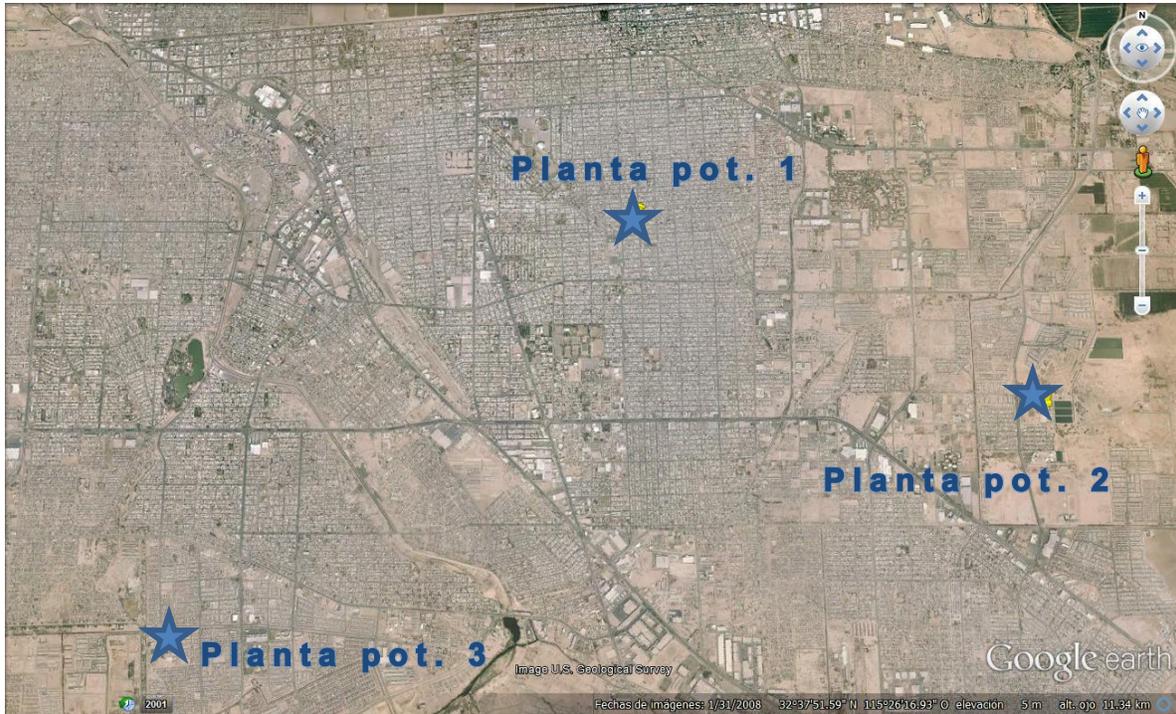


Figura 2. Ubicación de plantas potabilizadoras de la ciudad de Mexicali.  
Fuente: Google Earth, 2014.

El presente estudio se realizó en la planta potabilizadora No. 3 conocida como: POT-Xochimilco. En la Tabla 3 se presenta la información general de esta planta.

Tabla 3. Información general de la POT-Xochimilco.

<b>DATOS GENERALES</b>	
Año de inicio de operaciones	1998
Capacidad actual	1,350 L/s
Población servida	256,700 habitantes
Área de cobertura	9,979 Ha
Fuente de suministro	Río Colorado
Superficie total del predio m <sup>2</sup>	86,255 m <sup>2</sup>
Geoposicionamiento	32°36'06.71 N, 115°29'08.84 O

Fuente: CESP, 2012.

La Tabla 4 muestra los procesos que componen al sistema de potabilización.

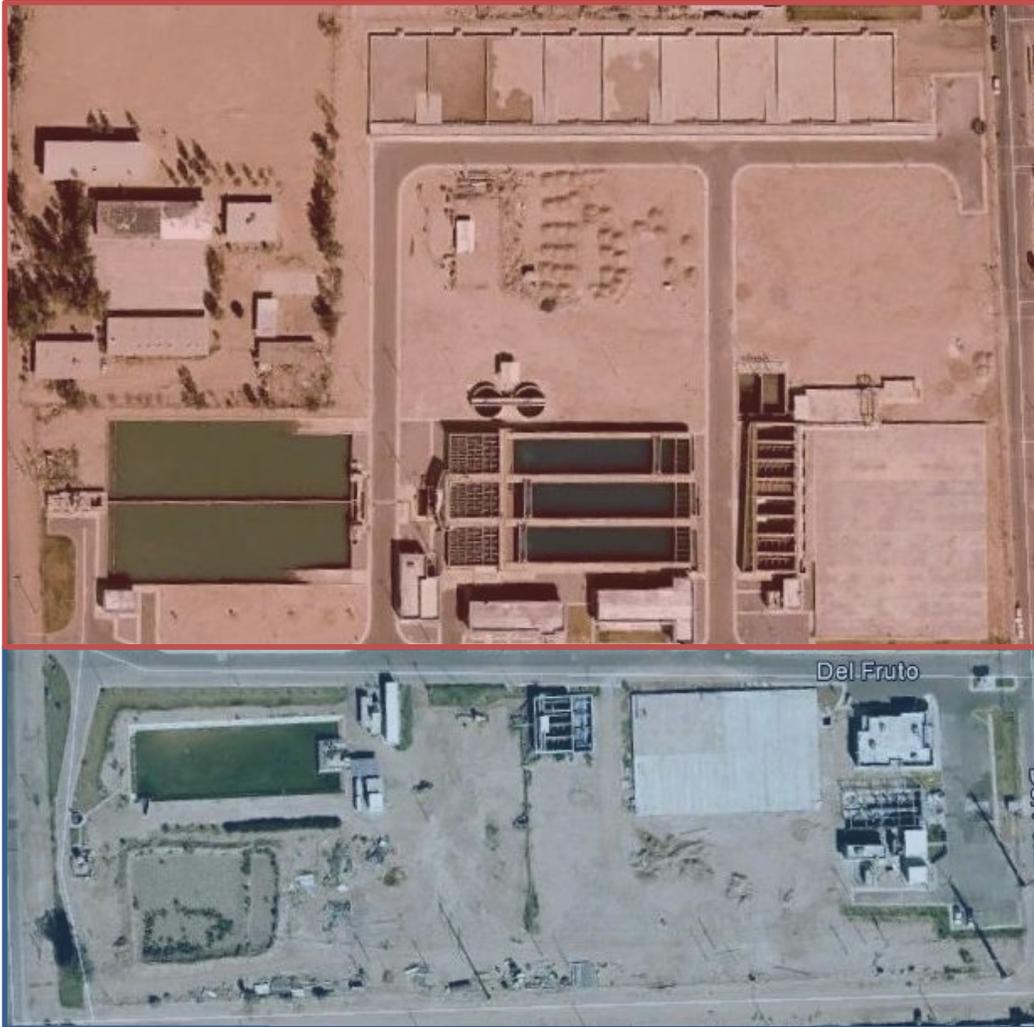
Tabla 4. Procesos unitarios que componen la POT-Xochimilco.

<b>PROCESOS</b>
Presedimentación
Mezcla Rápida
Floculación
Sedimentación
Filtración
Desinfección
Regulación
Bombeo a la red

Fuente: CESP, 2012.

Inicialmente la POT-Xochimilco tenía una capacidad de tratamiento de 80 L/s. En el año 2002 se amplió, incrementando su capacidad a 250 L/s y en octubre del 2007 se hizo otra ampliación, aumentado su capacidad de tratamiento a 1,350 L/s (CESPM, 2014). En la zona A de la Figura 3 se puede apreciar una vista aérea de la planta antes de 2007, la cual consistía únicamente en un sistema de sedimentación, filtración y cloración. En la zona B se muestra la planta ampliada a 1,350 L/s.

## ZONA B



## ZONA A

Figura 3. Vista aérea de la POT-Xochimilco.  
Fuente: Google Earth, 2014.

La POT-Xochimilco consiste de un sistema de potabilización convencional, cuenta con los siguientes procesos unitarios: Presedimentación, Coagulación, Floculación, Sedimentación, Filtración y Desinfección.

En la Figura 4 se muestra un esquema del tren de tratamiento.

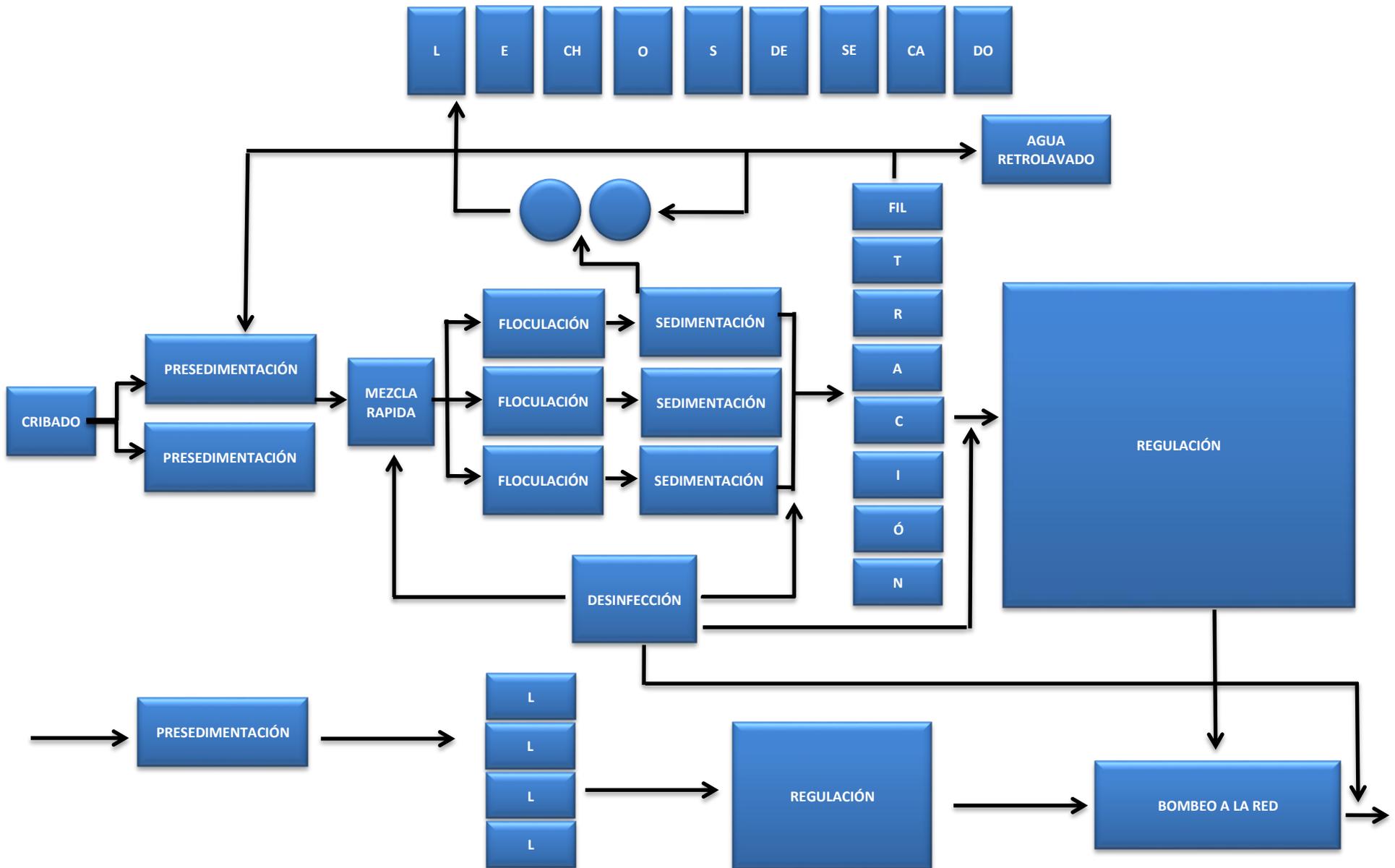


Figura 4. Esquema del tren de tratamiento de la POT-Xochimilco.  
Fuente: CESPM, 2012.

### 1.3 Planteamiento del problema

De los resultados de una evaluación preliminar de los procesos de la planta de tratamiento, se encontró que a pesar de que el fabricante de la planta indica una capacidad de diseño de 1,100 L/s, el sistema de floculación no funciona correctamente cuando se tratan más de 750 L/s. En la Figura 5, se puede observar que, el sistema de floculación se desborda cuando se incrementa el flujo de agua a 1,100 L/s, afectando el funcionamiento de todo el sistema.

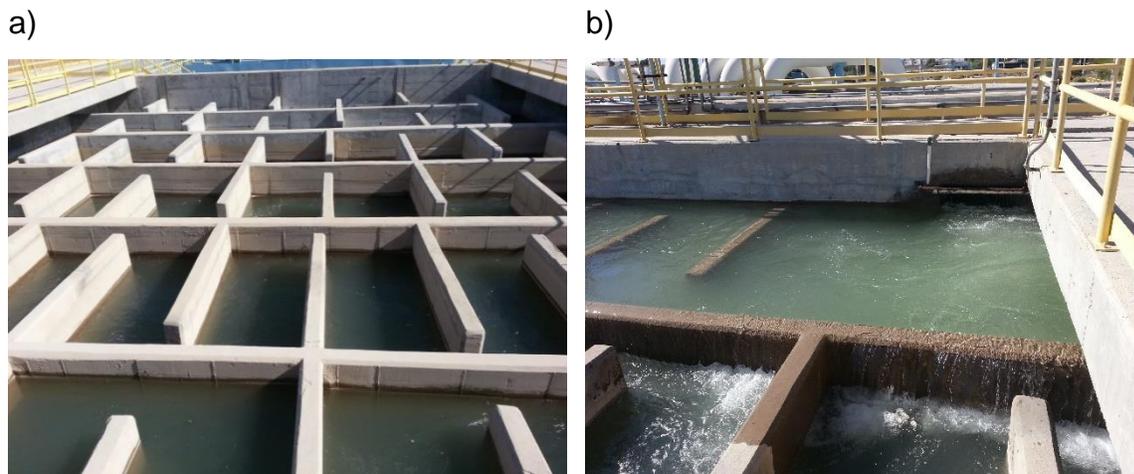


Figura 5. Sistema de floculación operando a un flujo de: a) 750 L/s y b) 1,100 L/s.

Si alguno de los procesos unitarios opera deficientemente provoca una operación deficiente en todo el sistema teniéndose como resultado un incremento en el costo del tratamiento, mantenimiento más frecuente en los equipos, disminución en la vida útil de los equipos y una mala calidad del agua. La calidad del agua tratada depende tanto del diseño correcto de los equipos como de la operación correcta de los mismos.

## **1.4 Justificación**

La POT-Xochimilco, no cuenta con procedimientos para evaluar el funcionamiento de cada uno de los procesos unitarios, por lo que el presente estudio plantea evaluar el funcionamiento de la planta, determinar los parámetros operacionales de cada unidad de proceso y hacer un análisis comparativo con los parámetros de diseño que se indican en el manual del fabricante. Con base en los resultados del estudio se harán ajustes operacionales y recomendaciones para hacer más eficiente el funcionamiento de la planta

## **1.5 Objetivos**

### **Objetivo general:**

Evaluar la eficiencia del funcionamiento de la POT-Xochimilco y realizar propuestas para la mejora de los procesos.

### **Objetivos específicos:**

- 1.- Caracterizar la calidad de agua en cada proceso unitario.
- 2.- Diagnosticar el funcionamiento de cada proceso.
- 2.- Optimizar la dosificación de los procesos químicos.
- 3.- Determinar los parámetros óptimos para la operación eficiente de cada proceso.

## **1.6 Hipótesis**

Mediante la implementación de ajustes en la operación de los procesos unitarios es posible mejorar la eficiencia de la POT-Xochimilco.



## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Importancia de la potabilización del agua**

El agua es el material más esencial para la supervivencia humana, después del aire. Sin el agua, la vida como la conocemos no sería posible. Afortunadamente, el aire es purificado adecuadamente por la naturaleza con una mínima ayuda de nosotros. Sin embargo, hoy esto no es posible con el agua (Ahuja, 2009).

Las fuentes de agua, han sido contaminadas gradualmente y fueron las causantes de muchas epidemias que causaron gran mortandad en ciudades enteras en la antigüedad. El hombre tardó mucho tiempo en darse cuenta de que el agua que consumía era la causante de muchas enfermedades que en ese entonces padecían y a finales del siglo XVIII empezó a implementar procesos para tratar y desinfectar el agua que consumía (Sierra, 2011).

Es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios que se realizan en una planta de tratamiento, a fin de purificarla o potabilizarla para que pueda ser consumida por los seres humanos sin efectos adversos a su salud. Se requieren diferentes niveles de purificación del agua para diferentes tipos de uso de agua.

El uso de agua se divide en cinco categorías: Suministro de agua pública, principalmente destinada para consumo humano; agua usada en la agricultura, en la industria, para recreación y para la pesca y la vida silvestre. Cada categoría de uso tiene sus propios criterios de calidad y métodos para evaluar su idoneidad. Los estándares más altos de purificación son requeridos para el agua potable, mientras, que por otra parte, es aceptable que el agua utilizada para refrigeración industrial esté relativamente contaminada según la United Nations Environment Programme (UNEP, 1991).

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover

totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por la norma que estable los límites permisibles de calidad para agua de uso y consumo humano (CEPIS, 2008), en México estos límites están establecidos en la norma NOM-127-SSA1-1994. Una operación unitaria es un proceso químico, físico o biológico mediante el cual sustancias indeseables que contiene el agua son removidas o transformadas en sustancias inocuas.

Se espera que las plantas de tratamiento de agua potable suministren a la población de agua segura y estéticamente aceptable para los consumidores a un costo razonable. Convencionalmente, el manejo y operación de una planta de tratamiento está basado en el monitoreo de los parámetros de la calidad del agua tratada para después compararlos con los requerimientos regulatorios. Sin embargo, el funcionamiento de cada unidad de tratamiento en una planta de tratamiento es importante y necesita ser evaluado para asegurar que el desempeño de la unidad sea satisfactorio. Múltiples factores como la variabilidad en la calidad de la fuente de agua y factores específicos en cada unidad como los gradientes de velocidad en la coagulación y floculación, flujos preferenciales en los sedimentadores y el tiempo de contacto en la desinfección, todos ellos pueden impactar en la calidad del agua tratada (Zhang et al., 2011). Las limitaciones financieras también pueden afectar la calidad de los servicios de abastecimiento de agua (Kalulu y Hoko, 2010).

En cuanto a la operación de una planta de tratamiento administrada por el organismo operador, un procedimiento operativo estándar es necesario para lograr un desempeño óptimo en el control de la calidad del agua, la producción de agua, los costos de reducción de químicos y reducción de residuos (Chang et al., 2007).

Es difícil producir agua de buena calidad para consumo humano de una fuente de agua de mala calidad, sin embargo, es factible mejorar la calidad del agua entre la fuente y el usuario consumidor con una combinación de adecuada operación, infraestructura y mantenimiento a la planta potabilizadora (Coulibalya y Rodriguez, 2004; Sadiq et al., 2010).

## **2.2 Tipos de plantas de potabilizadoras**

Las plantas potabilizadoras se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, en plantas de filtración rápida o filtración lenta.

También se pueden clasificar de acuerdo al tipo de tecnología empleada, en plantas convencionales antiguas, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o de patente.

### **2.2.1 Plantas de filtración rápida.**

Se llaman así debido a que los filtros que se utilizan operan con velocidades altas, entre 80 y 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, que dependen de la calidad del agua así como de las características del medio filtrante. Las velocidades altas provocan que los filtros se colmaten en un lapso de 40 a 50 horas en promedio, por lo tanto para su lavado se aplica el retrolavado de la unidad durante un tiempo de 5 a 15 min y así reanudar la operación de la unidad.

### **2.2.2 Plantas de filtración lenta.**

En este tipo de plantas los filtros operan a velocidades de entre 0.10 y 0.30 m/h, las cuales son hasta 100 veces menores que las tasas promedio de un filtro rápido. Conocidas también por el nombre de filtros ingleses por su lugar de origen. Los filtros lentos simulan los procesos de tratamiento que se efectúan en la naturaleza al percollar el agua proveniente de lluvias, ríos, etc. A través de los estratos de la corteza terrestre, atravesando capas de grava, arena y arcilla hasta alcanzar los acuíferos subterráneos. Al igual que en la naturaleza, los procesos que utilizan este tipo de filtros son físicos y biológicos.

### **2.2.3 Plantas potabilizadoras convencionales antiguas**

Este tipo de sistema es el más antiguo, comenzó a utilizarse a principios del siglo pasado. Se caracteriza por la gran extensión que ocupan las unidades, principalmente el decantador rectangular de flujo horizontal. Para hacer más eficiente su funcionamiento se fueron agregando equipos mecánicos como retromezcladores por lo cual este tipo de sistemas actualmente son mixtos, constituidos por unidades hidráulicas y mecánicas. Este tipo de sistemas cuenta con muchas deficiencias debido a que se contaba con muy poco fundamento técnico y se aplicaban parámetros y criterios por intuición

### **2.2.4 Plantas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS**

Esta tecnología se desarrolló en la década de 1970. Las unidades en este tipo de tecnología ocupan el 25 % ó 30 % del área que ocupa un sistema convencional de la misma capacidad. Esta reducción de área se debe al empleo de floculadores verticales y decantadores laminares. Los decantadores laminares tienen placas inclinadas de tal modo que el área de decantación real es la suma de las proyecciones horizontales de todas las placas, lo que equivale a la superficie del fondo del decantador convencional. Los filtros se proyectan en baterías para ser operados con altura variable. Algunas ventajas de estos sistemas es que son sumamente eficientes y fáciles de construir, operar y mantener.

### **2.2.5 Tecnología importada o de patente.**

Los sistemas de tecnología importada normalmente están integrados por decantadores de manto de lodos de suspensión dinámica, los cuales son unidades que integran la mezcla rápida, la floculación y la decantación en un solo equipo. Los filtros son de tasa constante y altura constante por lo cual se requiere una gran cantidad de equipos. Esta tecnología es importada de los países desarrollados y se caracteriza por considerar gran cantidad de equipos y alto grado de complejidad en las soluciones (CEPIS, 2008).

Como la calidad del agua cruda varía de una fuente a otra, el tipo de tratamiento para su potabilización también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente. Para que la planta potabilizadora sea eficiente y económica, requiere en su diseño, de un estudio cuidadoso basado en la calidad de la fuente y en la selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados y económicos para producir agua de la calidad requerida (Romero, 1999).

A menudo se consideran los procesos con membranas para nuevas plantas de tratamiento, sin embargo la mayoría de las plantas mantienen un diseño convencional que consiste en los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración en medio granular. Cuando se utilizan membranas, el pretratamiento con un diseño convencional es a menudo necesario (Lawler y Nason, 2005).

De la Figura 6 a la 9 se muestran algunos esquemas de tratamiento de plantas potabilizadoras.

#### Planta de remoción de hierro y manganeso

El hierro y el manganeso son elementos que comunmente se encuentra en aguas subterráneas provocando la coloracion del agua. En la Figura 6 se muestra el tren de tratamiento para la remoción de estos elementos el cual consiste en la oxidación con aire y cloro seguida de una sedimentacion y filtración.

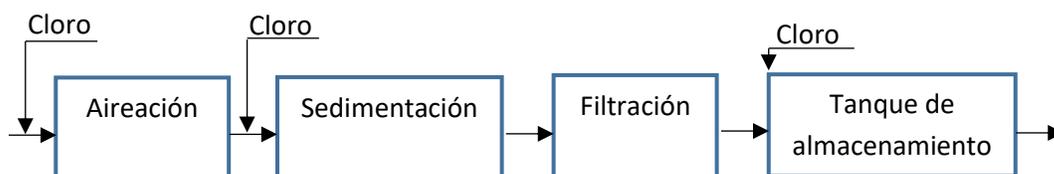


Figura 6. Tren de tratamiento para remoción de hierro y mangneso

#### Planta de filtración directa

Este tipo de tratamiento es apropiado para aguas claras de baja turbiedad. Las aguas provenientes de presas son ideales para este tipo de tratamiento ya que las presas trabajan como grandes sedimentadores y producen aguas poco contaminadas. En la Figura 7 se muestra este tren de tratamiento.

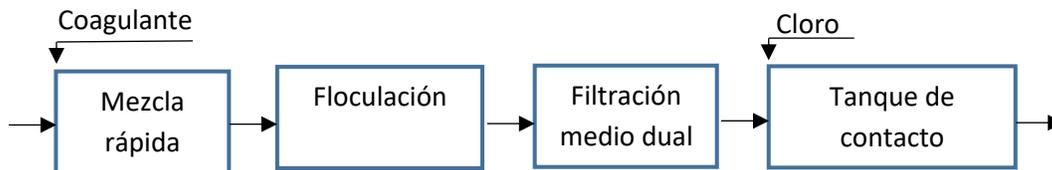


Figura 7. Tren de tratamiento de una planta de filtración directa.

#### Planta convencional para remoción de color, turbidez y microorganismos

Este sistema de tratamiento es el que se utiliza comúnmente en las plantas potabilizadoras municipales e incluye todos los procesos para la obtención de agua potable como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Tren de tratamiento de una planta convencional.

#### Planta de ablandamiento

El ablandamiento del agua es importante ya que reduce la dureza del agua lo cual produce incrustaciones en las tuberías de agua. En la Figura 9 se muestra el tratamiento con cal-soda, el cual precipita la dureza del agua.

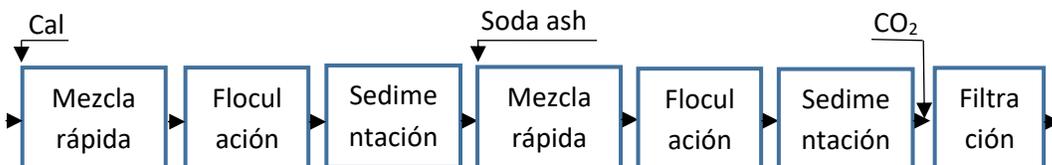


Figura 9. Tren de tratamiento de una planta de ablandamiento.

## **2.3 Procesos unitarios y equipos comúnmente utilizados en la potabilización de agua**

### **2.3.1 Coagulación**

En la práctica del tratamiento de agua, el término coagulante se refiere a un agente añadido al agua que facilita la sedimentación de materia coloidal o de materia suspendida finamente dividida. La coagulación es el proceso que se refiere a la serie de operaciones químicas y físicas en donde se aplican y hacen efecto los coagulantes (AWWA, 1951).

Muchas impurezas en el agua se encuentran como sólidos coloidales que no se sedimentan. La remoción de éstas se puede lograr si se promueve la aglomeración de las partículas coloidales por floculación, con o sin el uso de un coagulante, seguida por los procesos de sedimentación o flotación. La sedimentación es un proceso utilizado para remover partículas suspendidas de hasta 50  $\mu\text{m}$ , pero con partículas más pequeñas, que tienen velocidades de sedimentación muy bajas, no es factible removerlas por simple sedimentación. Para las partículas más pequeñas las velocidades de sedimentación son casi inexistentes. Si se logra aglomerar las partículas coloidales, finalmente aumentan de tamaño hasta un punto en el que es posible su remoción por sedimentación (Tebbutt, 2002).

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, las superficies de las partículas a interaccionar, la alcalinidad del agua y el agua misma (Pérez, 1978). El proceso de coagulación comienza en el instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura fracciones de segundo.

Básicamente consiste en dos fenómenos:

Fenómeno químico: Consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.

Fenómeno físico: Consiste en el transporte y contacto de las especies hidrolizadas con las impurezas del agua.

De forma simplificada se puede considerar que la coagulación se realiza en las siguientes fases, ya sea en forma consecutiva o simultánea:

- 1 Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión
- 2 Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan
- 3 Absorción de cadenas poliméricas por la superficie de los coloides
- 4 Absorción mutua de coloides
- 5 Acción de barrido (Pérez, 1978)

En la Figura 10 se representan esquemáticamente estas cinco fases.

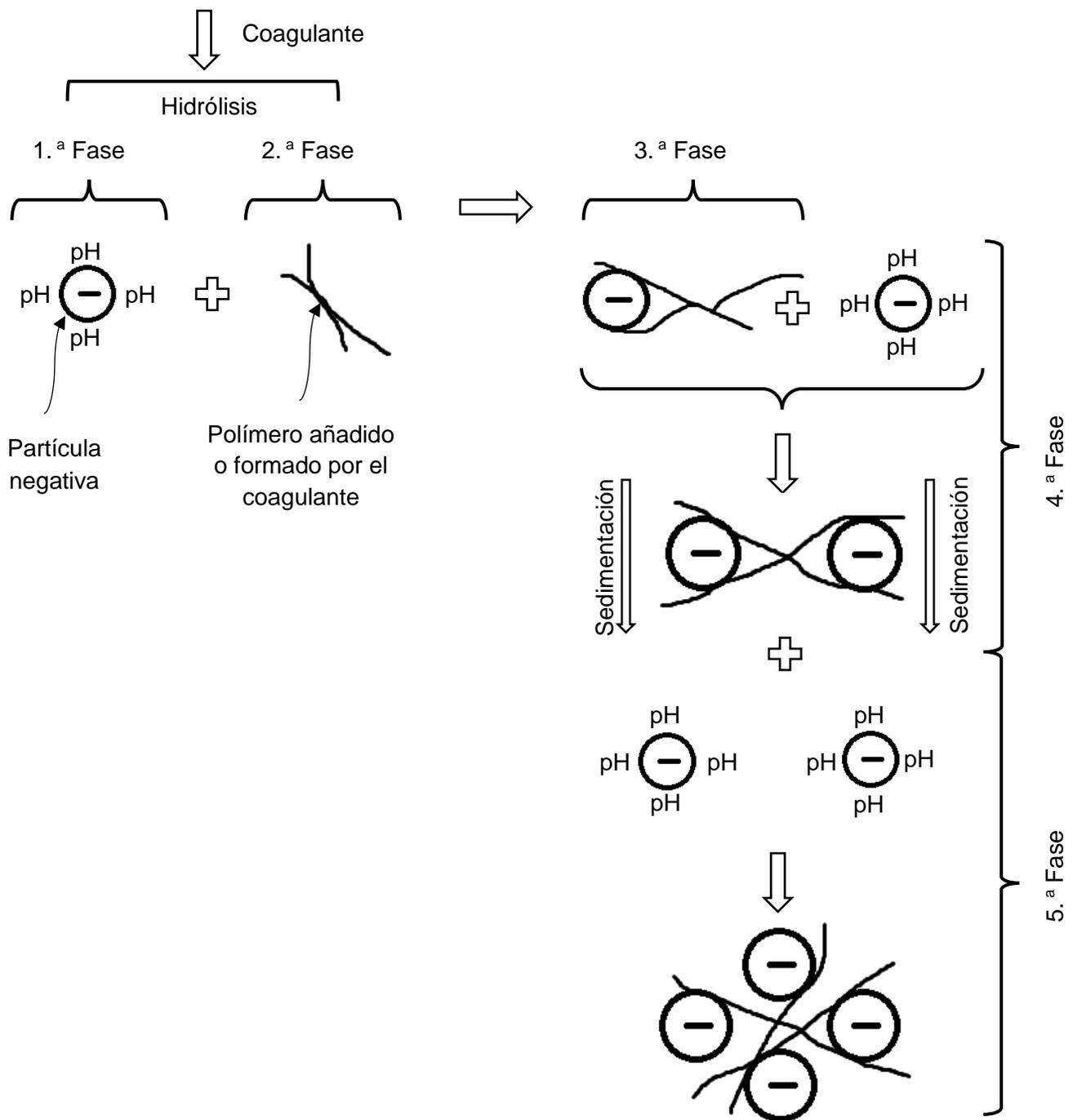


Figura 10. Modelo esquemático del proceso de coagulación.  
 Fuente: CEPIS, 2008.

Es importante comprender la química de la coagulación y los factores que controlan este proceso para su implementación exitosa como una etapa del tratamiento (Alansari et al., 2015).

Diversos autores consideran que combinar el agua de reciclado del retrolavado de filtros con el agua cruda a la entrada de la planta potabilizadora es un método factible para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes en aguas crudas de baja turbiedad (Gottfried et al., 2008; Chen et al., 2015).

El proceso de coagulación se emplea para:

- a. Remover turbiedad orgánica o inorgánica debida a partículas que no pueden sedimentar rápidamente.
- b. Remover el color verdadero y aparente.
- c. Eliminar bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- d. Destruir algas y plancton en general.
- e. Eliminar sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos en otros (Pérez, 1978).

### **2.3.2 Mezcla rápida**

En las plantas potabilizadoras se denomina mezcla rápida a la operación que tiene generalmente el propósito de dispersar rápida y uniformemente el coagulante a través de toda la masa o flujo de agua. Este proceso puede llevarse a cabo mediante la turbulencia, generada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras y tanques con equipo de mezcla rápida entre otros (Romero, 1999).

Debido a la naturaleza de las reacciones involucradas en el proceso de coagulación, se deduce que para que ocurra la neutralización de la carga, es de suma importancia que los coagulantes sean difundidos en la masa de agua tan rápido como sea posible (en un tiempo menor de 0,1 segundos), para que los productos

que se desarrollan en un intervalo de tiempo entre 0,01 y 1 segundo produzcan la desestabilización del coloide (CEPIS, 2008).

### 2.3.3 Parámetros operacionales de la mezcla rápida

Los parámetros operacionales de la mezcla rápida son la intensidad de agitación que se debe impartir a la masa de agua para dispersar al coagulante, la cual se evalúa mediante el gradiente de velocidad, y el tiempo durante el cual debe aplicarse esta agitación al agua.

Gradiente de velocidad

El gradiente medio de velocidad, comúnmente indicado por la letra G, puede ser fácilmente calculado por la ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

Donde:

G = Gradiente de velocidad [ $s^{-1}$ ]

P/V = Potencia disipada por unidad de volumen

$\mu$  = Coeficiente de viscosidad [ $kg\ s/m^2$ ]

### 2.3.4 Mezcladores

Las unidades normalmente utilizadas para producir la mezcla rápida se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo del tipo de energía utilizada para producir la agitación: Mecánicos e hidráulicos.

Las primeras plantas de tratamiento que se construyeron no tenían dispositivos especiales para la dispersión de los productos químicos. Los primeros dispositivos utilizados para la mezcla rápida eran hidráulicos. Con el desarrollo de la tecnología para la potabilización del agua, se prefirió el uso de mezcladores mecánicos, principalmente en los países más industrializados.

En la Tabla 5 se muestra una clasificación de las unidades de mezcla rápida, utilizadas en las plantas potabilizadoras de agua.

Tabla 5. Clasificación de las unidades de mezcla rápida.

Tipo de agitación	Tipo de unidad					
<b>Mecánicas</b>	Retromezclador en línea					
<b>Hidráulicas</b>	Resalto hidráulico	Canaleta Parshall				
		Canal de fondo inclinado				
		Vertedero rectangular				
	En línea	Difusores		En tuberías		
				En canales		
	Caídas	Inyectores				
		Estáticos				
		Orificios				
	Contracciones	Vertederos triangulares				
		Medidor Venturi				
		Reducciones				
	Velocidad o cambio de flujo	Orificios ahogados				
		Línea de bombeo				
Codos						

Fuente: (CEPIS, 2008).

En los mezcladores mecánicos, la turbulencia necesaria para la mezcla proviene de una fuente externa, generalmente un motor eléctrico y, de este modo, puede ser fácilmente controlable. Por otro lado, la potencia disipada en los mezcladores hidráulicos tiene origen en el trabajo interno del fluido y, por lo tanto, es función de la forma geométrica del mezclador y de las características del flujo, lo que hace que las condiciones de mezcla sean difíciles de controlar por el operador.

### 2.3.5 Mezcladores Hidráulicos

En los mezcladores hidráulicos la mezcla es ejecutada como resultado de la turbulencia que existe en el régimen del flujo (Romero, 1999).

El gradiente de velocidad para los mezcladores hidráulicos se obtiene mediante la ecuación 2:

$$G = \sqrt{\frac{\delta}{\mu}} \sqrt{\frac{H}{T}} \quad (2)$$

Donde:

$\delta$  = Peso específico del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  = Coeficiente de viscosidad [kg s/m<sup>2</sup>]

H = Perdida de carga [m]

T = Tiempo de mezcla [s]

El término de  $\sqrt{\delta/\mu}$  se puede obtener de la Tabla 6:

Tabla 6. Valores de  $\sqrt{\delta/\mu}$ .

Temperatura [°C]	$\sqrt{\delta/\mu}$
0	2,336.94
4	2,501.56
10	2,736.53
15	2,920.01
20	3,114.64
25	3,266.96

Fuente: CEPIS, 2008.

Las unidades hidráulicas más comunes son las de resalto hidráulico y los mezcladores en línea.

a) Mezcla con resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno que ocurre cuando la corriente líquida pasa de un régimen rápido a uno tranquilo, a través de una profundidad crítica, y discurre de una profundidad menor a una mayor, mientras que la velocidad cambia de mayor a menor que la crítica. La Figura 11 ilustra cómo ocurre el resalto hidráulico.

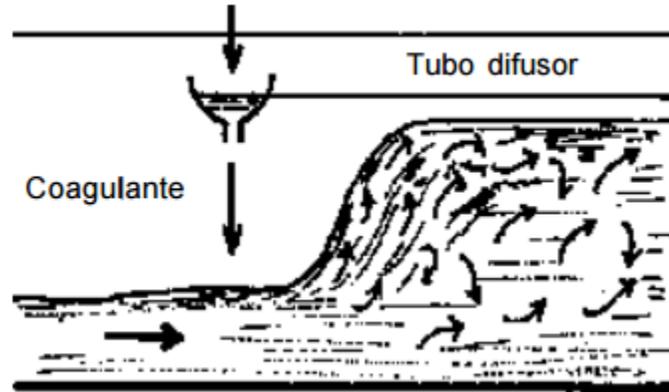


Figura 11. Resalto hidráulico.  
Fuente: CEPIS, 2008.

Los resaltos pueden producirse en canales horizontales o de fondo inclinado. Son frecuentemente utilizados para producir mezcla rápida en canales rectangulares con cambios bruscos de inclinación (Figura 12). La energía de agitación es generada por la pérdida de carga ( $h_p$ ), entre los puntos  $h_1$  y  $h_2$ . La mezcla rápida se produce entre los puntos 1 y 2.

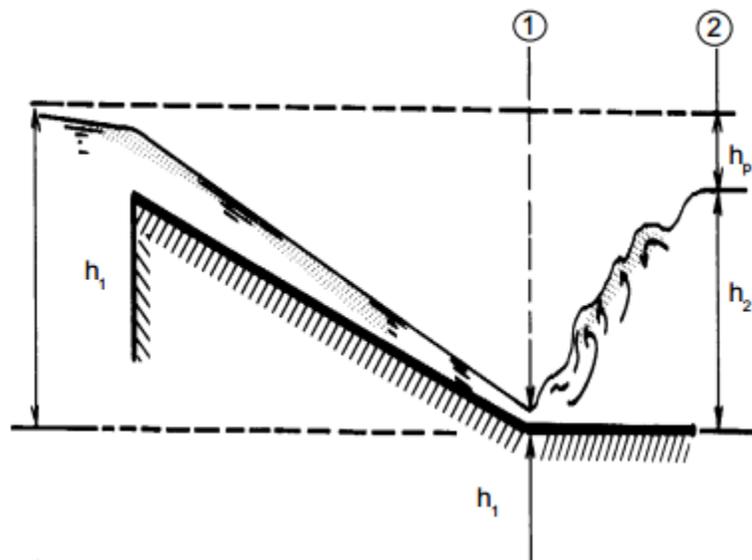


Figura 12. Canal rectangular con fondo inclinado o rampa.  
Fuente: CEPIS, 2008.

Otro tipo de dispositivo ampliamente utilizado en las plantas de tratamiento con la doble finalidad de medir el caudal y efectuar la mezcla rápida es la canaleta Parshall (Figura 13). Este se compone de 4 partes principales:

1. Transición de entrada: el piso se eleva sobre el fondo original del canal, con una pendiente suave y las paredes se van cerrando, ya sea en línea recta o circular.
2. Sección convergente: el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo.
3. Garganta: en la garganta el piso vuelve a bajar.
4. Sección divergente: es la última sección en la cual termina con otra pendiente ascendente. (CONAGUA)

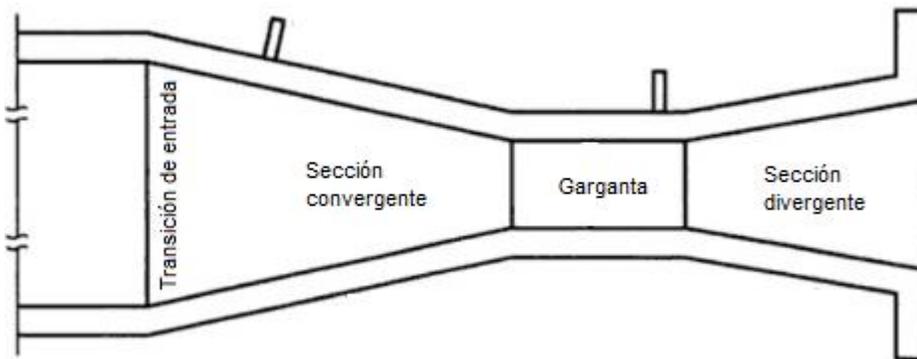


Figura 13. Canaleta Parshall.  
Fuente: Brière, 2005. Modificado

La canaleta Parshall tiene la finalidad de medir el caudal, pero cuando se requiere se utilizan para mezclar los reactivos químicos aprovechando el gradiente de velocidad producido en la garganta.

#### b) Mezcla en línea

El conocimiento de la rapidez con que se realizan las reacciones de desestabilización trajo como consecuencia el desarrollo de mezcladores instantáneos en línea. Con este tipo de unidades es posible conseguir tiempos de mezcla muy cortos, menores a segundo, y elevadas intensidades de mezcla.

Algunas razones por las que se recomienda este tipo de unidades son:

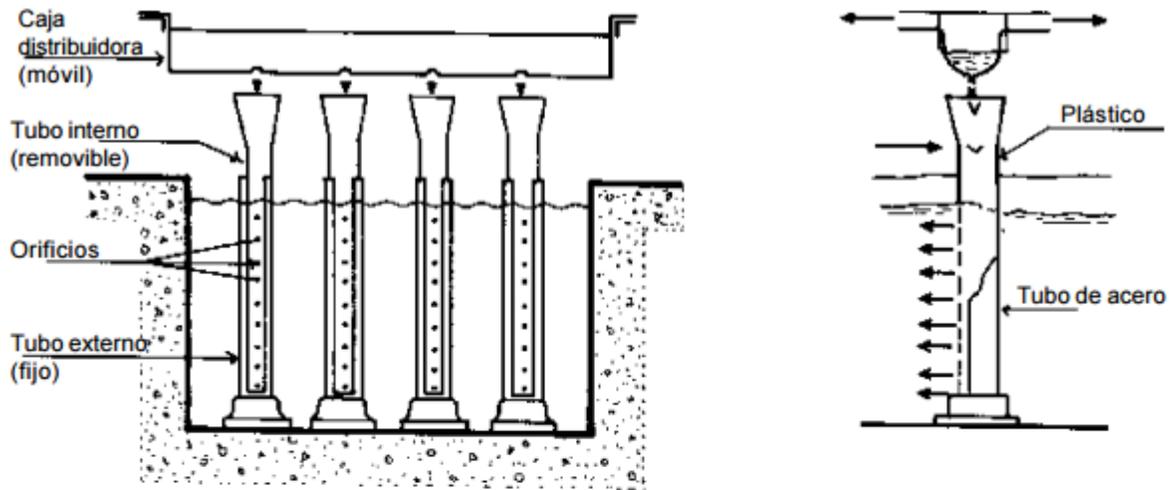
- 1) Proporciona una buena mezcla instantánea con pocos cortocircuitos.

- 2) Se reducen los costos al omitir la instalación de una unidad de mezcla rápida convencional.

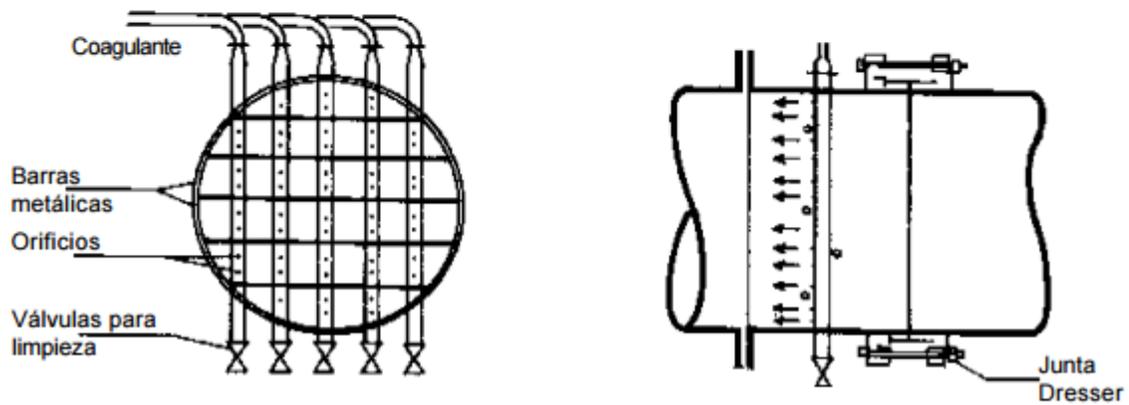
Estas unidades están constituidas por un dispositivo insertado en la tubería o canal de llegada de agua cruda a la planta de tratamiento. De acuerdo con sus características, se pueden clasificar, a su vez, en a) Difusores, b) Inyectores y c) Mezcladores estáticos.

- a) Difusores en línea.

Estas unidades fueron desarrolladas por Stengquist y Kaufman (Figura 14) y su finalidad es la de conseguir la mayor dispersión y mezcla del coagulante, mediante el uso de múltiples puntos de descarga distribuidos en toda la sección de la unidad.



a) Difusor en canal



b) Difusor en tubería

Figura 14. Mezcladores hidráulicos en línea. Difusores.  
Fuente: CEPIS, 2008.

### b) Inyectores

En este tipo de unidades la energía necesaria para la mezcla rápida se consigue con la energía disipada por una multitud de chorros que producen un flujo turbulento en la tubería de conducción de agua (Figura 15).

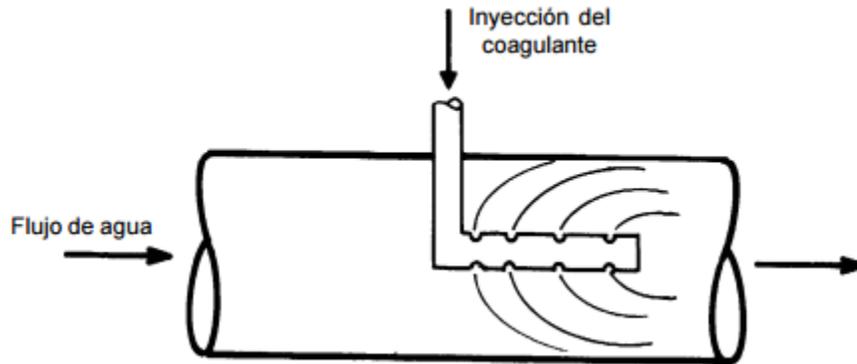


Figura 15. Mezcladores hidráulicos en línea. Inyectores.  
Fuente: CEPIS, 2008.

c) Mezcladores estáticos

Estas unidades están constituidas por barras, perfiles o láminas corrugadas, instaladas dentro de una tubería, que forman una rejilla alargada y continua, que producen una elevada intensidad de turbulencia en una longitud deseada y originan una mezcla muy eficiente, con poca pérdida de energía y sin el uso de partes móviles. Se muestra un ejemplo de éstas en la Figura 16.

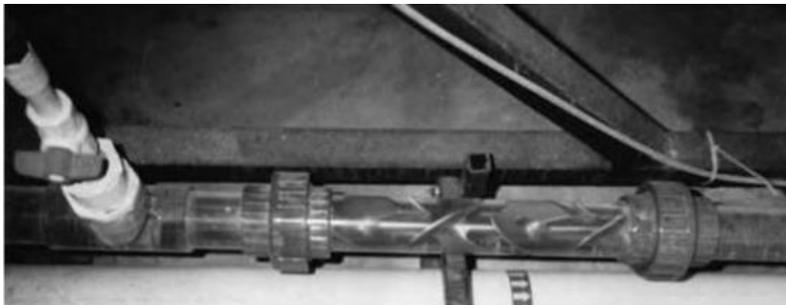


Figura 16. Mezclador hidráulico en línea. Estático.  
Fuente: Hendricks, 2011.

Entre las ventajas de este tipo de unidad se pueden indicar las siguientes:

1. La intensidad de mezcla se produce en un reactor fijo sin partes móviles.
2. Bajo mantenimiento y operación nula.
3. Se puede utilizar cualquier concentración de solución.

Las desventajas son las siguientes:

1. Los equipos son normalmente patentados.
2. Falta de experiencia técnica en el diseño.
3. Requiere más energía que los difusores e inyectores.

### 2.3.6 Mezcladores Mecánicos

Los tipos de unidades de mezcla mecánica son: a) Mezclador en línea mecánico y b) Retromezclador.

- Mezclador en línea mecánico.

Este tipo de agitador puede reemplazar a los grandes mezcladores y a los tanques retromezcladores, debido a que proporciona una agitación casi instantánea, en un volumen muy pequeño de agua y con un bajo consumo de energía (Figura 17).

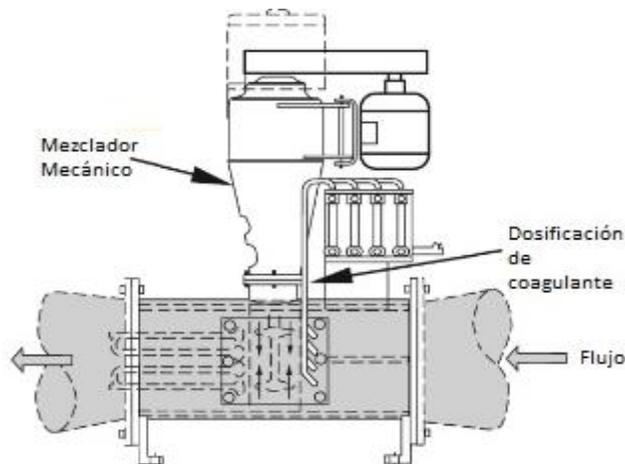


Figura 17. Mezclador en línea mecánico.  
Fuente: AWWA, 2010.

- Retromezclador.

Está compuesto de un tanque diseñado para un periodo de retención determinado y un sistema de agitación (Figura 18).

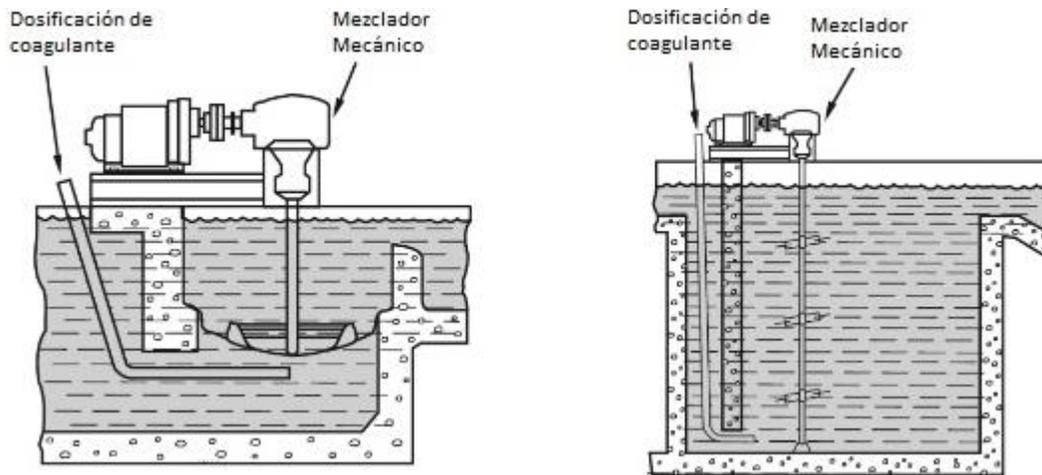


Figura 18. Unidades de mezcla mecánica por medio de retomezclado.  
Fuente: AWWA, 2010.

### 2.3.7 Ventajas y desventajas de los mezcladores hidráulicos y mecánicos

El gradiente de velocidad en un mezclador mecánico no varía con el caudal y tiene la ventaja adicional de permitir controlar el grado de agitación si se varía la velocidad de rotación del impulsor. Sin embargo, su funcionamiento depende de una fuente de energía externa, por lo que si ocurre una falla en el sistema de alimentación o en el propio mecanismo, causaría el colapso del proceso de mezcla rápida, lo que perjudicaría el tratamiento en su conjunto.

La energía dispensada por un mezclador mecánico es siempre mayor que la energía disipada en un mezclador hidráulico. En el equipo mecánico las pérdidas por inducción, por fricción y otras hacen que el trabajo útil aplicado al agua sea apenas una pequeña parte del total. Por otro lado, el costo relativamente elevado y la propia complejidad de los equipos electromecánicos hacen inadecuada su utilización en los países en desarrollo. Una desventaja que presentan los dispositivos hidráulicos es su poca flexibilidad a las variaciones de caudal.

## 2.4 Floculación

La floculación es el proceso en el cual se lleva a cabo la aglomeración de partículas coaguladas para formar partículas floculentas (Romero, 1999), de esta manera, partículas suspendidas muy pequeñas colisionan y se aglomeran formando

partículas más pesadas y de mayor tamaño llamadas Floc para después sedimentar. El crecimiento del Floc depende de dos factores, fuerzas químicas intermoleculares y la acción física producida por la agitación (Viessman & Hammer, 1985).

La formación del flóculo se inicia con la adición del coagulante, pero su volumen, peso y particularmente su cohesión deben de incrementarse. El tamaño del flóculo se mejora con:

- a) El incremento de la cantidad de flóculos en el agua; siempre es una ventaja poner en contacto el agua con precipitados formados durante los tratamientos siguientes (recirculación de lodos) con la mayor concentración posible.
- b) Agitación lenta para incrementar las probabilidades de desestabilizar las partículas coloidales colisionando con una partícula de flóculo.
- c) La utilización de productos conocidos como agentes floculantes (Degremont, 1979).

Normalmente, la floculación se define como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- 1) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
- 2) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- 3) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién

cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microfóculo.

#### 2.4.1 Parámetros operacionales en los floculadores

Los parámetros operacionales del proceso son el gradiente de velocidad ( $G$ ) y el tiempo de retención ( $T$ ). Los valores de estos parámetros, según los estudios realizados por Villegas y Letterman, son los que en forma conjunta van a producir la mayor eficiencia. Se ha determinado que el rango óptimo de gradientes de velocidad para la floculación varía entre 20 y 75  $s^{-1}$  y el de tiempos de retención entre 10 y 30 min, dependiendo de la calidad del agua.

#### 2.4.2 Tipos de floculadores

Se acostumbra clasificar a los floculadores como mecánicos o hidráulicos de acuerdo con el tipo de energía utilizada para agitar la masa de agua.

#### 2.4.4 Floculadores hidráulicos

Los floculadores hidráulicos utilizan la energía hidráulica disponible a través de una pérdida de carga general o específica.

##### A) Floculadores de pantallas

Los floculadores hidráulicos más utilizados son los de pantallas, de flujo horizontal o de flujo vertical. En los primeros, el agua circula con un movimiento de vaivén, y en los segundos, la corriente sube y baja sucesivamente, contorneando las diversas pantallas (Figura 19).

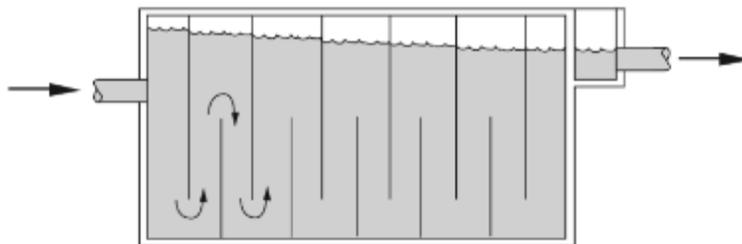


Figura 19. Floculador de pantallas de flujo vertical.  
Fuente: AWWA, 2010.

Los floculadores de pantallas de flujo horizontal son más recomendables para pequeños caudales. Las pantallas pueden ser hechas de madera o de láminas de asbesto-cemento.

Los floculadores de pantallas de flujo vertical pueden aplicarse a caudales mayores. Son más profundos, tienen 4 metros o más de profundidad. Ocupan menos área.

#### B) Floculador alabama

El floculador Alabama está constituido por compartimentos ligados entre sí por la parte inferior a través de curvas de 90° volteadas hacia arriba. El flujo es ascendente y descendente en el interior del mismo compartimento. Las boquillas permiten ajustar la velocidad a las condiciones de cálculo o de operación (Figura 20). Estas unidades son muy vulnerables a las variaciones de caudal. Fácilmente se pueden generar espacios muertos y cortocircuitos.

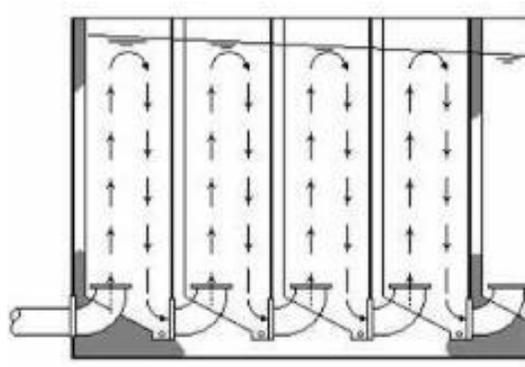
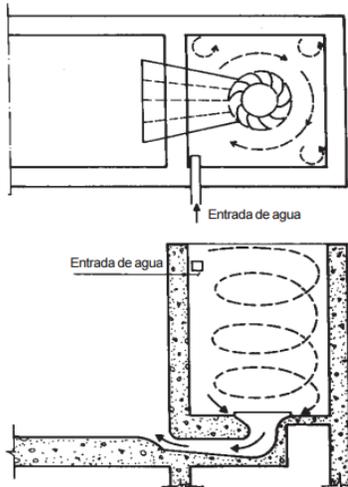


Figura 20. Floculador tipo alabama.  
Fuente: Jacobus, 2009.

#### C) Floculador helicoidal



Como se ilustra en la figura 21 el agua es admitida tangencialmente por la parte superior y sale de la cámara de floculación a través de una curva dotada de unas guías paralelas como una turbina Francis, lo que ayuda a generar el movimiento helicoidal.

En los floculadores helicoidales, la energía hidráulica se usa para generar un movimiento helicoidal en el agua, inducido por su ingreso tangencial en la cámara de floculación.

Figura 21. Floculador tipo helicoidal.  
Fuente: CEPIS, 2008.

#### D) Floculador de medio poroso

La floculación en medios porosos se está aplicando principalmente en pequeñas instalaciones, debido a su elevada eficiencia y bajo costo. Se distinguen dos tipos básicos: floculación en un medio poroso fijo (o floculación en medio granular) y floculación en un medio poroso expandido (floculación en lechos de arena expandida). Ambos fueron utilizados inicialmente en la India.

La floculación en medio granular consiste en hacer pasar el agua, después de haberle aplicado los coagulantes, a través de un medio granular contenido en un tanque (flujo vertical, Figura 22) o canal (flujo horizontal).

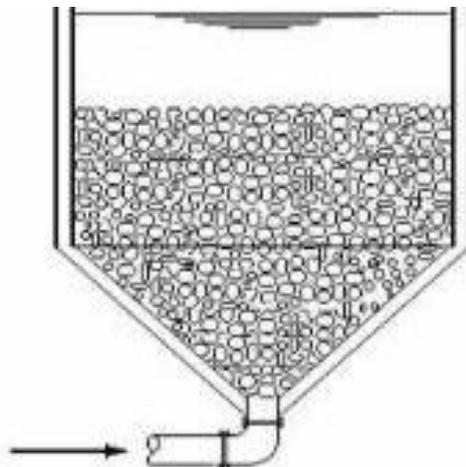


Figura 22. Floculador de medio poroso.  
Fuente: Jacobus, 2009.

El floculador de lecho de arena expandido consiste en una columna a través de la cual el agua cruda pasa en sentido ascendente, después de haber recibido el coagulante. La velocidad del agua es ajustada de tal modo que la expansión sea de alrededor de 6 a 10%. Esto evita la obstrucción del medio poroso.

#### 2.4.5 Floculadores Mecánicos

Los floculadores mecánicos utilizan energía de una fuente externa, normalmente un motor eléctrico acoplado a un intercambiador de velocidades, que hace posible la pronta variación de la intensidad de agitación.

##### a) Floculadores mecánicos de paletas

Los floculadores mecánicos más utilizados son, sin duda, los de movimiento giratorio con paletas paralelas o perpendiculares al eje (Figuras 23 y 24).

El eje puede ser horizontal o vertical. Estos últimos normalmente son más eficientes, porque evitan cadenas de transmisión, y también los pozos secos para la instalación de los motores. Su mantenimiento es difícil, pero cuando han sido bien proyectados, duran años sin dar mayores problemas.

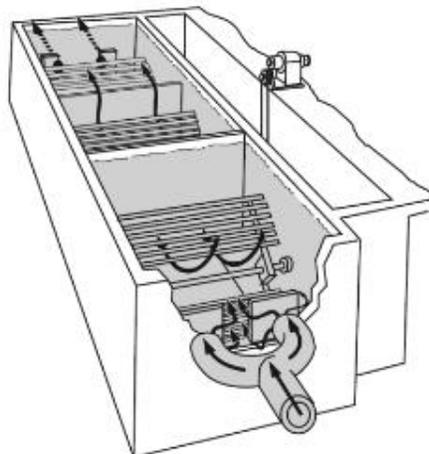


Figura 23. Floculador mecánico de eje horizontal del tipo paletas.  
Fuente: AWWA, 2010.

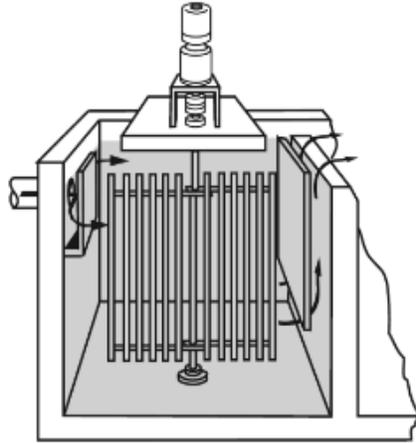


Figura 24. Floculador mecánico de eje vertical del tipo paletas.  
Fuente: AWWA, 2010.

b) Floculadores mecánicos de turbina

Los floculadores del tipo turbina (Figura 25) se dimensionan del mismo modo que los mezcladores rápidos. Como las velocidades periféricas máximas son superiores a 0,75 m/s, el agua tenderá a girar acompañando el movimiento de la turbina, a no ser que se prevea la instalación de deflectores o pantallas para estabilizar el movimiento.

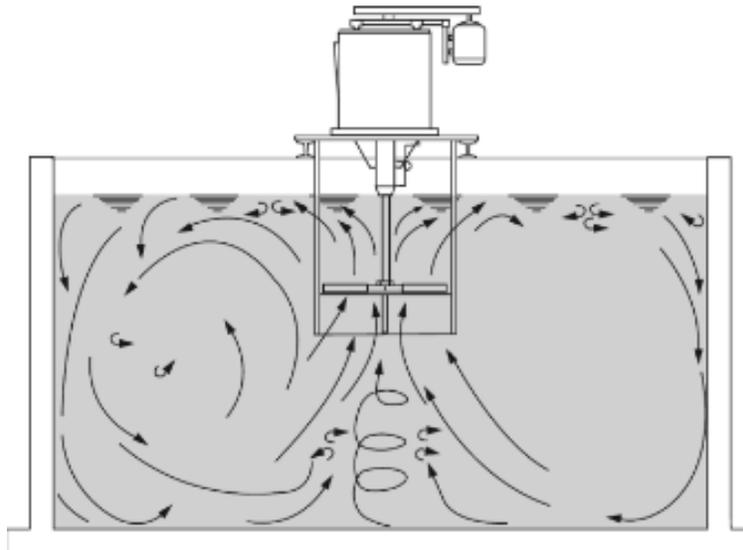


Figura 25. Floculador mecánico de turbina.  
Fuente: AWWA, 2010.

También se pueden clasificar en a) Floculadores de contacto de sólidos y b) Floculadores de potencia o de disipación de energía, dependiendo de la forma como se realiza la aglomeración de las partículas (Figura 26).

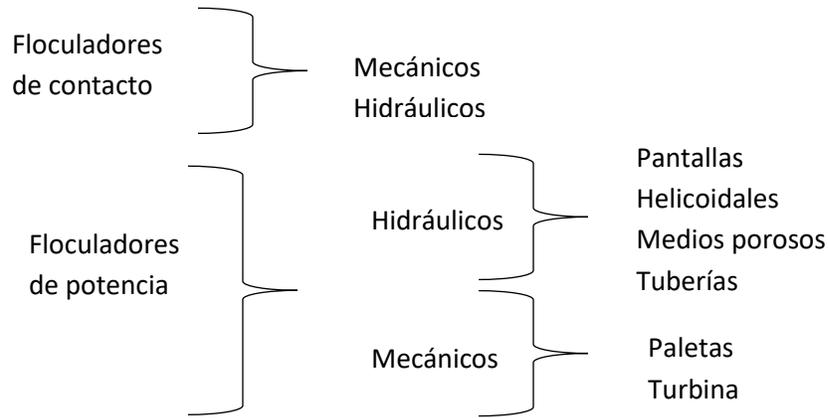


Figura 26. Clasificación de floculadores  
Fuente: CEPIS, 2008.

### 2.4.3 Floculadores de contacto de sólidos

Los floculadores de contacto de sólidos o de manto de lodos son controlados por la concentración de sólidos (C). Como esta varía continuamente, es necesaria una constante atención del operador. Usualmente, los floculadores de contacto de sólidos no son utilizados en plantas de tratamiento. Han sido desarrollados y son ofertados generalmente por fabricantes de equipos, cada uno con sus características propias, que siempre resaltan sus ventajas más aparentes. Son unidades cuyo control y operación son muy difíciles. Estas unidades pueden ser, a su vez, hidráulicas o mecánicas, de acuerdo con la concepción del diseño (Figura 27).

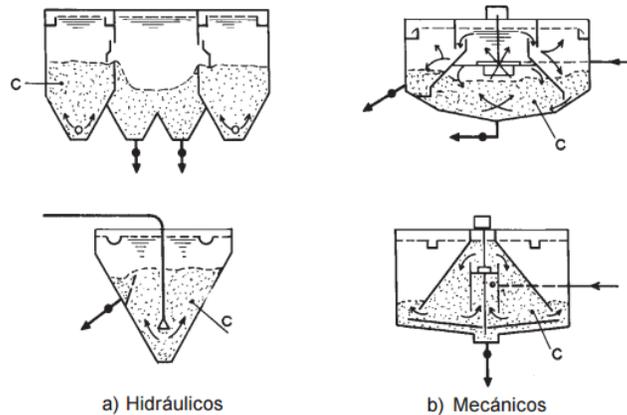


Figura 27. Flocladores de contacto de sólidos.  
Fuente: CEPIS, 2008.

#### 2.4.4 Flocladores de potencia

En los flocladores de potencia, las partículas son arrastradas por el flujo de agua a través del tanque de floculación sin que prácticamente exista concentración de sólidos. Normalmente, los gradientes son prefijados en el proyecto. En algunos casos, pueden ser ajustados por el operador. De acuerdo con la forma de disipación de energía, se pueden clasificar en hidráulicos y mecánicos.

#### 2.5 Sedimentación

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La sedimentación es el proceso más antiguo y más ampliamente usado en los procesos de tratamiento de agua y en recuperación de aguas residuales (Montgomery, 1985).

La sedimentación es el proceso que sigue a la coagulación y la floculación, primeramente para disminuir la carga en los filtros de arena. La filtración es el proceso final en la remoción física de las impurezas del agua. Se puede lograr producir un efluente de buena calidad del filtro, mediante una coagulación eficaz sin emplear la sedimentación, pero los filtros se taponarían muy rápidamente y los

costos de operación serían tan altos que el proceso no sería práctico. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York (DSNY; 2000).

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Por lo tanto se puede hacer referencia a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

### **2.5.1 Sedimentación de partículas discretas**

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se conoce como sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas.

### **2.5.2 Sedimentación de partículas floculentas**

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Se conoce como sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas.

### **2.5.3 Sedimentación por caída libre e interferida**

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le conoce como depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

### **2.5.4 Clasificación de unidades de sedimentación**

La sedimentación o la decantación se realizan en unidades denominadas sedimentadores o decantadores, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva en cada unidad. La clasificación más recomendable es la siguiente:

1. Sedimentadores o decantadores estáticos
2. Decantadores dinámicos
3. Decantadores laminares

### 2.5.5 Sedimentadores y decantadores estáticos

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre. En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad  $v_h$  constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido ( $v_h$ ) y su propia velocidad de sedimentación ( $v_s$ ) como se aprecia en la Figura 28.

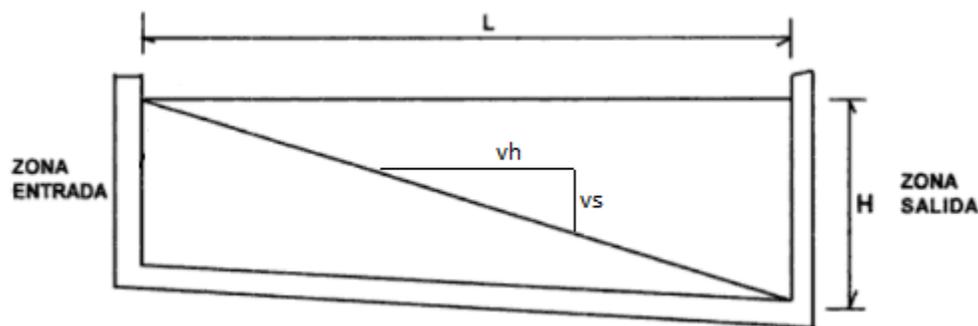


Figura 28. Trayectoria ideal de partículas discretas.  
Fuente: Corcho y Duque, 2005.

### 2.5.6 Componentes de una unidad

Una unidad de sedimentación como la mostrada en la Figura 29 consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas:

1. Zona de entrada y distribución de agua
2. Zona de sedimentación propiamente dicha
3. Zona de salida o recolección de agua
4. Zona de depósito de lodos.

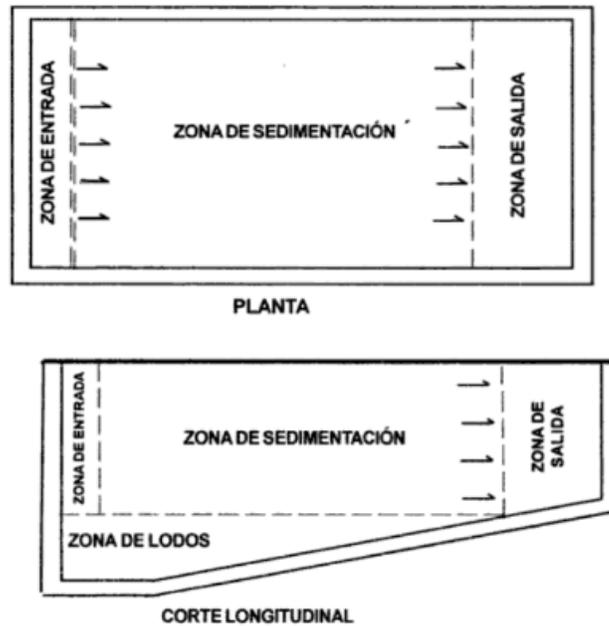


Figura 29. Zonificación de un sedimentador.  
Fuente: Corcho y Duque, 2005.

## 2.5.7 Desarenadores

Desarenadores: Son estructuras que tienen la función de remover las partículas de cierto tamaño que la captación de una fuente superficial permite pasar (Corcho y Duque, 2005), con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente y la interferencia en los procesos de coagulación y floculación.

El diseño del desarenador está relacionado con el diseño del sedimentador. Al estudiar la ubicación de una captación, debe evitarse al máximo el arrastre de arena, diseñando este tipo de unidades cuando la calidad de agua así lo requiera.

### 2.5.7.1 Tipos de desarenadores

Los diferentes tipos de desarenadores (Karia G. & Christian R., 2013):

Rectangular de flujo horizontal.- Este es el tipo de desarenador más usado comúnmente. Es normalmente diseñado para remover partículas de 0.2 mm de tamaño o más. Usualmente la longitud del canal depende de la profundidad requerida para una velocidad de sedimentación específica.

Generalmente, los desarenadores tienen forma rectangular, como se muestra en la Figura 30.

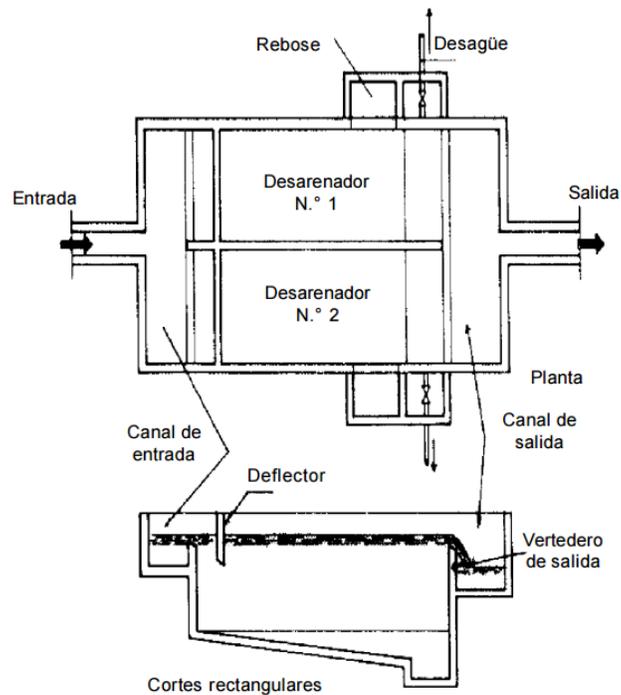


Figura 30. Desarenador rectangular.  
Fuente: CEPIS, 2008.

Tanques detritus.- Este es normalmente un desarenador de forma cuadrada en el cual cierta cantidad de materia orgánica y sólidos suspendidos finos presentes en el agua sedimentan junto con las arenas, controlando el flujo a través de la velocidad, sin embargo la materia orgánica es regresada al influente.

Desarenador aireado.- Este tipo es conocido también como tanque aireado detritus. En este tipo de desarenador los sólidos orgánicos que bien podrían sedimentar por gravedad se mantienen en suspensión mediante la aireación ascendente de

burbujas de aire proporcionado por el sistema de aireación ubicado en el fondo del tanque o por medio de algún tipo de agitación.

Cuadrado de flujo horizontal.- Este tipo de desarenador fue empleado anteriormente para remover partículas de 0.15 mm de tamaño e inferiores.

Flujo tipo vórtice.- En este tipo de desarenadores los dispositivos que producen el flujo vórtice en el tanque son usados para remover las arenas. Este sistema se basa en un vórtice mecánico inducido para capturar las arenas en una tolva ubicada centralmente en un tanque circular.

### 2.5.8 Tipos de sedimentadores y decantadores estáticos

Unidades de flujo horizontal: Estos sedimentadores se clasifican, de acuerdo con la forma de su planta, en rectangulares, circulares y cuadrados.

Los decantadores o sedimentadores rectangulares tienen la forma y características detalladas en la Figura 31, con la ventaja de que permiten una implantación más compacta, aunque su costo es más elevado. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2.5 a 4.0 metros.

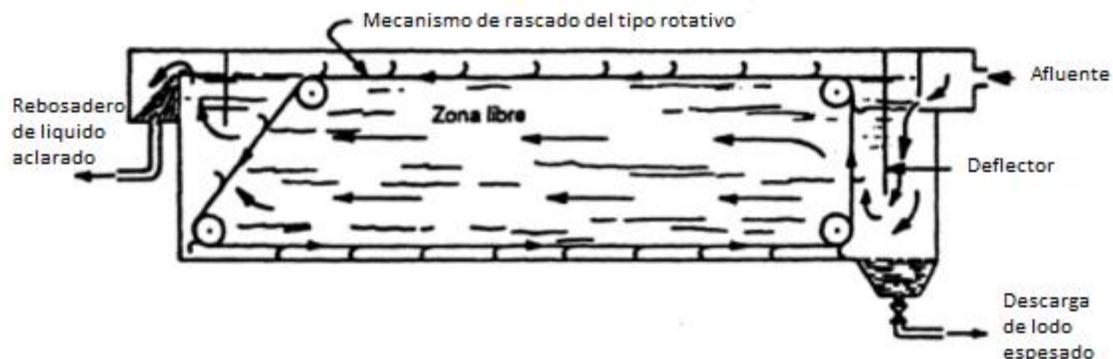


Figura 31. Sedimentador horizontal de forma rectangular.  
Fuente: Ramalho, 2003.

Los sedimentadores o decantadores de forma cuadrada o circular (Figura 32) disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro de la unidad.

Están provistos generalmente de una pantalla defleitora que desvía el agua hacia el fondo de la unidad. El flujo en la zona de sedimentación es horizontal.

También cuentan con canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada.

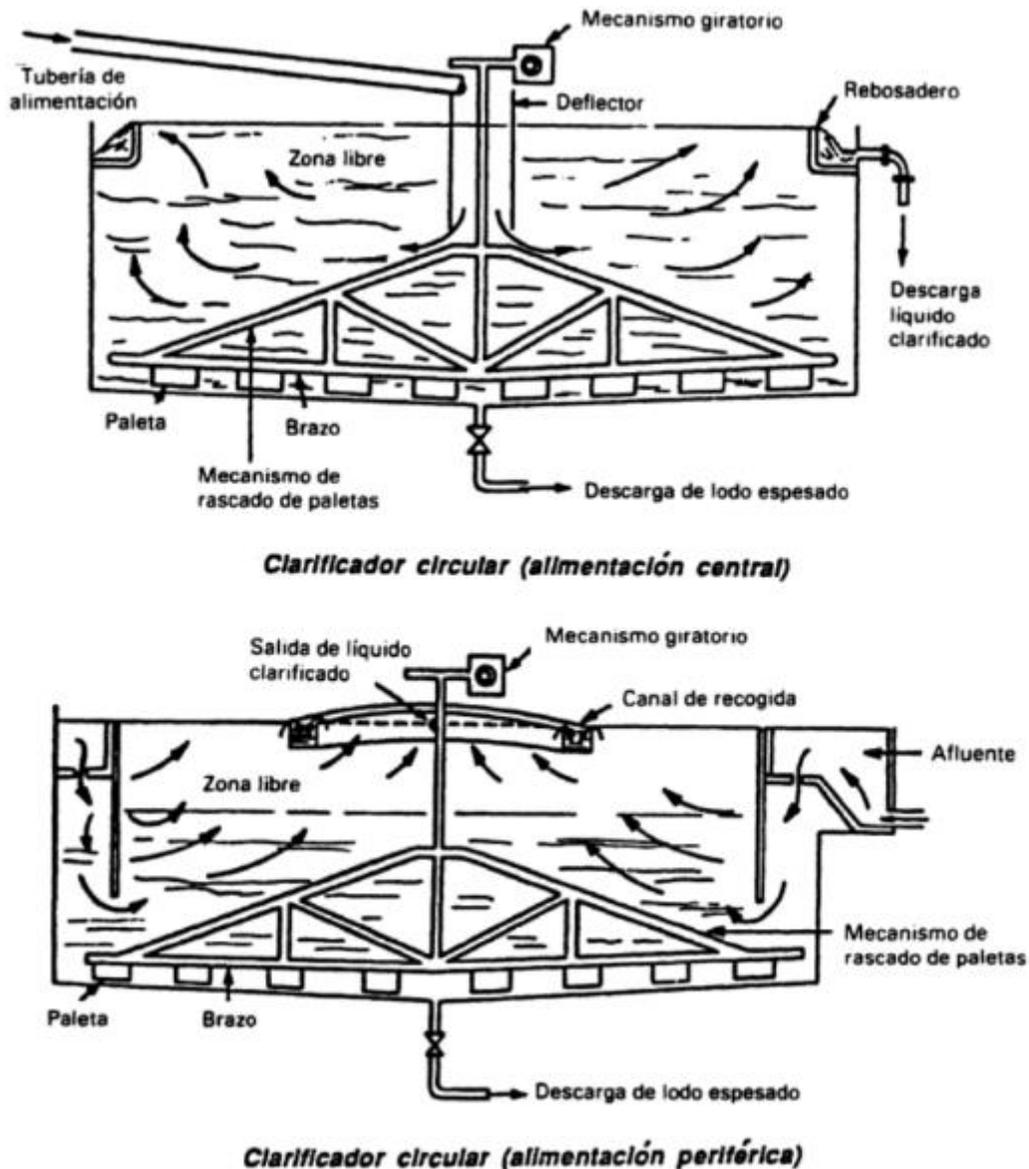


Figura 32. Sedimentadores o decantadores estáticos circulares.  
Fuente: Ramalho, 2003.

Es necesario vaciar el tanque de lodos cada cierto tiempo y extraer los lodos manualmente, con la ayuda de mangueras de agua a presión.

Usualmente, los sedimentos se compactan y transforman en una masa pastosa que resbala muy difícilmente; se requieren pendientes de 45° a 60° en el fondo de los tanques. El tamaño de la zona de lodos dependerá del periodo de funcionamiento del sedimentador y de la cantidad de lodos producidos.

Unidades de flujo vertical: Estas unidades tienen forma cilíndrica como se muestra en la Figura 33. La entrada del agua cruda se realiza por el centro de la unidad en forma descendente. En la parte inferior está ubicada la zona de lodos, que tiene forma cónica con pendiente de 45° a 60°, según la naturaleza del agua y el tratamiento aplicado. La recolección del agua sedimentada se realiza en la parte periférica superior de la unidad.

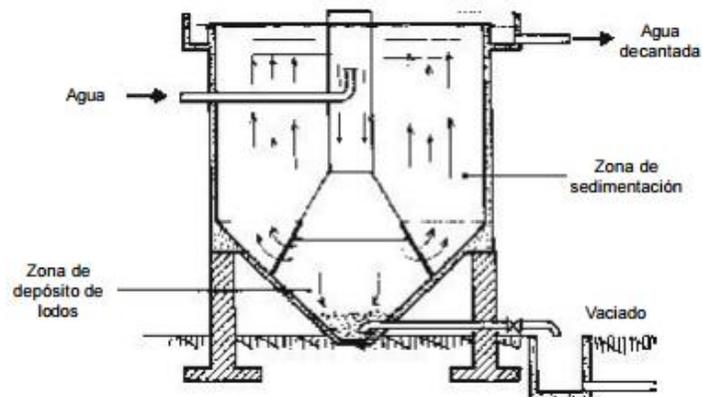


Figura 33. Sedimentador estático de flujo vertical.  
Fuente: CEPIS, 2008.

### 2.5.9 Decantadores dinámicos

La teoría de la decantación interferida se aplica a este tipo de unidades. Se requiere una alta concentración de partículas para incrementar las posibilidades de contacto en un manto de lodos que tiene una concentración de partículas de 10 a 20 % en volumen.

Las partículas pequeñas que entran por el fondo son arrastradas por el flujo, al

chocar con otras, incrementan su tamaño. Se entiende que en la zona de manto de lodos se promueve la floculación y en la parte superior a ella ocurre la decantación. Una unidad de manto de lodos consta básicamente de los siguientes componentes (Figura 34):

1. Sistema de entrada de agua
2. Zona de formación del manto de lodos
3. Zona de clarificación
4. Sistema de recolección de agua clarificada
5. Zona de concentración de lodos.

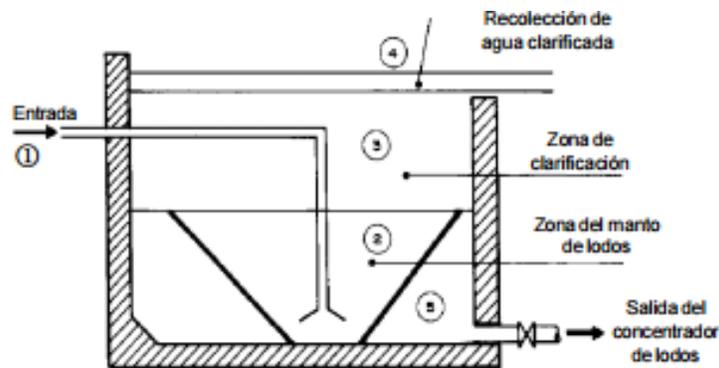


Figura 34. Componentes de un decantador de manto de lodos.  
Fuente: CEPIS, 2008.

La clarificación consiste en el tratamiento químico del agua para desestabilizar las partículas coloidales (coagulación) y facilitar su floculación y sedimentación con otros sedimentos suspendidos (Stackelberg et al., 2007). Es por eso que a este tipo de unidades también se les conoce como clarificadores.

Los decantadores de manto de lodos se pueden clasificar de acuerdo con las condiciones y características de la zona de formación de lodos, que se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de decantadores de manto de lodos.

<b>Tipo de suspensión</b>	<b>Mezcla de lodos</b>	<b>Control de la altura del manto de lodos</b>	<b>Tipo de flujo</b>
<b>Hidráulica</b>	Sin recirculación	Con vertedero Sin vertedero	Constante Pulsante
<b>Mecánica</b>	Sin recirculación	Con vertedero	Constante con separación dinámica
	Con recirculación	Sin vertedero	Constante con agitación

Fuente: CEPIS, 2008.

Unidades de manto de lodos con suspensión hidráulica.

Estas unidades fueron las primeras que se construyeron. Consisten esencialmente en un tanque de fondo cónico o tronco piramidal, en cuya parte inferior se inyecta el agua cruda que asciende disminuyendo la velocidad a medida que el área aumenta y manteniendo así un manto de lodos hidráulicamente suspendido.

Unidades de manto de lodos con suspensión mecánica.

Las unidades que usan sistemas mecánicos para mantener el manto de lodos en suspensión pueden ser, en general, de tres clases:

- a) De agitación
- b) De separación
- c) Pulsante o de vacío

Unidades de manto de lodos con agitación simple.

Un agitador mecánico que gira lentamente en el fondo, movido por un motor o por agua a presión, mantiene las partículas en suspensión y recolecta los lodos en un concentrador, de donde son removidos periódicamente (Figura 35). El agua tiene que ascender hasta las canaletas periféricas superiores y se filtra a través del manto de lodos. En estas unidades no existe recirculación de lodos.

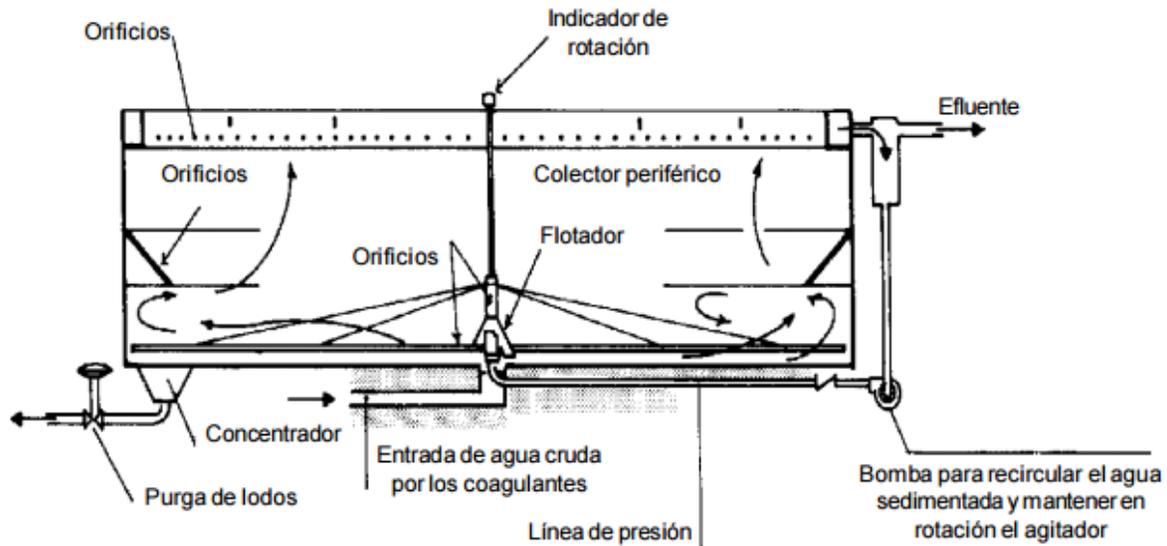


Figura 35. Unidad de manto de lodos con agitación simple.  
Fuente: CEPIS, 2008.

#### Unidad de manto de lodos con separación dinámica

Las unidades que emplean separación dinámica (Figura 36) utilizan una turbina que gira a alta velocidad, colocada en el centro del tanque, la cual impulsa el flujo hacia abajo a través del orificio periférico, de forma tal que las partículas que descienden empujadas por la energía mecánica de la turbina choquen con las que ascienden con el flujo del tanque.

En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: una primera zona de mezcla y reacción en la parte interior, donde se inyectan los coagulantes; una segunda zona de mezcla lenta o floculación; una tercera zona donde se establece el manto de lodos y, por último, una cuarta zona en la que se produce la decantación y el agua clarificada sube hasta las canaletas de salida.

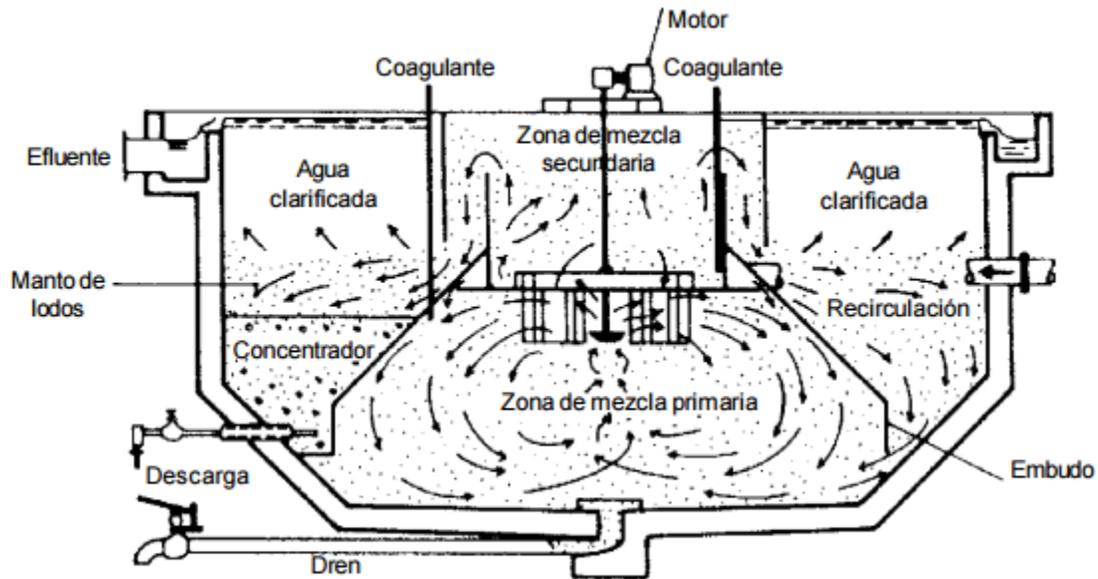


Figura 36. Unidades de separación dinámica.  
Fuente: CEPIS, 2008.

#### Unidad de manto de lodos pulsante o de vacío

Este tipo de unidades consiste esencialmente en un tanque cuadrado o circular, en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío, en la cual periódicamente se disminuye la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda por la campana hasta un cierto nivel y luego se descargue en el tanque y se produzca la expansión de los lodos y se bote el exceso de estos a los concentradores. Esta periódica expansión y contracción del manto se usa para homogeneizarlo. Se evitan las grietas o canales que permiten el paso directo de la turbiedad y la sedimentación de las partículas más pesadas en el fondo de la unidad.

#### 2.5.10 Decantadores laminares

##### a) De flujo horizontal

En estos decantadores el flujo del agua es o tiende a ser horizontal. La Figura 37 representa un sedimentador laminar con láminas ligeramente inclinadas con un ángulo de  $5^\circ$  (ángulo de máxima eficiencia de remoción). En esta solución, se requiere invertir el flujo para realizar la limpieza del sedimentador. Esta

solución es muy utilizada en plantas comerciales o plantas de pequeña capacidad (inferior a 50 litros por segundo). Su uso se limita únicamente por razones económicas.

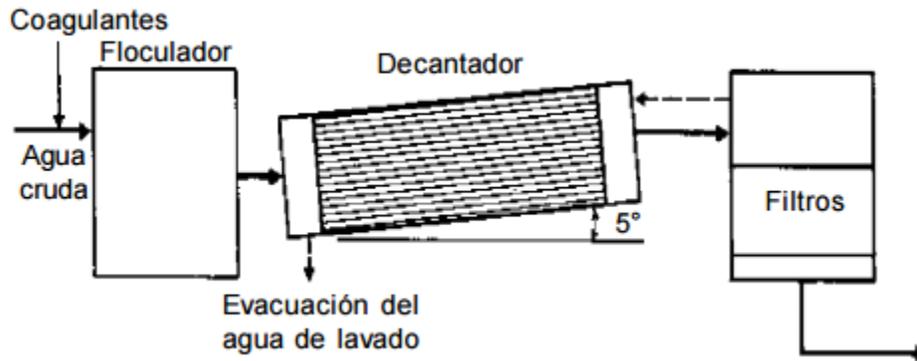


Figura 37. Decantador de láminas horizontales.  
Fuente: CEPIS, 2008.

b) De flujo inclinado

Este tipo de decantadores es el más usado (Figura 38). Generalmente, en la parte inferior del decantador se presenta una zona de distribución de agua. En la parte media existen módulos inclinados con un ángulo de 60°. El agua decantada se recolecta lateralmente en la parte superior.

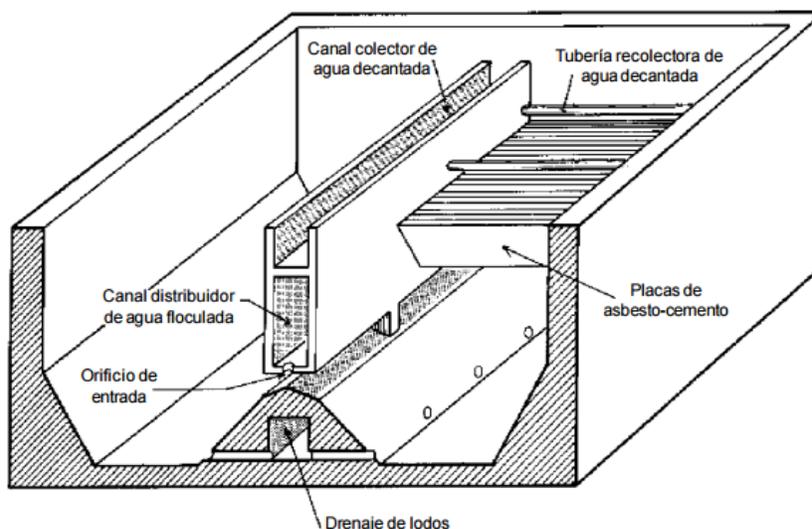


Figura 38. Decantador de placas.  
Fuente: CEPIS, 2008.

## 2.6 Filtración

El objeto de la filtración es separar las partículas y microorganismos, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la eficiencia de los procesos anteriores.

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua.

La filtración puede efectuarse de varias maneras: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos (pastas arcillosas, papel filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados), con flujo ascendente de abajo hacia arriba o descendente de arriba hacia abajo y mixto (parte ascendente y parte descendente). Por último, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad, según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante.

Tradicionalmente en las plantas de tratamiento municipales, se han utilizado filtros de arena con flujo descendente por gravedad (Arboleda, 1981).

Si el proceso de filtración está bien diseñado y funcionando correctamente, éste puede llegar a remover de manera eficaz y permanente microbios patógenos y en algunos casos puede ser el único tratamiento que actúa como barrera, por ejemplo en la remoción de ooquistes de *Cryptosporidium* mediante filtración directa cuando el único desinfectante que se utiliza es el cloro. Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004).

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, el efluente producido por el filtro debe tener una turbiedad menor o igual 0.10 UNT (Unidad nefelométrica de turbidez) para garantizar que esté libre de huevos de parásitos

(Giardia, Cryptosporidium, Etc.), para que el filtro logre esta eficiencia el efluente del sedimentador debe tener una turbiedad máxima de 2 UNT (Caballero, 2011).

### 2.6.1 Tipos de unidades de filtración

En la Tabla 8 resume las diferentes alternativas para cada uno de los parámetros que usualmente se utilizan para clasificar filtros rápidos.

Tabla 8. Clasificación de filtros.

Parámetro de clasificación			
Lecho filtrante	Sentido del flujo	Carga sobre el lecho	Control operacional
Simple (arena o antracita)	Descendente	A gravedad	Tasa constante y nivel variable
Lechos doble o múltiples	Ascendente	A presión	Tasa constante y nivel constante
	Ascendente-descendente		Tasa declinante

Fuente: (CEPIS, 2008).

### 2.6.2 Filtración por gravedad

La filtración rápida, realizada por gravedad, usualmente se emplea en las plantas de tratamiento para fines de abastecimiento público. El factor económico es la variable que define su preferencia de uso. Estas unidades pueden ser de flujo ascendente y son conocidos como filtro ruso y ser operadas con tasa de filtración constante o declinante.

Cuando es de flujo descendente, la filtración rápida puede realizarse con tasa declinante o constante en filtros de lecho único de arena o de lechos múltiples.

### 2.6.3 Filtración ascendente

La filtración ascendente presenta la ventaja de que el agua afluyente escurre en el sentido en que los granos del medio filtrante disminuyen de tamaño, lo que hace

posible que todo el medio filtrante, constituido por arena, sea efectivo en la remoción de partículas suspendidas.

La aplicación más ventajosa de este tipo de unidades es la filtración directa, en la que los productos químicos se aplican y dispersan en el agua cruda antes de la filtración. En seguida, el agua es conducida a los filtros por la parte inferior.

#### **2.6.4 Filtración descendente**

Los filtros descendentes por gravedad eran diseñados para funcionar únicamente con tasa constante, y generalmente iban provistos de dispositivos automáticos de control de caudal y nivel. En los últimos años se han desarrollado tecnologías que han simplificado sensiblemente la forma de operación de los filtros de gravedad, como la operación mediante tasa declinante.

Este tipo de unidades es el que normalmente se prefiere diseñar en los sistemas de abastecimiento públicos. Su mayor simplicidad garantiza una adecuada operación.

#### **2.6.5 Filtración ascendente-descendente**

Los filtros denominados Bi-Flow, donde parte del agua cruda coagulada es introducida en la parte superior, y la restante en la parte inferior del filtro. La colección se hace por medio de tuberías provistas de bocas e instaladas en el interior del medio filtrante. La Figura 39 presenta, en forma esquemática, este tipo de instalación.

Este tipo de instalación presenta el inconveniente de que la colección del agua se hace en el interior del medio filtrante, donde las bocas se pueden obstruir con el tiempo, por lo que requieren un mantenimiento rutinario.

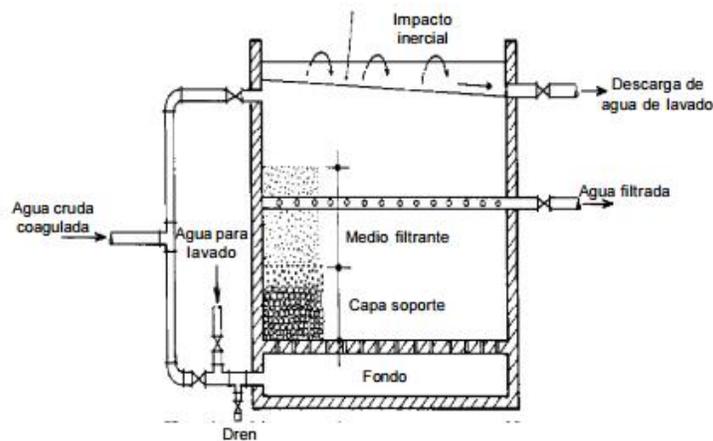


Figura 39. Esquema de un filtro ascendente-descendente Biflow.  
Fuente: CEPIS, 2008.

## 2.6.6 Clasificación de filtros de acuerdo a su forma de operación

### 2.6.6.1 Filtros de tasa constante y nivel variable

Cuando la entrada a los filtros es hecha de modo que el caudal total afluente sea repartido equitativamente y el nivel de agua en cada filtro varíe independientemente del nivel de los demás, el caudal de filtración será constante, ya que el aumento de resistencia del filtro es acompañado por el aumento de carga hidráulica disponible. El nivel del agua en la caja del filtro variará desde un valor mínimo, cuando el medio filtrante se encuentra limpio, hasta un valor máximo, cuando el filtro deberá ser lavado. El nivel de agua será diferente entre los diversos filtros de una batería, y dependerá solamente del grado de colmatación del medio filtrante de cada uno de ellos. Al inicio de la operación, el medio filtrante estará limpio y, por lo tanto, para evitar que el nivel mínimo se localice debajo de la cima de la capa filtrante, la instalación deberá estar provista de una válvula u otro dispositivo cualquiera en la tubería efluente para ajustar el nivel mínimo. La conexión de las salidas individuales de los filtros en un canal provisto de un vertedero también podrá ser utilizada para este fin. Este método de operación se conoce como “distribución equitativa de caudal”.

La Figura 40 muestra las características principales de arreglo típico de entrada y salida de los filtros cuando se emplea este método de control.

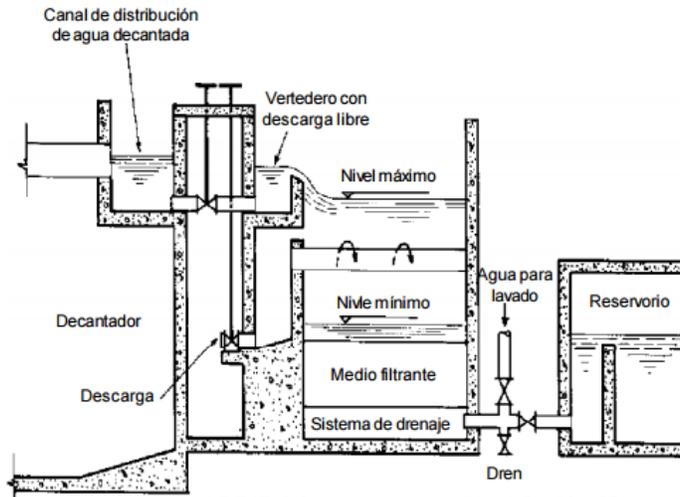


Figura 40. Arreglo típico de entrada y salida de los filtros de tasa constante y nivel variable. Fuente: CEPIS, 2008.

### 2.6.6.2 Filtros de tasa y nivel constantes

En este método de operación el nivel de agua en los filtros de gravedad no varía mucho. Al inicio de la carrera de filtración, el medio filtrante está limpio, y para que la resistencia total del filtro sea mantenida constante, es necesario un dispositivo controlador que genere un valor de pérdida de carga igual a la diferencia entre la carga hidráulica total disponible y la suma de las pérdidas de carga en el sistema (pérdida de carga inicial en el medio filtrante, pérdida de carga en el lecho de soporte y pérdida de carga en drenaje, tuberías y accesorios).

A medida que progresa la carrera de filtración, aumenta la pérdida de carga en el medio filtrante debido a la retención de partículas y, como resultado, la pérdida de carga introducida por el dispositivo controlador debe disminuir.

Cuando el dispositivo controlador genere el menor valor posible de pérdida de carga referente a la tasa de filtración fijada, el filtro debe ser lavado, pues de aquel momento en adelante, cualquier aumento de la pérdida de carga en el medio filtrante no será compensado por el dispositivo controlador.

Básicamente, los dispositivos de control disponen de un medidor de caudal, un transmisor, una válvula de control y un fijador de caudal (ver Figura 41). La conexión entre los dispositivos puede ser mecánica, neumática, eléctrica, hidráulica o el resultado de la combinación de dos o más medios de conexión.

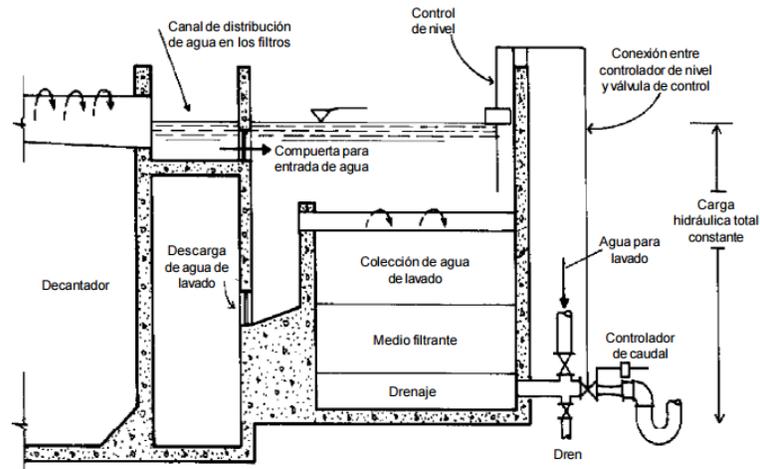


Figura 41. Filtro de tasa y nivel constante.

Fuente: CEPIS, 2008.

### 2.6.6.3 Filtros de tasa declinante

Otro sistema de operación (Figura 42) consiste en aquel donde la carga hidráulica disponible es íntegramente aplicada desde el inicio hasta el final de la carrera de filtración, lo que conlleva, con el transcurso del tiempo, una disminución gradual del caudal filtrado.

Como la distribución de agua hacia cada una de las unidades de filtración de la misma batería es hecha por medio de una tubería o un canal común de dimensiones relativamente grandes (para que la pérdida de carga pueda ser considerada despreciable), el nivel de agua es prácticamente el mismo en todos los filtros que integran la batería y en el canal común de distribución de agua (principio de vasos comunicantes).

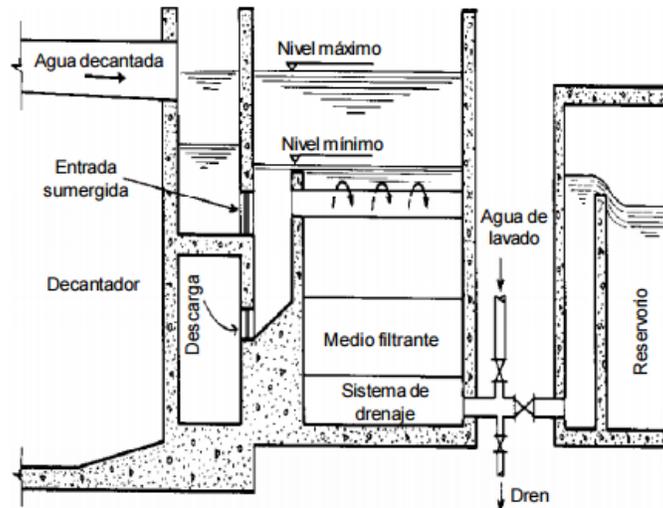


Figura 42. Esquema de un sistema de filtración con tasa declinante.  
Fuente: CEPIS, 2008.

En estas unidades se identifican tres niveles de operación, N1, N2 y N3 (ver Figura 43). El nivel N2 (nivel máximo) corresponde al instante en que un filtro de la batería debe ser lavado.

También se denomina a este nivel de operación nivel máximo de operación de los filtros, y corresponde al instante en el que se ha utilizado la totalidad de la carga hidráulica disponible para la filtración en la batería.

Durante el lavado de un filtro, los restantes de la batería deben absorber el caudal del filtro retirado de operación y, de este modo, el nivel de agua en ellos sube hasta alcanzar el valor máximo N3. Finalmente, cuando el filtro recién lavado es puesto en operación, este filtra un caudal superior a aquel obtenido cuando fue retirado para lavado y, en consecuencia, el nivel de agua en toda la batería, incluido el canal común de distribución, disminuye del nivel N3 hasta alcanzar un valor mínimo, que es el nivel N1. De ahí en adelante, el nivel de agua en la batería de los filtros subirá progresivamente debido a la retención de impurezas en los filtros, hasta que el nivel N2 sea nuevamente alcanzado. Esto significará que otro filtro habrá concluido con la carrera de filtración y deberá ser retirado para su lavado. El filtro que se retirará para el lavado será aquel que tenga el mayor número de horas en operación de filtración.

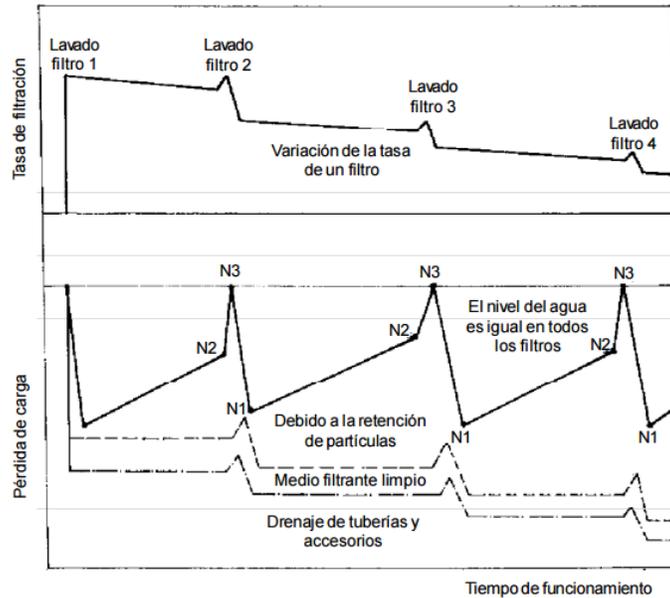


Figura 43. Variación de la tasa de filtración, pérdida de carga y nivel de agua durante el funcionamiento del filtro.

Fuente: CEPIS, 2008.

### 2.6.7 Filtros a presión

La filtración rápida bajo presión se realiza en tanques de lámina de acero y puede ser de flujo ascendente, descendente con medios filtrantes constituidos por una o más capas y ascendente-descendente (Bi-Flow).

El medio filtrante así como la sección transversal de este tipo de filtros son similares a los filtros rápidos normales. La dosificación de reactivos químicos se realiza generalmente en línea. La aplicación de este tipo de filtros se da en especial en la remoción de hierro y manganeso precipitados, en el tratamiento de aguas usadas en procesos industriales y en la filtración de agua recirculada de piscinas de natación. Las ventajas de este tipo de filtros sobre los filtros por gravedad radica en que existe una mayor presión para conducir el agua sobre el filtro lo cual proporciona carreras de filtración más largas (Terence, 1999).

## **2.7 Desinfección**

### **2.7.1 Fundamentos de la desinfección del agua**

La desinfección del agua, como se le conoce hoy día, implica un tratamiento especializado para la destrucción de organismos dañinos. En general, los procesos de desinfección se han empleado para destruir o dejar inactivos algunos organismos productores de enfermedades (patógenos), de manera más particular, bacterias de origen intestinal. Estos organismos pueden sobrevivir durante semanas a temperaturas cercanas a los 21.1°C, o quizá por meses a temperaturas más bajas. Además de la influencia de la temperatura, su supervivencia en el agua depende de factores ambientales, fisiológicos y morfológicos, tales como el pH, el oxígeno y el suministro de nutrientes, dilución, competencia con otros organismos, resistencia a influencias tóxicas y la habilidad para formar esporas. El que estos organismos realmente puedan ocasionar enfermedades en el hombre al ingerirlos depende de su virulencia y concentración así como de la vulnerabilidad o susceptibilidad del individuo a ellos.

Obviamente, la desinfección del agua también abarca la destrucción de organismos patógenos distintos de las bacterias intestinales, pero no necesariamente implica la destrucción completa de todo organismo vivo, es decir esterilización. (Los procesos de desinfección del agua pocas veces se han llevado al punto de la esterilización; esta se ha reservado en gran parte a la práctica de la medicina). Entre los demás organismos patógenos de importancia con respecto a la desinfección del agua existen varios virus, protozoos intestinales y algunos macroorganismos. Además, muchos organismos presentan un problema de importancia estética o económica, tanto de origen vegetal como animal, son a veces vulnerables a la desinfección y es posible controlarlos parcial o completamente mediante un tratamiento adecuado (AWWA, 1998).

Se sabe que el agua puede ser un vehículo importante en la dispersión de agentes capaces de causar enfermedades diarreicas como por ejemplo el cólera y la tifoidea,

motivo por el cual para un país como México, es prioritario contar con agua desinfectada para uso y consumo humano.

En el agua se presentan tres clases de microorganismos patógenos que provocan las enfermedades mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Patógenos transmitidos a través del agua.

<b>Bacterias</b>	<b>Enfermedad</b>	<b>Virus</b>	<b>Enfermedad</b>
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis	Adenovirus	Enteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis	Coxsackievirus y ecovirus	Meningitis, miocarditis
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Hepatitis A y E	Hepatitis
<i>Salmonella spp</i>	Gastroenteritis	Norwalk	Enteritis
<i>Shigella dysenteriae</i>	Disentería	Polio virus	Poliomielitis
<i>Shigella spp</i>	Gastroenteritis	Rotavirus	Enteritis
<i>Vibrio cholerae</i>	Gastroenteritis	Calicivirus y astrovirus	Enteritis
<i>Virio spp</i>	Gastroenteritis		
<b>Protozoarios</b>	<b>Enfermedad</b>		
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis		
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería		
<i>Cryptosporidium spp</i>	Disentería		

Fuente: Moe, 2007.

La ausencia de estos microorganismos en el agua depende, entre otros, de los siguientes factores:

- 1 Naturaleza, concentración y estado biológico de los organismos patógenos
- 2 Características y concentración del agente desinfectante utilizado
- 3 Características del agua a tratar: composición, pH, temperatura, etc.
- 4 Tiempo de contacto con el desinfectante (IMTA, 2002).

Los desinfectantes basados en el cloro han jugado un papel muy importante en la prevención de las infecciones gastrointestinales. Los beneficios de esta práctica se traducen en la protección de la salud pública a través del control de la hidrotransmisión de infecciones gastrointestinales, y como evidencia se encuentra la incidencia casi nula de infecciones como el cólera y la tifoidea en los países industrializados.

### **2.7.2 Características de un desinfectante ideal:**

Un buen desinfectante debe poseer las siguientes características importantes (IMTA, 2002):

- a) Rápido y efectivo para eliminar microorganismos patógenos presentes en el agua
- b) Debe prevenir procesos de reparación después de la desinfección primaria
- c) Fácilmente soluble en agua a las concentraciones requeridas para la desinfección
- d) Capaz de proporcionar acción residual
- e) No debe producir subproductos durante la desinfección
- f) Que no imparta sabor, olor o color al agua
- g) Que no sea tóxico para la vida humana o animal
- h) Fácil de manipular, transportar, aplicar y controlar
- i) De fácil disponibilidad a un costo moderado

### **2.7.3 Tipos de desinfectantes**

Existen diferentes métodos para inactivar o matar microorganismos (Tabla 10), sin que todos sean necesariamente utilizados por los ambientalistas. Los procesos de sedimentación, coagulación, floculación y filtración rápida, reducen en grado variable el contenido microbiano del agua, de tal manera que no es posible asegurar su calidad sanitaria y se requerirá de una desinfección final. Es importante señalar que aunque no siempre es lo correcto, en situaciones en las que no se cuenta con procesos de potabilización, el agua debe al menos ser desinfectada como único tratamiento contra la contaminación microbiológica.

Tabla 10. Agentes inactivantes o inhibidores del crecimiento microbiano.

<b>Acción</b>	<b>Agente</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Inhibición</b>	Químicos Alta presión osmótica Refrigeración Deseccación	Colorantes, antibióticos Jarabes  Liofilización
<b>Remoción</b>	Filtración Centrifugación Coagulación y sedimentación Adsorción	Utilizados en el tratamiento de agua
<b>Destrucción</b>	Calor Mecánico Radiación Químico	Seco y húmedo (ebullición) Ondas ultrasónicas Luz ultravioleta Cloro, ozono

Fuente: IMTA, 2002.

### **2.7.4 Desinfección física mediante luz ultravioleta**

Los métodos principales de desinfección física del agua son la ebullición, que no resulta practica para sistemas de abastecimiento públicos, y la radiación ultravioleta, que actualmente se emplea en países industrializados.

La desinfección con luz ultravioleta es un método efectivo de desinfección de aguas claras, pero su efectividad es muy reducida cuando el líquido es turbio o contiene nitratos, sulfatos y hierro ferroso. Un inconveniente de este método es que no tiene poder residual para proteger el agua de una nueva contaminación, motivo por el cual no ha sido muy utilizada en países con alta incidencia de diarreas.

### **2.7.5 Desinfectantes químicos**

De acuerdo con las características que debe tener un buen desinfectante para su aplicación en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano, las sustancias químicas que han sido más ampliamente utilizadas son: cloro, yodo, ozono y otros oxidantes como el permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno, cada uno de los cuales tiene sus ventajas y limitaciones. La cloración es el método de desinfección de agua más ampliamente utilizado, debido a que el cloro además de que tiene una alta capacidad para matar microorganismos patógenos con rapidez, se puede obtener con facilidad a costos moderados.

El yodo, puede ser un buen desinfectante cuando las dosis son adecuadas (10 -15 mg/L). No es adecuado para aguas que presentan color o turbidez. Un inconveniente en su uso es su alta volatilidad en soluciones acuosas.

El permanganato de potasio es un agente oxidante fuerte, y es efectivo contra el agente casual del cólera (*Vibrio cholerae*); sin embargo, mancha los contenedores y por esto no es muy aceptado para abastecimientos públicos de agua.

El uso de ozono es cada vez más utilizado para la desinfección del agua para uso y consumo humano, ya que además es efectivo en la eliminación de compuestos que dan sabor o color. La limitate es que no posee poder residual, que proteja al agua contra una nueva contaminación durante la distribución (IMTA, 2002).

### **2.7.6 Cloración**

En el siglo pasado, la cloración del agua potable ha reducido dramáticamente la incidencia de enfermedades transmitidas por agua en los lugares donde se ha aplicado, contribuyendo a mejores esperanzas de vida y sociedades más saludables (Rose, 2011).

El cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, incluyendo su fácil dosificación y costo conveniente.

Sin embargo, presenta algunas desventajas:

- a) Es muy corrosivo
- b) Puede producir sabor desagradable en el agua, incluso en concentraciones que no significan riesgo para el consumidor
- c) Su manejo y almacenamiento requieren de ciertas normas de seguridad, para evitar riesgos en la salud de los operadores (CEPIS, 2008).

Aunque el cloro y sus derivados no son los desinfectantes perfectos, muestran las siguientes características que los hacen sumamente valiosos:

- a) Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada o entregada a los usuarios.
- b) Tienen una acción germicida de espectro amplio.
- c) El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo.
- d) El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente, aun en lugares remotos de los países en desarrollo.
- e) Es económico y eficaz en relación con sus costos.

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son: cloro gaseoso, cal clorada, hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio (Solsona, 2002).

### **2.7.7 Mecanismos de la desinfección con cloro**

Durante el proceso químico de la desinfección se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Asimismo, se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección. La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrogenios ( $H^+$ ) e hipoclorito ( $OCl^-$ ) y adquiere sus propiedades oxidantes:

Ambas fracciones de la especie son microbicidas y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus y produciendo su inactivación (Solsona, 2002).

En presencia de amoníaco la adición de cantidades crecientes de cloro produce residuales de cloro según la curva similar presentada en la Figura 44. A estas sustancias se les conoce como cloro residual combinado.

El punto de la curva en el cual todo el amoníaco y materia orgánica (si esta existe), ya ha reaccionado con el cloro y comienza a aparecer un residual de cloro libre se denomina: punto de quiebre o "break point" (punto "C" de la curva).

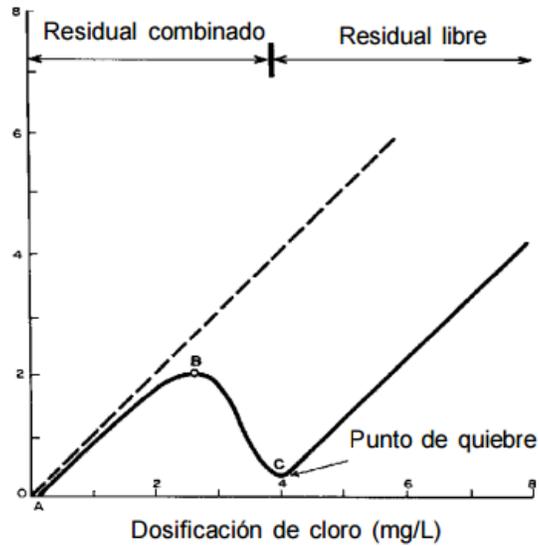


Figura 44. Curva del punto de quiebre.  
Fuente: CEPIS, 2008.

Entre los puntos A y B se forman mono y dicloraminas. En los puntos B y C las cloraminas se descomponen por acción del exceso de cloro, produciendo compuestos que no son detectados como cloro residual, originando una disminución en el residual del cloro, hasta un valor mínimo correspondiente al “break point”. (Punto C). A partir de este punto cualquier adición de cloro producirá un residual de cloro libre proporcional a la dosis que se aplique (Richter, 1984).

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Revisión bibliográfica

Se recopiló información referente al sistema de tratamiento de agua utilizado en la POT-Xochimilco como: Manuales de operación, reportes (dosificación de reactivos, caudal potabilizado), bitácoras, informes de calidad del agua.

#### 3.2 Determinación de la calidad del agua en la salida de cada proceso unitario

##### 3.2.1 Muestreo

Se tomaron muestras de agua antes y después de cada proceso para analizar la calidad de agua conforme a los lineamientos establecidos en la NOM 014-SSA1-1993 “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados”.

##### 3.2.2 Medición de parámetros en el sitio de estudio

Los parámetros que se midieron en el sitio de estudio se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Listado de parámetros medidos en el sitio de estudio.

Parámetro	Unidades	Método de medición
pH	-	Electrométrico
Temperatura	°C	Electrométrico
Turbiedad	UNT	Nefelométrico
Conductividad eléctrica	mS/cm	Electrométrico

##### 3.2.3 Análisis de laboratorio

En la Tabla 12 se presentan los parámetros, físicos y químicos así como aquellos para determinar la dosis adecuada de desinfectante, que fueron analizados tanto en el Laboratorio Químico Ambiental del Instituto de Ingeniería y el Laboratorio de Investigación de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería.

Tabla 12. Análisis de parámetros en laboratorio.

Parámetro	Unidades	Método	Norma
Cloro residual	mg/l	Colorimétrico	NOM-127-SSA1-1994
Turbiedad	UNT	Nefelométrico	NOM-127-SSA1-1994
Análisis Granulométrico	-	-	M·MMP·1·06/03

### 3.3 Metodología de evaluación del funcionamiento de la planta potabilizadora Xochimilco

Para evaluar el funcionamiento de la POT-Xochimilco se utilizó la metodología del CEPIS, la cual es similar a la metodología del IMTA. En la Tabla 13, se muestra un comparativo de los procesos y técnicas de evaluación de cada una de éstas. Ambas metodologías son similares en sus técnicas de evaluación, excepto en el proceso de filtración; ya que en la evaluación de esta unidad de proceso los valores óptimos recomendados para el porcentaje de expansión del medio filtrante varían.

Tabla 13. Comparación de técnicas para evaluación de procesos unitarios.

Proceso	Parámetro	Técnica de IMTA	Técnica de CEPIS
Presedimentación	Tiempo de retención	trazadores	Trazadores
Mezcla rápida	Dosis óptima de reactivos	Pruebas de jarras	Prueba de jarras
	Exactitud de dosificador	Aforo de bomba	Aforo de bomba
	Tiempo de retención	Trazadores	Formula y trazadores
	Gradiente de velocidad	Gradiente de velocidad	Gradiente de velocidad
Floculación	Tiempo de retención	Trazadores	Trazadores
	Gradiente de velocidad	Gradiente de velocidad	Gradiente de velocidad
Sedimentación	Tiempo de retención	Trazadores	Trazadores
Filtración	Tiempo de lavado	Medición de turbiedad	Turbiedad
	Filtrado inicial	Medición de turbiedad	Turbiedad
	Expansión del medio	Medición con muestreador vertical	Medición con muestreador vertical
	Altura del medio	Medición en campo	Medición en campo
	Tamaño de partículas	Análisis granulométrico	Análisis granulométrico
Cloración	Tiempo de contacto	Aumento de dosis de cloro	Aumento de dosis de cloro

### 3.3.1 Determinación de parámetros óptimos para la evaluación del funcionamiento de los procesos unitarios

En la Tabla 14 se muestran los parámetros operacionales determinados, bajo las condiciones en que se encontraba funcionando cada proceso unitario de la planta al inicio del presente estudio. Adicionalmente se determinaron los valores óptimos de operación con base en pruebas de laboratorio y mediciones en *in situ*.

Tabla 14. Procesos y parámetros evaluados

Proceso	Parámetro	Unidades
Mezcla rápida	-Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>
	-Tiempo de contacto	s
Floculación	-Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>
	-Tiempo de contacto	s
Sedimentación	-Tiempos de retención	min
	-Velocidad de sedimentación	cm/s
	-Volumen de lodos	ml/l
Filtración	-Tasa de filtración	m/h
	-Tasa de retrolavado	m/h
	-Tamaño efectivo del medio filtrante	mm
	-Coeficiente de uniformidad del medio filtrante	Sin unidades
Desinfección	-Tiempo de contacto	mg/l

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO PARA LA EVALUACIÓN DE UNIDADES DE PROCESO DE LA PLANTA POTABILIZADORA XOCHIMILCO

#### 4.1 Presedimentador

##### 4.1.1 Tiempo de retención

Para la determinación del tiempo de retención hidráulico (TRH) real en el presedimentador, se utilizó la técnica de trazadores. Para realizar esta prueba, se utilizó como trazador cloruro de sodio (sal común), porque es de bajo costo, de fácil obtención y porque la determinación de la concentración en el efluente es rápida y de fácil medición, a través de la conductividad eléctrica.

##### 4.1.1.1 Preparación del trazador

Las concentraciones comunes para el uso del ion cloruro como trazador se encuentran entre 30 y 50 mg/L. En esta prueba se eligió una concentración de cloruro de sodio de 40 mg/L. La masa de cloruro de sodio que se necesita para preparar la solución, se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Ma = \frac{V K Co}{I \times 10^3} \quad (3)$$

Donde:

Ma = Masa del trazador que se necesita [kg]

V = Volumen útil del reactor [m<sup>3</sup>]

K = Constante de corrección [Adimensional]

Co = Concentración [mg/L o g/m<sup>3</sup>]

I = Grado de pureza del trazador [Adimensional expresado en fracción]

Una vez obtenido el peso de trazador se disuelve en agua y se agita de manera que quede bien disuelto.

#### 4.1.1.2 Aplicación del trazador en el presedimentador

Antes de añadir el trazador se midió la conductividad eléctrica inicial del agua (CEo). Después se vertió la solución del trazador de forma instantánea en el afluente de la del floculador y al mismo tiempo se comenzó a hacer la medición de la conductividad eléctrica (CE) en el efluente cada minuto. La medición se terminó cuando se obtuvieron tres lecturas consecutivas con el valor inicial de la conductividad eléctrica o cuando ya no varió significativamente durante cinco minutos.

Con los resultados obtenidos se llenó el formato mostrado en la Tabla 15.

Tabla 15. Formato para registro de lecturas de conductividad

Número de Muestra	Tiempo de lectura [min]	Conductividad eléctrica (CE) [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	(CE-CEo) [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]

CEo: Conductividad eléctrica inicial

CE: Conductividad eléctrica medida en un tiempo determinado

Con los valores obtenidos durante esta prueba, se graficó el tiempo en el eje de las abscisas y el término CE-CEo en el eje de las ordenadas. El tiempo de retención real es el que corresponde a la obtención de la concentración máxima de trazador.

En la Figura 45 se pueden observar los tanques que contienen la solución del trazador antes de aplicarlo a la entrada del presedimentador. También se puede ver que se requirió del apoyo de varias personas para lograr la aplicación instantánea a esta unidad de proceso.



Figura 45. Tanques con la solución de trazador.

En la Figura 46 se puede observar el punto donde se añadió el trazador, el cual corresponde a la compuerta de entrada al presedimentador.



Figura 46. Vista del punto de aplicación del trazador.

En la Figura 47 se muestra la salida del efluente del presedimentador en donde se tomaron las muestras de agua para la medición de la conductividad eléctrica.



Figura 47. Vista del punto de medición de CE en el efluente del presedimentador.

## **4.2 Mezcla rápida**

### **4.2.1 Determinación de la dosis óptima de reactivos**

Se tomaron 100 litros de agua cruda que ingresa a la mezcla rápida. En esta muestra de agua se midió el pH, la temperatura y la turbiedad. Adicionalmente se registró la lectura de la dosis aplicada de coagulante y floculante en planta.

#### **4.2.1.1 Preparación de coagulante**

La dosis óptima de coagulante se determinó en el laboratorio, mediante la realización de pruebas de jarras a muestras de agua cruda tomada en el efluente del presedimentador. Para estas pruebas, se preparó una solución coagulante con sulfato de aluminio en agua destilada, para obtener la equivalencia de 1ml de solución = 1mg de sulfato de aluminio base seca. La solución coagulante se preparó a partir de un reactivo de sulfato de aluminio en solución con una densidad de 1.30 kg/L y una concentración de 45.06 %. Para ello se preparó un litro de solución diluida y se agregó un volumen de 1.707 ml de sulfato de aluminio.

#### **4.2.1.2 Preparación de floculante**

En la POT-Xochimilco se utiliza como floculante: Polímero catiónico, el cual tiene una densidad de 1.06 kg/L y una concentración del 100 % en base húmeda. De esta solución, se procedió a preparar dos diluciones para obtener una solución con concentración final, en donde 1 ml de solución = 0.1 mg de polímero. Preparación de diluciones:

- a) En un litro de agua destilada se agregaron 10 ml de polímero catiónico, obteniéndose una solución en donde 1 ml = 10.6 mg
- b) De la dilución anterior, se tomaron 9.43 ml (100 mg de polímero catiónico) y se agregaron a un matraz volumétrico y se agregó agua destilada para preparar 1000 ml de solución con lo cual se obtuvo una concentración final de 1ml = 0.1 mg de polímero catiónico.

Es importante aclarar que los cálculos para la preparación del floculante se deben realizarse cada vez que se compre un nuevo lote de polímero, debido a que puede haber variación en la densidad y en la concentración de éste.

#### **4.2.1.3 Prueba de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante (sulfato de aluminio) y de floculante (polímero catiónico)**

Después de la preparación de las soluciones de coagulante y de polímero, se procedió a realizar las pruebas de jarras a muestras de agua cruda, aplicando diferentes dosis de reactivos químicos.

Para determinar la dosis óptima de coagulante, se utilizaron seis jarras y a cada una se le agregaron 2 litros de agua obtenida en la entrada de la mezcla rápida de la planta. Posteriormente a cada jarra se le seleccionó una dosis diferente de coagulante a agregar. Las dosis de coagulante se seleccionaron con valores de concentración que estuvieran alrededor de la dosis utilizada por la planta.

Se procedió a programar el equipo de prueba de jarras seleccionando los gradientes de velocidad y tiempos de mezcla de diseño, los cuales se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Gradientes de velocidad y tiempos para pruebas de jarras

<b>Gradiente de Velocidad [s<sup>-1</sup>]</b>	<b>Tiempo de mezcla [min]</b>	<b>Agitación en jarra [RPM]</b>
1000	0.75	300
70	7	65
34	7	40
20	7	27

Una vez programado el equipo, se puso en operación y se añadieron las dosis a cada jarra de manera simultánea e instantánea, asegurando una mezcla homogénea, agregando el coagulante en cada jarra aproximadamente a 5 centímetros de profundidad; de esta manera se obtuvo una dispersión más rápida. En la Figura 48 se muestran las jarras durante la prueba de floculación.



Figura 48. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de sulfato de aluminio.

Una vez transcurrido el tiempo de floculación, se procedió a extraer las jarras del equipo y se colocaron mangueras de hule dentro de éstas, se les hizo un vacío utilizando una jeringa para provocar un sifón, se estrangularon con una pinza y se dejaron reposar durante 10 minutos para simular el proceso de sedimentación. Posteriormente se retiraron las pinzas de las mangueras y se dejó fluir aproximadamente 10 mL de agua y se desechó. Finalmente se recolectaron 30 mL de muestra de cada jarra como se ilustra en la Figura 49. Se midió la turbiedad de cada muestra tomada, seleccionando como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.



Figura 49. Toma simultánea de muestras en cada jarra.

Una vez obtenida la dosis óptima de coagulante, se procedió a realizar las pruebas de jarras para determinar la dosis óptima de floculante. Para esto se volvieron a

agregar 2 litros de agua obtenida en la entrada de la mezcla rápida de la planta en cada una de las seis jarras. Después a cada jarra se le seleccionó una dosis diferente de floculante a agregar. Las dosis de floculante se seleccionaron con valores de concentración que estuvieran alrededor de la dosis utilizada por la planta.

Se programó el equipo para pruebas de jarras con los datos de la Tabla 16 y se añadió la dosis óptima de coagulante obtenida a cada una de las jarras, así como las diferentes dosis de floculante. Se realizó el mismo procedimiento para la recolección de muestras en cada jarra como en la prueba para determinación de dosis óptima de coagulante, seleccionando como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.

#### **4.2.2 Determinación del porcentaje de exactitud en bomba dosificadora de coagulante en la planta**

Para esta técnica se aforó la bomba dosificadora de coagulante a cada uno de sus porcentajes de operación del 10 al 100 %, tomando 3 mediciones de flujo en cada porcentaje operativo. En la Figura 50 se muestra el aforo utilizando la técnica volumen-tiempo, en uno de los porcentajes de operación. Después se graficaron los resultados obtenidos del aforo para compararlos con la curva de calibración dada por el fabricante. El grado de exactitud de la bomba dosificadora se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{PR}{PT} * 100 \quad (4)$$

Donde:

E = Grado de exactitud [%]

PR = Flujo real obtenido en la prueba [L/h]

PT = Flujo teórico dado por el fabricante [L/h]



Figura 50. Aforo de bomba dosificadora.

Por seguridad personal, se realizó un cambio del punto de aplicación del reactivo químico, con el fin de obtener el volumen y determinar el flujo de la bomba dosificadora como se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Toma de muestra de coagulante.

El grado de exactitud puede clasificarse como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Exactitud de dosificadores.

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

Fuente: IMTA, 2002.

#### 4.2.3 Tiempo de retención

No se utilizó la prueba de trazadores para la determinación del TRH real ya que este proceso se da en fracciones de segundos y es complicado hacer las mediciones de conductividad eléctrica por lo que se determinó con la fórmula:

$$Tr = \frac{v}{Q} \quad (5)$$

Donde:

Tr = Tiempo de retención hidráulico [s]

v = Volumen de la unidad [m<sup>3</sup>]

Q = Gasto que entra a la unidad [m<sup>3</sup>/s]

#### 4.2.4 Gradiente de velocidad

Para la determinación del gradiente de velocidad en la mezcla rápida se utilizó la ecuación 2. La pérdida de carga para la mezcla rápida se determinó mediante la ecuación de Bernoulli:

$$Z_1^2 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2^2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + H \quad (6)$$

Donde:

Z = Altura sobre un nivel de referencia [m]

V = Velocidad de flujo del agua en un punto considerado [m/s]

P = Presión estática a la que está sometida el agua [atm]

$g$  = Valor de la aceleración de la gravedad [ $9.81 \text{ m/s}^2$ ]

$\gamma$  = Densidad del agua [ $\text{kg/m}^3$ ]

$H$  = Pérdida de carga [m]

### 4.3 Floculación

#### 4.3.1 Tiempo de retención

Para determinar el tiempo de retención en el floculador se utilizó la técnica de trazadores mencionada en el apartado 4.1.1.

En la Figuras 52 se puede ver cómo se añadió el trazador en la entrada del floculador.



Figura 52. Adición de trazador.

En la Figura 53 se muestra la medición de la CE en una de las muestras del efluente del floculador.



Figura 53. Medición de conductividad eléctrica.

### **4.3.2 Gradiente de velocidad**

Para la medición del gradiente de velocidad se utilizó la técnica mencionada en el apartado 4.2.4.

En el floculador, la pérdida de carga es el desnivel de la superficie del agua en cada cámara a un nivel de referencia. Se utilizó equipo topográfico de nivelación y con un estadal se tomó la lectura al inicio y al final de cada cámara, siendo la diferencia de alturas la pérdida de carga.

### **4.3.3 Distribución de flujos en cada floculador**

Para esta prueba se añadió la solución trazadora en un punto común antes de entrar a los floculadores (caja de mezcla) para después tomar simultáneamente muestras a la entrada de cada uno de los 3 floculadores durante cada minuto hasta que la lectura de CE fue igual a la lectura de CE inicial.

El caudal que entra a cada floculador unidad será proporcional a la masa de trazador que ingresa al respectivo floculador.

## **4.4 Sedimentador**

### **4.4.1 Tiempo de retención**

Se utilizó la técnica de trazadores mencionada en el apartado 4.1.1 para determinar el tiempo de retención en el sedimentador. En la Figura 54 se muestra la preparación del trazador.



Figura 54. Preparación de trazador.

En la Figura 55 se muestra el punto donde se añadió el trazador que fue a la salida del floculador.



Figura 55. Adición de trazador.

## 4.5 Filtros

### 4.5.1 Tiempo de lavado de filtros

Cuando se lava un filtro, las turbiedades iniciales del agua de lavado pueden llegar a valores sobre 1000 UNT y mientras el medio filtrante se va limpiando la turbiedad empieza a disminuir. Con esta información de tiempo-turbiedad, se realiza una curva que permite determinar el tiempo de lavado más conveniente.

Este procedimiento consiste en tomar muestras de agua de la canaleta de lavado del filtro cada minuto durante 15 minutos. Se le determinó la turbiedad a cada muestra y se elaboró una gráfica de turbiedad contra tiempo, en la que el tiempo de lavado se encuentra donde la curva alcanza un comportamiento asintótico. En la Figura 56 se muestra la toma de muestras de agua en uno de los filtros.

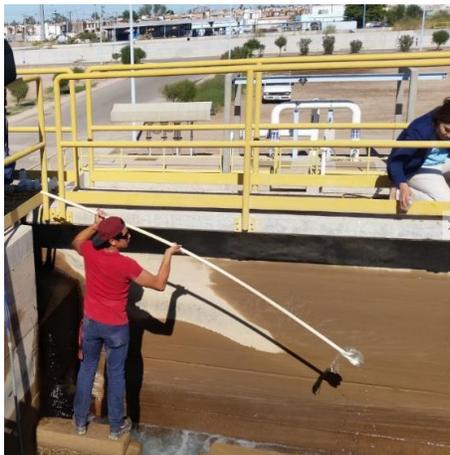


Figura 56. Toma de muestra en canaleta de lavado.

#### 4.5.2 Filtrado inicial

Al finalizar el lavado del filtro, el primer efluente de la carrera de lavado suele ser de mayor turbiedad que el resto, debido a que las partículas que no alcanzaron a salir durante el lavado salen al entrar en operación el filtro. Los resultados de esta prueba permiten conocer si el filtro tuvo un tiempo de lavado eficiente, así como el comportamiento del medio filtrante.

Cuando inició el proceso de lavado del filtro se tomaron muestras de agua del efluente del filtro cada minuto durante 15 minutos. Después se tomaron las turbiedades de cada muestra y se graficó la turbiedad contra tiempo, en donde el tiempo de filtrado inicial es aquel cuando la turbiedad alcanza un valor establecido, que por lo general debe ser menor a 1 UNT. En la Figura 57 se muestra el punto donde se muestreo el efluente para cada uno de los 8 filtros.



Figura 57. Punto de muestreo de efluente de filtros.

#### 4.5.3 Granulometría del medio filtrante

El objetivo de esta prueba es determinar el tamaño de los granos que componen una muestra del medio filtrante. Como los filtros de la POT-Xochimilco están compuestos por arena y antracita se realizó la granulometría para cada uno de ellos.

Para realizar esta prueba se lavó el filtro y se vació para poder entrar en él. Después se tomó una muestra representativa de toda la profundidad del lecho para llevarla a laboratorio. Luego se secó la muestra y se pesaron 500 g para después colocarla en un juego de mallas con aberturas de 2.36 a 0.075 mm como se muestra en la Figura 58. Se agitó manualmente hasta que los granos pasaran a través de tantas mallas como su peso tamaño lo permitía. Hecho esto, se pesaron las porciones de

muestras retenidas en cada malla y se calcularon como porcentajes de la muestra total. Finalmente se graficaron los porcentajes obtenidos en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los porcentajes de peso acumulado y el tamaño de los granos en milímetros en el eje de las abscisas.

El tamaño de la malla por el cual pasa el 10 % del material determina el tamaño efectivo.



Figura 58. Adición de medio filtrante a juego de mallas.

#### **4.5.4 Porcentaje de expansión del medio filtrante**

Según el CEPIS los rangos de expansión ideales son de 25 a 30 %, ya que con valores mayores los granos del medio se separan demasiado y no logran friccionarse entre sí para lograr un lavado eficiente. Para esta prueba se necesitó de un medidor de expansión de medio filtrante que consta de un elemento vertical con colectores de muestra separados a cada 5 cm mostrada en la Figura 59.



Figura 59. Medidor de expansión de medio filtrante.

Antes de iniciar con el lavado, se colocó el medidor de expansión por encima del medio filtrante. Se inició el lavado del filtro y 3 minutos después se retiró lentamente

de forma vertical el medidor de expansión. Se determinó la altura entre el colector de muestra más alto que contenía medio filtrante y la parte inferior del medidor ( $h_1$ ). Por último, con la altura total del medio filtrante ( $h_2$ ) se calculó el porcentaje de expansión:

$$E = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

$E$  = Porcentaje de expansión [%]

$h_1$  = Altura medida en el colector de muestra durante el lavado [cm]

$h_2$  = Altura del medio filtrante [cm]

Esta medición se realizó en 6 puntos diferentes representativamente en el área del filtro.

#### 4.5.5 Espesor del medio filtrante

Cuando el medio filtrante expande demasiado este se puede ser arrastrado por el agua de desecho del lavado de filtros, lo cual disminuye el espesor del medio. Para determinar la profundidad del medio se vació el filtro para poder entrar en él y con ayuda de una pala se midió el espesor total del medio y el espesor de cada medio que lo contiene como lo es la arena sílice y antracita indicadas en la Figura 60.



Figura 60. Medición del espesor del medio.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 Presedimentador

##### 5.1.1 Tiempo de retención

Al presedimentador ingresa un flujo de 765 L/s y tiene un volumen de 5,054 m<sup>3</sup>. Con estos valores y aplicando la ecuación 5, se determinó un tiempo de retención hidráulico teórico (TRH) de 110 minutos. Además se determinó el TRH real del presedimentador norte, utilizando la técnica de trazadores.

La conductividad eléctrica inicial (CEo) medida en el agua fue de 1,357  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se tomaron muestras de agua cada minuto y se les midió la CE durante un intervalo de tiempo de 300 minutos. Los resultados de CE obtenidos de cada medición se muestran en Tabla 30 que aparece en el Anexo 1. Con estos datos obtenidos in campo, se generó la gráfica que se muestra en la Figura 61. Como se indicó anteriormente, el TRH real es aquel donde se alcanza el máximo valor de CE, el cual se obtuvo a los 93 min.

Se hizo una comparación entre el valor determinado del TRH teórico y el valor de TRH real obtenido de la prueba de trazadores en campo y se determinó que había una diferencia del 15 % entre ambos tiempos de retención hidráulico. Esta diferencia de tiempos de retención hidráulica nos indica que hay espacios muertos en el presedimentador, lo que provoca una disminución en el TRH real. Es deseable que ambos tiempos sean iguales, sin embargo este porcentaje de desfaseamiento se considera aceptable.

En la Figura 61 también se puede ver que una vez alcanzada la concentración máxima de CE, la curva tiende a alargarse hacia la derecha hasta el punto en el que salió todo el trazador. Este comportamiento nos confirma que hay espacios muertos en la unidad.

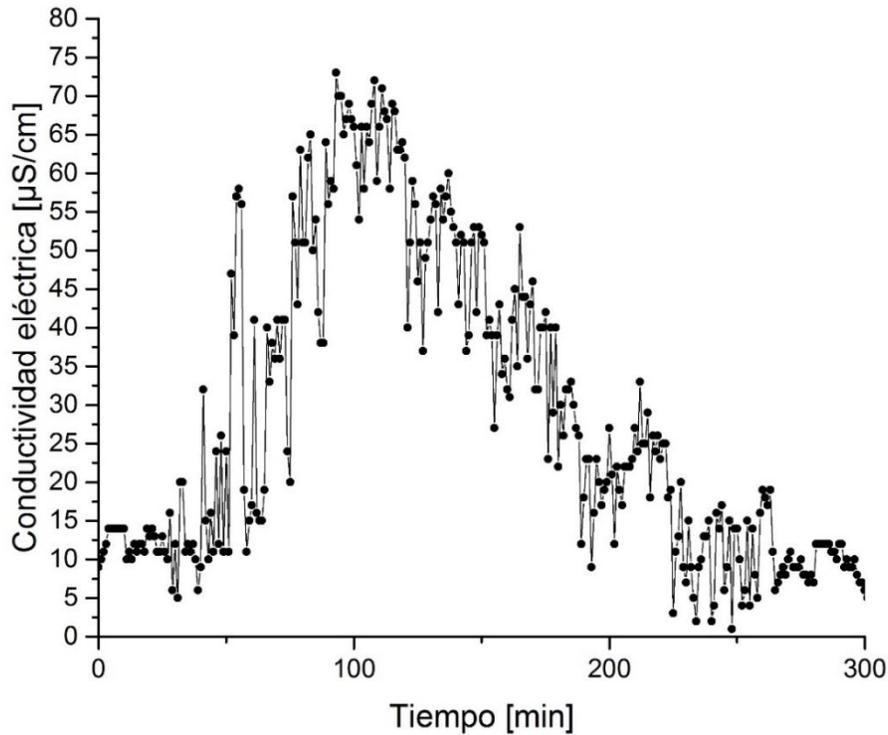


Figura 61. Curva de CE medida en el presedimentador

A la entrada del presedimentador se cuenta con una estructura que permite una distribución adecuada del flujo de agua por medio de un vertedor con orificios en el fondo como se muestra en la Figura 62, sin embargo la salida de esta unidad no cuenta con una estructura adecuada para la salida uniforme del agua, ya que el efluente sale por una abertura muy reducida, como se puede ver en la Figura 63 y este tipo de estructura es lo que puede estar ocasionando espacios muertos en el presedimentador.



Figura 62. Estructura de entrada del presedimentador.



Figura 63. Estructura de salida del presedimentador.

## 5.2 Mezcla Rápida

### 5.2.1 Dosis óptima de reactivos

Se recopiló información referente al sistema de tratamiento de agua utilizado en la POT-Xochimilco como: manual de operación, bitácoras de registro de dosificación, de reactivos, de caudal potabilizado y reportes de calidad del agua potabilizada. Para esta prueba se realizó el análisis de los reportes de operación registrados en el formato: “Reporte Horario de Operación FO-OP-PP3-O1” correspondientes al periodo del 14 al 17 de junio del 2015 y los reportes operativos denominados: “Borrador de agua cruda” correspondientes al mismo periodo. Se seleccionaron los resultados del periodo antes mencionado porque durante estos días, los valores de turbiedad en el cárcamo de agua cruda, en la salida del sedimentador y en el efluente de la planta presentaban valores promedio similares hasta antes del cambio de la dosificación, sobre todo en salida a sedimentador y red, como lo muestran las Tablas 18, 19 y 20.

La POT-Xochimilco se abastece del agua proveniente del canal Tulichek, cuya turbiedad varía a lo largo del año. En la Tabla 18 se muestran las turbiedades durante el periodo del 14 al 17 de junio donde la turbiedad máxima fue de 28.60 UNT y la mínima de 16.9 UNT.

Tabla 18. Turbiedad del agua cruda en el cárcamo de bombeo.

Hora	Turbiedad de agua cruda en cárcamo de bombeo			
	[UNT]			
	14/06/15	15/06/15	16/06/15	17/06/15
0	16.90	20.70	25.70	23.50
1	16.95	22.10	25.05	23.75
2	17.00	23.50	24.40	24.00
3	17.20	23.05	25.25	23.35
4	17.40	22.60	26.10	22.70
5	19.15	21.75	23.95	21.75
6	20.90	20.90	21.80	20.80
7	21.20	21.20	21.50	24.30
8	21.50	21.50	21.20	27.80
9	20.90	23.10	20.95	28.20
10	20.30	24.70	20.70	28.60
11	20.70	25.85	20.10	26.45
12	21.10	27.00	19.50	24.30
13	20.75	26.40	20.10	24.60
14	20.40	25.80	20.70	24.90
15	19.45	25.95	21.30	25.15
16	18.50	26.10	21.90	25.40
17	18.40	26.00	22.10	25.30
18	18.30	25.90	22.30	25.20
19	18.50	25.25	22.60	25.35
20	18.70	24.60	22.90	25.50
21	19.50	24.70	23.05	25.90
22	20.30	24.80	23.20	26.30
23	20.50	25.25	23.35	26.50
24	20.70	25.70	23.50	26.70
<b>Promedio</b>	19.41	24.18	22.53	25.05
<b>Desviación estándar</b>	1.91	1.79	1.83	1.13

Los valores de turbiedad medidos a la salida de los sedimentadores durante este periodo elegido, se presentan en la Tabla 19. La turbiedad máxima en este periodo fue de 7.61 UNT y la mínima de 5.84 UNT.

De acuerdo a recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), el efluente de los filtros debe salir con una turbiedad de 0.1 UNT y para lograr obtener este valor, es necesario que el efluente de los sedimentadores tenga un valor de turbiedad de 2 UNT como máximo (CEPIS, 2008). Como se puede ver en la Tabla 19 no se cumple con esta recomendación.

Tabla 19. Turbiedad del agua a la salida de los sedimentadores.

Hora	Turbiedad del agua a la salida de los sedimentadores			
	[UNT]			
	14/06/15	15/06/15	16/06/15	17/06/15
0	7.35	7.10	6.79	7.09
1	7.32	7.12	6.53	6.90
2	7.28	7.13	6.26	6.71
3	7.24	7.15	6.05	6.77
4	7.20	7.17	5.84	6.83
5	6.85	7.16	6.16	6.97
6	6.49	7.15	6.48	7.10
7	6.65	7.33	6.31	7.23
8	6.81	7.50	6.13	7.35
9	6.78	7.44	6.67	7.48
10	6.75	7.37	7.20	7.61
11	6.89	7.25	7.37	7.53
12	7.02	7.12	7.54	7.44
13	7.21	7.29	7.10	6.84
14	7.39	7.45	6.66	6.24
15	7.32	7.44	6.68	6.31
16	7.25	7.43	6.69	6.38
17	7.28	7.26	6.66	6.82
18	7.31	7.09	6.63	7.25
19	7.29	6.88	6.52	7.18
20	7.27	6.67	6.40	7.10
21	7.23	6.62	6.78	6.95
22	7.18	6.56	7.16	6.79
23	7.14	6.68	7.13	6.82
24	7.10	6.79	7.09	6.85
<b>Promedio</b>	7.10	7.13	6.67	6.98
<b>Desviación estándar</b>	0.25	0.27	0.42	0.35

En la Tabla 20 se muestran los valores de turbiedad medidos en el efluente de la planta durante este periodo. Se puede ver que la turbiedad se mantiene constante con un valor mínimo de 0.77 UNT y máximo de 1.09 UNT.

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización, indica que el efluente de las plantas potabilizadoras, deberán salir con valor de turbiedad menor a 5 UNT, sin embargo la CESPM ha establecido un valor máximo 1 UNT en el efluente de la planta.

En la Tabla 20 se puede observar que el efluente de la POT-Xochimilco cumple con el límite máximo de turbiedad de acuerdo a la normatividad mexicana, sin embargo la EPA indica que la única manera de asegurar que un efluente está libre de huevos de parásitos, es obteniendo una calidad de agua con turbiedades debajo de 0.1 UNT. De la información revisada para el periodo del 14 al 17 de junio, se obtuvieron los valores promedio de pH, temperatura y turbiedad del agua cruda, mostrados en la Tabla 21.

Adicionalmente, durante el estudio, se tomaron muestras de agua cruda y se obtuvo un valor promedio de pH de 8.20, temperatura del agua de 28.9 °C y una turbiedad de 31.2 UNT. Se encontró que en la POT-Xochimilco se dosificaba sulfato de aluminio y polímero catiónico con las dosis de 7.0 mg/L y 0.4 mg/L respectivamente.

Se hicieron pruebas de jarras para determinar las dosis óptimas de reactivos y para ello se aplicó inicialmente: sulfato de aluminio, para determinar la demanda óptima de coagulante, el equipo para prueba de jarras se programó con los gradientes de velocidad y tiempos de diseño que se muestran en la Tabla 16. En la Figura 64 se puede ver una imagen de las jarras con diferentes dosis de coagulante. En la Tabla 22 se muestran los resultados de la primera corrida de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante.

Tabla 20. Turbiedad del efluente.

Hora	Turbiedad del efluente a la red			
	[UNT]			
	14/06/15	15/06/15	16/06/15	17/06/15
0	0.97	0.91	1.02	0.96
1	0.94	0.91	1.01	0.97
2	0.90	0.91	1.00	0.97
3	0.90	0.94	1.00	0.97
4	0.89	0.96	0.99	0.96
5	0.89	0.96	0.99	0.96
6	0.88	0.95	0.98	0.95
7	0.85	0.96	0.97	0.97
8	0.82	0.96	0.96	0.98
9	0.84	0.97	0.98	0.99
10	0.85	0.97	0.99	0.99
11	0.83	0.98	1.00	0.98
12	0.80	0.98	1.00	0.97
13	0.82	1.01	0.99	0.98
14	0.84	1.03	0.97	0.99
15	0.81	1.01	0.99	1.04
16	0.77	0.99	1.00	1.09
17	0.80	1.04	0.98	0.99
18	0.82	1.09	0.96	0.89
19	0.85	1.03	0.99	0.90
20	0.87	0.96	1.01	0.91
21	0.86	0.97	0.98	0.94
22	0.84	0.98	0.94	0.97
23	0.88	1.00	0.95	0.99
24	0.91	1.02	0.96	1.00
<b>Promedio</b>	0.86	0.98	0.98	0.97
<b>Desviación estándar</b>	0.0455	0.0420	0.0194	0.0394

Tabla 21. Parámetros de calidad de agua cruda de junio 2015.

Día	pH	Temperatura [°C]	Turbiedad [UNT]
14/06/2015	7.94	29.70	19.41
15/06/2015	7.81	30.46	24.18
16/06/2015	8.08	30.20	22.53
17/06/2015	8.06	30.20	25.05
<b>Promedio</b>	7.97	30.14	22.79
<b>Desviación estándar</b>	0.10	0.27	2.15

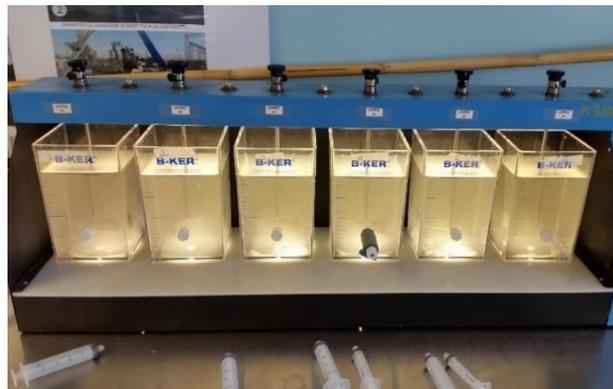


Figura 64. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante.

Tabla 22. Prueba de jarras con aplicación de sulfato de aluminio

Jarra	Dosis de Coagulante [mg/L]	Turbiedad Sedimentada [UNT]	Turbiedad Filtrada [UNT]	pH final
1	3.51	24.10	3.01	8.03
2	7.02	13.10	1.13	7.91
<b>3</b>	<b>10.53</b>	<b>4.30</b>	<b>0.65</b>	<b>7.84</b>
4	15.21	2.67	0.48	7.75
5	18.72	2.63	0.44	7.68
6	23.40	7.37	0.87	7.61

La dosis óptima de coagulante es aquella en donde se obtiene la menor turbiedad y esto ocurrió en la jarra 5, en la que se obtuvo una turbiedad de 0.44 UNT, con una dosis de coagulante de 18.72 mg/L, pero debido a que también se utiliza polímero para la aglomeración de partículas, se seleccionó como dosis óptima un valor intermedio; en este caso el de la jarra 3 con dosis de 10.53 mg/L de sulfato de aluminio, con la finalidad de economizar el uso de reactivos durante la dosificación de coagulante en planta.

Se realizó la segunda corrida de pruebas de jarras con aplicación de 10.53 mg/L de sulfato de aluminio en cada una de las jarras y variando la dosis de polímero catiónico desde 0.10 hasta 0.60 mg/L, para la determinación de la dosis óptima de floculante.

En la Figura 65 se observar que en la última jarra la cual contiene una dosis de 0.6 mg/L de polímero, presenta una mejor calidad y una mayor aglomeración de partículas.



Figura 65. Prueba de jarras para determinación de dosis óptima de polímero.

Los resultados de la prueba de dosis óptima de floculante se muestran en la Tabla 23, siendo la jarra 6 donde se obtuvo la dosis óptima con una dosificación de 0.60 mg/L de floculante. También se muestra que a mayor cantidad de coagulante añadido el pH disminuye.

Tabla 23. Resultados de turbiedad con diferentes dosis de floculante

Jarra	Dosis de Coagulante [mg/L]	Dosis de Floculante [mg/L]	Turbiedad Sedimentada [UNT]	Turbiedad Filtrada [UNT]	pH final
1	10.53	0.10	3.68	0.56	8.03
2	10.53	0.20	3.59	0.48	7.91
3	10.53	0.30	3.30	0.47	7.84
4	10.53	0.40	3.10	0.46	7.75
5	10.53	0.50	1.87	0.45	7.68
6	<b>10.53</b>	<b>0.60</b>	<b>1.90</b>	<b>0.31</b>	<b>7.61</b>

En la Figura 66 se puede ver la variación de la turbiedad con respecto a las distintas dosis de polímero aplicado. Se puede apreciar que cuando se aplicaron dosis de 10.53 mg/L de sulfato de aluminio y 0.60 mg/L de polímero, se logró obtener en las muestras de agua una turbiedad de 1.90 UNT en el efluente del sedimentador (simulado en laboratorio) y una turbiedad de 0.31 UNT en el efluente de los filtros (simulados en laboratorio).

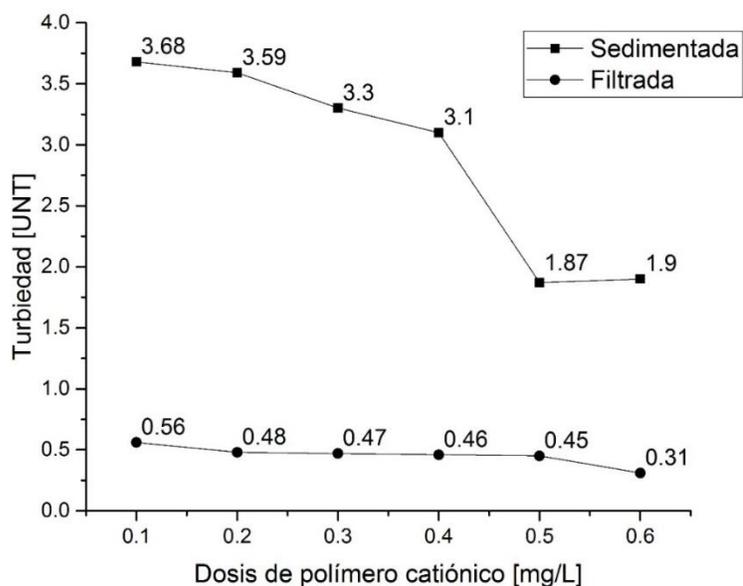


Figura 66. Comportamiento de la turbiedad obtenida de prueba de jarras para determinación de dosis óptima de polímero

### 5.2.2 Aplicación en planta de dosis óptima de reactivos

Una vez determinadas las dosis óptimas de coagulante y floculante, se compararon con las dosis que se estaban aplicando en la planta. Se estaban aplicando 7.0 mg/L de coagulante y 0.4 mg/L de floculante mientras que como ya se mencionó anteriormente, las dosis óptimas determinadas durante las pruebas fueron: 10.53 mg/L de coagulante y 0.6 mg/L de floculante. Se entregó al jefe de la planta un informe de resultados de las pruebas realizadas y se le recomendó hacer los cambios en la dosificación de reactivos y con base en el informe, instruyó a los operadores para que se hicieran los ajustes necesarios para aplicar las dosis recomendadas a partir del día 18 de junio a las 16:00 horas. En la Figura 67 se puede ver que a partir de la fecha en que se aplicaron las dosis óptimas de reactivos, se alcanzó un valor mínimo de turbiedad de 4.0 UNT en el efluente del sedimentador y valores menores a 0.5 UNT en el efluente de la planta.

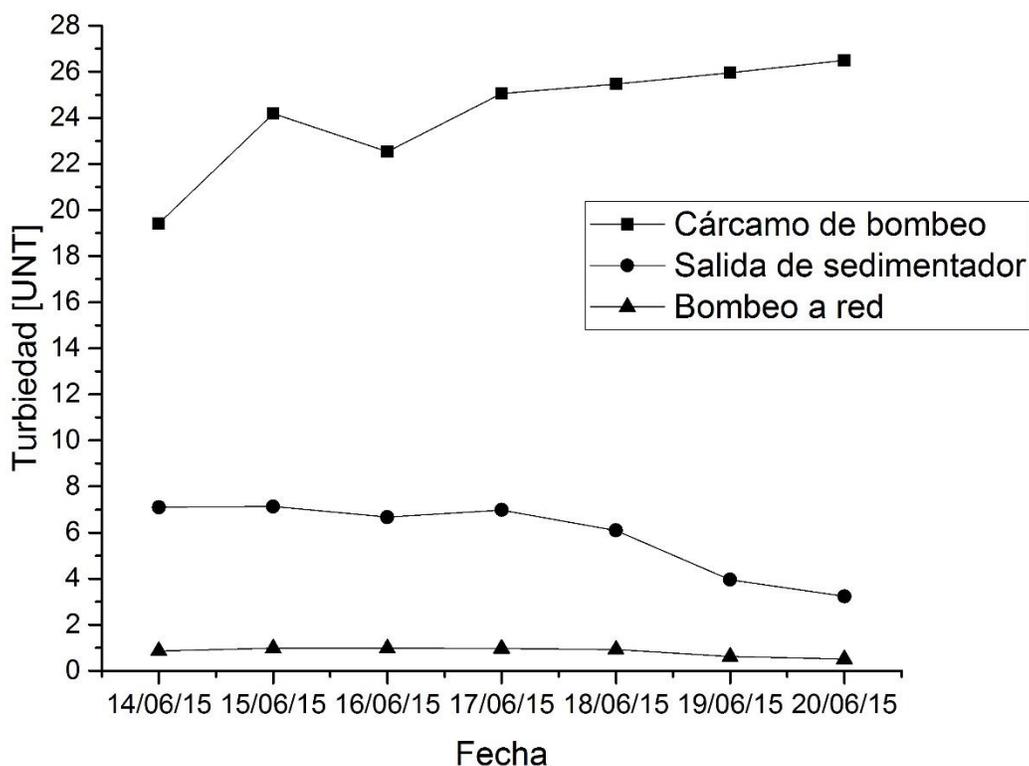


Figura 67. Comportamiento de turbiedad antes y después de modificar la dosis de reactivos químicos.

En la Figura 68, se muestran los valores de turbiedad en el efluente de la planta antes y después de la modificación de la dosificación de reactivos. Se puede ver que a partir del día 18 de junio de 2016 se obtuvo una marcada disminución en la

turbiedad del agua a la salida a red de distribución. La calidad del agua fue mejorando y se observa que el día 20 de junio a las 20:00 horas se logró alcanzar una turbiedad de 0.31 UNT. Cabe mencionar que este valor coincidió con el obtenido para el efluente en las pruebas de jarras.

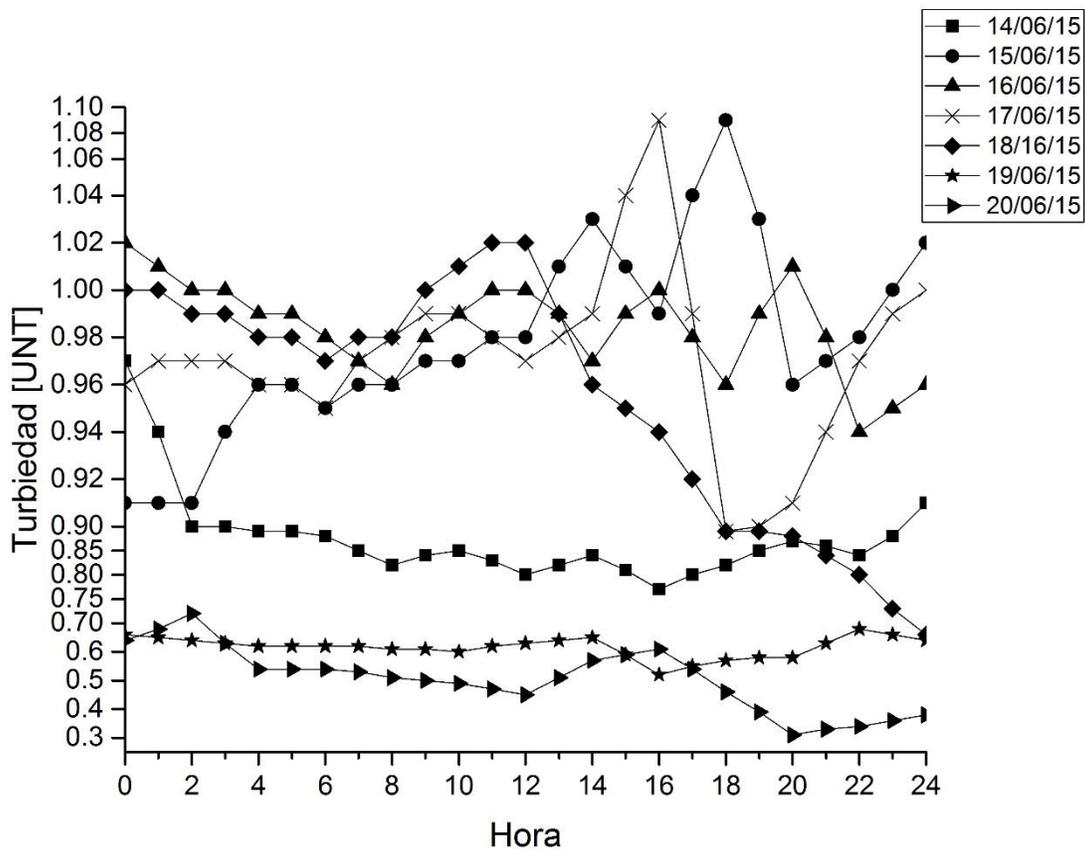


Figura 68. Comportamiento horario de turbiedad en el efluente al cambiar dosis de reactivos químicos.

Es importante indicar que las pruebas de jarras son una simulación de la operación de la planta potabilizadora, por lo que el ajuste fino de las dosificaciones se realiza por lo menos a las 24 horas del cambio de la dosis determinada en esta investigación, si fuera necesario.

Con las modificaciones que se hicieron en la dosificación de los reactivos químicos, se observó que el sedimentador sur presenta una mejor calidad de agua en el efluente, el cual se alimenta a los filtros. Sin embargo, se observó que el floculador

sur presentó mejor tamaño del flóculo que los formados en los floculadores norte y central. Por ello se decidió hacer pruebas de la distribución del flujo de la caja de mezcla a cada uno de los floculadores. Se encontró que la distribución de reactivos es la adecuada en cada floculador ya que se aplica mediante control de flujo por rotámetros y difusores para cada uno de ellos.

### **5.2.2 Exactitud de dosificador**

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos del aforo mediante la técnica: volumen-tiempo de la bomba dosificadora de sulfato de aluminio para cada porcentaje de operación de la bomba. Se colocó en modo manual la bomba dosificadora para poder realizar el aforo. Así mismo la bomba cuenta con un mecanismo de control de dosificación en forma de perilla la cual consta de 0 a 100 % de su caudal.

Se realizaron tres lecturas de aforo para cada porcentaje de operación, cuyos valores de muestran en la Tabla 24, se calculó el valor promedio y se graficó el flujo obtenido en el eje de las abscisas y el porcentaje de abertura en el eje de las ordenadas. En la Figura 69 se muestra la curva de calibración del dosificador de sulfato de aluminio establecida por el fabricante (teórica), así como la determinada en campo (real).

Tabla 24. Resultados de aforo de bomba dosificadora.

9.09 %				18.18 %				27.27 %			
T	V	Q	Q	T	V	Q	Q	T	V	Q	Q
Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h
4.38	1000	228.31	13.70	1.45	1000	689.66	41.38	2.1	2000	975.61	58.54
4.42	1000	226.24	13.57	1.47	1000	680.27	40.82	2.1	2000	975.61	58.54
4.49	1000	222.72	13.36	1.48	1000	675.68	40.54	2	2000	980.39	58.82
		Q prom	13.55			Q prom	40.91			Q prom	58.63
36.36 %				45.45 %				54.54 %			
T	V	Q	Q	T	V	Q	Q	T	V	Q	Q
Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h
4	5608	1402.00	84.12	4	7275	1818.75	109.13	3	6550	2183.33	131.00
4	5640	1410.00	84.60	4	7230	1807.50	108.45	3	6530	2176.67	130.60
4	5635	1408.75	84.53	4	7260	1815.00	108.90	3	6550	2183.33	131.00
		Q prom	84.42			Q prom	108.83			Q prom	130.87
63.63 %				72.72 %				81.81 %			
T	V	Q	Q	T	V	Q	Q	T	V	Q	Q
Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h
3	7480	2493.33	149.60	3	8680	2893.33	173.60	3	9390	3130.00	187.80
3	7550	2516.67	151.00	3	8640	2880.00	172.80	3	9440	3146.67	188.80
3	7550	2516.67	151.00	3	8680	2893.33	173.60	3	9390	3130.00	187.80
		Q prom	150.53			Q prom	173.33			Q prom	188.13
90.90 %				100 %							
T	V	Q	Q	T	V	Q	Q				
Min	mL	mL/min	L/h	Min	mL	mL/min	L/h				
3	9890	3296.67	197.80	3	10900	3633.33	218.00				
3	9940	3313.33	198.80	3	10800	3600.00	216.00				
3	9920	3306.67	198.40	3	10840	3613.33	216.80				
		Q prom	198.33			Q prom	216.93				

T = Tiempo

V = Volumen y Q= Gasto

Como se muestra en la Figura 66, la curva real está un poco desfasada de la curva teórica, lo ideal sería que la curva real estuviera encima de la curva teórica. Realizando los cálculos correspondientes con la ecuación 4 para el 90 % de abertura se obtiene un grado de exactitud de 5.14 %, que en base a la Tabla 17, se determina que el dosificador tiene un grado de exactitud bueno, por lo que esto no afecta al funcionamiento de la bomba.

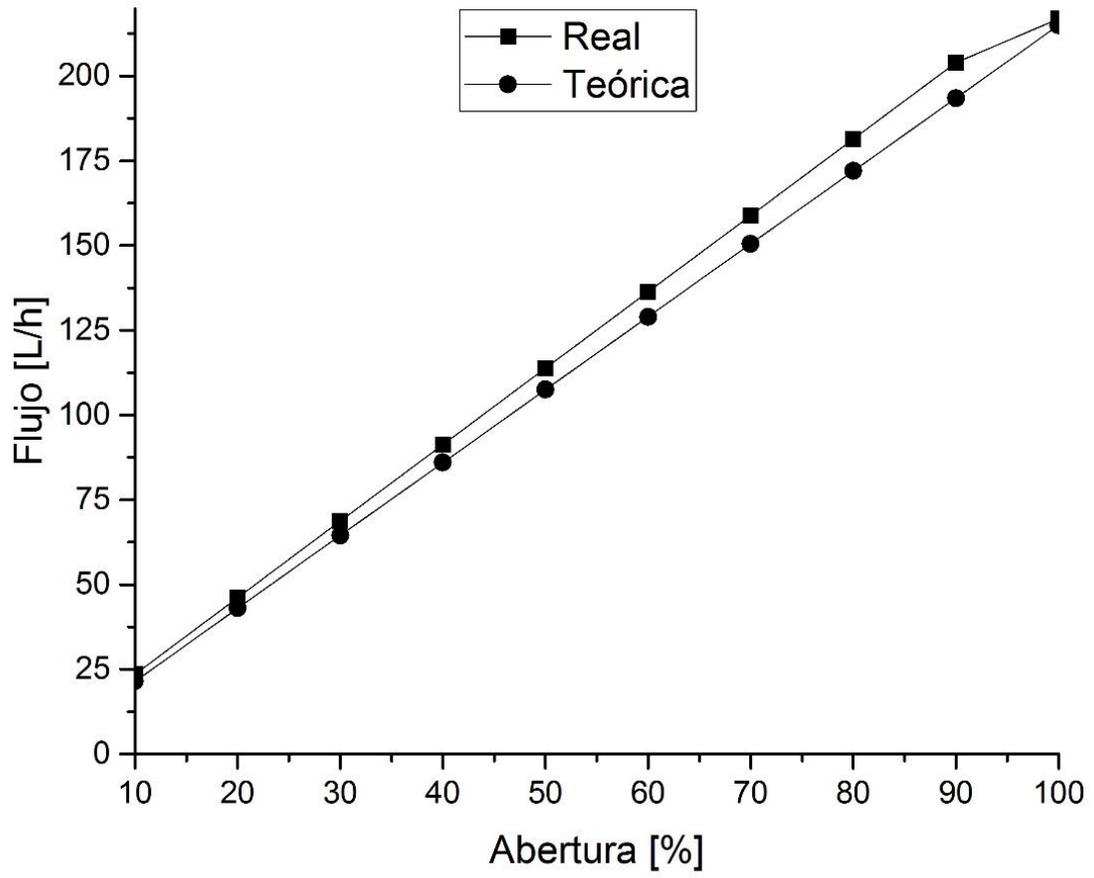


Figura 69. Curvas real y teórica del dosificador.

### 5.2.3 Tiempo de retención

El volumen de la unidad de mezcla rápida es de  $45.52 \text{ m}^3$ , cuyas dimensiones se muestran en la Figura 70. Se determinó el tiempo de retención con la ecuación 5 a un gasto de  $765 \text{ L/s}$ , obteniendo un tiempo de retención de  $59.50 \text{ s}$  el cual es un tiempo muy alto ya que los tiempos de retención óptimos son de entre  $1$  y  $7 \text{ s}$ .

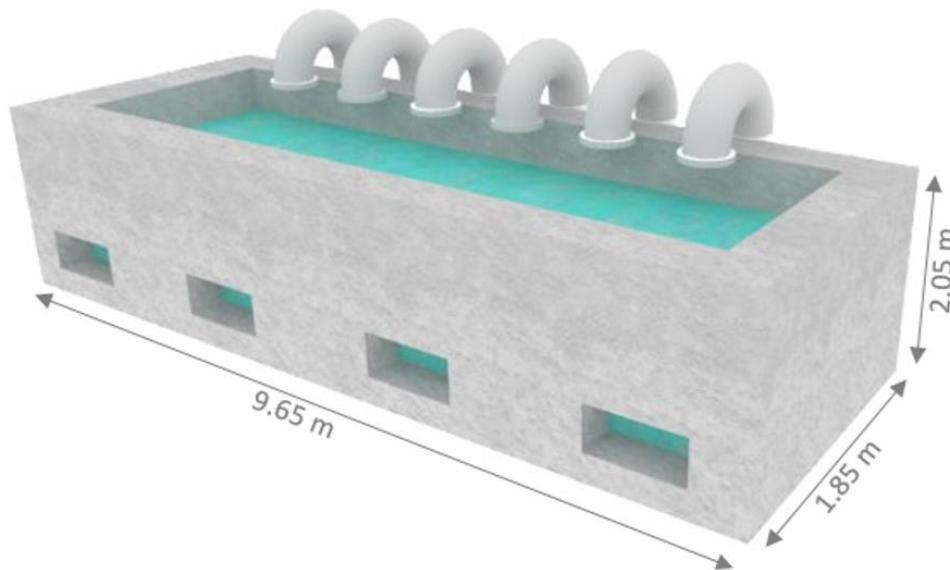


Figura 70. Dimensiones de la caja de mezcla rápida.

Como la desestabilización de las partículas se realiza en fracciones de segundos, si se tiene un TRH alto en la mezcla rápida, las partículas tendrán más tiempo para poder aglomerarse lo cual podría perjudicar al proceso de mezcla rápida o a la floculación con posibles sedimentos en las unidades.

### 5.2.4 Gradiente de velocidad

Para las condiciones hidráulicas existentes; se procedió al cálculo del gradiente de velocidad de la mezcla rápida el cual es generado en la unidad, impartido por las bombas sumergibles. Se utilizó la ecuación 2 para la determinación del gradiente de velocidad y se calculó la pérdida de carga entre la salida de la tubería (punto 1) y el espejo de agua de la caja de mezcla (punto 2) como se observa en la Figura 71.

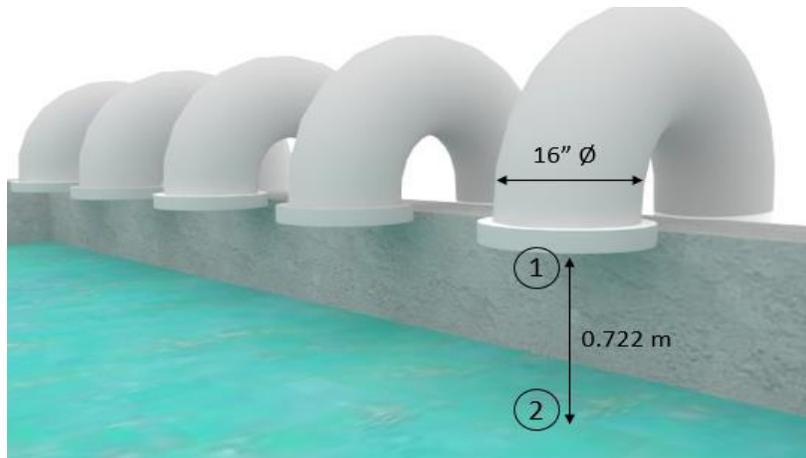


Figura 71. Zona de entrada de la mezcla rápida.

Para determinar las velocidades en los puntos 1 y 2, se utilizó ecuación 8

$$v = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Donde:

v = Velocidad [m/s]

Q = Gasto [m<sup>3</sup>/s]

A = Área [m<sup>2</sup>]

El área de la caja de mezcla se determinó a partir de las dimensiones mostradas en la Figuras 70 y el área del tubo de descarga de la bomba se calculó a partir del diámetro del tubo de 16 pulgadas.

Las velocidades obtenidas en los puntos 1 y 2 fueron:

$$v_1 = 2.95 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0.04285 \text{ m/s}$$

Sustituyendo las velocidades en la ecuación 6 y considerando el punto 2 como punto de referencia y que las presiones en ambos puntos son iguales a cero, se obtuvo una pérdida de carga (H) de: 0.9647 m.

Para calcular el gradiente de velocidad se consideró una temperatura de 20 °C y se obtuvo de la Tabla 6 un valor de 3114.64 para el término  $\sqrt{\delta/\mu}$

Finalmente con los valores obtenidos de la pérdida de carga y el tiempo de retención hidráulico, se aplicó la ecuación 2 y se obtuvo un gradiente de velocidad en la caja mezcla rápida de  $396.59 \text{ s}^{-1}$ . El gradiente de velocidad de la caja de mezcla rápida determinado, nos indica que bajo ello cual es un valor muy bajo ya que el rango óptimo para la mezcla rápida es de entre  $700$  y  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

### 5.2.5 Gradiente de interconexión

La estructura de interconexión entre la mezcla rápida y el floculador es un canal rectangular el cual tiene un volumen de  $60.28 \text{ m}^3$  y un gasto de  $0.765 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con la ecuación 5 se calculó el TRH obteniendo un valor de:

$$Tr = 78.80 \text{ s.}$$

La pérdida de carga se midió con equipo topográfico obteniendo un valor de  $0.143 \text{ m}$ . De la Tabla 6 se obtuvo el valor de  $\sqrt{\delta/\mu}$  a una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y con el tiempo de retención y pérdida de carga determinada previamente, se obtuvo el gradiente de velocidad utilizando la ecuación 2 obteniéndose el siguiente valor:

$$G = 135.28 \text{ s}^{-1}.$$

Este gradiente de velocidad está dentro del rango óptimo ya que debe de estar entre el valor del gradiente de la mezcla rápida y el primer gradiente de floculación  $396.59$  y  $103.49 \text{ s}^{-1}$  respectivamente. En la Figura 72 se muestra la unidad donde se lleva a cabo la mezcla rápida.



Figura 72. Vista de la unidad de mezcla rápida.

Por otro lado, se encontró lo que puede estar provocando que la eficiencia de remoción de turbiedad sea menor es la forma incorrecta en que se aplica el sulfato de aluminio ya que se realiza de manera puntual como se muestra en la Figura 73. Para que la distribución del reactivo sea homogénea debería aplicarse a lo largo de la unidad



Figura 73. Dosificación incorrecta de coagulante.

## 5.3 Floculador

### 5.3.1 Tiempo de retención

El TRH en el floculador, se determinó también con la técnica de trazadores. El TRH real se determinó solo en el floculador central, ya que las tres unidades de floculación son iguales. El floculador tiene un volumen de 361.77 m<sup>3</sup>, y trabaja a un gasto de diseño de 369 L/s. Con estos valores de volumen y gasto se calculó el TRH teórico utilizando la ecuación 5. El TRH teórico obtenido fue:

$$Tr = 16.34 \text{ m.}$$

La conductividad eléctrica inicial (CE<sub>0</sub>) medida en el agua fue de 1,393 μS/cm. Se tomaron muestras de agua cada minuto y se les midió la CE durante un tiempo de 36 minutos. Los resultados de CE obtenidos de cada medición se muestran en Tabla 31 que aparece en el Anexo 2. Con estos datos se generó una gráfica la cual se muestra en la Figura 74, en donde se muestra que el TRH real es aquel donde se alcanza el máximo valor de CE, el cual se obtuvo a los 16 min. Comparando este valor con el TRH teórico se determinó que solo existe una diferencia de 20 segundos entre ambos, lo cual es un resultado favorable.

Analizando la curva de CE se observa que una vez alcanzada la máxima el resto del trazador sale de la unidad de una manera similar lo cual genera una forma parecida a una campana de Gauss. Este comportamiento es ideal y determina que el floculador no sufre de cortos circuitos o flujos preferenciales y trabaja de manera eficiente teniendo un tiempo de retención de 16 min.

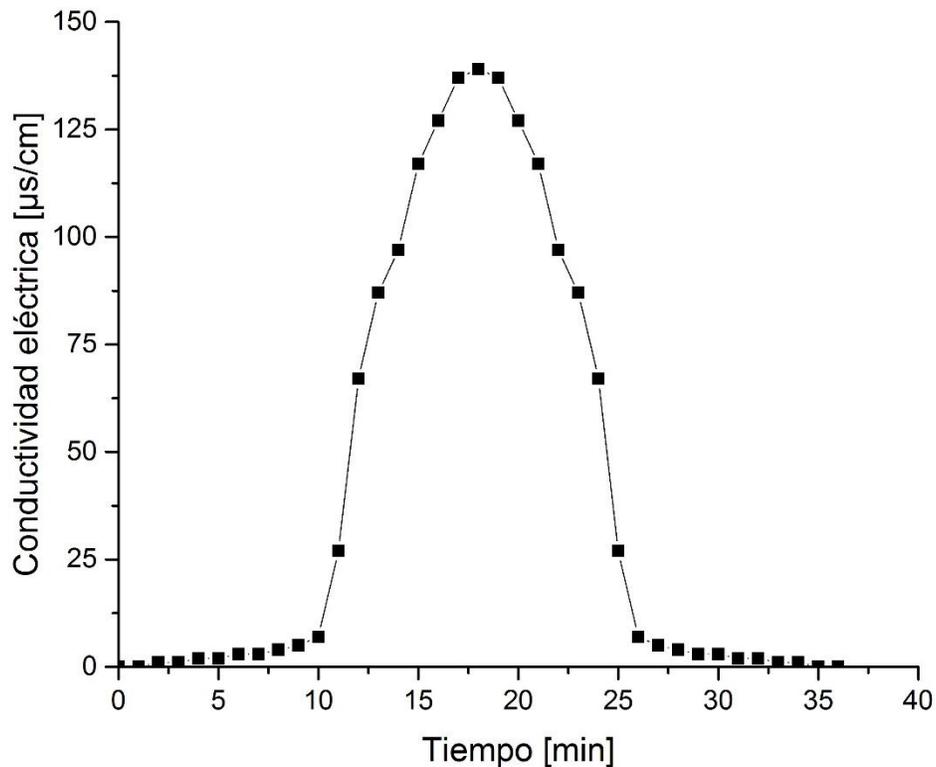


Figura 74. Curva de CE del agua en el floculador.

### 5.3.2 Gradientes de velocidad.

Se determinaron los gradientes de velocidad en cada cámara del floculador midiendo las pérdidas de carga ( $\Delta h$ ) con ayuda de un equipo topográfico. El volumen de agua de cada cámara se determinó midiendo las dimensiones del floculador así como el tirante de agua en cada una de ellas. Con el TRH real de 16 minutos determinado de la prueba de trazadores, se calculó el TRH real proporcional para el volumen de agua en cada cámara del floculador. Estos valores se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Valores determinados en el floculador central.

Cámara	$\Delta h$ [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Tr real [min]
1	0.397	140.80	6.23
2	0.350	118.08	5.22
3	0.145	102.89	4.55

Aplicando la ecuación 2 con los valores mostrados en la Tabla 25, y considerando una temperatura de agua de 20 °C para obtener el valor del término  $\sqrt{\delta/\mu}$  de la Tabla 6, se calcularon los gradientes de las cámaras 1, 2 y 3 del floculador, los cuales fueron:

$$G_1 = 101.50 \text{ s}^{-1}$$

$$G_2 = 104.12 \text{ s}^{-1}$$

$$G_3 = 71.78 \text{ s}^{-1}$$

Se encontró que estos valores obtenidos no corresponden con los valores de diseño para el flujo de 1100 L/s de  $G_1 = 70 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_2 = 34 \text{ s}^{-1}$  y  $G_3 = 20 \text{ s}^{-1}$ . Los valores encontrados están por encima de los de diseño lo cual se debe a que el floculador no está diseñado de manera correcta y se puede comprobar a simple vista ya que el agua se desborda en el primer gradiente como se muestra en la Figura 75.

Los gradientes de velocidad determinados, están muy por encima de los gradientes de diseño, esto puede afectar las características del floc haciéndolo ligero y poco sedimentable lo cual afectaría la remoción en la sedimentación y/o la filtración.



Figura 75. Floculador a 1100 L/s.

### 5.3.3 Gradiente de interconexión Floculador- Sedimentador

A la salida del floculador se encuentra una estructura la cual sirve para distribuir el flujo uniformemente hacia el sedimentador la cual cuenta con ranuras ahogadas con las dimensiones mostradas en la figura 76.

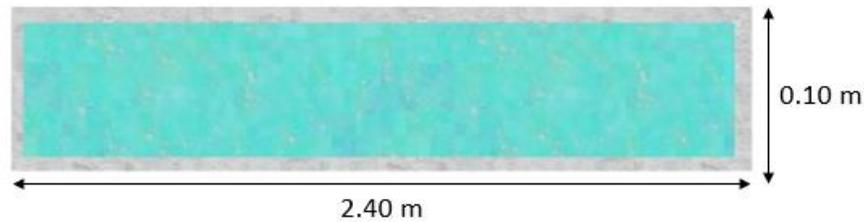


Figura 76. Dimensiones del gradiente de interconexión Floculador – Sedimentador.

Para calcular el gradiente de velocidad en la ranura se utilizó la siguiente ecuación:

$$G_{\text{orificios}} = \sqrt{\frac{\delta}{2\mu g}} \sqrt{\frac{f}{4Rh}} (v)^{1.5} \quad (9)$$

Donde:

$\delta$  = Peso específico del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  = Coeficiente de viscosidad [kg s/m<sup>2</sup>]

Rh = Radio hidráulico de la sección [m]

f = Coeficiente de Darcy Weisbach [Varía entre 0.015 y 0.030]

g = Valor de la aceleración de la gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>]

v = Velocidad del flujo en la sección [m/s]

Con las dimensiones del orificio mostradas en la Figura 73, se calculó el área de la sección de  $0.24 \text{ m}^2$  y a un gasto de  $369 \text{ L/s}$ , utilizando la ecuación 8 se obtuvo una velocidad de en la sección de  $1.5375 \text{ m/s}$ . También con las dimensiones mostradas en la Figura 73 se obtiene un radio hidráulico de  $0.048 \text{ m}$ . Se utilizó un coeficiente de Darcy Weisbach de  $0.020$ . Obtenidos estos valores y a una temperatura de agua de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtener el valor de  $\sqrt{\delta/\mu}$  de la Tabla 6, se obtiene un gradiente de velocidad de:

$$G_{\text{orificio}} = 38.67 \text{ s}^{-1}$$

Este valor de gradiente de velocidad es más del doble del valor óptimo ya que debería ser menor a  $15 \text{ s}^{-1}$ , lo cual podría romper el floc formado a la salida del ultimo gradiente de floculación afectando todo el trabajo realizado por la unidad de floculación, provocando que no precipite el floc en el sedimentador y afectando así la remoción de turbiedad.

### **5.3.3 Distribución de flujos**

Se realizó la técnica de distribución de flujos mediante trazadores que se muestra en el apartado 4.3.3 para conocer la cantidad de flujo que entra hacia cada uno de los 3 floculadores. Se obtuvieron los datos que se muestran en las Tablas 30, 31 y 32 en el Anexo 3. En la Figura 77 se muestra la cantidad de trazador que pasó por cada unidad.

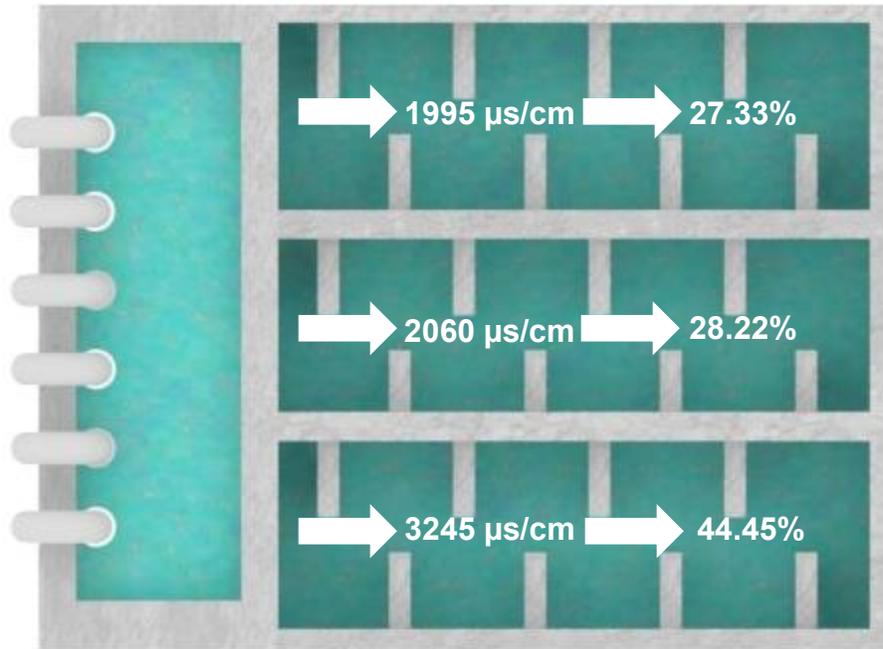


Figura 77. Cantidad de trazador que pasa por cada unidad.

Como se observa en la Figura 74 la cantidad de CE obtenida en el floculador norte, central y sur fue de 1995, 2060 y 3245  $\mu\text{s}/\text{cm}$  respectivamente teniendo un total de 7300  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Con esto se determinó que por cada floculador pasó un porcentaje de 27.33, 28.22 y 44.45 %. A un flujo de operación de 750 L/s se obtuvo que por cada floculador pasaban los gastos correspondientes:

Floculador norte  $Q = 204.97 \text{ L/s}$

Floculador central  $Q = 211.64 \text{ L/s}$

Floculador sur  $Q = 333.39 \text{ L/s}$

Dentro de los resultados obtenidos en esta prueba se obtuvo que efectivamente el flujo que entraba a cada floculador no era equitativo por lo cual la calidad del agua era distinta teniendo en el floculador sur, central y norte, 204.97, 211.64 y 333.39 L/s respectivamente, siendo este último el cual presentaba mejor calidad de agua. Esto se puede deber a un mal diseño de distribución de flujo a la entrada de los floculadores o a que las compuertas de entrada de cada floculador pueden estar desniveladas.

## 5.4 Sedimentador

### 5.4.1 Tiempo de retención

Con un gasto de operación de 369 L/s en el sedimentador, un volumen de 3,757.48 m<sup>3</sup> y aplicando la ecuación 5, se determinó un TRH teórico de 169.71 minutos. Utilizando la prueba de trazadores mencionada en el apartado 4.1.1 se determinó el TRH real del sedimentador norte. La CEo fue de 1393 µS/cm y se tomaron muestras de agua cada minuto durante 400 minutos, a las cuales se les midió la CE. Los resultados de CE obtenidos de cada medición se muestran en la Tabla 35 en el Anexo 4. Con los datos de la Tabla 35 se generó la gráfica que se muestra en la Figura 76. El TRH real corresponde al valor en donde se alcanza el valor máximo de CE, en este caso se obtuvo a los 90 min.

Comparando el valor determinado del TRH teórico con el valor de TRH real obtenido de la prueba de trazadores en campo se determinó que había una diferencia importante del 53 %. Esta diferencia indica que existe un volumen considerable de espacios muertos en el sedimentador, lo que provoca una disminución importante en el TRH real. Lo ideal sería que ambos tiempos fueran iguales, sin embargo este porcentaje desfaseamiento se considera crítico.

El sedimentador se diseñó para una velocidad de sedimentación  $V_s = 1.69$  m/h. La  $V_s$  se puede determinar mediante la ecuación 10.

$$V_s = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Donde:

$V_s$  = Velocidad de sedimentación [m/h]

$Q$  = Gasto de operación de la unidad [m<sup>3</sup>/s]

$A$  = Área de la unidad [m<sup>2</sup>]

De la misma forma la  $V_s$  también se puede determinar con la ecuación 11.

$$V_s = \frac{d}{t} \quad (11)$$

Donde:

$V_s$  = Velocidad de sedimentación [m/h]

$d$  = Altura de sedimentación [m]

$t$  = Tiempo de sedimentación de la partícula [m<sup>2</sup>]

El sedimentador cuenta con una altura promedio de 4.43 m, un TRH real obtenido con la prueba de trazadores de 90 min y utilizando la ecuación 11 se obtiene una  $V_s$  real de 2.95 m/h. Con la  $V_s$  real, el gasto de operación de 369 L/s y la ecuación 10 se determina el área de sedimentación el cual es de 450.30 m<sup>2</sup>. Por lo tanto si se tiene una altura promedio de 4.43 se obtiene un volumen útil en la unidad de 1,994.83 m<sup>3</sup>. Como se puede ver en la unidad existen 1,762.65 m<sup>3</sup> de espacios muertos lo cual acorta de manera considerable el TRH real.

La existencia de espacios también se puede observar con el comportamiento de la curva de CE mostrada en la Figura 78, donde se puede ver que una vez alcanzada la concentración máxima de CE, la curva tiende a alargarse hacia la derecha hasta el punto en que salió todo el trazador.

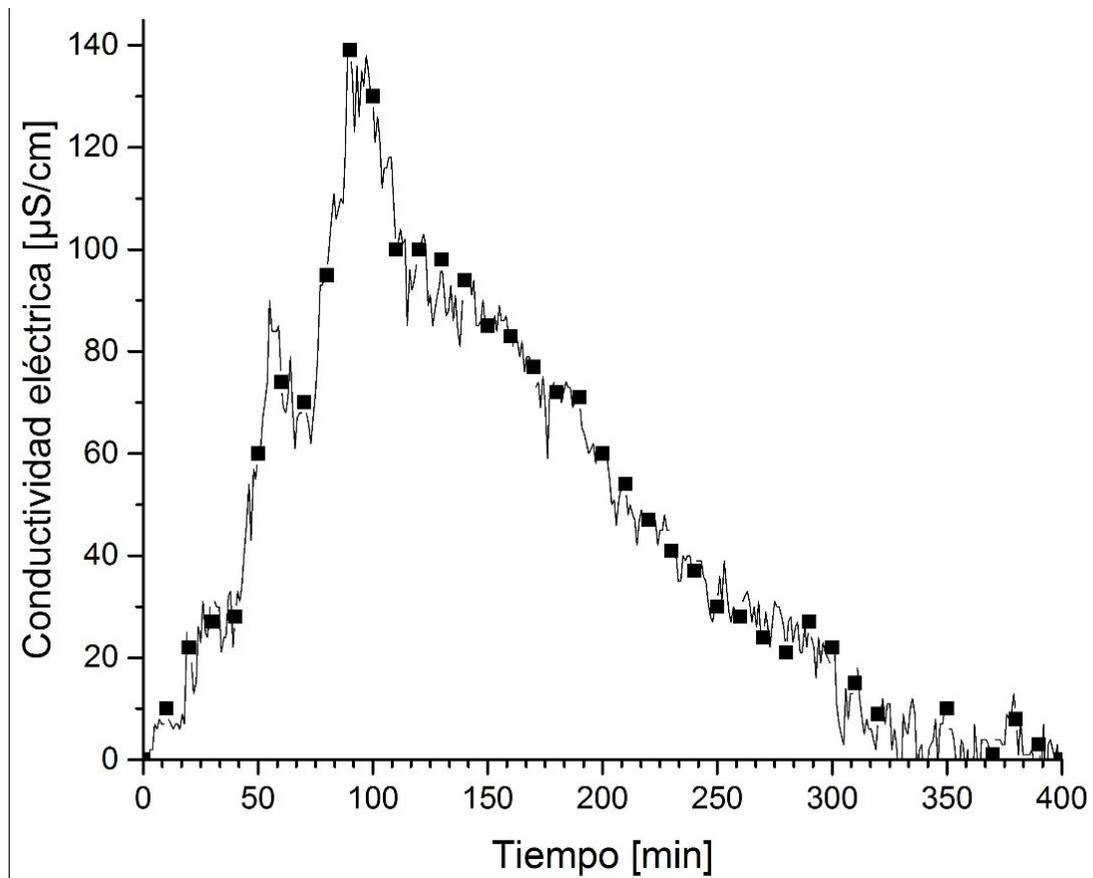


Figura 78. Curva de conductividad eléctrica en el sedimentador.

Según el CEPIS esto se puede deber al diseño del sedimentador, el cual tiene una mampara de concreto a la entrada lo cual genera un flujo preferencial por el centro de la unidad formando los espacios muertos en las partes superior e inferior de la unidad tal y como se muestra en la Figura 79.

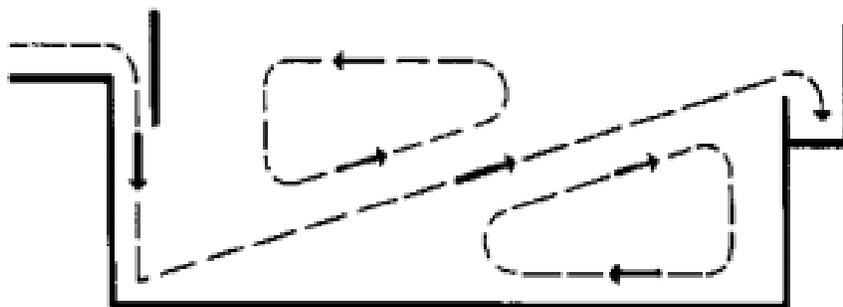


Figura 79. Cortos circuitos y espacios muertos.  
Fuente: CEPIS, 2008.

## 5.5 Filtros

### 5.5.1 Tiempo de lavado

Se determinó el tiempo de lavado que necesitaban cada uno de los 8 filtros que componen la batería de filtros en la POT-Xochimilco. Se realizó el procedimiento mostrado en el apartado 4.5.1 en el cual se recolectaron muestras en la canaleta de lavado durante el lavado de cada filtro. Estas muestras se tomaron cada minuto durante 19 minutos para después medir la turbiedad en cada una de ellas. En el Anexo 5 se muestran las gráficas del tiempo de lavado de cada uno de los 8 filtros.

En la Figura 80 se muestra una comparativa de los tiempos de lavado de cada filtro.

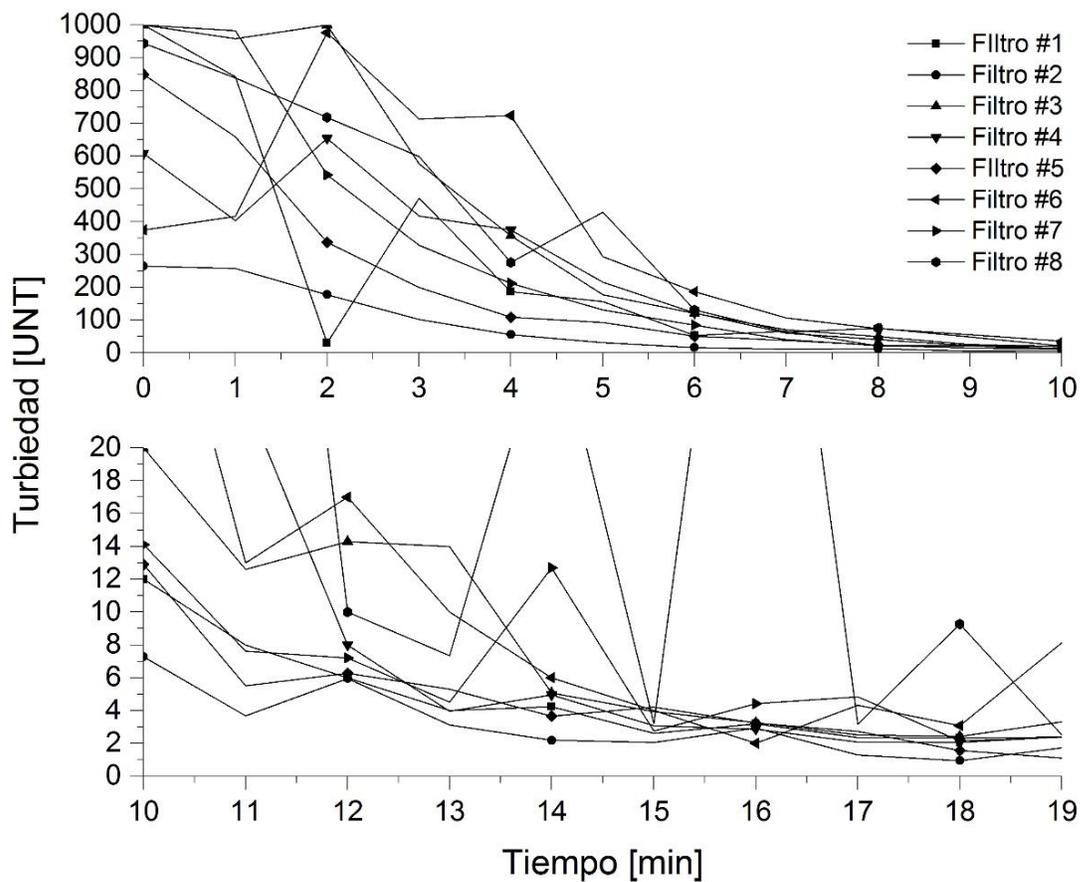


Figura 80. Tiempo de lavado de filtros.

Como se muestra en la Figura 80. En todos los filtros se observó que a partir de los 14 minutos presentaron un comportamiento asintótico con respecto al eje horizontal, presentando turbiedades abajo de 4 UNT una vez alcanzados los 14 minutos de lavado, excepto el filtro número 2, el cual a los 14 minutos seguía presentando agua con una turbiedad arriba de 20 UNT. De acuerdo al IMTA, los tiempos de lavado normales de los filtros son de 10 a 15 minutos. Esto se puede deber a una falta de capacidad de los tanques de almacenamiento de agua de lavado o a un procedimiento de lavado inadecuado.

### **5.5.2 Filtrado inicial.**

Para la determinación del tiempo de filtrado inicial se recolectaron 15 muestras en intervalos de un minuto, a partir de que se puso en operación cada filtro después del lavado. A cada muestra se le midió la turbiedad. Este procedimiento se encuentra en el apartado 4.5.2. En el Anexo 6 se muestran las gráficas del filtrado inicial de cada uno de los 8 filtros.

En la Figura 81 se muestra una comparativa del filtrado inicial de los 8 filtros. El tiempo de filtrado inicial en el cual cada uno de los filtros demora en alcanzar una turbiedad normal de cada uno estaban dentro del rango entre 10 y 15 min. Los filtros número 1, 4 y 5 son lo que después de 15 minutos todavía no alcanzaban una turbiedad por debajo de las 0.5 UNT, siendo el número 1 el de mayor turbiedad. Con estos resultados se puede asumir que los filtros 1, 4 y 5 no se lavaron de manera correcta o les faltó tiempo de lavado.

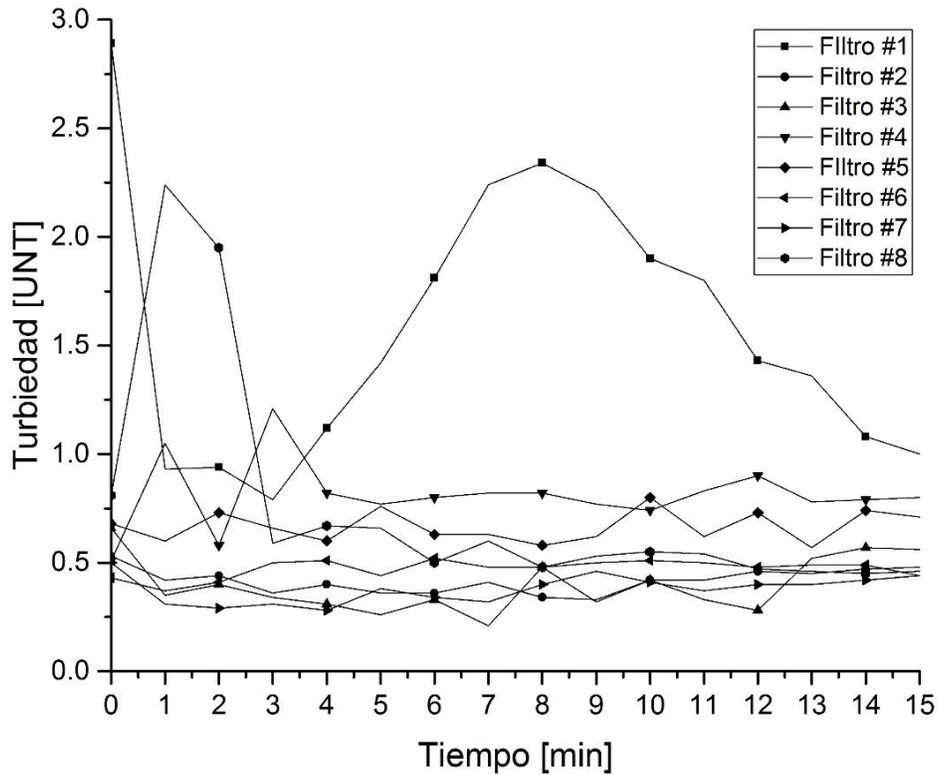


Figura 81. Filtrado inicial de cada filtro.

### 5.5.3 Expansión del medio filtrante y altura del medio filtrante

Se necesitó vaciar cada uno de los 8 filtros para poder entrar en ellos y así medir la altura del medio filtrante. Obtenidas estas alturas se procedió a lavar los filtros, determinando los porcentajes de expansión con el medidor de expansión de medio filtrante en 6 puntos alrededor de cada filtro como se muestra en la figura 82.

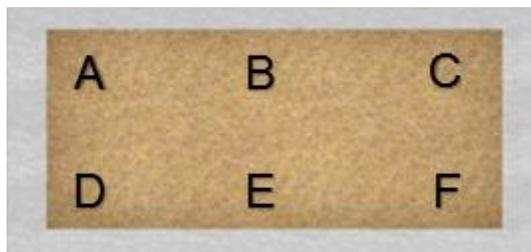


Figura 82. Puntos de muestreo de expansión de medio filtrante en filtros.

En la Tabla 26 se muestran los resultados de la altura de medio y porcentajes de expansión del medio filtrante durante el lavado en los seis puntos de muestreo de los ocho filtros.

Tabla 26. Resultados de prueba de expansión de medio filtrante.

<b>Filtro 1</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	61	61	61	61	61	61
<b>Expansión [cm]</b>	13	18	16	18	26	14
<b>Expansión [%]</b>	21.31	29.51	26.23	29.51	42.62	22.95
<b>Filtro 2</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	69	69	69	69	69	69
<b>Expansión [cm]</b>	21	19	16	11.5	13	16
<b>Expansión [%]</b>	30.43	27.54	23.19	16.67	18.84	23.19
<b>Filtro 3</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	70	70	70	70	70	70
<b>Expansión [cm]</b>	14	11	14	11	11	14
<b>Expansión [%]</b>	20	15.71	20	15.71	15.71	20
<b>Filtro 4</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	57	57	57	57	57	57
<b>Expansión [cm]</b>	16	13	12	100	26	16
<b>Expansión [%]</b>	28.07	22.81	21.05	175.44	45.61	28.07
<b>Filtro 5</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	64	64	64	64	64	64
<b>Expansión [cm]</b>	16	11	11	13	11	13
<b>Expansión [%]</b>	25	17.19	17.19	20.31	17.19	20.31
<b>Filtro 6</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	66	66	66	66	66	66
<b>Expansión [cm]</b>	8	9	11.5	100	16	11.5
<b>Expansión [%]</b>	12.12	13.64	17.52	151.52	24.24	17.42
<b>Filtro 7</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	77	77	77	77	77	77
<b>Expansión [cm]</b>	21	21	25	100	16	21
<b>Expansión [%]</b>	27.27	27.27	32.47	129.87	20.78	27.27
<b>Filtro 8</b>						
<b>Punto</b>	A	B	C	D	E	F
<b>Altura del medio</b>	68	68	68	68	68	68
<b>Expansión [cm]</b>	24	24	16	41	39	18
<b>Expansión [%]</b>	35.29	35.29	23.53	60.29	57.35	26.47

Se observó que en todos los filtros que la expansión no es uniforme, lo que indica que la distribución del agua de lavado no es pareja, llegando en algunos casos a obtenerse expansiones de hasta 175 % como es el caso del filtro 4.

En la Tabla 27 se muestran los valores de expansión promedio de cada uno de los filtros así como su comparación con el valor óptimo. De los resultados se observó que solo en el filtro 1 el valor de expansión medido se encuentra en el intervalo óptimo, alcanzándose la expansión más alta (53.51 %) en el filtro 4 y la mínima de 17.86 % en el filtro 3. Como se mencionó anteriormente, los valores de expansión muy altas provocan pérdida del medio filtrante, en cambio valores bajos como en el filtro 3 provocan que los granos del medio filtrante no se expandan lo suficiente para que las partículas se friccionen unas con otras y así poder tener un lavado eficiente. Por lo que ambos casos, los valores de expansión altos y bajos son desfavorables en el lavado de filtros.

Los valores de expansión obtenidos provocan que el medio filtrante abandone la unidad junto con el agua de desecho del lavado, lo cual se observó a simple vista en el filtro 4.

Tabla 27. Comparación de porcentajes de expansión promedios con esperados

<b>Filtro</b>	<b>Expansión promedio</b>	<b>Intervalo óptimo</b>
<b>No.</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
1	28.69	25-30
2	23.31	25-30
3	17.86	25-30
4	53.51	25-30
5	19.53	25-30
6	39.41	25-30
7	44.16	25-30
8	39.70	25-30

Los resultados de la altura del medio de cada filtro se encuentran en la Tabla 28 así como la altura de diseño del medio filtrante. De estos resultados obtenidos el punto más crítico fue en el filtro 4 el cual tiene una altura del medio de 57 cm siendo 75

cm la altura de diseño. Esto se debe a que se está perdiendo el material filtrante en cada lavado lo cual puede ser comprobado con los resultados de la prueba de porcentaje de expansión ya que este filtro tiene una expansión muy alta de 53.51 %. En cambio en el filtro número 7 se muestra una altura de medio filtrante mayor a la de diseño, lo cual se puede deber a que el material no se acomoda se manera uniforme después del lavado o se añadió material nuevo recientemente.

Tabla 28. Alturas de medio filtrante.

Filtro	Altura medida	Altura de diseño
#	cm	cm
1	61	75
2	69	75
3	70	75
4	57	75
5	64	75
6	66	75
7	77	75
8	68	75

### 5.5.5 Granulometría del medio filtrante

Se determinó en el laboratorio la granulometría de medio filtrante para la antracita y la arena de cada uno de los 8 filtros, utilizando tamices de distinto diámetro de acuerdo al procedimiento descrito en apartado 4.5.3 de este trabajo. Con los valores de granulometría obtenidos se elaboró una curva granulométrica para antracita y arena de cada filtro las cuales se ilustran en las Figuras 83 a la 98. En el Anexo 7 se muestran las tablas correspondientes para el análisis granulométrico de cada uno de los filtros.

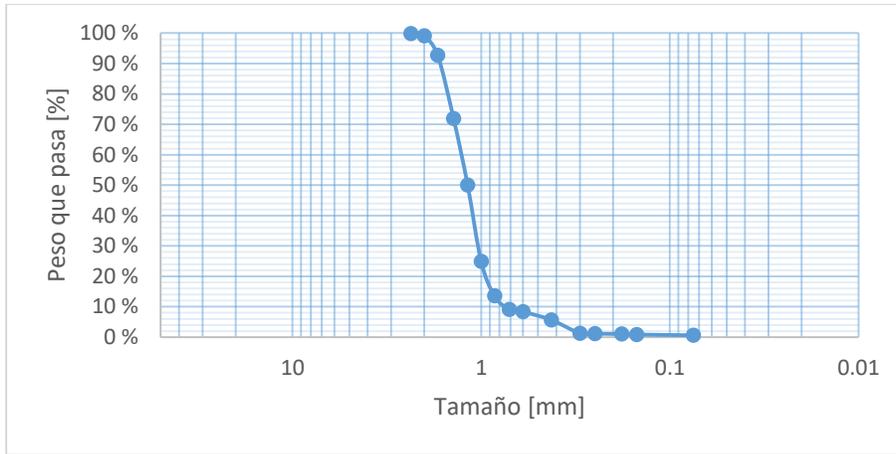


Figura 83. Curva granulométrica de antracita en filtro 1.

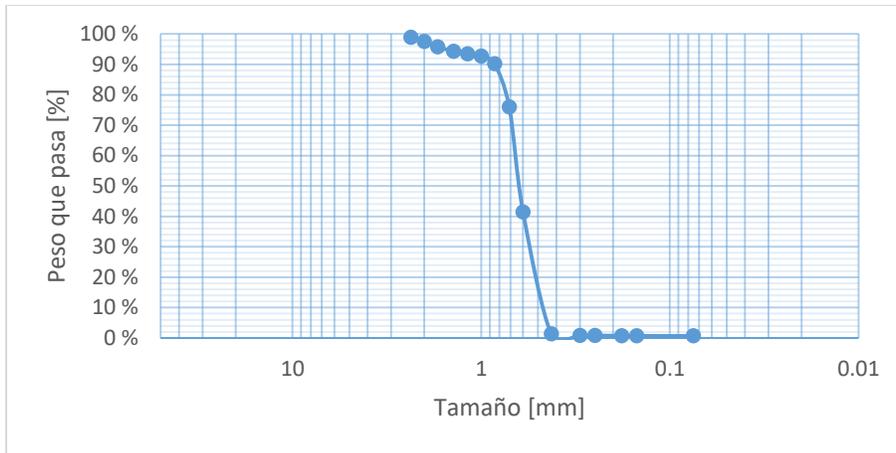


Figura 84. Curva granulométrica de arena en filtro 1.

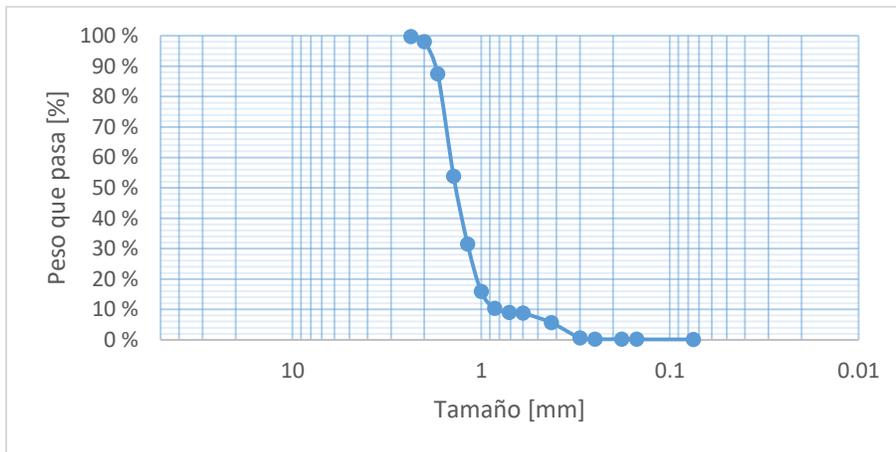


Figura 85. Curva granulométrica de antracita en filtro 2.

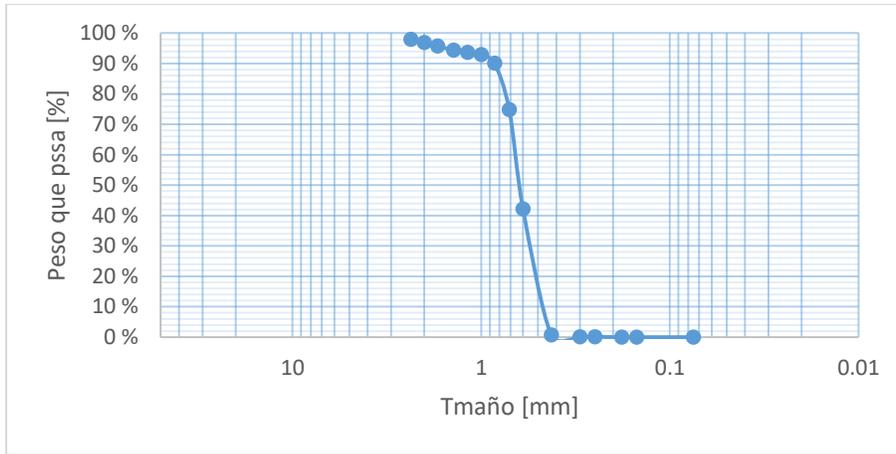


Figura 86. Curva granulométrica de arena en filtro 2.

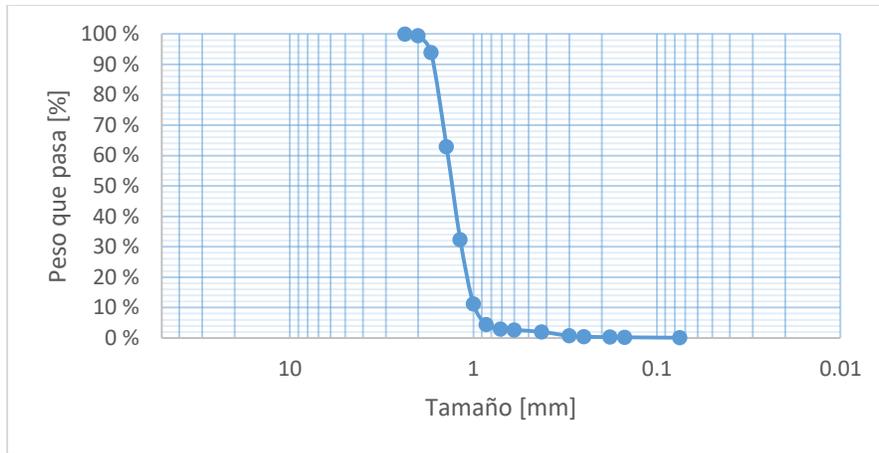


Figura 87. Curva granulométrica de antracita en filtro 3.

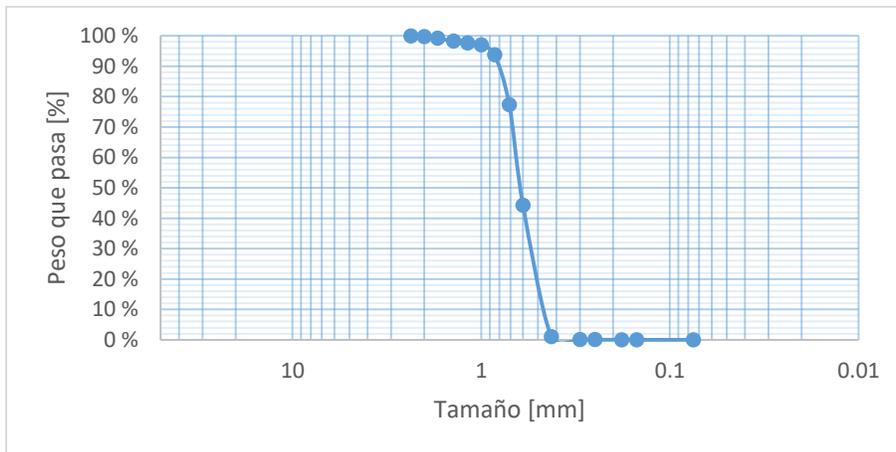


Figura 88. Curva granulométrica de arena en filtro 3.

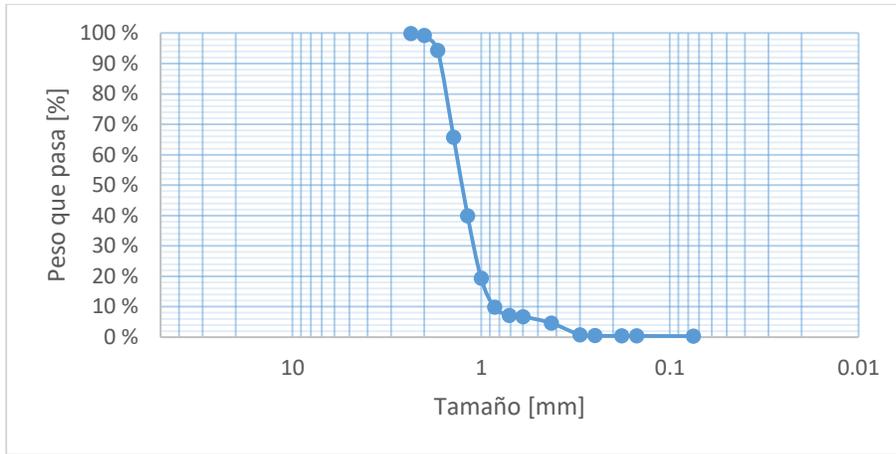


Figura 89. Curva granulométrica de antracita en filtro 4.

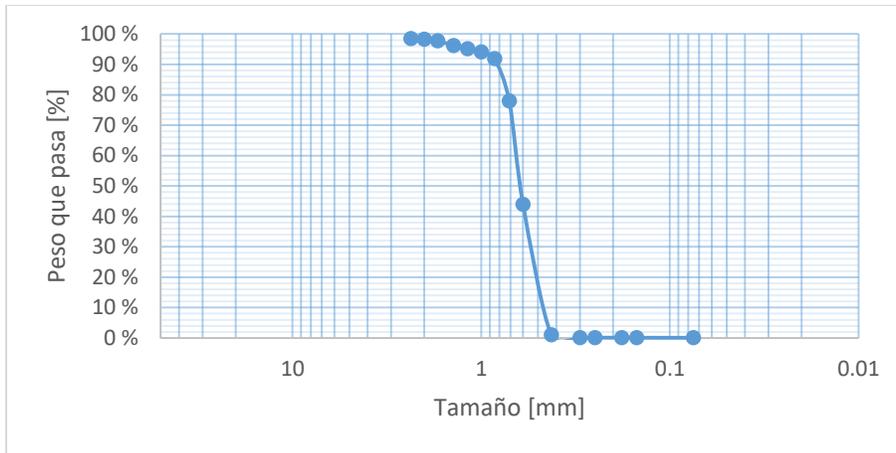


Figura 90. Curva granulométrica de arena en filtro 4.

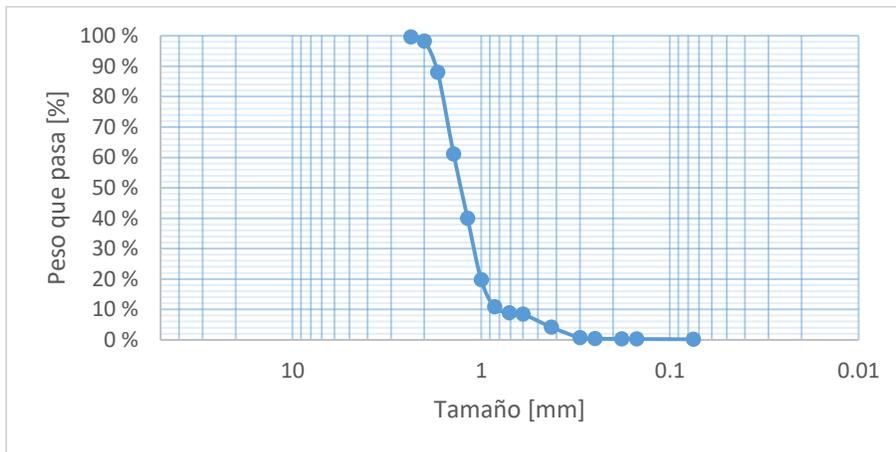


Figura 91. Curva granulométrica de antracita en filtro 5.

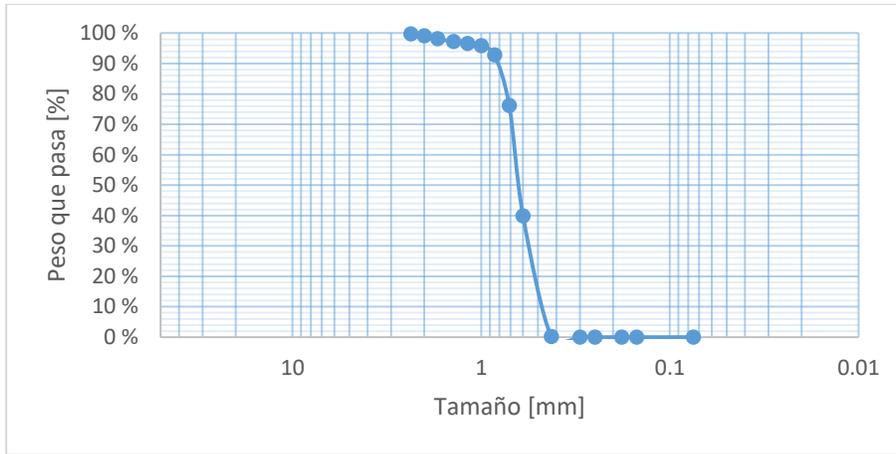


Figura 92. Curva granulométrica de arena en filtro 5.

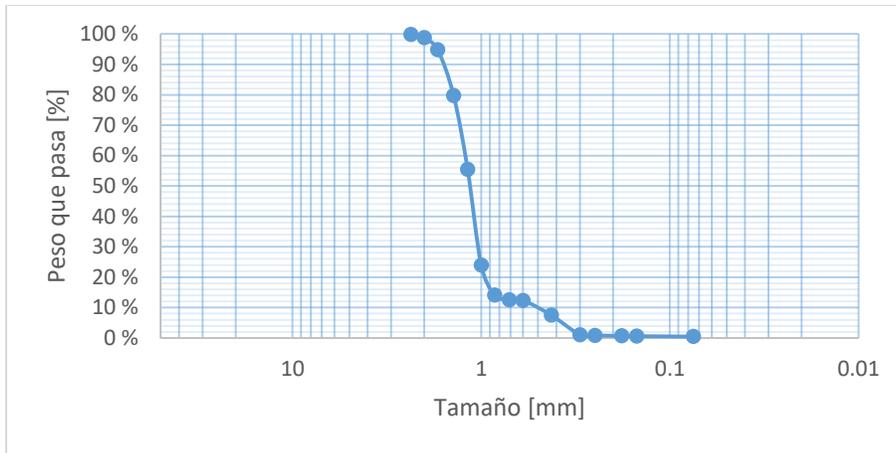


Figura 93. Curva granulométrica de antracita en filtro 6.

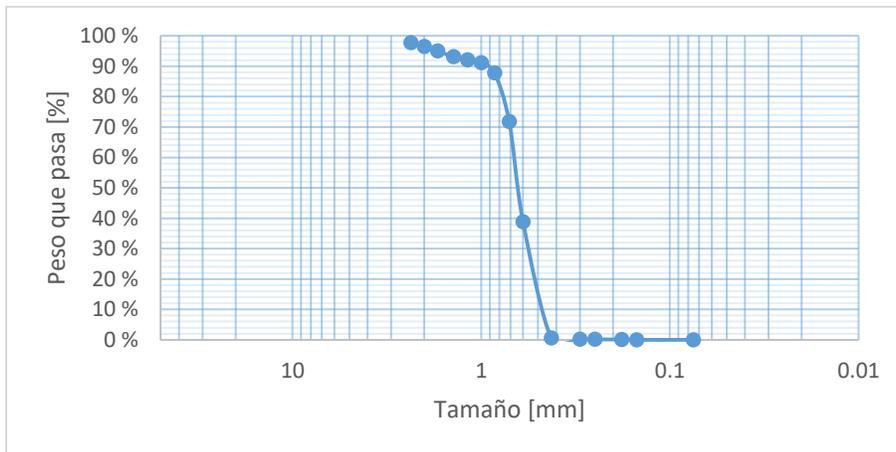


Figura 94. Curva granulométrica de arena en filtro 6.

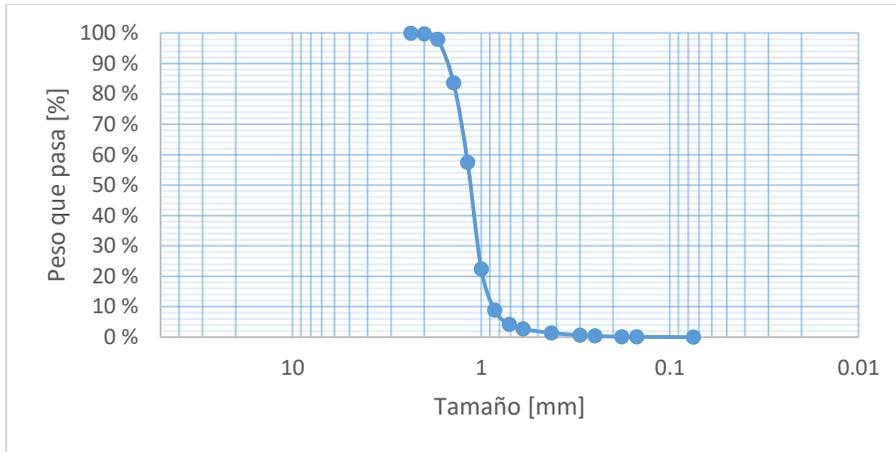


Figura 95. Curva granulométrica de antracita en filtro 7.

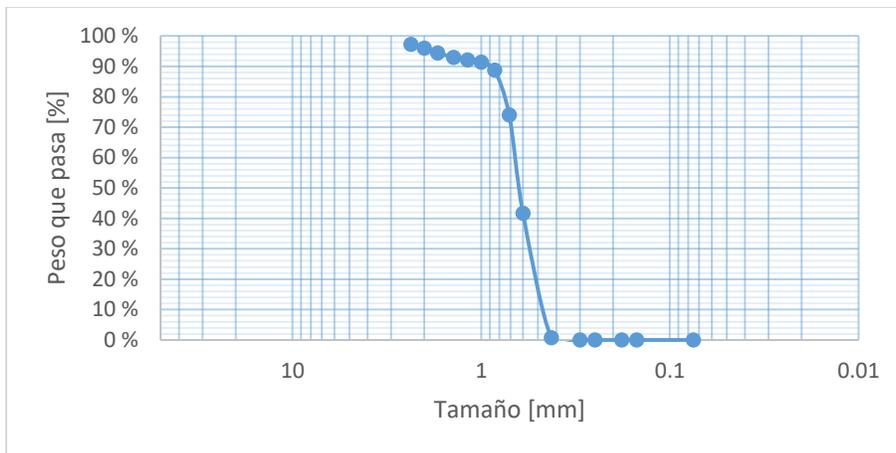


Figura 96. Curva granulométrica de arena en filtro 7.

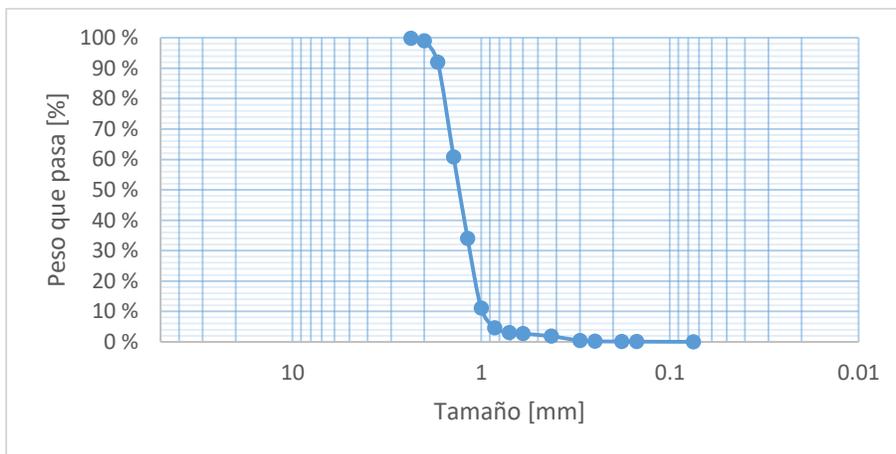


Figura 97. Curva granulométrica de antracita en filtro 8.

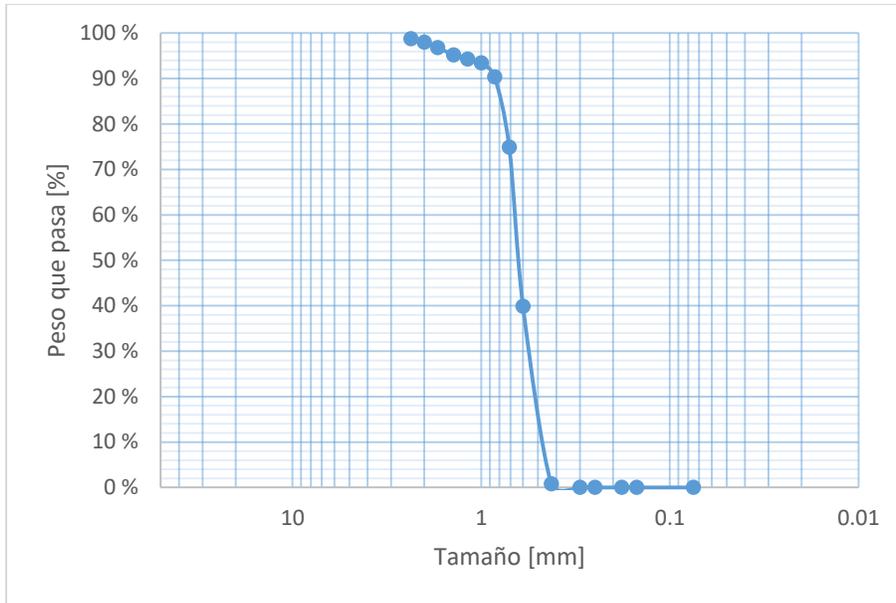


Figura 98. Curva granulométrica de arena en filtro 8.

De cada curva granulométrica se determinaron las principales características del material filtrante como son: el tamaño efectivo que es tamaño de la malla que deja pasar el 10 % del material de la muestra tamizada, el coeficiente de uniformidad que es la relación entre el diámetro de la malla que deja pasar el 60 % (D60) del material tamizado y el de la malla que deja pasar el 10 % (D10) y el grado de intermezcla que es la relación entre el diámetro de malla que dejar pasar el 90 % (D90) de antracita tamizada y el de la malla que deja pasar el D10 de arena en un mismo filtro.

En la Tabla 29 se muestran las medidas de los espesores de antracita y arena de cada filtro medido en campo y los resultados obtenidos del análisis granulométrico así como la comparación con los valores óptimos. Como se muestra en la Tabla 29 los espesores de antracita en los filtros del 1 al 6 son considerablemente menores a los de diseño marcados por el fabricante. Esto es debido a que como se vio anteriormente existen puntos en donde la expansión del medio filtrante es mayor en ciertas zonas dentro del filtro y como la antracita se encuentra en la parte superior del medio filtrante es la primera en salir durante el lavado.

También se determinó que el coeficiente de uniformidad en los filtros 1, 2, 4, 5 y 6 son mayores a los óptimos, lo cual puede deberse a una mala selección del medio.

Según el IMTA si el diámetro del grano del material es mayor, se produce una reducción de la pérdida de carga pero desmejora la calidad del agua filtrada. El grado de intermezcla obtenido en todos los filtros fue mayor que el óptimo, lo cual se pudo comprobar a simple vista ya que en las muestra de medio filtrante se encontró el material un poco mezclado. Esto desmejora la eficiencia de la unidad ya que la arena rellena los poros de la antracita evitando más el paso del agua lo que incrementa la pérdida de carga acortando las carreas de filtración.

Tabla 29. Resultados de análisis granulométrico y comparativa con valores.

	Espesor del medio en el filtro [mm]		Tamaño efectivo [mm] D10		D60 mm	Coeficiente de uniformidad $CU = \frac{D60}{D10}$		Tamaño más grueso [mm] D90	Grado de intermezcla $Im = \frac{D90 \text{ antracita}}{D10 \text{ Arena}}$	
	Obtenido	Diseño	Obtenido	Diseño		Obtenido	Óptimo		Obtenido	Óptimo
Antracita Filtro 1	31	45	0.72	0.90	1.40	1.94	<1.5	1.80	3.67	3
Arena Filtro 1	30	30	0.49	0.56	0.07	1.39	<1.5	0.85		
Antracita Filtro 2	35	45	0.85	0.9	1.6	1.88	<1.5	1.9	3.88	3
Arena Filtro 2	34	30	0.49	0.56	0.68	1.39	<1.5	0.85		
Antracita Filtro 3	40	45	0.99	0.9	1.4	1.41	<1.5	1.7	3.47	3
Arena Filtro 3	30	30	0.49	0.56	0.65	1.33	<1.5	0.8		
Antracita Filtro 4	27	45	0.85	0.9	1.4	1.65	<1.5	1.8	3.67	3
Arena Filtro 4	30	30	0.49	0.56	0.65	1.33	<1.5	0.81		
Antracita Filtro 5	38	45	0.85	0.9	1.4	1.65	<1.5	1.8	3.67	3
Arena Filtro 5	26	30	0.49	0.56	0.68	1.39	<1.5	0.81		
Antracita Filtro 6	30	45	0.5	0.9	1.25	2.5	<1.5	1.7	3.47	3
Arena Filtro 6	36	30	0.49	0.56	0.68	1.39	<1.5	0.9		
Antracita Filtro 7	42	45	0.89	0.9	1.2	1.35	<1.5	1.6	3.33	3
Arena Filtro 7	35	30	0.48	0.56	0.66	1.38	<1.5	0.9		
Antracita Filtro 8	40	45	1	0.9	1.5	1.5	<1.5	1.8	3.67	3
Arena Filtro 8	28	30	0.49	0.56	0.68	1.39	<1.5	0.85		

## 5.6 Cloración

### 5.6.1 Tiempo de contacto

Para determinar el tiempo de contacto real se tiene que incrementar la dosificación de cloro en un 30 % para utilizar este incremento como trazador y así poder obtener el tiempo de contacto real. Como no se contó con la autorización para hacer esto ya que el usuario se vería afectado con un cloro residual alto se utilizó la ecuación 12 para determinar el tiempo de contacto.

$$TC = \frac{V}{Q} \quad (12)$$

Donde:

TC = Tiempo de contacto [s]

V = Volumen de la unidad [m<sup>3</sup>]

Q = Flujo que pasa por la unidad [m<sup>3</sup>/s]

Los tanques de regulación sirven también para darle un tiempo de contacto al agua con el cloro. Este tanque tiene una capacidad de 16,000 m<sup>3</sup> y diseñado para un gasto de 1,100 L/s. Aplicando la ecuación 12 se obtiene un

$$TC = 4.04 \text{ h}$$

El tiempo de contacto calculado es de 4.04 h lo cual es óptimo ya que se necesita mínimo de 30 min para asegurar la desinfección completa. El IMTA recomienda que no se utilicen tanques donde el nivel de agua sea variable ya que el tiempo de contacto podría variar.

## CAPÍTULO 5

### **CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

De la presente investigación se concluye lo siguiente:

- a) El presedimentador opera de manera eficiente aunque se podría mejorar el desempeño de la unidad modificando la zona de salida.
- b) La mezcla rápida opera de manera eficiente, siendo la forma en que se dosifica el coagulante la única oportunidad de mejora.
- c) El floculador es la unidad que se encuentra en las condiciones más críticas, ya que al estar mal diseñado no cumple con su función a su capacidad de diseño. La distribución del flujo a la entrada de cada floculador no es uniforme, lo cual causa que la calidad de agua en cada tren de tratamiento sea diferente.
- d) El sedimentador no opera de manera eficiente, ya que el tiempo de retención es muy corto, provocando así que el floc no alcance a sedimentar.
- e) De las dosificaciones de reactivos químicos se concluye que las cantidades de sulfato de aluminio y polímero catiónico dosificadas no eran las óptimas, causando así turbiedades más altas en los procesos.
- f) Los filtros en su mayoría operan de manera eficiente aunque se necesita de una evaluación periódica de los mismo ya que algunos tienen perdida de lecho filtrante.

## 5.2 Recomendaciones

En base a las conclusiones se recomienda lo siguiente:

- a) Modificar la zona de salida del presedimentador para poder asegurar un flujo pistón a todo lo largo de la unidad.
- b) Se recomienda cambiar la forma en la que se dosifica el coagulante en la mezcla rápida, siendo la manera correcta a todo lo largo de la unidad y de manera uniforme.
- c) Se recomienda plantear un rediseño de los floculadores, o analizar otras alternativas para que puedan operar de manera eficiente a su capacidad de diseño.
- d) Modificar la zona de entrada del sedimentador para evitar que se formen espacios muertos o caminos preferenciales de flujo.
- e) Realizar de manera recurrente las pruebas de jarras para asegurar así que la dosificación de reactivos sea la óptima.
- f) Capacitar al personal para que realice de manera periódica la evaluación de los filtros para evitar que el lecho filtrante se pierda.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cánepa de Vargas, L. (1996). Planta potabilizadora compacta y transportable de OSE-Uruguay. En CEPIS informe técnico (Vol. 437). CEPIS.

[2] VARON, O. A. G., & OSORIO, W. R. (2005). Evaluación de la planta de potabilización de agua del municipio de Villamaría "AQUAMANA ESP".

[3] Cánepa de Vargas Lidia. (2004). Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Plantas de Filtración Rápida. Tomo I capítulo 3. Páginas de la 117 a 122.

[4] Unda Opazo Francisco. (2003). Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública. Página 118.

[5] CESP. (2010). Manual de operaciones planta potabilizadora Xochimilco.

[6] CESP. (2012). Ficha técnica planta potabilizadora Xochimilco.

[7] CONAGUA. (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Páginas 17 y 18.

[8] INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado el día 17 de noviembre del 2014 de:

[http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta\\_resultados/iter2010.aspx](http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx)

[9] IMTA. (2007). Curso Diseño de plantas potabilizadoras. Página 56.

[10] CESP. (2014). Planta potabilizadora No. 3. Recuperado el día 5 de mayo del 2014 de:

<http://www.cespm.gob.mx/plantapot3.html>

[11] CEPIS/OPS. (2008). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I. Lima, Perú.

[12] CEPIS/OPS. (2008). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo II. Lima, Perú.

[13] Degremont. (1979). Water treatment handbook. Rueil-Malmaison, Francia.

- [14] Montgomery James M. (1985). Water treatment principles & design. Canadá.
- [15] Arboleda J. (1981). Teoría diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima, Perú.
- [16] Pérez Carrión José. (1978). Estado del arte: Coagulación. Lima, Perú.
- [17] AWWA. (1998). Cloración de agua, principios y prácticas. Denver, Colorado.
- [18] Moe C. L. (2007). Waterborne transmission of infectious agents. Manual of environmental microbiology. Estados Unidos.
- [19] IMTA. (2002). Manual de evaluación de plantas potabilizadoras. Cuernavaca, Morelos.
- [20] IMTA. (2002). Manual de operaciones unitarias de plantas potabilizadoras. Toluca, Estado de México.
- [21] Solsona F. (2002) Desinfección del agua. Lima, Perú.
- [22] Richter C. (1984) Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Lima, Perú.
- [23] Ahuja Santinder. (2009) Handbook of water purity and quality. Calabash, NC, USA.
- [24] Sierra Ramírez C. A. (2011) Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico. Medellín, Colombia.
- [25] Tebbutt T.H.Y. (2002) Fundamentos de control de la calidad del agua. México. D.F.
- [26] Romero Rojas J. A. (1999) Potabilización del agua. Mexico, D.F.
- [27] Viessman, Jr W. & Hammer M. J. (1985) Water supply and pollution control. New York, USA.
- [28] Departamento de Sanidad del estado de Nueva York. (DSNY, 2000). Manual de tratamiento de aguas. Albany. N.Y. USA.
- [29] 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.
- [30] Norma Oficial Mexicana. NOM-014-SSA1-1993 "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados"

- [31] M-MMP-1-06/03. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Suelos y materiales para terracerías. Granulometría de materiales compactables para terracerías.
- [32] UNEP. (1991). Freshwater Pollution. Nairobi, Kenya.
- [33] Terence J. McGhee. (1999). Abastecimiento de agua y alcantarillado. Santafé de Bogotá. Colombia.
- [34] AWWA. (1951). Water Quality and Treatment. New York.
- [35] Stackelberg, P. E., Gibs, J., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Zaugg, S. D., & Lippincott, R. L. (2007). Efficiency of conventional drinking-water-treatment processes in removal of pharmaceuticals and other organic compounds. *Science of the Total Environment*, 377(2), 255-272.
- [36] Zhang, K., Achari, G., Sadiq, R., Langford, C. H., & Dore, M. H. (2012). An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water research*, 46(6), 1673-1683.
- [37] Kalulu, K., & Hoko, Z. (2010). Assessment of the performance of a public water utility: A case study of Blantyre Water Board in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(13), 806-810.
- [38] Chang, E. E., Chiang, P. C., Huang, S. M., & Lin, Y. L. (2007). Development and implementation of performance evaluation system for a water treatment plant: case study of Taipei water treatment plant. *Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management*, 11(1), 36-47.
- [39] Coulibaly, H. D., & Rodriguez, M. J. (2004). Development of performance indicators for small Quebec drinking water utilities. *Journal of Environmental Management*, 73(3), 243-255.
- [40] Gottfried, A., Shepard, A. D., Hardiman, K., & Walsh, M. E. (2008). Impact of recycling filter backwash water on organic removal in coagulation–sedimentation processes. *Water research*, 42(18), 4683-4691.
- [41] Chen, T., Xu, Y., Liu, Z., Zhu, S., Shi, W., & Cui, F. (2016). Evaluation of drinking water treatment combined filter backwash water recycling technology based on comet and micronucleus assay. *Journal of Environmental Sciences*, 42, 61-70.
- [42] OMS. (2004). Guías para la calidad del agua potable. Ginebra.

- [43] Lawler, D. F., & Nason, J. A. (2005). Integral water treatment plant modeling: improvements for particle processes. *Environmental science & technology*, 39(17), 6337-6342.
- [44] Sadiq, R., Rodríguez, M. J., & Tesfamariam, S. (2010). Integrating indicators for performance assessment of small water utilities using ordered weighted averaging (OWA) operators. *Expert Systems with Applications*, 37(7), 4881-4891.
- [45] Alansari, A., Selbes, M., Karanfil, T., & Amburgey, J. (2015). Optimization of Coagulation Pretreatment Conditions in a Ceramic Membrane System. *Journal AWWA*, 107, 12.
- [46] Caballero D. (2011). Manual para la evaluación y diagnóstico de plantas de tratamiento de filtrado rápido en la zona rural colombiana. Bucaramanga, Colombia.
- [47] Rose J. (2011). Disinfection Byproducts and the Wrath of Unintended Consequences <http://www.waterandhealth.org/disinfection-byproducts-wrath-unintended-consequences/>.
- [48] Brière F. (2005). Distribución de agua potable y colecta de desagües y de agua de lluvia. Montreal, Canadá.
- [49] Hendricks D. (2011). Fundamentals of water treatment units processes. Physical, chemical and biological. Boca raton Fl.
- [50] AWWA. (2010). Water treatment. Principles and practices of water supply operations. Estados Unidos de America.
- [51] Jacobus A. (2009). Gerenciamento e tratamento de água. Curso de tecnologia em gestão ambiental. Cascavel.
- [52] Ramalho R.S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverte, S.A. Pag. 154.
- [53] Corcho F, Duque J. (2005). Acueductos. Teoría y diseño. Editorial Sello. Medellín, Colombia. Pag, 184.
- [54] Karia, G. L., & Christian, R. A. (2013). Wastewater treatment: Concepts and design approach. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [55] Sánchez Molina, J. (2010). Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

## Anexo 1

Tabla 30. Resultados de prueba de trazadores en presedimentador.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]	[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]
0	0	1,366	9	32	32	1,377	20
1	1	1,367	10	33	33	1,377	20
2	2	1,368	11	34	34	1,368	11
3	3	1,369	12	35	35	1,369	12
4	4	1,371	14	36	36	1,368	11
5	5	1,371	14	37	37	1,369	12
6	6	1,371	14	38	38	1,367	10
7	7	1,371	14	39	39	1,363	6
8	8	1,371	14	40	40	1,366	9
9	9	1,371	14	41	41	1,389	32
10	10	1,371	14	42	42	1,372	15
11	11	1,367	10	43	43	1,367	10
12	12	1,368	11	44	44	1,373	16
13	13	1,367	10	45	45	1,368	11
14	14	1,369	12	46	46	1,381	24
15	15	1,368	11	47	47	1,369	12
16	16	1,369	12	48	48	1,383	26
17	17	1,369	12	49	49	1,368	11
18	18	1,368	11	50	50	1,381	24
19	19	1,371	14	51	51	1,368	11
20	20	1,370	13	52	52	1,404	47
21	21	1,371	14	53	53	1,396	39
22	22	1,370	13	54	54	1,414	57
23	23	1,368	11	55	55	1,415	58
24	24	1,368	11	56	56	1,413	56
25	25	1,370	13	57	57	1,376	19
26	26	1,368	11	58	58	1,368	11
27	27	1,367	10	59	59	1,372	15
28	28	1,373	16	60	60	1,374	17
29	29	1,363	6	61	61	1,398	41
30	30	1,369	12	62	62	1,373	16
31	31	1,362	5	63	63	1,372	15

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]	[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]
64	64	1,372	15	96	96	1,422	65
65	65	1,376	19	97	97	1,424	67
66	66	1,397	40	98	98	1,426	69
67	67	1,390	33	99	99	1,424	67
68	68	1,395	38	100	100	1,423	66
69	69	1,393	36	101	101	1,418	61
70	70	1,398	41	102	102	1,411	54
71	71	1,393	36	103	103	1,423	66
72	72	1,398	41	104	104	1,415	58
73	73	1,398	41	105	105	1,423	66
74	74	1,381	24	106	106	1,421	64
75	75	1,377	20	107	107	1,426	69
76	76	1,414	57	108	108	1,429	72
77	77	1,408	51	109	109	1,416	59
78	78	1,400	43	110	110	1,423	66
79	79	1,420	63	111	111	1,428	71
80	80	1,408	51	112	112	1,425	68
81	81	1,408	51	113	113	1,424	67
82	82	1,419	62	114	114	1,415	58
83	83	1,422	65	115	115	1,426	69
84	84	1,407	50	116	116	1,425	68
85	85	1,411	54	117	117	1,420	63
86	86	1,399	42	118	118	1,420	63
87	87	1,395	38	119	119	1,421	64
88	88	1,395	38	120	120	1,419	62
89	89	1,421	64	121	121	1,397	40
90	90	1,413	56	122	122	1,408	51
91	91	1,416	59	123	123	1,416	59
92	92	1,415	58	124	124	1,413	56
93	93	1,430	73	125	125	1,403	46
94	94	1,427	70	126	126	1,408	51
95	95	1,427	70	127	127	1,394	37

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]	[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]
128	128	1,406	49	160	160	1,389	32
129	129	1,408	51	161	161	1,388	31
130	130	1,411	54	162	162	1,398	41
131	131	1,414	57	163	163	1,402	45
132	132	1,413	56	164	164	1,392	35
133	133	1,399	42	165	165	1,410	53
134	134	1,415	58	166	166	1,401	44
135	135	1,411	54	167	167	1,401	44
136	136	1,414	57	168	168	1,393	36
137	137	1,417	60	169	169	1,400	43
138	138	1,412	55	170	170	1,403	46
139	139	1,410	53	171	171	1,389	32
140	140	1,408	51	172	172	1,389	32
141	141	1,400	43	173	173	1,397	40
142	142	1,409	52	174	174	1,397	40
143	143	1,408	51	175	175	1,399	42
144	144	1,394	37	176	176	1,380	23
145	145	1,396	39	177	177	1,397	40
146	146	1,408	51	178	178	1,386	29
147	147	1,410	53	179	179	1,397	40
148	148	1,399	42	180	180	1,379	22
149	149	1,410	53	181	181	1,387	30
150	150	1,409	52	182	182	1,383	26
151	151	1,408	51	183	183	1,389	32
152	152	1,396	39	184	184	1,389	32
153	153	1,398	41	185	185	1,390	33
154	154	1,396	39	186	186	1,387	30
155	155	1,384	27	187	187	1,384	27
156	156	1,396	39	188	188	1,383	26
157	157	1,400	43	189	189	1,369	12
158	158	1,391	34	190	190	1,375	18
159	159	1,393	36	191	191	1,380	23

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
192	192	1,380	23	224	224	1,376	19
193	193	1,366	9	225	225	1,360	3
194	194	1,373	16	226	226	1,368	11
195	195	1,380	23	227	227	1,370	13
196	196	1,377	20	228	228	1,377	20
197	197	1,374	17	229	229	1,366	9
198	198	1,376	19	230	230	1,364	7
199	199	1,377	20	231	231	1,372	15
200	200	1,384	27	232	232	1,366	9
201	201	1,378	21	233	233	1,362	5
202	202	1,369	12	234	234	1,359	2
203	203	1,379	22	235	235	1,366	9
204	204	1,376	19	236	236	1,367	10
205	205	1,374	17	237	237	1,370	13
206	206	1,379	22	238	238	1,370	13
207	207	1,379	22	239	239	1,372	15
208	208	1,379	22	240	240	1,359	2
209	209	1,380	23	241	241	1,361	4
210	210	1,384	27	242	242	1,373	16
211	211	1,381	24	243	243	1,371	14
212	212	1,390	33	244	244	1,374	17
213	213	1,382	25	245	245	1,363	6
214	214	1,382	25	246	246	1,366	9
215	215	1,386	29	247	247	1,372	15
216	216	1,375	18	248	248	1,358	1
217	217	1,383	26	249	249	1,371	14
218	218	1,381	24	250	250	1,371	14
219	219	1,383	26	251	251	1,367	10
220	220	1,380	23	252	252	1,361	4
221	221	1,382	25	253	253	1,363	6
222	222	1,382	25	254	254	1,372	15
223	223	1,375	18	255	255	1,361	4

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]	[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]
256	256	1,371	14	288	288	1,368	11
257	257	1,365	8	289	289	1,367	10
258	258	1,362	5	290	290	1,369	12
259	259	1,373	16	291	291	1,369	12
260	260	1,376	19	292	292	1,366	9
261	261	1,375	18	293	293	1,367	10
262	262	1,374	17	294	294	1,366	9
263	263	1,376	19	295	295	1,366	9
264	264	1,368	11	296	296	1,367	10
265	265	1,363	6	297	297	1,365	8
266	266	1,364	7	298	298	1,364	7
267	267	1,365	8	299	299	1,364	7
268	268	1,366	9	300	300	1,363	6
269	269	1,365	8	301	301	1,362	5
270	270	1,367	10	302	302	1,360	3
271	271	1,368	11	303	303	1,359	2
272	272	1,366	9	304	304	1,357	0
273	273	1,366	9	288	288	1,368	11
274	274	1,366	9	289	289	1,367	10
275	275	1,367	10	290	290	1,369	12
276	276	1,365	8	291	291	1,369	12
277	277	1,365	8	292	292	1,366	9
278	278	1,364	7	293	293	1,367	10
279	279	1,365	8	294	294	1,366	9
280	280	1,364	7	295	295	1,366	9
281	281	1,369	12	296	296	1,367	10
282	282	1,369	12	297	297	1,365	8
283	283	1,369	12	298	298	1,364	7
284	284	1,369	12	299	299	1,364	7
285	285	1,369	12	300	300	1,363	6
286	286	1,369	12	301	301	1,362	5
287	287	1,368	11	302	302	1,360	3

## Anexo 2

Tabla 31. Resultados de prueba de trazadores en floculador.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
0	0	1,393	0	32	160	1,395	2
1	5	1,393	0	33	165	1,394	1
2	10	1,394	1	34	170	1,394	1
3	15	1,394	1	35	175	1,393	0
4	20	1,395	2	36	180	1,393	0
5	25	1,395	2				
6	30	1,396	3				
7	35	1,396	3				
8	40	1,397	4				
9	45	1,398	5				
10	50	1,400	7				
11	55	1,420	27				
12	60	1,460	67				
13	65	1,480	87				
14	70	1,490	97				
15	75	1,510	117				
16	80	1,520	127				
17	85	1,530	137				
18	90	1,532	139				
19	95	1,530	137				
20	100	1,520	127				
21	105	1,510	117				
22	110	1,490	97				
23	115	1,480	87				
24	120	1,460	67				
25	125	1,420	27				
26	130	1,400	7				
27	135	1,398	5				
28	140	1,397	4				
29	145	1,396	3				
30	150	1,396	3				
31	155	1,395	2				

### Anexo 3

Tabla 32. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador norte.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
0	0	1,373	13	32	32	1,385	25
1	1	1,378	18	33	33	1,382	22
2	2	1,434	74	34	34	1,381	21
3	3	1,438	78	35	35	1,376	16
4	4	1,429	69	36	36	1,375	15
5	5	1,430	70	37	37	1,372	12
6	6	1,436	76	38	38	1,372	12
7	7	1,433	73	39	39	1,373	13
8	8	1,429	69	40	40	1,371	11
9	9	1,446	86	41	41	1,370	10
10	10	1,439	79	42	42	1,370	10
11	11	1,437	77	43	43	1,369	9
12	12	1,436	76	44	44	1,367	7
13	13	1,437	77	45	45	1,367	7
14	14	1,431	71	46	46	1,360	-
15	15	1,424	64	47	47	1,368	8
16	16	1,423	63	48	48	1,365	5
17	17	1,422	62	49	49	1,363	3
18	18	1,419	59	50	50	1,361	1
19	19	1,421	61	51	51	1,360	-
20	20	1,413	53	52	52	1,373	13
21	21	1,415	55			Total=	1995
22	22	1,410	50				
23	23	1,406	46				
24	24	1,403	43				
25	25	1,401	41				
26	26	1,400	40				
27	27	1,395	35				
28	28	1,393	33				
29	29	1,390	30				
30	30	1,384	24				
31	31	1,383	23				

Tabla 33. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador central.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
0	0	1,374	14	32	32	1,388	28
1	1	1,364	4	33	33	1,387	27
2	2	1,370	10	34	34	1,384	24
3	3	1,384	24	35	35	1,380	20
4	4	1,402	42	36	36	1,377	17
5	5	1,403	43	37	37	1,375	15
6	6	1,410	50	38	38	1,378	18
7	7	1,421	61	39	39	1,374	14
8	8	1,420	60	40	40	1,374	14
9	9	1,437	77	41	41	1,372	12
10	10	1,443	83	42	42	1,370	10
11	11	1,442	82	43	43	1,369	9
12	12	1,444	84	44	44	1,370	10
13	13	1,450	90	45	45	1,365	5
14	14	1,450	90	46	46	1,365	5
15	15	1,448	88	47	47	1,364	4
16	16	1,445	85	48	48	1,362	2
17	17	1,434	74	49	49	1,361	1
18	18	1,436	76	50	50	1,360	-
19	19	1,437	77	51	51	1,360	-
20	20	1,433	73	52	52	1,374	14
21	21	1,426	66			Total=	2060
22	22	1,431	71				
23	23	1,425	65				
24	24	1,416	56				
25	25	1,408	48				
26	26	1,403	43				
27	27	1,407	47				
28	28	1,403	43				
29	29	1,397	37				
30	30	1,396	36				
31	31	1,386	26				

Tabla 34. Resultados de prueba de distribución de flujo en floculador sur.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]	[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]
0	0	1,367	7	32	32	1,380	20
1	1	1,362	2	33	33	1,376	16
2	2	1,434	74	34	34	1,378	18
3	3	1,537	177	35	35	1,374	14
4	4	1,599	239	36	36	1,372	12
5	5	1,588	228	37	37	1,370	10
6	6	1,565	205	38	38	1,373	13
7	7	1,542	182	39	39	1,368	8
8	8	1,537	177	40	40	1,368	8
9	9	1,526	166	41	41	1,366	6
10	10	1,516	156	42	42	1,365	5
11	11	1,531	171	43	43	1,367	7
12	12	1,487	127	44	44	1,363	3
13	13	1,483	123	45	45	1,363	3
14	14	1,466	106	46	46	1,362	2
15	15	1,470	110	47	47	1,361	1
16	16	1,456	96	48	48	1,362	2
17	17	1,444	84	49	49	1,360	-
18	18	1,435	75	50	50	1,360	-
19	19	1,434	74	51	51	1,360	-
20	20	1,428	68	52	52	1,367	7
21	21	1,423	63			Total=	3245
22	22	1,418	58				
23	23	1,413	53				
24	24	1,408	48				
25	25	1,402	42				
26	26	1,400	40				
27	27	1,396	36				
28	28	1,395	35				
29	29	1,389	29				
30	30	1,383	23				
31	31	1,383	23				

## Anexo 4

Tabla 35. Resultados de prueba de trazadores en sedimentador.

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
0	0	1,393	0	32	32	1,423	30
1	1	1,391	-2	33	33	1,423	30
2	2	1,391	-2	34	34	1,414	21
3	3	1,395	2	35	35	1,417	24
4	4	1,395	2	36	36	1,417	24
5	5	1,400	7	37	37	1,425	32
6	6	1,399	6	38	38	1,426	33
7	7	1,401	8	39	39	1,415	22
8	8	1,400	7	40	40	1,421	28
9	9	1,400	7	41	41	1,426	33
10	10	1,403	10	42	42	1,424	31
11	11	1,401	8	43	43	1,427	34
12	12	1,400	7	44	44	1,434	41
13	13	1,399	6	45	45	1,439	46
14	14	1,400	7	46	46	1,447	54
15	15	1,400	7	47	47	1,436	43
16	16	1,399	6	48	48	1,450	57
17	17	1,402	9	49	49	1,448	55
18	18	1,400	7	50	50	1,453	60
19	19	1,418	25	51	51	1,453	60
20	20	1,415	22	52	52	1,460	67
21	21	1,412	19	53	53	1,463	70
22	22	1,406	13	54	54	1,467	74
23	23	1,408	15	55	55	1,483	90
24	24	1,419	26	56	56	1,477	84
25	25	1,416	23	57	57	1,477	84
26	26	1,424	31	58	58	1,477	84
27	27	1,418	25	59	59	1,478	85
28	28	1,417	24	60	60	1,467	74
29	29	1,423	30	61	61	1,462	69
30	30	1,420	27	62	62	1,461	68
31	31	1,424	31	63	63	1,464	71

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]	[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]
64	64	1,472	79	96	96	1,525	132
65	65	1,462	69	97	97	1,531	138
66	66	1,454	61	98	98	1,528	135
67	67	1,460	67	99	99	1,523	130
68	68	1,461	68	100	100	1,523	130
69	69	1,461	68	101	101	1,514	121
70	70	1,463	70	102	102	1,519	126
71	71	1461	68	103	103	1,515	122
72	72	1,459	66	104	104	1,505	112
73	73	1,455	62	105	105	1,509	116
74	74	1,460	67	106	106	1,509	116
75	75	1,465	72	107	107	1,511	118
76	76	1,472	79	108	108	1,511	118
77	77	1,486	93	109	109	1,503	110
78	78	1,486	93	110	110	1,493	100
79	79	1,488	95	111	111	1,494	101
80	80	1,488	95	112	112	1,497	104
81	81	1,494	101	113	113	1,494	101
82	82	1,499	106	114	114	1,495	102
83	83	1,504	111	115	115	1,478	85
84	84	1,499	106	116	116	1,489	96
85	85	1,501	108	117	117	1,485	92
86	86	1,503	110	118	118	1,487	94
87	87	1,502	109	119	119	1,490	97
88	88	1,512	119	120	120	1,493	100
89	89	1,533	140	121	121	1,494	101
90	90	1,532	139	122	122	1,496	103
91	91	1,527	134	123	123	1,494	101
92	92	1,516	123	124	124	1,482	89
93	93	1,529	136	125	125	1,484	91
94	94	1,519	126	126	126	1,478	85
95	95	1,528	135	127	127	1,481	88

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]	[#]	[min]	[ $\mu$ S/cm]	[ $\mu$ S/cm]
128	128	1,484	91	160	160	1,476	83
129	129	1,486	93	161	161	1,474	81
130	130	1,491	98	162	162	1,477	84
131	131	1,485	92	163	163	1,475	82
132	132	1,480	87	164	164	1,472	79
133	133	1,481	88	165	165	1,475	82
134	134	1,486	93	166	166	1,469	76
135	135	1,479	86	167	167	1,472	79
136	136	1,484	91	168	168	1,472	79
137	137	1,477	84	169	169	1,470	77
138	138	1,474	81	170	170	1,470	77
139	139	1,483	90	171	171	1,466	73
140	140	1,487	94	172	172	1,467	74
141	141	1,487	94	173	173	1,462	69
142	142	1,488	95	174	174	1,468	75
143	143	1,484	91	175	175	1,463	70
144	144	1,487	94	176	176	1,452	59
145	145	1,478	85	177	177	1,465	72
146	146	1,478	85	178	178	1,466	73
147	147	1,479	86	179	179	1,467	74
148	148	1,483	90	180	180	1,465	72
149	149	1,478	85	181	181	1,466	73
150	150	1,478	85	182	182	1,463	70
151	151	1,477	84	183	183	1,465	72
152	152	1,477	84	184	184	1,467	74
153	153	1,480	87	185	185	1,466	73
154	154	1,477	84	186	186	1,466	73
155	155	1,482	89	187	187	1,462	69
156	156	1,479	86	188	188	1,463	70
157	157	1,479	86	189	189	1,464	71
158	158	1,480	87	190	190	1,464	71
159	159	1,477	84	191	191	1,458	65

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]	[#]	[min]	[μS/cm]	[μS/cm]
192	192	1,457	64	224	224	1,435	42
193	193	1,455	62	225	225	1,438	45
194	194	1,453	60	226	226	1,438	45
195	195	1,454	61	227	227	1,441	48
196	196	1,455	62	228	228	1,438	45
197	197	1,451	58	229	229	1,438	45
198	198	1,454	61	230	230	1,434	41
199	199	1,452	59	231	231	1,434	41
200	200	1,453	60	232	232	1,433	40
201	201	1,452	59	233	233	1,428	35
202	202	1,452	59	234	234	1,428	35
203	203	1,448	55	235	235	1,433	40
204	204	1,443	50	236	236	1,432	39
205	205	1,444	51	237	237	1,433	40
206	206	1,439	46	238	238	1,433	40
207	207	1,444	51	239	239	1,430	37
208	208	1446	53	240	240	1,430	37
209	209	1,446	53	241	241	1,432	39
210	210	1,447	54	242	242	1,432	39
211	211	1,441	48	243	243	1,432	39
212	212	1,443	50	244	244	1,429	36
213	213	1,441	48	245	245	1,428	35
214	214	1,440	47	246	246	1,424	31
215	215	1,435	42	247	247	1,421	28
216	216	1,440	47	248	248	1,420	27
217	217	1,442	49	249	249	1,423	30
218	218	1,439	46	250	250	1,423	30
219	219	1,441	48	251	251	1,429	36
220	220	1,440	47	252	252	1,424	31
221	221	1,439	46	253	253	1,432	39
222	222	1,439	46	254	254	1,427	34
223	223	1,440	47	255	255	1,422	29

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
256	256	1,420	27	288	288	1,419	26
257	257	1,423	30	289	289	1,415	22
258	258	1,422	29	290	290	1,420	27
259	259	1,420	27	291	291	1,417	24
260	260	1,421	28	292	292	1,415	22
261	261	1,424	31	293	293	1,409	16
262	262	1,425	32	294	294	1,417	24
263	263	1,426	33	295	295	1,412	19
264	264	1,424	31	296	296	1,416	23
265	265	1,420	27	297	297	1,414	21
266	266	1,423	30	298	298	1,413	20
267	267	1,419	26	299	299	1,412	19
268	268	1,424	31	300	300	1,415	22
269	269	1,416	23	301	301	1,416	23
270	270	1,417	24	302	302	1,404	11
271	271	1,422	29	303	303	1,400	7
272	272	1,419	26	304	304	1,398	5
273	273	1,415	22	305	305	1,396	3
274	274	1,420	27	306	306	1,407	14
275	275	1,424	31	307	307	1,401	8
276	276	1,423	30	308	308	1,406	13
277	277	1,423	30	309	309	1,406	13
278	278	1,421	28	310	310	1,408	15
279	279	1,419	26	311	311	1,411	18
280	280	1,414	21	312	312	1,405	12
281	281	1,420	27	313	313	1,401	8
282	282	1,421	28	314	314	1,398	5
283	283	1,416	23	315	315	1,401	8
284	284	1,419	26	316	316	1,399	6
285	285	1,420	27	317	317	1,399	6
286	286	1,414	21	318	318	1,397	4
287	287	1,414	21	319	319	1,395	2

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)	Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[#]	[min]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]	[ $\mu\text{S/cm}$ ]
320	320	1,402	9	352	352	1,399	6
321	321	1,401	8	353	353	1,397	4
322	322	1,405	12	354	354	1,392	-1
323	323	1,400	7	355	355	1,383	-10
324	324	1,404	11	356	356	1,397	4
325	325	1,404	11	357	357	1,396	3
326	326	1,395	2	358	358	1,391	-2
327	327	1,399	6	359	359	1,395	2
328	328	1,396	3	360	360	1,385	-8
329	329	1,389	-4	361	361	1,379	-14
330	330	1,385	-8	362	362	1,400	7
331	331	1,402	9	363	363	1,394	1
332	332	1,399	6	364	364	1,387	-6
333	333	1,398	5	365	365	1,397	4
334	334	1,403	10	366	366	1,397	4
335	335	1,405	12	367	367	1,397	4
336	336	1,402	9	368	368	1,396	3
337	337	1,391	-2	369	369	1,393	0
338	338	1,395	2	370	370	1,394	1
339	339	1,396	3	371	371	1,397	4
340	340	1,388	-5	372	372	1,397	4
341	341	1,382	-11	373	373	1,397	4
342	342	1,395	2	374	374	1,396	3
343	343	1,396	3	375	375	1,396	3
344	344	1,397	4	376	376	1,402	9
345	345	1,401	8	377	377	1,401	8
346	346	1,392	-1	378	378	1,402	9
347	347	1,400	7	379	379	1,406	13
348	348	1,400	7	380	380	1,401	8
349	349	1,403	10	381	381	1,394	1
350	350	1,403	10	382	382	1,401	8
351	351	1,399	6	383	383	1,394	1

Número de muestra	Tiempo	CE	(CE-CEo)
[#]	[min]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
384	384	1,394	1
385	385	1,394	1
386	386	1,394	1
387	387	1,395	2
388	388	1,392	-1
389	389	1,392	-1
390	390	1,396	3
391	391	1,391	-2
392	392	1,400	7
393	393	1,385	-8
394	394	1,396	3
395	395	1,397	4
396	396	1,395	2
397	397	1,393	0
398	398	1,396	3
399	399	1,382	-11
400	400	1,393	0
401	401	1,393	0

## Anexo 5

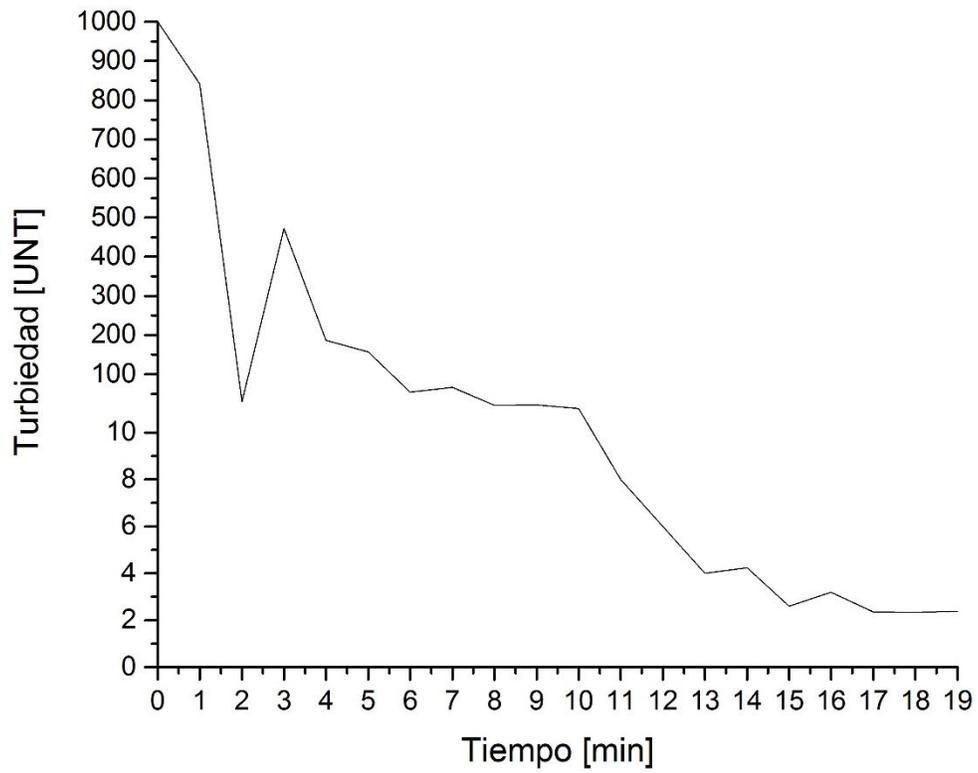


Figura 99. Tiempo de lavado de filtro No. 1.

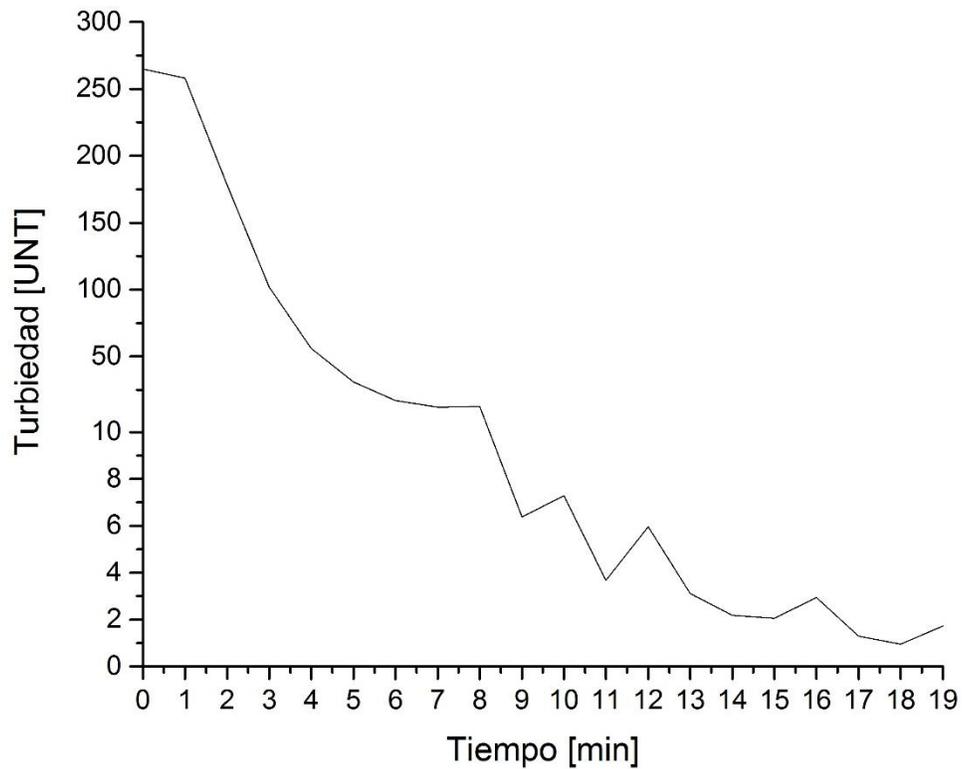


Figura 100. Tiempo de lavado de filtro No. 2.

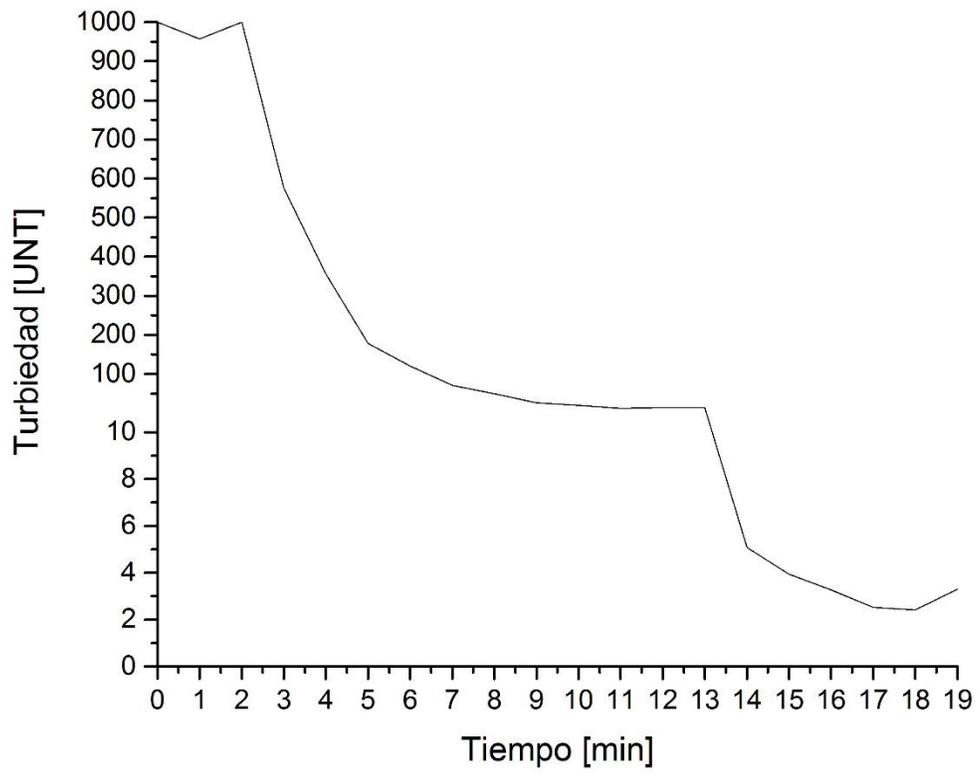


Figura 101. Tiempo de lavado de filtro No. 3.

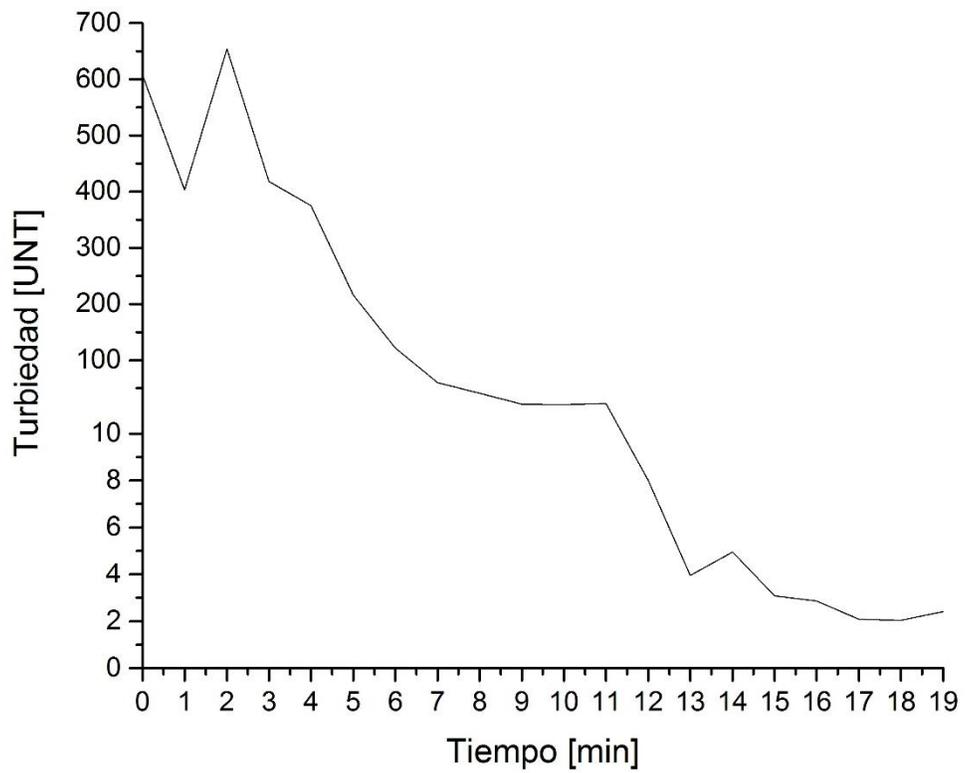


Figura 102. Tiempo de lavado de filtro No. 4.

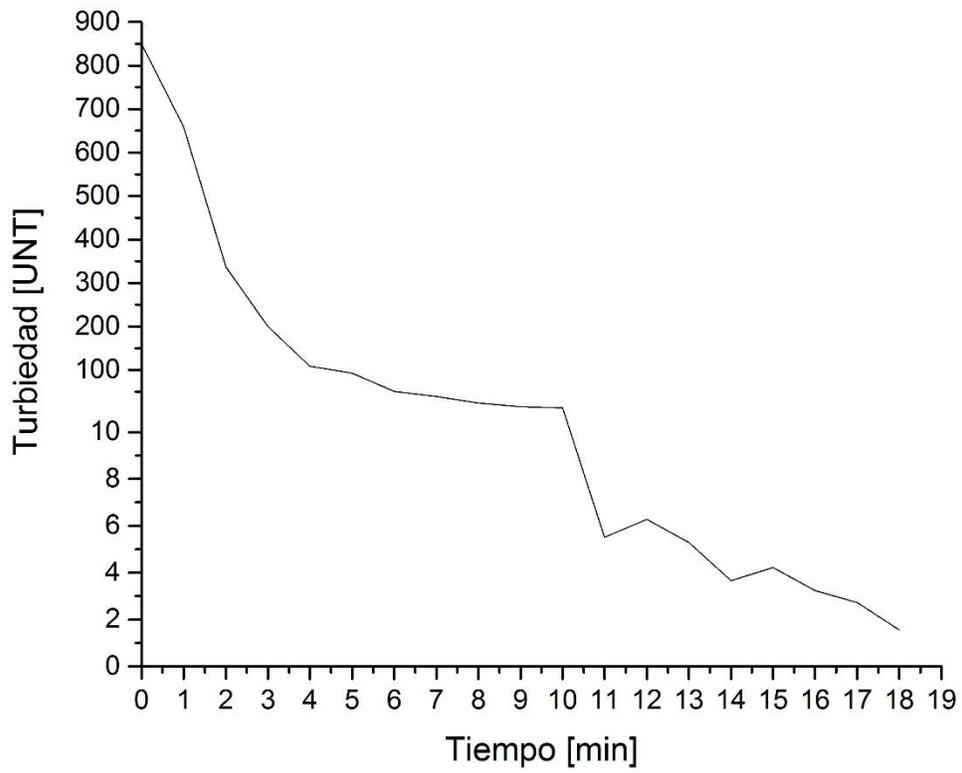


Figura 103. Tiempo de lavado de filtro No. 5.

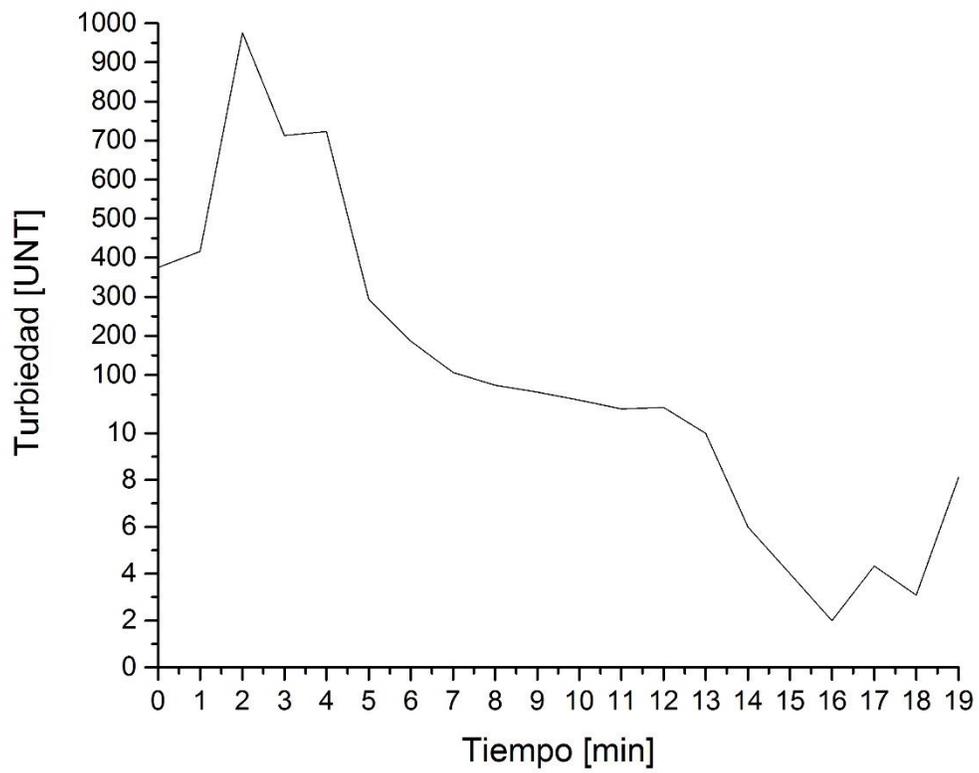


Figura 104. Tiempo de lavado de filtro No. 6.

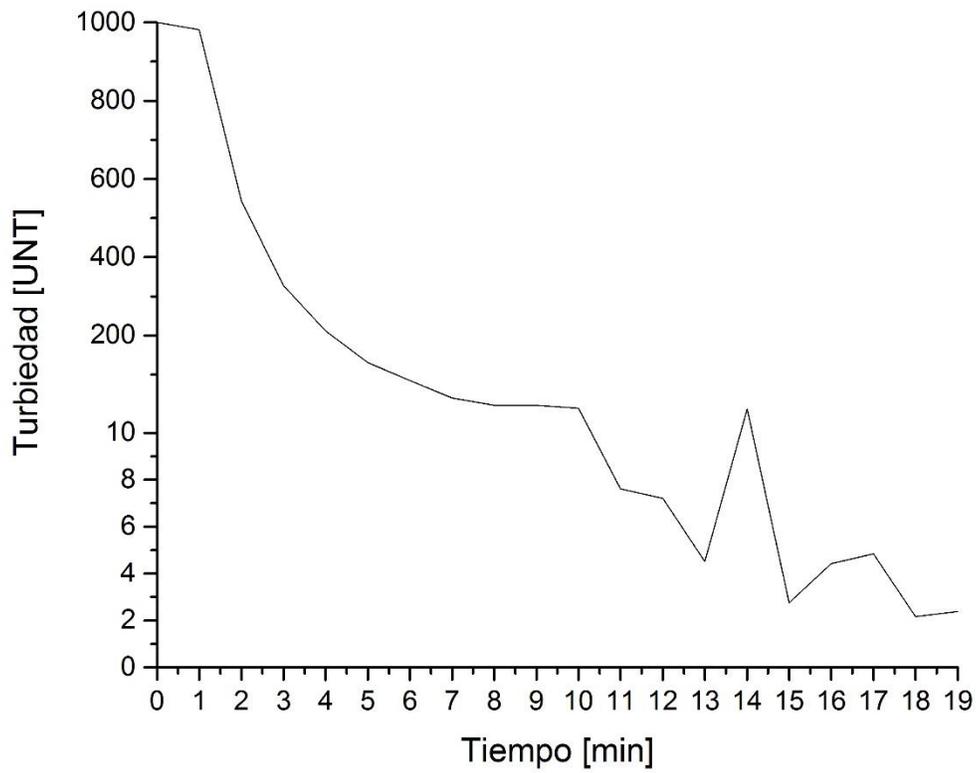


Figura 105. Tiempo de lavado de filtro No. 7.

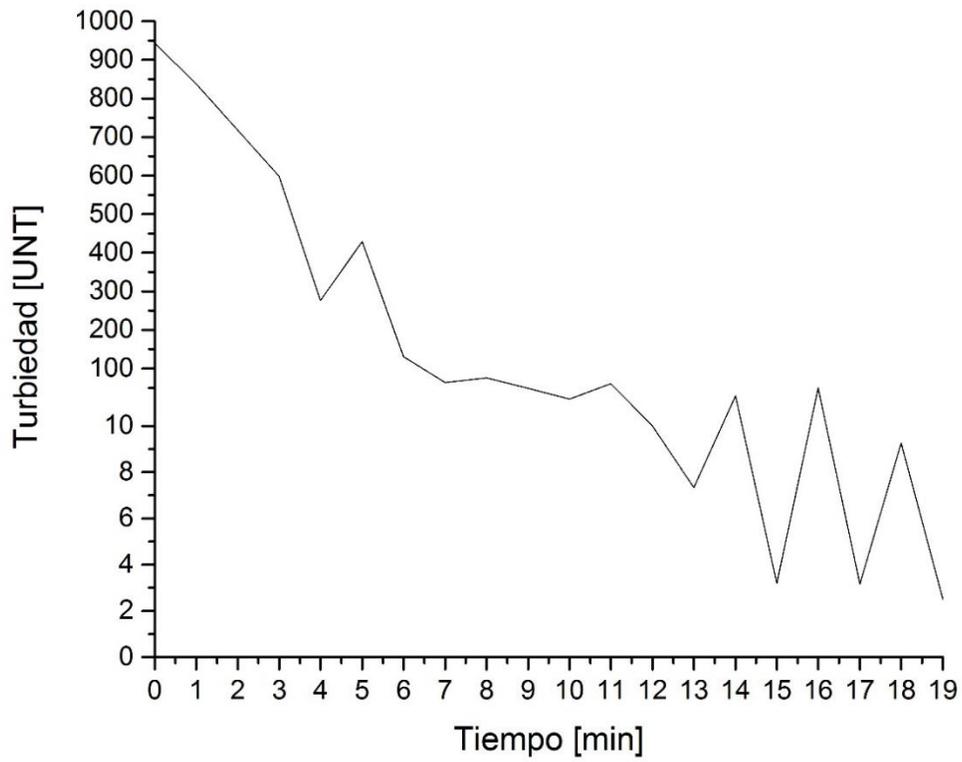


Figura 106. Tiempo de lavado de filtro No. 8.

## Anexo 6

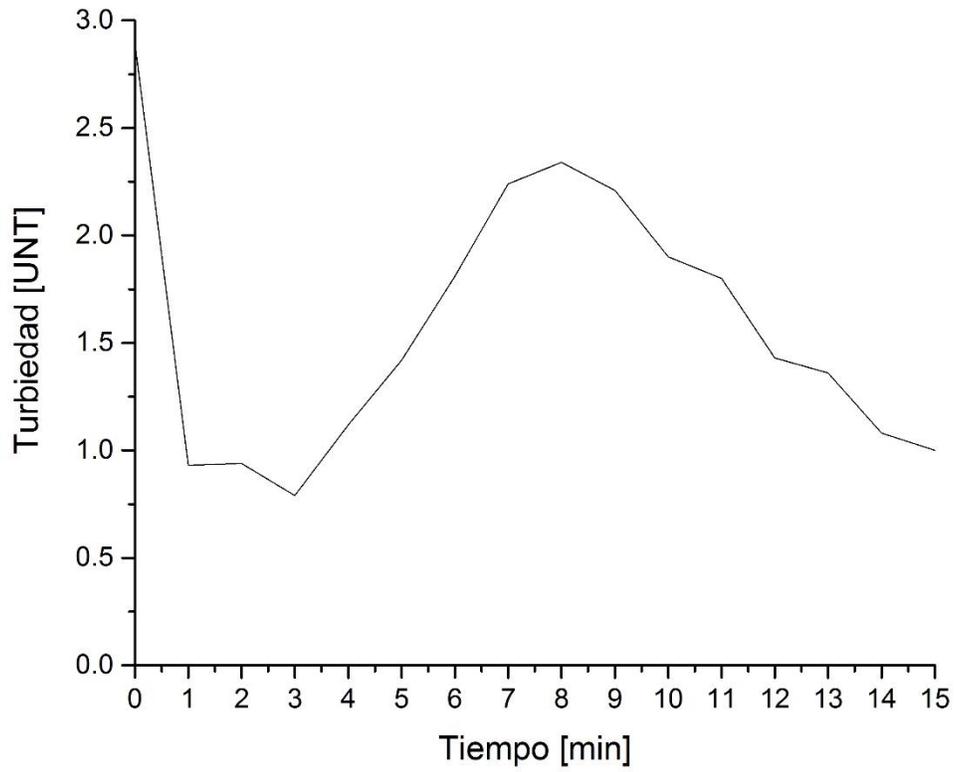


Figura 107. Filtrado inicial de filtro No. 1.

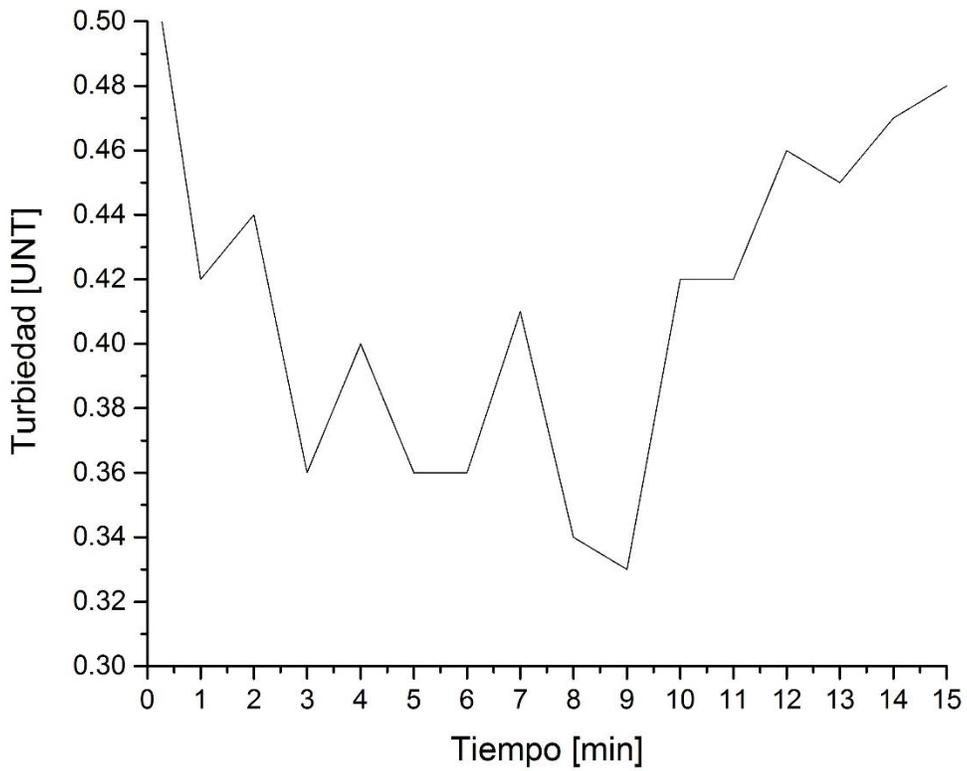


Figura 108. Filtrado inicial de filtro No. 2.

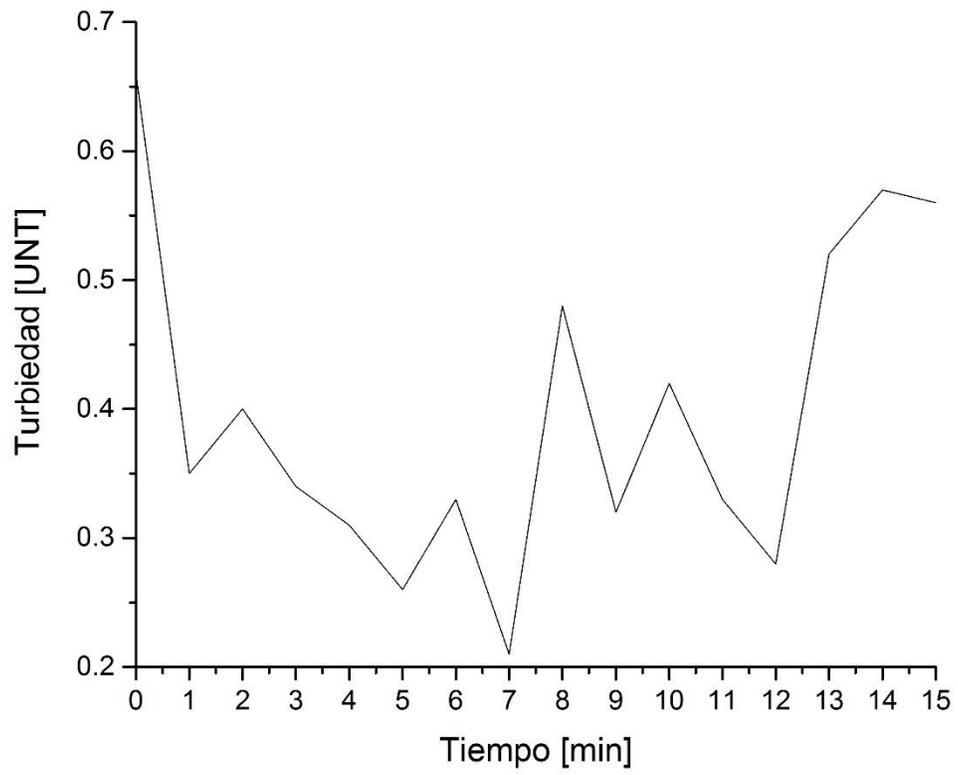


Figura 109. Filtrado inicial de filtro No. 3.

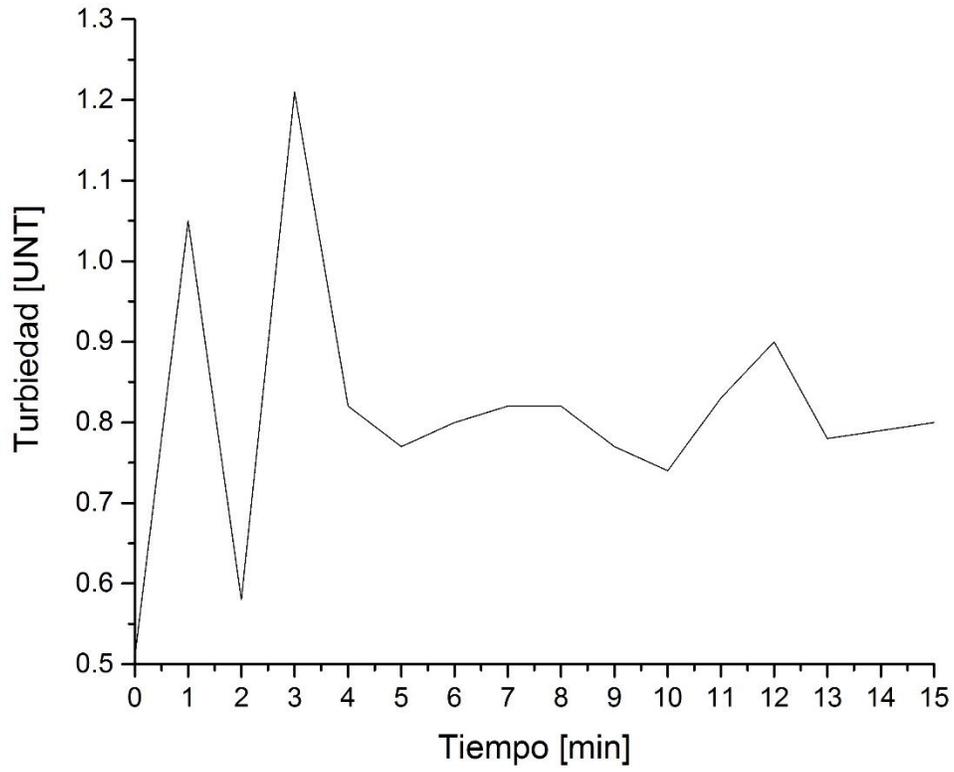


Figura 110. Filtrado inicial de filtro No. 4.

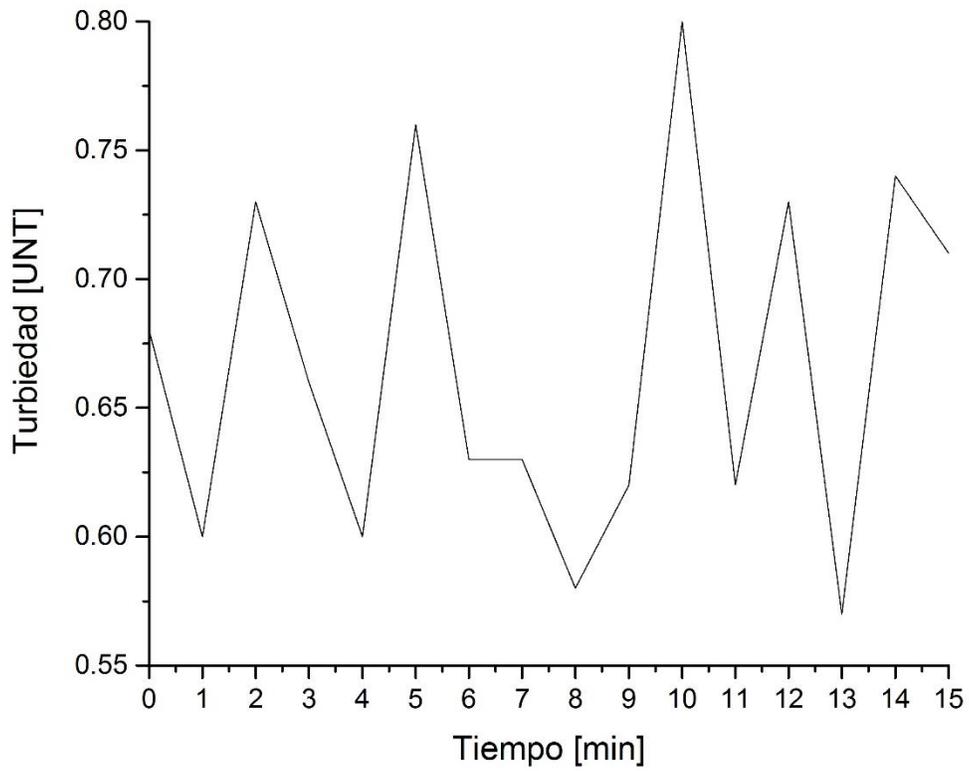


Figura 111. Filtrado inicial de filtro No. 5.

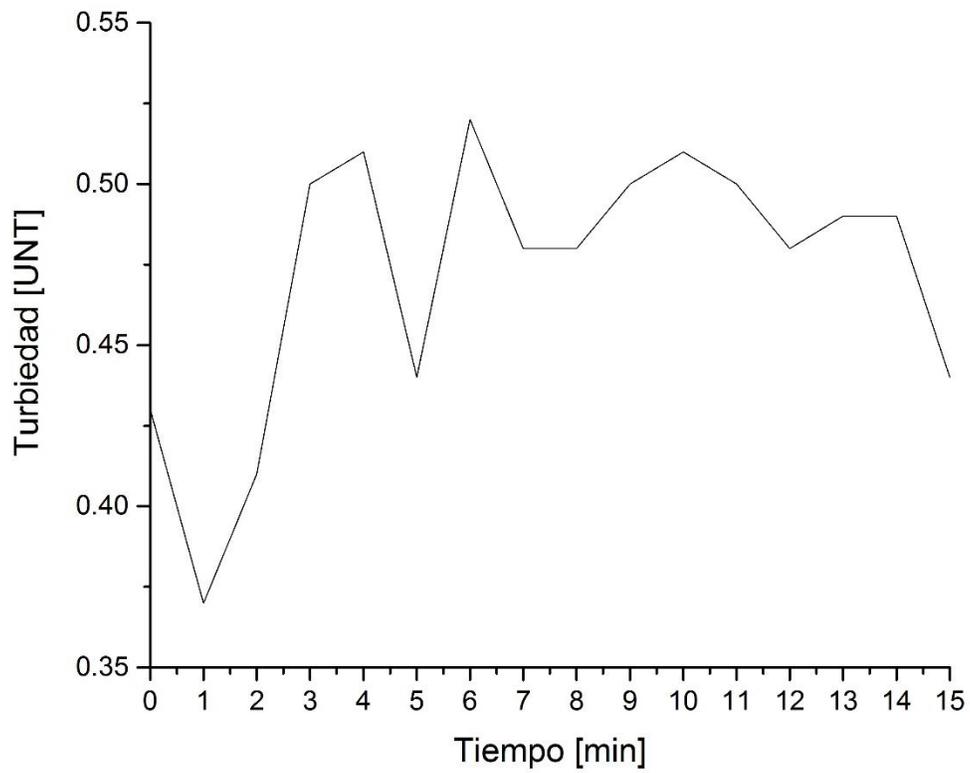


Figura 112. Filtrado inicial de filtro No. 6.

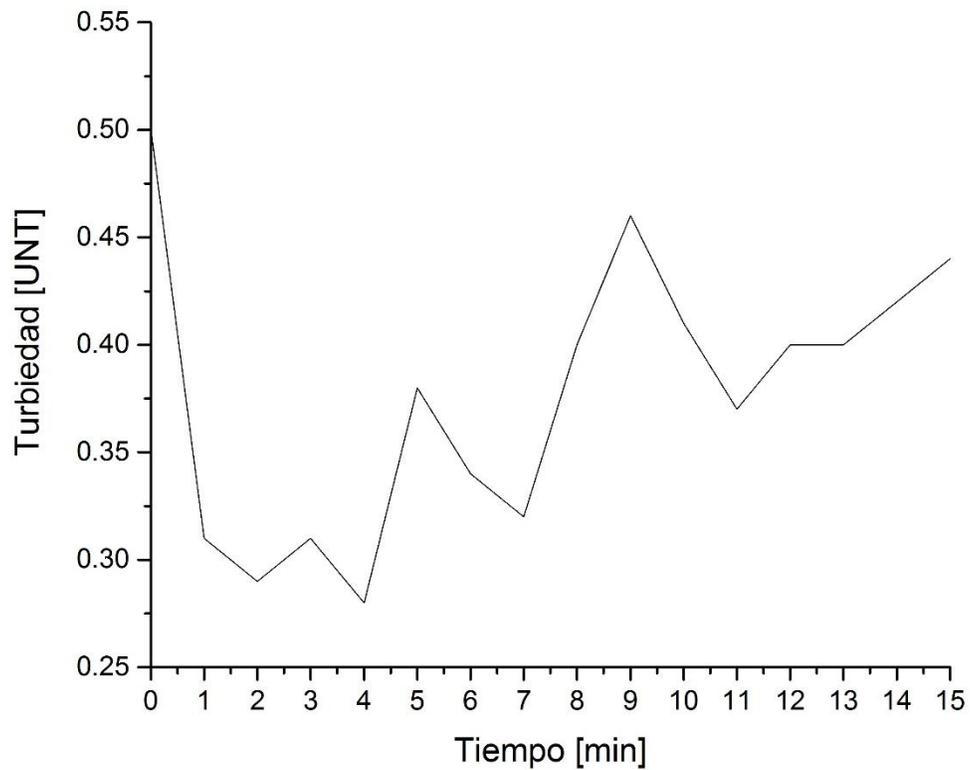


Figura 113. Filtrado inicial de filtro No. 7.

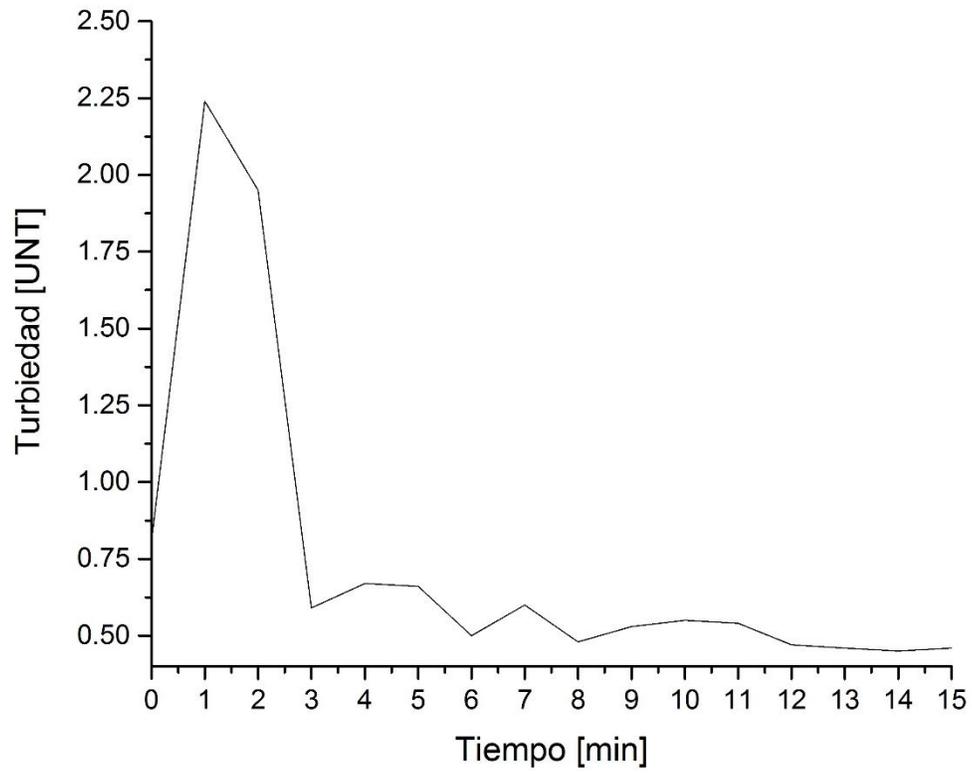


Figura 114. Filtrado inicial de filtro No. 8.

## Anexo 7

Tabla 36. Análisis granulométrico de antracita en filtro 1.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	418.9	419.58	0.68	0.14	99.86
10	2.00	416.75	420.51	3.76	0.78	99.07
12	1.70	407.4	437.85	30.45	6.34	92.73
14	1.40	397.5	497.70	100.20	20.88	71.85
16	1.18	378.73	483.30	104.57	21.79	50.07
18	1.00	425.15	546.15	121.00	25.21	24.86
20	0.85	417.15	471.30	54.15	11.28	13.57
25	0.71	417.65	439.30	21.65	4.51	9.06
30	0.60	391.9	395.40	3.50	0.73	8.33
40	0.425	314.85	327.75	12.90	2.69	5.65
50	0.30	308.15	329.10	20.95	4.36	1.28
60	0.25	365.45	366.10	0.65	0.14	1.15
80	0.18	365.3	365.85	0.55	0.11	1.03
100	0.15	284.18	285.05	0.87	0.18	0.85
200	0.075	319.35	320.48	1.13	0.24	0.61
Fondo	0	816.1	819.05	2.95	0.61	0.00
				479.96	100	

Tabla 37. Análisis granulométrico de arena en filtro 1.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	418.9	424.4	5.50	1.13	98.87
10	2.00	416.6	423.2	6.60	1.35	97.52
12	1.70	407.28	415.8	8.52	1.75	95.77
14	1.40	397.5	404.5	7.00	1.44	94.33
16	1.18	378.73	382.8	4.07	0.84	93.50
18	1.00	425.1	428.7	3.60	0.74	92.76
20	0.85	417.3	429.7	12.4	2.54	90.21
25	0.71	417.3	486.6	69.3	14.22	75.99
30	0.6	391.9	560.05	168.15	34.51	41.48
40	0.425	314.9	510.6	195.7	40.17	1.31
50	0.30	308.2	310.6	2.40	0.49	0.82
60	0.25	365.45	365.6	0.15	0.03	0.79
80	0.18	365	365.2	0.20	0.04	0.75
100	0.15	284.2	284.5	0.30	0.06	0.69
200	0.075	319.5	319.6	0.10	0.02	0.67
Fondo	0	815.8	819.05	3.25	0.67	0.00
				487.24	100	

Tabla 38. Análisis granulométrico de antracita en filtro 2.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	418.9	420.1	1.20	0.24	99.76
10	2.00	416.75	425.3	8.55	1.71	98.05
12	1.70	407.2	460.1	52.9	10.56	87.49
14	1.40	397.5	566.08	168.58	33.67	53.82
16	1.18	378.73	490.65	111.92	22.35	31.47
18	1.00	425.1	503.2	78.10	15.60	15.88
20	0.85	417.33	445.25	27.92	5.58	10.30
25	0.71	417.65	424.13	6.48	1.29	9.01
30	0.60	392	393.25	1.25	0.25	8.76
40	0.425	314.85	330.45	15.6	3.12	5.64
50	0.30	308.2	333.33	25.13	5.02	0.62
60	0.25	365.45	367.45	2.00	0.40	0.22
80	0.18	365.35	365.4	0.05	0.01	0.21
100	0.15	284.18	284.5	0.32	0.06	0.15
200	0.075	319.65	319.75	0.10	0.02	0.13
Fondo	0	816.1	816.75	0.65	0.13	0.00
				500.75	100	

Tabla 39. Análisis granulométrico de arena en filtro 2.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	418.9	429.3	10.4	2.08	97.92
10	2.00	416.9	422.17	5.27	1.05	96.87
12	1.70	407.25	413	5.75	1.15	95.72
14	1.40	397.3	404	6.70	1.34	94.38
16	1.18	378.73	382.5	3.77	0.75	93.63
18	1.00	425.1	428.5	3.40	0.68	92.95
20	0.85	417.5	431.9	14.4	2.88	90.07
25	0.71	418.05	494.35	76.3	15.25	74.82
30	0.60	392.1	555.4	163.3	32.64	42.18
40	0.425	315.3	522.9	207.6	41.49	0.69
50	0.30	308.35	311.1	2.75	0.55	0.14
60	0.25	365.45	365.75	0.3	0.06	0.08
80	0.18	364.9	365.3	0.4	0.08	0.00
100	0.15	284.27	284.27	0	0.00	0.00
200	0.075	319.65	319.65	0	0.00	0.00
Fondo	0	492.05	492.05	0	0.00	0.00
				500.34	100	

Tabla 40. Análisis granulométrico de antracita en filtro 3.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	418.9	419.3	0.4	0.08	99.92
10	2.00	416.8	419.2	2.4	0.48	99.44
12	1.70	407.2	435.2	28.0	5.59	93.86
14	1.40	397.5	553	155.5	31.02	62.84
16	1.18	378.9	531.6	152.7	30.46	32.38
18	1.00	425.1	531.2	106.1	21.16	11.21
20	0.85	417.4	451.9	34.5	6.88	4.33
25	0.71	417.8	424.65	6.85	1.37	2.96
30	0.60	391.9	393.55	1.65	0.33	2.63
40	0.425	314.8	317.9	3.1	0.62	2.01
50	0.30	308	314.7	6.7	1.34	0.68
60	0.25	365.6	366.9	1.3	0.26	0.42
80	0.18	365.2	365.9	0.7	0.14	0.28
100	0.15	284	284.2	0.2	0.04	0.24
200	0.075	319.2	320	0.8	0.16	0.08
Fondo	0	815.6	816	0.4	0.08	0.00
				501.3	100	

Tabla 41. Análisis granulométrico de arena en filtro 3.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	419.4	0.4	0.08	99.92
10	2.00	416.8	417.8	1.0	0.20	99.72
12	1.70	407.2	409.8	2.6	0.52	99.20
14	1.40	397.5	402.2	4.7	0.94	98.25
16	1.18	378.9	382	3.1	0.62	97.63
18	1.00	425.1	428.2	3.1	0.62	97.01
20	0.85	417.4	433.5	16.1	3.24	93.77
25	0.71	417.7	499.3	81.6	16.40	77.37
30	0.6	391.9	556.9	165	33.16	44.21
40	0.425	315	529.7	214.7	43.15	1.07
50	0.30	308.1	313.2	5.1	1.02	0.04
60	0.25	365.5	365.5	0	0.00	0.04
80	0.18	365.1	365.2	0.1	0.02	0.02
100	0.15	284.1	284.2	0.1	0.02	0.00
200	0.075	319.6	319.6	0	0.00	0.00
Fondo	0	816.5	816.5	0	0.00	0.00
				497.6	100	

Tabla 42. Análisis granulométrico de antracita en filtro 4.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	419.5	0.5	0.11	99.89
10	2.00	416.8	419.9	3.1	0.67	99.22
12	1.70	407.2	429.9	22.7	4.91	94.31
14	1.40	397.5	529.6	132.1	28.56	65.75
16	1.18	378.9	498.5	119.6	25.86	39.89
18	1.00	425.1	520.1	95.0	20.54	19.35
20	0.85	417.4	461.4	44.0	9.51	9.84
25	0.71	417.8	430.2	12.4	2.68	7.16
30	0.60	392.2	394.2	2.0	0.43	6.72
40	0.425	315.1	324.8	9.7	2.10	4.63
50	0.30	308.2	326.1	17.9	3.87	0.76
60	0.25	365.5	366.8	1.3	0.28	0.48
80	0.18	365.2	365.6	0.4	0.09	0.39
100	0.15	284.3	284.3	0	0.00	0.39
200	0.075	319.7	320	0.3	0.06	0.32
Fondo	0	815.5	817	1.5	0.32	0.00
				462.5	100	

Tabla 43. Análisis granulométrico de arena en filtro 4.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	426.7	7.7	1.54	98.46
10	2.00	416.8	417.7	0.9	0.18	98.28
12	1.70	407.2	410.1	2.9	0.58	97.70
14	1.40	397.5	404.9	7.4	1.48	96.22
16	1.18	378.9	384.5	5.6	1.12	95.10
18	1.00	425.1	430.4	5.3	1.06	94.04
20	0.85	417.4	428.4	11.0	2.20	91.83
25	0.71	417.9	487.3	69.4	13.89	77.94
30	0.60	392	561.6	169.6	33.95	44.00
40	0.425	314.9	529.8	214.9	43.01	0.98
50	0.30	308.6	313	4.4	0.88	0.10
60	0.25	365.8	365.8	0	0.00	0.10
80	0.18	365.2	365.2	0	0.00	0.10
100	0.15	284.3	284.4	0.1	0.02	0.08
200	0.075	319.5	319.6	0.1	0.02	0.06
Fondo	0	815.9	816.2	0.3	0.06	0.00
				499.6	100	

Tabla 44. Análisis granulométrico de antracita en filtro 5.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	420.8	1.8	0.36	99.64
10	2.00	416.8	423.8	7.0	1.40	98.24
12	1.70	407.2	458.6	51.4	10.25	87.99
14	1.40	397.5	532.2	134.7	26.86	61.13
16	1.18	378.9	485.2	106.3	21.20	39.93
18	1.00	425.1	526.3	101.2	20.18	19.74
20	0.85	417.4	462.1	44.7	8.92	10.83
25	0.71	418.5	428.4	9.9	1.97	8.86
30	0.60	392	394.1	2.1	0.42	8.44
40	0.425	315.15	336.5	21.35	4.26	4.18
50	0.30	308.1	325.6	17.5	3.49	0.69
60	0.25	365.05	366.4	1.35	0.27	0.42
80	0.18	364.9	365.5	0.6	0.12	0.30
100	0.15	284.2	284.3	0.1	0.02	0.28
200	0.075	319.5	320	0.5	0.10	0.18
Fondo	0	815.6	816.5	0.9	0.18	0.00
				501.4	100	

Tabla 45. Análisis granulométrico de arena en filtro 5.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	420.1	1.1	0.22	99.78
10	2.00	416.8	420.1	3.3	0.66	99.12
12	1.70	407.2	411.9	4.7	0.94	98.17
14	1.40	397.5	402.4	4.9	0.98	97.19
16	1.18	378.9	381.7	2.8	0.56	96.63
18	1.00	425.1	428.7	3.6	0.72	95.90
20	0.85	417.4	432.8	15.4	3.09	92.81
25	0.71	418.1	500.8	82.7	16.61	76.20
30	0.60	392.2	573.1	180.9	36.33	39.87
40	0.425	315.1	512.8	197.7	39.71	0.16
50	0.30	308.3	309.1	0.8	0.16	0.00
60	0.25	365.5	365.5	0	0.00	0.00
80	0.18	365	365	0	0.00	0.00
100	0.15	284.5	284.5	0	0.00	0.00
200	0.075	319.6	319.6	0	0.00	0.00
Fondo	0	816.4	816.4	0	0.00	0.00
				497.9	100	

Tabla 46. Análisis granulométrico de antracita en filtro 6.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	419.9	0.9	0.18	99.82
10	2.00	416.8	422.2	5.4	1.08	98.74
12	1.70	407.2	427.1	19.9	3.97	94.78
14	1.40	397.5	472.8	75.3	15.01	79.77
16	1.18	378.9	500.8	121.9	24.29	55.48
18	1.00	425.1	583.5	158.4	31.57	23.91
20	0.85	417.4	466.8	49.4	9.84	14.07
25	0.71	417.8	425.2	7.4	1.47	12.59
30	0.60	392.1	393.2	1.1	0.22	12.38
40	0.425	314.7	339.1	24.4	4.86	7.51
50	0.30	308.1	340.5	32.4	6.46	1.06
60	0.25	365.5	366.5	1.0	0.20	0.86
80	0.18	365	365.9	0.9	0.18	0.68
100	0.15	284.2	284.5	0.3	0.06	0.62
200	0.075	319.6	320.4	0.8	0.16	0.46
Fondo	0	816.4	818.7	2.3	0.46	0.00
				501.8	100	

Tabla 47. Análisis granulométrico de arena en filtro 6.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	430.5	11.5	2.31	97.69
10	2.00	416.8	422.8	6.0	1.21	96.49
12	1.70	407.2	414.7	7.5	1.51	94.98
14	1.40	397.5	406.8	9.3	1.87	93.11
16	1.18	378.9	384.1	5.2	1.04	92.07
18	1.00	425.1	429.7	4.6	0.92	91.14
20	0.85	417.4	434.1	16.7	3.35	87.79
25	0.71	417.9	497.8	79.9	16.05	71.74
30	0.60	391.8	555.6	163.8	32.90	38.84
40	0.425	315	505.5	190.5	38.26	0.58
50	0.30	308.1	310.3	2.2	0.44	0.14
60	0.25	365.6	365.6	0	0.00	0.14
80	0.18	365.1	365.3	0.2	0.04	0.10
100	0.15	284	284.5	0.5	0.10	0.00
200	0.075	319.8	319.8	0	0.00	0.00
Fondo	0	815.7	815.7	0	0.00	0.00
				497.9	100	

Tabla 48. Análisis granulométrico de antracita en filtro 7.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	419.1	0.1	0.02	99.98
10	2.00	416.8	417.8	1.0	0.20	99.78
12	1.70	407.2	416.4	9.2	1.83	97.95
14	1.40	397.5	469.5	72.0	14.36	83.59
16	1.18	378.9	510	131.1	26.15	57.44
18	1.00	425.1	600.6	175.5	35.00	22.44
20	0.85	417.4	485.2	67.8	13.52	8.92
25	0.71	417.7	441.6	23.9	4.77	4.15
30	0.60	391.9	399.2	7.3	1.46	2.69
40	0.425	315	321.7	6.7	1.34	1.36
50	0.30	308.1	311.7	3.6	0.72	0.64
60	0.25	365.6	366.8	1.2	0.24	0.40
80	0.18	365.1	366.5	1.4	0.28	0.12
100	0.15	284.4	284.6	0.2	0.04	0.08
200	0.075	319.4	319.8	0.4	0.08	0.00
Fondo	0	816	816	0	0.00	0.00
				501.4	100	

Tabla 49. Análisis granulométrico de arena en filtro 7.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	432.8	13.8	2.77	97.23
10	2.00	416.8	423.1	6.3	1.27	95.96
12	1.70	407.2	414.9	7.7	1.55	94.42
14	1.40	397.5	404.7	7.2	1.45	92.97
16	1.18	378.9	383.1	4.2	0.84	92.13
18	1.00	425.1	429	3.9	0.78	91.34
20	0.85	417.4	430.1	12.7	2.55	88.79
25	0.71	417.7	491.5	73.8	14.82	73.97
30	0.60	391.8	552.8	161	32.34	41.63
40	0.425	314.9	518.6	203.7	40.91	0.72
50	0.30	308.2	311.8	3.6	0.72	0.00
60	0.25	365.5	365.5	0	0.00	0.00
80	0.18	365.2	365.2	0	0.00	0.00
100	0.15	284.5	284.5	0	0.00	0.00
200	0.075	319.5	319.5	0	0.00	0.00
Fondo	0	816.2	816.2	0	0.00	0.00
				497.9	100	

Tabla 50. Análisis granulométrico de antracita en filtro 8.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	419.8	0.8	0.16	99.84
10	2.00	416.8	420.9	4.1	0.82	99.02
12	1.70	407.2	442.2	35	7.02	92.00
14	1.40	397.5	553	155.5	31.17	60.83
16	1.18	378.9	513	134.1	26.88	33.95
18	1.00	425.1	539.5	114.4	22.93	11.02
20	0.85	417.4	449.6	32.2	6.45	4.57
25	0.71	418.3	426	7.7	1.54	3.03
30	0.60	392.1	393.8	1.7	0.34	2.69
40	0.425	314.9	319.2	4.3	0.86	1.82
50	0.30	308.1	315.1	7.0	1.40	0.42
60	0.25	365.5	366.7	1.2	0.24	0.18
80	0.18	365.1	365.6	0.5	0.10	0.08
100	0.15	284.1	284.2	0.1	0.02	0.06
200	0.075	319.6	319.9	0.3	0.06	0.00
Fondo	0	816	816	0	0.00	0.00
				498.9	100	

Tabla 51. Análisis granulométrico de arena en filtro 8.

ANTRACITA						
Tara	Abertura	Peso de malla	Peso de malla con material	Retenido	Retenido	%Pasa
[#]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
8	2.36	419	425	6.0	1.21	98.79
10	2.00	416.8	420.7	3.9	0.79	98.00
12	1.70	407.2	413.2	6.0	1.21	96.79
14	1.40	397.5	405.3	7.8	1.57	95.22
16	1.18	378.9	383.6	4.7	0.95	94.27
18	1.00	425.1	429.1	4.0	0.81	93.47
20	0.85	417.4	432.8	15.4	3.10	90.36
25	0.71	417.9	494.7	76.8	15.48	74.88
30	0.60	392.1	565.8	173.7	35.02	39.86
40	0.425	314.9	508.5	193.6	39.03	0.83
50	0.30	308.4	312.5	4.1	0.83	0.00
60	0.25	365.5	365.5	0	0.00	0.00
80	0.18	365.1	365.1	0	0.00	0.00
100	0.15	284.3	284.3	0	0.00	0.00
200	0.075	319.6	319.6	0	0.00	0.00
Fondo	0	815.5	815.5	0	0.00	0.00
				496	100	

