

01187



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA (INGENIERÍA AMBIENTAL)**

**OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO PRIMARIO
AVANZADO VÍA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE
PARTÍCULA**

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN INGENIERÍA**

**P R E S E N T A
ALMA C. CHÁVEZ MEJÍA**

**DIRECTORA DE TESIS
DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS**

UNAM
POSGRADO
DGEF

MÉXICO D.F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora:

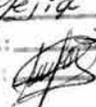
Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros, por todo el apoyo brindado, por sus consejos recibidos en mi desarrollo profesional y por el tiempo dedicado a la realización de este trabajo de tesis. Gracias por siempre.

A los miembros de mi jurado doctoral, Dra. Rosario Iturbe, Dr. Germán Buitrón, Dra. Georgina Fernández, Dra. Petia Mijaylova, Dr. Jesús Gracia y Dr. Modesto Cruz, por sus invaluable aportaciones, críticas constructivas y recomendaciones para enriquecer la tesis.

A mis colegas y amigos Dr. G. Lars, G. Tchobanoglous y T. Asano por sus valiosos consejos y recomendaciones hechas para la realización de la misma.

A todos mis compañeros y amigos del Grupo de Tratamiento y Reúso, Tony, Elias, Juan Carlos, Aarón, Antonio, Juan Pablo, Ana Cecilia, Vanessa, Fernanda, Paulina, Andrés, Gaby y Margarita López por haber contribuido de alguna manera con este trabajo. En especial a Cati, Rosa y Adriana, por su amistad incondicional.

A la UNAM, y en especial, al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Alma C. Chávez Mejía
FECHA: 26/10/2004
FIRMA: 

DEDICATORIA

Para mi hijo Luis Fernando (mi chiquito nene), por enseñarme el verdadero concepto de compartir y cambiar mi vida para siempre.

De la misma manera, una dedicatoria especial, para mi marido Bernd, por estar en los momentos más difíciles y felices de mi vida. Te amo.

A mis padres, por darme la mejor herencia: la educación y sobre todo por su amor y comprensión.

A mis hermanas, hermanos, sobrinos, sobrinas, cuñadas y cuñados por compartir momentos de felicidad y estar conmigo en las buenas y en las malas.

		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
	RESUMEN/ABSTRACT	4
2	ANTECEDENTES	8
2.1	Análisis de la situación del reúso agrícola	8
2.1.1	<i>El reúso en riego agrícola en México</i>	10
2.1.2	<i>Problemática asociada la riego con agua residual</i>	10
2.1.2.1	<i>Los helmintos</i>	11
2.1.3	<i>Normatividad</i>	13
2.1.3.1	<i>Reglamentación en México</i>	14
2.2	Alternativas de tratamiento para remover huevos de helmintos, coliformes fecales y otros microorganismos	18
2.2.1	<i>Fundamentos del proceso fisicoquímico</i>	20
2.2.1.1	<i>Tratamiento primario avanzado</i>	21
2.2.2	<i>Experiencias mundiales y nacionales con procesos de tratamiento fisicoquímico</i>	22
2.2.2.1	<i>Experiencias en Países Nórdicos</i>	23
2.2.2.2	<i>Experiencias en los Estados Unidos de Norteamérica</i>	23
2.2.2.3	<i>Experiencias en Francia.</i>	23
2.2.2.4	<i>Experiencias en Hong Kong</i>	24
2.2.2.5	<i>Experiencias en Brasil</i>	24
2.2.2.6	<i>Experiencias en México</i>	24
2.2.3	<i>Costos de tratamiento de agua residual con un proceso primario avanzado</i>	26
2.2.3.1	<i>Costos de tratamiento para las plantas de la Cd. de México</i>	28
2.2.4	<i>Contenido de huevos de helmintos y su relación con los SST</i>	29
3	OBJETIVO y METAS	31
3.1	Justificación	31
3.2	Premisas	32
3.3	Hipótesis	32
3.4	Objetivo	32
3.5	Metas	33
3.6	Alcances	33
4	REVISION BIBLIOGRÁFICA	34
4.1	Las partículas en el agua residual	34
4.1.1	<i>Tamaño de partícula en el agua residual cruda y tratada</i>	34
4.1.2	<i>Tamaño de la materia orgánica en aguas residuales</i>	35
4.1.3	<i>Tamaño de partículas y nutrientes</i>	36
4.1.4	<i>Tamaño de partícula de metales pesados</i>	37

ÍNDICE		Pagina
4.1.5	<i>Tamaño de partícula y microorganismos</i>	38
4.1.6	<i>Importancia de tamaño de partícula en el desempeño de los procesos fisicoquímicos</i>	39
4.2	Técnicas analíticas para determinar el tamaño de partícula y su distribución	39
4.2.1	<i>Técnicas de separación</i>	40
4.2.1.1	<i>Mallas</i>	40
4.2.1.2	<i>Filtración con membranas</i>	41
4.2.1.3	<i>Fraccionamiento en campo de flujo</i>	41
4.2.1.4	<i>Sedimentación</i>	42
4.2.2	<i>Técnicas de medición</i>	46
4.2.2.1	<i>Microscopio óptico</i>	46
4.2.2.2	<i>Sensores de zona eléctrica</i>	47
4.2.2.3	<i>Contadores de partículas basados en la dispersión de luz</i>	47
4.2.2.4	<i>Contadores de partículas con luz láser</i>	48
4.2.3	<i>Tamaño de las partículas de acuerdo con el tipo de proceso de tratamiento empleado</i>	50
4.2.3.1	<i>Tamaño de las partículas del agua tratada mediante un proceso fisicoquímico</i>	51
5	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	53
5.1	Sitios de muestreo del agua residual	53
5.2	Toma y conservación de muestras para la evaluación de calidad del agua residual cruda y agua residual tratada	54
5.2.1	<i>Mediciones en campo</i>	54
5.2.2	<i>Conservación de la muestra</i>	54
5.3	Método y técnicas de análisis	57
5.4	Simulación del Proceso fisico-químico en la prueba de jarras	59
5.4.1	<i>Conversión de rpm a gradiente s⁻¹</i>	59
5.4.2	<i>Realización de las pruebas de jarras</i>	60
5.5	Planeación de la metodología experimental	61
5.5.1	<i>Evolución de la distribución del tamaño de la partícula con el tiempo con y sin preservador</i>	63
5.5.2	<i>Estudio del efecto del tipo y dosis de coagulante aplicado en la remoción de partículas</i>	64
5.5.2.1	<i>Método de análisis de datos</i>	64
5.5.3	<i>Estudio de la remoción de partículas con base en el gradiente y tiempo de contacto aplicados durante la coagulación</i>	65
5.5.3.1	<i>Método de análisis de datos</i>	65
5.5.4	<i>Optimización de la floculación con base en el volumen de partículas</i>	66
5.5.4.1	<i>Método de análisis de datos</i>	66
5.5.5	<i>Remoción de compuestos en partículas mayores y menores a 20 µm</i>	67
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
6.1	Evolución de la distribución del tamaño de la partícula con el tiempo con y sin preservador	68
6.1.1	<i>Efecto de la aplicación del formaldehído en el agua residual cruda y tratada</i>	68

ÍNDICE

	Página
	de la Cd. De Oulú, Finlandia
6.1.1.1	Agua residual cruda 68
6.1.1.2	Agua residual tratada con un proceso físico químico 70
6.1.2	Efecto de la aplicación del formaldehído en el agua residual cruda y tratada de la Cd. México 72
6.1.2.1	Variación en el volumen de partículas 72
6.1.2.2	Variación en la distribución del tamaño de partícula 73
6.1.3	Efecto del formaldehído en el contenido de coniformes fecales 74
6.2	Evaluación de la distribución del tamaño de partícula 76
6.2.1	Etapa 1. Resultados con la técnica de corriente eléctrica 76
6.2.2	Partículas en el agua residual cruda 77
6.2.2.1	Distribución del tamaño de partícula en volumen 77
6.2.2.2	Distribución del tamaño de partícula en número 78
6.2.2.3	Clasificación de las partículas contenidas en el agua residual por su volumen 79
6.2.2.4	Clasificación de las partículas contenidas en el agua residual por su número 80
6.2.2.5	Aplicación de las distribuciones encontradas al objeto de la tesis 80
6.2.3	Cambio en la distribución del volumen y número de partícula con base en el tipo y dosis de coagulante aplicado 88
6.2.3.1	Comparación de los coagulantes para remover partículas de diferentes tamaños con base en el volumen total que ocupa 88
6.2.3.2	Análisis estadístico de la selección de las condiciones de operación con base en el volumen total de partículas 90
6.2.3.3	Comparación de la selección de coagulantes con base en los SST y la distribución de partículas 91
6.2.3.3.1	Relación entre partículas y SST 92
6.2.3.4	Efecto del coagulante sobre la remoción de partículas por intervalo de tamaño 93
6.2.3.4.1	Sulfato de aluminio (basicidad nula) 93
6.2.3.4.2	Pax xl 13 (basicidad media) 95
6.2.3.5	Comparación de la distribución del volumen de partículas para sulfato de aluminio y Pax xl 13 95
6.2.3.6	Remoción en volumen de partículas entre 20 y 80 μm y la aplicación del estudio en la remoción de huevos de helmintos 97
6.2.3.7	Relación entre volumen de partículas y los huevos de helmintos 98
6.2.3.8	Evaluación de coagulantes a través del número total de partículas 99
6.2.3.8.1	Comparación de la distribución del tamaño de partículas en número con diversas dosis de Pax xl 19 y sulfato de aluminio 99
6.2.3.9	Remoción del número de partículas entre 0.7 y 1.5 μm (coniformes fecales) 101
6.2.3.9.1	Relación entre el numero de partículas (0.7 - 1.5 μm) y los coniformes fecales 102
6.2.3.10	Remociones del número de partículas entre 1.5 y 4 μm (salmonella spp) 103

ÍNDICE

	Página	
6.2.3.10.1	<i>Relación entre el número de partículas (1.5-4 μm) y la salmonella spp</i>	103
6.2.4	Estudio de la remoción de partículas con base en el gradiente y tiempo de contacto aplicados durante la coagulación	105
6.2.4.1	<i>Comparación de los gradientes con base en el tamaño de partículas medidas en volumen</i>	105
6.2.4.1.1	<i>Remoción total de partículas en función del gradiente</i>	105
6.2.4.1.2	<i>Análisis estadístico de la elección del mejor gradiente con base en el volumen total de partículas</i>	107
6.2.4.2	<i>Selección del gradiente con base en los SST</i>	107
6.2.4.3	<i>Efecto del coagulante sobre la remoción de partículas por intervalo de tamaño</i>	108
6.2.4.4	<i>Distribución de partículas en el volumen</i>	111
6.2.4.5	<i>Remociones del volumen de partículas para 20 y 80 μm y huevos de helmintos</i>	113
6.2.4.6	<i>Comparación del gasto energético</i>	114
6.2.4.7	<i>Evaluación de los gradientes con base en el número total de partículas</i>	115
6.2.4.8	<i>Relación entre el número de partículas y el contenido bacteriológico</i>	115
6.2.5	Optimización de la floculación con base en el volumen de partículas	117
6.2.5.1	<i>Comparación del efecto del gradiente con base en el volumen total de partículas y los SST</i>	117
6.2.5.2	<i>Remoción de partículas con tamaños entre 20 y 40 μm medidas en volumen</i>	119
6.2.5.3	<i>Remoción del volumen de partículas menores a 20 μm</i>	123
6.2.5.4	<i>Comparación de la distribución de partículas con las condiciones de estudio utilizadas en la floculación</i>	123
6.2.5.5	<i>Comparación de la distribución de partículas con las mejores condiciones encontradas en las tres etapas de estudio</i>	124
6.2.5.6	<i>Costo energético</i>	125
6.2.5.7	<i>Comparación de los gradientes con base en el tamaño de partículas medidas en número y su relación con el contenido bacteriológico</i>	125
6.2.6	Remoción de compuestos en partículas mayores y menores de 20 μm	127
6.2.6.1	<i>Distribución de los microorganismos</i>	127
6.2.6.2	<i>Distribución de P-PO₄ y N-NH₃</i>	128
6.2.6.3	<i>Distribución de la DQO, SST y Turbiedad</i>	128
6.2.6.4	<i>Comparación de costos para cada una de las técnicas de evaluación del sistema de tratamiento</i>	129
6.2.7	Etapa 2. Resultados con la técnica de luz láser	132
6.2.7.1	<i>Distribución del tamaño de partícula en el agua residual cruda</i>	132
6.2.7.2	<i>Calidad físico química y microbiológica</i>	133
6.2.7.3	<i>Distribución del tamaño de la partícula del efluente físico químico sometido a diversas condiciones de operación</i>	134
6.2.7.3.1	<i>Evaluación del efecto del tipo y dosis de coagulante aplicados</i>	134
	<i>Sulfato de aluminio</i>	134
	<i>Policloruro de aluminio (Pax xl 19)</i>	135
6.2.7.3.2	<i>Cambio en la distribución del tamaño con base en el</i>	139

ÍNDICE

	Página
	<i>gradiente y el tiempo de contacto utilizado en la cámara de coagulación</i>
	<i>Gradiente 160 s⁻¹</i> 139
	<i>Gradiente 330 s⁻¹</i> 139
	<i>Gradiente 460 s⁻¹</i> 141
6.2.7.3.3	<i>Cambio en la Distribución del tamaño de la partícula de acuerdo al gradiente y el tiempo aplicado en la floculación</i> 142
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 144
7.1	Recomendaciones 146
7.2	Desarrollos futuros 146
8	REFERENCIAS 148
ANEXOS	
A1	Resultados de la aplicación de Coagulantes A 1-1
A2	Resultado del análisis estadístico A 2-1
A3	Resultados de la Distribución del Tamaño de partícula, Sensor de corriente eléctrica A 3-1
A4	Costo por Técnica Analítica A 4-1
A5	Resultados de la Distribución del Tamaño de partícula, técnica dispersión de luz láser A5-1
A6	Técnicas de medición y separación de partículas en agua residual A6-1

LISTA DE FIGURAS

	Página	
2.1	Géneros comúnmente encontrados en el agua residual del Valle de México.	12
2.2	Configuraciones básicas del tratamiento fisicoquímico.	22
2.3	Relación entre la concentración de SST y el contenido de huevos de helmintos en las aguas residuales del Valle de México.	30
4.1	Tamaño de los diversos contaminantes y microorganismos de interés en el tratamiento del agua.	35
4.2	Sistema de mallas	40
4.3	Sistema de filtración	41
4.4	Fraccionamiento por flujo de campo	42
4.5	Pipeta andreasen	43
4.6	Centrífuga	44
4.7	Formas de separación de las partículas mediante diversas técnicas	45
4.8	Microscopio óptico	46
4.9	Contador de partículas con sensor eléctrico	47
4.10	Contador láser	48
4.11	Velocidad y costo de análisis de acuerdo con las técnicas	50
5.1	Lugar de toma de la muestra del agua residual; Emisor Central Profundo (El Salto, Tepeji del Río, Hgo.)	53
5.2	Homogenización del agua residual	54
5.3	Envases utilizados en el muestreo para determinar los parámetros de a)tamaño de partícula, b) fisicoquímicos y c)microbiológicos	55
5.4	Sistema para preservar la muestra	56
5.5	Envases de muestreo para análisis de huevos de helminto	56
5.6	Contador de partículas, Coulter Multisizer III	58
5.7	Curva de calibración de la velocidad del gradiente	60
5.8	Equipo de prueba de jarras	61
5.9	Esquematización de la metodología experimental	62
6.1	Distribución del volumen de partículas del agua residual cruda con y sin preservador	70
6.2	Distribución del volumen de las partículas del agua residual cruda y tratada con respecto al y preservada con formaldehído	71
6.3	Cambio de la distribución del tamaño de partículas en (a) ARC y (b) ART con respecto al tiempo	73
6.4	Contenido de coliformes fecales en agua residual cruda con respecto al tiempo	74
6.5	Contenido de coliformes fecales en agua residual tratada con respecto al tiempo	75
6.6	Cambio en la distribución del volumen de partículas del ARCM	77
6.7	Cambio en la distribución del número de partículas del ARCM	79
6.8	Relación entre el volumen de partículas y los SST del agua residual de la Cd. De México	81
6.9	Relación entre el número de partículas y los SST del agua residual de la Cd. De México	82

LISTA DE FIGURAS

	Página	
6.10	Relación entre el contenido de huevos de helmintos y el volumen de partículas del agua residual	83
6.11	Relación entre el número de huevos de helmintos y el volumen de partículas del agua residual	83
6.12	Correlación entre el número (a) y volumen (b) de partículas y el contenido de coliformes fecales del agua residual de la ciudad de México	85
6.13	Correlación entre el número (a) y volumen (b) de partículas y el contenido bacteriológico del agua residual de la ciudad de México	86
6.14	Contenido de partículas en volumen de acuerdo a la dosis y tipo de coagulante	89
6.15	SST remanentemente de acuerdo al tipo y dosis del coagulante empleado	92
6.16	Relación entre el contenido de SST y el volumen de partículas del AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes	93
6.17	Volumen de partículas por tamaño de interés al aplicar diversas dosis de sulfato de aluminio (basicidad cero)	94
6.18	Contenido del volumen de partículas por intervalos de tamaño al aplicar diversas dosis de Pax xl 13 (basicidad media)	95
6.19	Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con a) sulfato de aluminio (basicidad nula) y b) Pax xl 13	96
6.20	Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con 20 y 80 $\mu\text{mol Al/L}$ de diversos coagulantes	97
6.21	Relación entre el contenido de huevos de helmintos y volumen de partículas de los efluentes tratados con diversos tipos y dosis de coagulantes	98
6.22	Distribución por intervalo de tamaño al aplicar diversas dosis de a) sulfato de aluminio y b) Pax xl 19	100
6.23	Distribución por intervalo de tamaño al aplicar 300 $\mu\text{mol Al/L}$ de diversos coagulantes	101
6.24	Relación entre el contenido de coniformes fecales y el número de partículas de AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes	102
6.25	Relación entre el contenido de microbiológico y el número de partículas del AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes	104
6.26	Contenido del volumen de partículas en diversos efluentes	106
6.27	Contenido de SST de los efluentes obtenidos con diversas condiciones de gradiente	108
6.28	Contenido de partículas por intervalos de tamaño al utilizar 160 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	109
6.29	Contenido de partículas por intervalo de tamaño al utilizar 300 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	110
6.30	Contenido de partículas por intervalo de tamaño al utilizar 460 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	111
6.31	Distribución del volumen de partículas en los efluentes tratados con 160, 300 y 460 s^{-1}	112

LISTA DE FIGURAS

	Página	
6.32	Relación entre el contenido de huevos de helmintos y volumen de partículas del ART con diversos gradientes y tiempos de contacto durante la coagulación	114
6.33	Volumen de partículas remanentes de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizados en la cámara de floculación	118
6.34	Volumen de partículas remanentes y SST de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizados en la cámara de floculación	119
6.35	Contenido de partículas de 20 a 80 μm de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto	120
6.36	Relación entre el volumen de partículas de 20 a 80 μm y los huevos de helmintos de todas las etapas experimentales	121
6.37	Histograma de frecuencia para a) volumen de partículas (20-80 μm) y b) el contenido de huevos de helmintos	122
6.38	Contenido de partículas < a 20 μm de acuerdo la gradiente y tiempo de contacto	123
6.39	Distribución acumulada de las partículas en el ARC y en el efluente tratado con diversas condiciones de operación durante la floculación	124
6.40	Distribución acumulada de las partículas en el efluente tratado con diversas condiciones de operación	124
6.41	Distribución del tamaño de las partículas en el agua residual cruda con la técnica de luz láser	133
6.42	Distribución del volumen de partículas remanentes cuando se aplica sulfato de aluminio	135
6.43	Distribución de los SST de acuerdo al tamaño de partícula al aplicar diversas dosis de sulfato de aluminio	136
6.44	Distribución del volumen de partículas remanentes cuando se aplica Pax xl 19	137
6.45	Distribución de los SST de acuerdo al tamaño de partícula al aplicar diversas dosis Pax xl 19	137
6.46	Distribución del los SST de acuerdo al tamaño de partícula y las mejores dosis de cada coagulante	138
6.47	Remoción del volumen de partículas empleando 160 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	139
6.48	Remoción del volumen de partículas empleando 330 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	139
6.50	Remoción del volumen de partículas empleando 460 s^{-1} y diversos tiempos de contacto	141
6.51	Distribución de los SST con los gradientes y tiempos de contacto de la cámara de floculación	143

LISTA DE TABLAS

	Página	
2.1	Ejemplos de reúso con agua residual cruda y tratada en la agricultura.	9
2.3	Incremento de la productividad por el empleo de aguas negras para riego en el Valle del Mezquital.	10
2.2	Distrito de riego en México que utilizan agua residual.	8
2.4	Dosis infectada y tiempo de sobrevivencia de diversos microorganismos.	11
2.5	Frecuencia de enfermedades hídricas en el Valle del Mezquital y una zona que emplea agua limpia.	12
2.6	Contenido microbiológico en las aguas residuales de México y otros países.	13
2.7	Comparación de algunas normas de calidad para agua en riego agrícola.	16
2.8	Remoción de huevos de helmintos en algunos sistemas de tratamiento.	18
2.9	Remoción esperada de microorganismos para varios sistemas de tratamiento de agua residual municipal.	19
2.10	Ventajas del proceso primario avanzado (TPA)	20
2.11	Eficiencia de remoción de contaminantes del sistema de tratamiento de Puebla.	26
2.12	Costos de construcción y área requerida por los procesos de tratamiento de aguas residuales.	26
2.13	Comparación de costos de tratamiento y eficiencia de remoción por diversos procesos.	28
2.14	Costos comparativos para una planta de 1 m ³ /s.	28
4.1	Clasificación de las partículas con base en el tamaño.	35
4.2	Contenido de materia orgánica del agua residual con base en su tamaño.	36
4.3	Datos de distribución de fósforo asociado con la fracción filtrable.	36
4.4	Contenido de fósforo en agua residual y tratada para cuatro plantas de Alemania.	37
4.5	Contenido de nitrógeno en el afluente de acuerdo con el tamaño de partícula.	37
4.6	Límites de medición de las técnicas que se emplean para determinar el tamaño de la partícula	49
4.7	Distribución de los contaminantes en el agua residual y agua residual tratada por diversos procesos	51
4.8	Contenido de partículas entre 2-5 µm determinada en diversas etapas de tratamiento	52
5.1	Métodos y técnicas para la determinación de parámetros de evaluación	57
5.2	Condiciones de trabajo empleadas en las pruebas de jarras	63
5.3	Condiciones de trabajo utilizadas en las pruebas de jarras	67
6.1	Contenido de partículas en el agua residual cruda sin y con preservador y de acuerdo al tiempo transcurrido después de aplicar el formaldehído	69

LISTA DE TABLAS

	Página	
6.2	Contenido de partículas en el agua residual tratada con 200 $\mu\text{molAl/L}$ con y sin preservador y de acuerdo al tiempo transcurrido después de aplicar el formaldehído	70
6.3	Contenido de partículas en el agua residual cruda de la Cd. De México con y sin preservador en función del tiempo	72
6.4	Contenido de partículas en el agua residual tratada de la Cd. De México con y sin preservador en función del tiempo	72
6.5	Contenido en volumen de partículas para tres periodos de comprendió estudio	78
6.6	Contenido en número de partículas para los 4 periodos de estudio	80
6.7	Reducción del volumen total de partículas con base en el tipo y dosis de coagulante	89
6.8	Análisis de variancia, con base en el volumen de partículas	90
6.9	Análisis de intervalos múltiples de basicidad, volumen y dosis con el 95% de significancia	90
6.10	Contenido de partículas de 20 a 80 μm en efluentes tratados con diversas dosis de coagulantes	97
6.11	Remoción del número total de partículas con base en el tipo y dosis de coagulante aplicado	99
6.12	Porcentaje de remoción de partículas de 0.7 a 1.5 μm	101
6.13	Remoción de partículas de 1.5 a 4 μm	103
6.14	Remoción de partículas en volumen con base en el gradiente y tiempo aplicados en la coagulación	106
6.15	Análisis de variancia con base en el volumen de partículas	107
6.16	Análisis de intervalos múltiples del volumen, 95% de significancia	107
6.17	Contenido de partículas de 20 a 80 μm y huevos de helmintos en efluentes tratados con diversos tiempos y gradientes en la mezcla rápida	113
6.18	Gasto energético requerido en la cámara de coagulación de acuerdo al gradiente y tiempo aplicado	115
6.19	Contenido de partículas con los diversos gradientes y tiempos aplicados en la cámara de coagulación	115
6.20	Contenido de partículas de 0.7 y 1.5 μm y coniformes fecales	116
6.21	Contenido de partículas entre 1.5 y 4 μm y <i>Salmonella spp</i>	116
6.22	Contenido de huevos de helmintos en efluentes tratados con diversos tiempos y gradientes en la mezcla lenta	120
6.23	Gasto energético requerido en la cámara de floculación de acuerdo al gradiente y tiempo aplicado	125
6.24	Contenido de partículas totales y por intervalo de tamaño (0.7-1.5 y 1.5-4 μm) y contenido bacteriológico	126
6.25	Contenido microbiológico del agua residual y tratada y su asociación con las partículas mayores y menores a 20 μm	127
6.26	Calidad fisico químico y microbiológica del agua residual cruda y tratada y su asociación con las partículas mayores y menores a 20 μm	129
6.27	Comparación de costos para cada una de las técnicas empleadas en la determinación de la calidad del agua residual	131

LISTA DE TABLAS

		Página
6.28	Calidad fisico química y microbiológica del agua residual cruda	133
6.29	Calidad fisico química y microbiológica con las mejores dosis de cada coagulante	139
6.30	Contenido de partículas mayores y menores a 20 μm de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizado durante la floculación	142

INDICE DE ABREVIATURAS

ARC	Agua residual cruda
ART	Agua residual tratada
AWWA	American Water Works Association
BGS	British Geological Survey
CNA	Comisión Nacional del Agua
CEPT	Tratamiento Primario Mejorado Químicamente
CF	Coniformes fecales
COT	Carbono Orgánico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DTP	Distribución de tamaño de partícula
Efl	Efluente
FR	Filtros rociadores
G&A	Grasas y Aceites
h	Horas
Hgo	Hidalgo
HH/L	Huevos de helmintos en un litro de agua residual cruda o tratada
Inf	Influente
L/s	Litros por segundo
LA	Lodos activados
m³/s	Metros cúbicos por segundo
mg/L	Miligramos en un litro
min	Minutos
mL/m³	Mililitros de partículas por cada metro cúbico de agua residual (cruda o tratada)
N.A.	No aplica
N.D.	No detectado
NMP/100 mL	Número más probable en 100 mL de agua residual cruda o tratada
No/m³	Número de partículas por cada metro cúbico de agua residual (cruda o tratada)
NTK	Nitrógeno total Kjendalk
OMS	Organización Mundial de la Salud
PD	Promedio diario
PM	Promedio mensual
PT	Fósforo total
s	Segundos
SD	Sin dato
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SP	Sedimentación primaria
SS	Sedimentación secundaria
SSA	Secretaría de Salubridad y Asistencia
SST	Sólidos suspendidos Totales
T/ha	Toneladas por hectárea
TP	Tamaño de la partícula
TPA	Tratamiento Primario Avanzado
TRH	Tiempo de retención hidráulica
UFP/100 mL	Unidades formadoras de Placas en 100 mL de agua residual cruda o tratada
USEPA	United State Environmental Protection Agency
v/v	Volumen/volumen
%	Porcentaje
µm	Micras o micrómetro

1. INTRODUCCIÓN

Los parámetros de diseño, el desempeño de operación y de evaluación de la calidad del agua residual producida por los procesos de tratamiento de aguas residuales se establecen en términos de **parámetros no específicos** como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST). Estos representan sólo un valor cualitativo y proporcionan información global acerca del material presente o de sus efectos sin importar tamaño y naturaleza específica, ya que los contaminantes contenidos tanto en el agua residual como en los efluentes tratados son mezclas heterogéneas de materiales en un intervalo amplio de tamaño y pesos moleculares, con diversas propiedades que influyen en su comportamiento y repercuten directamente sobre la eficiencia de remoción de cualquier proceso de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, estos parámetros carecen de validez estequiométrica o de utilidad para hacer análisis cuantitativos.

En México (Diario Oficial de la Federación, 1996, SEMARNAT y CNA, 2004) entre los parámetros que se utilizan para conocer la calidad del agua residual (cruda y tratada) destinada al reúso agrícola (restringido y no restringido) están los Sólidos Suspendidos Totales, huevos de helmintos y coliformes fecales. En laboratorios certificados, tales parámetros tienen un costo unitario de \$125, \$700 y \$230 respectivamente y, requieren 3 horas, 5 y 1 día, en cada caso, para conocer el resultado del análisis; además en el caso de la determinación de los huevos de helmintos, es necesario contar con personal altamente capacitado para la detección de las especies involucradas, por lo que el tiempo en el que se obtienen resultados del análisis impide el ajuste adecuado para corregir la operación de cualquier proceso.

La determinación de Sólidos Suspendidos Totales y microorganismos pierde de vista que ambos son partículas que difieren en tamaño. En efecto, los SST están constituidos por partículas de tamaño $> 1.2 \mu\text{m}$ (Levine, 1985 Y 1991), los coliformes fecales, indicadores tradicionales de contaminación microbiológica, tienen un tamaño entre 0.7 y $1.5 \mu\text{m}$ (Jawetz *et al.*, 1995), la *Salmonella* spp. (microorganismo de interés por su grado de patogenicidad) mide entre 1.5 y $4 \mu\text{m}$ (Jawetz *et al.*, 1995) y los huevos de helmintos entre 20 y $80 \mu\text{m}$ (Ayres, 1989).

Dadas sus dimensiones y características, es posible suponer que el contenido de microorganismos (libres o asociados a los sólidos suspendidos) pueda ser evaluado a través de la determinación de la distribución del tamaño (en número y volumen) de las partículas, siempre y cuando se cuente con una técnica adecuada que permitan relacionar los parámetros tradicionales y con ello determinar de manera inmediata la variación de la calidad del agua de entrada y de salida del proceso de tratamiento y corregir las fallas presentadas durante la operación.

Entre las técnicas de conteo de partículas utilizadas en aguas residuales destacan la de luz láser y la del sensor de corriente eléctrica, las cuales han sido aplicadas tanto en Europa como en Norte América. Con esta última técnica ha

sido posible determinar la relación entre el número de partículas y el contenido de microorganismos en el agua residual en plantas con procesos de tratamiento biológico (Boller y Blazer, 1998) y en agua potable para relacionarlas con quistes de *Giardia murris* (con tamaño de 3-9 μm ,) y *Cryptosporidium parvum* (2-5 μm) haciéndola una opción interesante en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Sin embargo, en ningún país, se ha aplicado la técnica para relacionar el volumen y número de partículas con el contenido de microorganismos patógenos (huevos de helmintos y *Salmonella* spp) por ser un problema exclusivo de las aguas residuales de México y la mayoría de los países en desarrollo o pobres. En menor medida la técnica ha sido aplicada para determinar la forma en la que cada uno de los factores involucrados afectan el desempeño de un proceso físico químico, tratamiento aplicado para remover los huevos de helmintos y producir un efluente con fines de reúso en la agricultura. Por ello, esta investigación tuvo por objeto utilizar la técnica de distribución y tamaño de partícula (en número y volumen) para determinar, de manera más rápida y precisa que la de los SST, las condiciones óptimas con las cuales debe operar un proceso físico químico y al mismo tiempo, desarrollar ecuaciones para conocer el contenido microbiológico del agua residual (huevos de helmintos, los coliformes fecales, *Salmonella* spp) y los SST con la ventaja de que la determinación se haga en línea a un costo de \$50 por muestra, en un tiempo de respuesta menor a 5 minutos sin requerimiento de personal altamente capacitado para la operación del equipo. Asimismo de establecer los límites de remoción de partículas del proceso físico químico.

El presente trabajo está estructurado en ocho capítulos de los cuales este es el primero. El segundo contiene los antecedentes en él se considera la situación del reúso de agua en la agricultura tanto a nivel nacional como internacional. También se analiza la problemática asociada al riego con agua residual; en especial, cuando ésta presenta una alta concentración de los huevos de helmintos debido a la importancia que representa en el país. Además, se hace un comparativo entre los parámetros determinados en la normatividad nacional contra los internacionales para este reúso, los tipos de procesos de tratamiento de aguas residuales para remover huevos de helmintos haciendo énfasis en los procesos físico químicos, por ser una tecnología apta para remover este tipo de patógeno, y finalmente se presenta la experiencia de su aplicación a nivel mundial.

El tercer capítulo lo comprenden la justificación, premisas, hipótesis, objetivos, metas y alcances planteados durante el desarrollo de la misma. El cuarto capítulo, contiene la revisión bibliográfica acerca de la importancia del tamaño de la partícula en los procesos de tratamiento de agua, se analizan algunas correlaciones de microorganismos con diversos tamaños de partículas en efluentes secundarios y en agua potable. Además, se presentan algunas relaciones entre diversos tamaños de partícula con la materia orgánica, los nutrientes y los metales pesados. En el mismo apartado se describen las técnicas comúnmente empleadas para separar y medir partículas presentes tanto en el agua residual cruda como en la tratada por diversos procesos. El quinto capítulo contiene la metodología desarrollada durante la fase experimental que incluye los

procedimientos para simular el tratamiento físico químico en las 3 etapas en las que se dividió el estudio. El sexto capítulo presenta los resultados y la discusión de los mismos para cada etapa experimental. En la primera etapa, se discute la importancia de la preservación de la muestra como parte de un protocolo de importancia en un estudio de distribución de tamaño de partícula. En la segunda, se presentan los resultados de la distribución de partículas obtenida tanto con la técnica de luz láser y como la del sensor con corriente eléctrica del agua residual cruda y tratada con un proceso físico químico sometido a diversas condiciones de operación (dosis y tipos de coagulantes, tiempos y gradiente en la mezcla rápida y lenta). También se incluyen las relaciones entre las partículas y los microorganismos (huevos de helmintos, Coliformes fecales y *Salmonella* spp) y SST. En la tercera etapa se encuentran los resultados de la distribución de algunos contaminantes de interés relacionados con las partículas mayores y menores de 20 μm y una evaluación de los costos de los parámetros más importantes. En el séptimo capítulo se incluyen las conclusiones obtenidas en cada una de las etapas experimentales, y finalmente, en el octavo se indican las referencias consultadas como base para la realización de la tesis.

Adicionalmente, se presentan seis anexos. El primero contiene una parte complementaria del estudio de coagulantes, mientras que el segundo se detalla el análisis estadístico para cada uno de los parámetros de evaluación para cada una de las etapas de estudio donde se determinó el tamaño de la partícula con la técnica de corriente eléctrica. El tercero muestra los resultados del tamaño y distribución de partículas con la técnica antes mencionada, en el cuarto capítulo el desglose de los costos de cada una de las técnicas comparadas, en el quinto, los resultados de distribución de tamaño de partícula con la técnica de luz láser en las distintas etapas del proceso analizadas y por último en el sexto una descripción detallada de las técnicas de separación y de medición frecuentemente utilizadas para medir partículas en las aguas residuales.

RESUMEN

Los criterios internacionales y la norma nacional establecen límites para el contenido de coliformes fecales, los huevos de helmintos y los Sólidos Suspendidos Totales para el reúso del agua en la agricultura. El tiempo de espera para cada uno de estos parámetros es de un día para los Coliformes fecales, cinco días para los huevos de helmintos y tres horas para los Sólidos Suspendidos Totales, lo que obstaculiza la posibilidad de realizar de manera inmediata cambios o modificaciones en las operaciones unitarias y mejorar de esta manera su desempeño. Su determinación representa un elevado costo que por falta de recursos económicos impide la evaluación en particular de los huevos de helmintos. La utilización del tamaño de partícula y su distribución representan una herramienta útil para pronosticar de manera rápida y directa la calidad microbiológica del agua residual y determinar las condiciones óptimas en las cuales se debe operar un proceso de tratamiento. Por tal motivo, esta tesis evaluó el empleo de esta técnica para determinar, de manera más rápida la calidad microbiológica. Ello se llegó a través de correlaciones entre el número o volumen de partículas y los coliformes fecales, *Salmonella spp* y los huevos de helmintos tanto del agua residual cruda como tratada así como las condiciones óptimas en las cuales se debe operar un proceso de tratamiento físico químico que trata un agua residual con fines de reúso agrícola.

La determinación del tamaño de partícula se realizó con dos técnicas, la primera con el sensor eléctrico y la segunda con dispersión de luz láser. La primera técnica presenta una mayor utilidad práctica al determinar el número y volumen de las partículas de manera cuantitativa. Además, se estableció que de acuerdo con su tamaño, los microorganismos considerados en la normatividad mexicana para evaluar la calidad del agua guardan cierta relación con las partículas. Estas relaciones aplican tanto en el influente como en el efluente. Respecto a los de huevos de helmintos, se determinó que este patógeno se relaciona con el volumen de partículas entre 20 y 80 μm . En el caso del agua residual tratada con un procesos físico químico la ecuación determinada fue:

$\text{HH/L} = 0.041 * \text{volumen de partículas (mL/m}^3, 20\text{-}80 \mu\text{m)}$ con un coeficiente de correlación de 0.91.

La ecuación puede utilizarse para conocer la concentración de huevos de helmintos requerida en el riego sin restricción ($< 1 \text{ HH/L}$) y para el riego restringido ($< 5 \text{ HH/L}$). La aplicación práctica económica de esta relación es el contenido de este patógeno podrá ser obtenido en línea, en cinco minutos y a un costo de 2.6 USD, en lugar de hacerlo en forma puntual, en cinco días y a un costo de 70 USD.

En cuanto al contenido bacteriológico (coliformes fecales y *Salmonella spp.*) este se podrá conocer a través del número partículas entre los intervalos de 0.7 a 1.5 μm y de 1.5 a 4 μm respectivamente, no obstante, la aplicación se limita a 11.6 a 12.8 Ulog/ m^3 de partículas y de 6.5 a 8.3 Ulog/100 mL de bacterias por lo que para otros intervalos se requiere de su calibración.

Se demostró que las condiciones óptimas para el proceso físico químico se pueden obtener a partir de la distribución del tamaño de partícula y no por medio de los SST como tradicionalmente se hace. Se determinó que cuando se desea que el efluente presente un volumen de partículas totales de 50 mL/m³ (el 80% menor a 20 µm) y hallar < 1 HH/L se requiere que la mezcla rápida se realice con un gradiente de 160 s⁻¹ con 60 s y se utilicen 100 µmolAl/L de Pax xl 19. La mezcla lenta, debe operar a 20 s⁻¹ con 15 min y 0.5 mg/L de polímero aniónico y finalmente la sedimentación se debe hacer con 5 minutos. Otras condiciones de operación, favorecerá la remoción de partículas menores a 20 µm, y por ende, la remoción de bacteriológicos, pero se provocarán la resuspensión de partículas mayores a 20 µm, por lo que el contenido de huevos de helmintos tiende a incrementarse en el sistema. Los análisis estadísticos con un grado de significancia del 5% mostraron que los resultados encontrados son confiables. Colateral a este trabajo se encontró que para preservar la muestra para determinar el tamaño de partícula y su distribución se debe usar 0.03% de formaldehído y realizar la determinación en un período no mayor de 6 horas, condiciones que no han sido reportadas en la literatura.

Por último, la coagulación-floculación resultó un proceso viable para tratar agua que se destina al riego agrícola ya que al remover las partículas, en especial las mayores de 20 µm promueve la separación de los huevos de helmintos que son el principal riesgo para la salud sobre todo en países en vía de desarrollo. Además, debido a la distribución de la materia orgánica (DQOt) y los nutrientes (N y P) en las partículas del agua residual, no son totalmente eliminados por este proceso lo que conviene para el reúso del agua en la agricultura ya que aportan los nutrientes y mejora la estructura del suelo; por la misma razón las bacterias (coliformes fecales y *Salmonella* spp) no pueden ser separados del sistema mediante este tratamiento físico químico, por lo que es necesario complementar con un proceso de desinfección.

ABSTRACT

The international approaches and the national norm establish limits for the content of fecal coliforms, helminth ova (Ho) and Total Suspended Solids for the water reuse in agriculture. The time taken for each one of these parameters is of one day for the fecal coliforms, five days for helminth ova and three hours for the Total Suspended Solids, what blocks the possibility to carry out of way immediate changes or modifications in the unitary operations and to improve its performance. Their determination represents a high cost that prevents the evaluation in particular of the helminth ova for lack of economic resources. The use of the particle size (PS) and their distribution (PSD) represent an useful tool to predict in a quick and direct way the microbiological quality of the wastewater and to determine the good conditions in which a treatment process should be operated. For such a reason, this thesis evaluated the use of this technique to determine, in a quicker way the microbiological quality. That was achieved through correlations among the number or volume of particles and the fecal coliforms, *Salmonella* spp. and the helminth ova, both in raw wastewater as in treated wastewater in optimal conditions in which a process of chemical physical treatment should be operated that is used in agriculture.

The determination of the particle size was carried out with two techniques, the first one with the electric sensor and the second one with laser light dispersion. The first technique presents a better practical utility when determining the number and volume of the particles in a quantitative way. Also, it established accordinge with their size, the microorganisms considered in the Mexican normativity to evaluate the quality of the water have certain relationship with the particles. These relationships apply as much in the influent as in the effluent. Regarding those of helminth eggs, it was determined that this pathogen is related with the volume of particles between 20 and 80 μm . In the case of the residual water treated with a physical chemical processes the equation determined was:

$\text{Ho/L} = 0.041 * \text{volume of particles (mL/m}^3, 20\text{-}80 \mu\text{m)}$ with a coefficient of correlation of 0.91.

The equation can be used to know the concentration of helminth ova required in the watering without restriction (<1 HH/L) and for the restricted watering (<5 HH/L). The economic practical application of this relationship is that the content of this pathogen can be obtained on-line, in five minutes at a cost of 2.6 USD, instead of making it in punctual form, in five days and at a cost of 70 USD.

As for the bacteriological content (fecal coliformes and *Salmonella* spp.) this one can be known through the number particles among the intervals from 0.7 to 1.5 μm and of 1.5 to 4 μm . Nevertheless these application is limited, from 11.6 to 12.8 Ulog/ m^3 of particles and of 6.5 to 8.3 Ulog/100 mL of bacterias for it is required a calibration for other rangs.

It was demonstrated that the best conditions for the physical chemical process can be obtained starting from the distribution of the particle size and not by

means of the TSS like traditionally it is made. It was determined that when it is desirable an effluente with a volume of total particles of 50 mL/m^3 (80 % smaller than $20 \mu\text{m}$) and $<1 \text{ Ho/L}$ it is required a fast mixture with a gradient of 160 s^{-1} with 60 s and $100 \mu\text{molAl/L}$ of Pax xl 19. The slow mixture, should operate to 20 s^{-1} with 15 min and 0.5 mg/L of anionic polymer and finally the sedimentation should be made within 5 minutes. Other operation conditions will it will favor the smallest removal of particles to $20 \mu\text{m}$, and so, the removal of bacteriologicals, but it will casue the resuspension of particles bigger than $20 \mu\text{m}$, causing an increase of the content of helminth ova in the system. The statistical analyses with a significance of 5% showed that the results are reliable. Colateral to this work it was found that to preserve the sample to determine the particle size and their distribution should be used 0.03 formaldehyde% and to not carry out the determination in one period bigger than 6 hours, conditions that have not been reported in the literature.

Lastly, the clotting-floculación was a viable process to treat water used in agriculture because it removes particles, especially those bigger than $20 \mu\text{m}$ which promote the separation of the helminth eggs which are the main risk in developing countries health. Also, due to the distribution of the organic matter (DQOt) and the nutrients (N and P) in the particles of the wastewater, are not completely eliminated by this processes that is convenient for the agriculture, it contributes with nutrients and improves the soil sturcture; for the same reason the bacterias (fecal coliformes and *Salmonella* spp.) cannot be separated from the system by means of this physical chemical treatment, it is necessary to suplement these process with a disinfection one.

2. ANTECEDENTES

2.1 Análisis de la situación del reúso agrícola

El reúso de aguas residuales es una práctica antigua aplicada en China y Grecia desde finales del siglo XVIII (Cifuentes *et al.*, 1999 y USEPA, 1992). Así, el “riego con aguas negras” fue una actividad común desde el siglo XIX en Francia, Alemania, India, el Reino Unido, Australia y los Estados Unidos. En México, las experiencias datan de 1896 (OMS, 1989; BGS, 1998 y Strauss, 1991). Actualmente, el reúso de aguas negras sin tratar se practica en diversos países en vías de desarrollo como Chile, India, Perú, Brasil, Argentina, Túnez y México (Tabla 2.1, USEPA, 1992, Shelef, 1991 y Strauss, 1991). Esto ocurre debido a que el agua residual se utiliza como una estrategia efectiva para el desarrollo de la agricultura y el aprovechamiento eficiente del agua; además, es una forma de prevenir la contaminación de ríos y embalses (Gaspard y Schwartzbrod, 1993; Shuval, 1987; Blumenthal *et al.*, 2000; Stott *et al.*, 1996 y USEPA, 1992).

Tabla 2.2. Distritos de Riego en México que utilizan agua residual. Fuente SEMARNAT - CNA, 2004

Distrito de Riego			Volumen usado (m ³ /s)			Área (ha)
			Total	Tratada	No tratada	
Noreste	010	Culiacán, Sin	0.13	0	0.130	800
	014	Rio Colorado, BC	0.011	0	0.11	69
	066	Sto. Domingo, BCS	0.004	0	0.004	22
Norte-Centro	005	Delicias, Chih	0.022	0	0.022	589
	009	Cd. Juárez, Chih	3.72	0	0.56	7,503
	017	R. Lago, Coah-Dur	0.18	0	0.18	1,600
Noreste-Central	029	Xicotencatl, Tam	0.62	0	0.62	2,300
	035	La antigua, Ver	0.39	0	0.39	1,000
	082	Río Blanco, Ver	9.41	0.08	9.33	13,000
Valle de México	003	Tula, Hgo	34.12	0	34.1	57,973
	100	Alfajayucan, Hgo	11.85	0	11.85	24,745
	033	Estado de México	0.60	0	0.60	5,498
	028	Tulancingo, Hgo	0.14	0	0.14	300
	088	Chiconautla, Méx	0.80	0	0.80	3,123
	016	Estado de Morelos	11.7	1.1	9.6	23,000
Balsas-Lerma	013	Estado de Jalisco	4.87	0	4.87	13,077
	020	San Juan del Rio, Qro	0.07	0.07	0	230
	024	C. de Chapala, Mich	0.20	0	0.20	10,469
	030	Valsequillo, Pue	8.23	7.2	1.03	20,600
	045	Tuxpan, Mich	1.74	0.17	1.57	4,300
	056	Atoyac-Zahuapan, Tlax	0.80	0.24	0.56	3,800
	061	Zamora, Mich	0.67	0	0.67	2,000
	068	Tepecuac y Quechul, Gro	0.07	0	0.07	100
	087	Rosario-Mezq, Mich	9.61	0	9.61	33,080
	097	Lázaro Cárdenas, Mich	9.08	0	9.08	21,899
	099	Quitupan Magdalena, Mich	0.18	0	0.18	5,000
Volumen Usado (m³/s)			108	9	99	254,597

Tabla 2.1. Ejemplos de reúso con agua residual cruda y tratada en la agricultura.
Fuente: Adaptada de USEPA, 1992; Shelef, 1991 y Strauss, 1991

País	Tipo de Agua	Uso	Volumen de agua (L/s)	Área irrigada (ha)	Observación
Argentina					
Provincia de Mendoza	Tratamiento primario	Riego no restringido Lechuga, ajo, tomate y alcachofas		2,000	
Ortega	Laguna de estabilización	Riego no restringido		----	Mezcla con agua de río Efluente con alto riesgo a la salud
Brasil					
Sao Paulo (17 millones de habitantes)	Secundario, filtración, desinfección	Riego urbano, reúso y riego agrícola	43,800	---	Programa de recuperación de agua
Chile					
Santiago (Zarjón de la Aguada)	Agua residual cruda	Riego no restringido Lechuga, repollo, apio, cereal, uvas	70-80% del total de AR de la Ciudad	6,000	CF= 10 ⁶ -10 ⁸ NMP/100 ml Alta incidencia de tifoidea
India	Agua residual cruda	Riego de vegetales		73,000	Enfermedades entéricas, anemia y enfermedades gastrointestinales
Israel (4 millones de habitantes)	Efluentes terciarios TP-TS + filtración + desinfección	Riego restringido y no restringido	3,000	15,000	Proyectos para reinyección
Kuwait (2 millones de habitantes)		Riego restringido y no restringido	3,500		Tratamientos Avanzado
México Valle del Mezquital	Sin tratamiento	Todo tipo de cultivos. Maíz, sorgo, cebada, tomates verdes, chiles y cultivos forrajeros	52,600 (90% de agua residual de valle de México)	90,000	10 ⁶ -10 ⁷ NMP/100 mL de CF 6-98 HH/L
Perú (Lima)	Lagunas primarias, Lagunas facultativas, Agua residual cruda	Todo tipo de cultivos		5-6,000	Bacterias entéricas e infecciones virales
Arabia Saudita	Tratamiento terciario	Todo tipo de cultivos	22,000	3,100	Calidad equivalente a la potable (OI, desalminación, filtración y desinfección)
Túnez	Tratamiento secundario	Citricos, cereales, cultivos forrajeros y árboles de olivo	2850	4500	

2.1.1 El reúso en riego agrícola en México

En México, la escasez de agua y el alto contenido de materia orgánica y nutrientes en las aguas residuales, han hecho del reúso en riego agrícola una práctica común desde 1896. Empero, no fue sino hasta 1920 cuando se empezó a visualizar la importancia económica de ello (BGS, 1998; Blumenthal *et al.*, 1996; Cifuentes *et al.*, 1999 y Jiménez *et al.*, 1997, 1998 y 1999). Actualmente, el reúso agrícola representa un volumen de 108 m³/s, de los cuales, sólo el 8.2% recibe tratamiento (total o parcial; CNA, 2000, Tabla 2.2). Destaca el caso del valle del Mezquital, ubicado en el estado de Hidalgo, pues representa el 43% del total de agua residual utilizada para este fin y el 34% del área regada en el país. El empleo de esta agua fue una consecuencia espontánea motivada por las obras de desagüe del Valle de México (Cifuentes, 1999, Jiménez *et al.*, 1998). Su uso ha elevado significativamente la productividad agrícola en las 90,000 ha cultivadas (Tabla 2.3). Dada la importancia que tiene el empleo de aguas negras para la agricultura en el país, los estudios de tratamiento de agua se enfocan hoy en día a controlar los riesgos pero a preservar las ventajas.

Tabla 2.3. Incremento de la productividad por el empleo de aguas negras para riego en el valle del Mezquital. Fuente: Cifuentes, 1999 y Jiménez *et al.*, 1997

Cultivo	Producción T/ha		Incremento (%)
	Agua residual	Agua de Primer Uso	
Maíz	5	2	150
Cebada	4	2	100
Jitomate	35	18	94
Avena para forraje	22	12	83
Alfalfa	120	70	71
Chile	12	7	70
Trigo	3	1.8	67

2.1.2 Problemática Asociada al Riego con Agua Residual

Trabajos de Shuval y Bartone 1986; Shuval *et al.*, 1997, Shuval, 1991 y Fattal *et al.*, 1985 y 1986 resumen información en diversos países sobre el empleo del agua residual cruda y tratada. A partir de estos trabajos ha sido posible reunir evidencias acerca de los riesgos sobre la salud así como de los beneficios por el reúso agrícola. El principal riesgo está asociado con la diseminación de microorganismos patógenos contenidos en el agua residual y que causan infecciones intestinales o enfermedades entéricas. Ello ocurre por tres rutas: **(a)** consumo de vegetales cultivados con aguas contaminadas, **(b)** contacto del agua residual con los agricultores y **(c)** contacto con la población que reside cerca de los campos irrigados (Shuval, 1984, 1986 y 1991; Helmer, 1991; Blumenthal, 1996 y Cifuentes y Blumenthal, 1992 y Cifuentes, 1994). La diseminación de las enfermedades depende de la viabilidad del patógeno en el suelo y en el cultivo, la inmunidad que la población tenga y la dosis mínima infectiva (Tabla 2.4). De

acuerdo con estas características, los huevos de helmintos son los de mayor riesgo debido a que tienen una alta supervivencia en el medio ambiente (algunos meses, WHO, 1989), el ser humano es incapaz de desarrollar resistencia a ellos como ocurre en el caso de las bacterias, y su dosis infectiva es muy baja (1 a 10 organismos/L, USEPA, 1992).

Tabla 2.4. Dosis infectiva y tiempo de sobrevivencia de diversos microorganismos. Fuente Adaptada: USEPA, 1992 y WHO, 1989

Organismo	Dosis Infectiva	Tiempo de sobrevivencia (días)		
		Agua	Cultivos	Suelo
Bacterias				
<i>Clostridium perfringens</i>	1X10 ¹⁰			
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	10 ⁶ -10 ¹⁰	30-60	15-30	20-70
<i>Salmonella typhi</i>	10 ⁴ -10 ⁷	30-60	15-30	20-70
<i>Shigella dysenteriae</i> 1	10	10-30	5-10	20-70
<i>Shigella Flexneri</i> 2 ^a	180	10-30	5-10	20-70
<i>Vibrio Cholerae</i>	10 ³ -10 ⁷	10-30	2-5	10-20
Helmintos				
<i>Ascaris lumbricoides</i>	1-10	Algunos meses	30-60	Algunos meses
Protozoarios				
<i>Entamoeba histolytica</i>	<10	15-30	2-10	10-20
<i>Giardia lamblia</i>	<10	15-30	2-10	10-20
Virus				
Enterovirus	1-10	50-120	15-60	20-100

2.1.2.1 Los helmintos

Los helmintos son parásitos de humanos que provocan una de las enfermedades más comunes de la humanidad, la helmintiasis. Se estima que tan sólo por *Ascaris spp.* en el mundo hay más de 1000 millones de personas infectadas (WHO, 2001). La incidencia es mayor en países con poca educación y bajo ingreso per cápita. En cambio, en países desarrollados como el Reino Unido, Estados Unidos, Alemania, Francia y España su presencia es ocasional (Stott *et al.*, 1996 y WHO, 2001).

Está demostrado que el empleo del agua negra para riego es la causa principal de la transmisión de las enfermedades diarreicas ocasionadas por helmintos (Cifuentes y Blumenthal, 1992). Como puede observarse en la Tabla 2.5, los niños de entre 4 y 16 años sufren 16 veces más de *Ascariasis* en las zonas de riego con aguas negras que donde se emplea agua limpia. Ello no ocurre con otros tipos de microorganismos (protozoarios).

Tabla 2.5. Frecuencia de enfermedades hídricas en el valle del Mezquital y una zona que emplea agua limpia. Fuente: Cifuentes y Blumenthal, 1992

Especie	Población Afectada Por Edades	Tasas De Morbilidad		
		Zona Regada Con Aguas Negras (A)	Zona Regada Con Agua Limpia (B)	Relación (A/B)
<i>Ascaris lumbricoides</i> (Helmintos)	0 A 4	15.3	2.7	5.7
	5 A 14	16.1	1.0	16.0
	> 15	5.3	0.5	11.0
<i>Giardia lamblia</i> (Protozoario)	0 A 4	13.6	13.5	1.0
	5 A 14	9.6	9.2	1.0
	> 15	2.3	2.5	1.0
<i>Entamoeba histolytica</i> (Protozoario)	0 A 4	7.0	7.3	1.0
	5 A 14	16.4	12.0	1.3
	>15	16.0	13.8	1.2

A nivel nacional, la situación es crítica ya que el INEGI y la SSA/DGEI (1998) reportaron que el 33% de la población sufre de helmintiasis y cada día mueren 10 niños por enfermedades gastrointestinales. Desafortunadamente, ello casi siempre ocurre por falta de recursos económicos para recibir la atención médica necesaria, pues la enfermedad es controlable. En el caso de los helmintos, la muerte sobreviene por complicaciones con anemia, presencia de quistes en órganos vitales (hígado, cerebro o pulmones) o por estallamiento del intestino.

La cantidad y diversidad de helmintos encontrada en el agua residual varía en cada comunidad (Stott, 1996). Estudios realizados por Jiménez *et al.*, 1997, 1999 y Chávez y Jiménez, 2000, determinaron que en el agua residual de la Ciudad de México el contenido de huevos de helmintos varía entre 6 y 96 HH/L y que el 90% son *Ascaris spp*, 6% *Hymenolepis nana* y 2% *Toxocara* y *Trichuris sp*, en la misma proporción, como lo muestra la Figura 2.1.

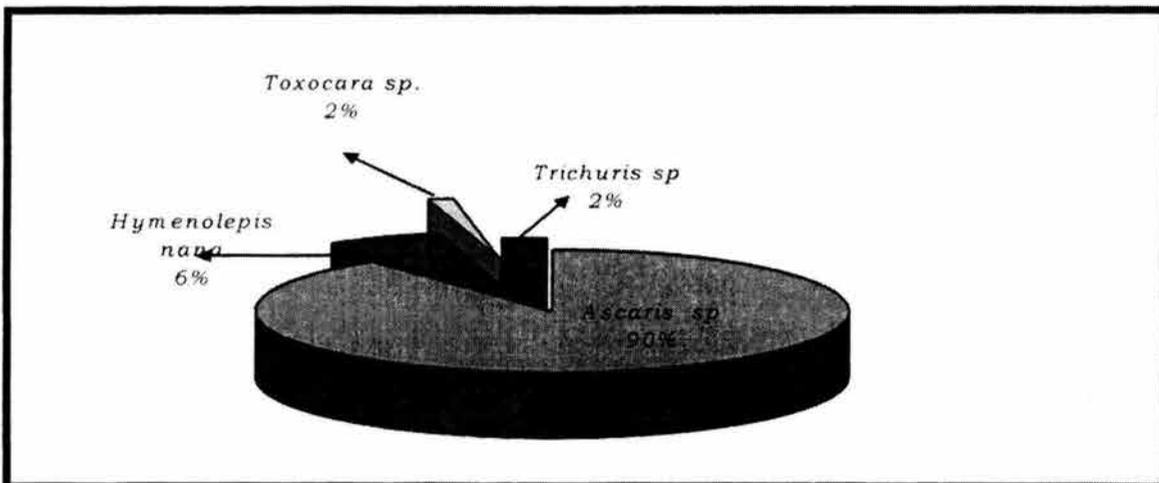


Figura 2.1. Géneros encontrados en el ARC del Valle de México. Fuente: Jiménez *et al.*, 1997 y 1999.

Los mismos autores comparan la concentración de diversos microorganismos presentes en el agua residual cruda con el contenido de otros países y queda por ello establecido, de acuerdo con la Tabla 2.6, que hay una diferencia muy marcada en las concentraciones que presentan los países desarrollados y aquellos que no lo son.

Tabla 2.6. Contenido microbiológico en las aguas residuales de México y otros países

Parámetros	Tamaño μm	δ g/cm^2	Concentración	País	Referencia
Huevos de helmintos, HH/L	20-80	1.1-1.2	34,000	Brasil	Dixo <i>et al.</i> , 1995
			116-202	Brasil	Blumenthal, <i>et al.</i> , 1996
			840	Marruecos	Schwarzbrod, <i>et al.</i> , 1989
			2-375	México	Jiménez <i>et al.</i> , 1997, 1999
			28.3	Ismalia, Abu Attwa	Stott <i>et al.</i> , 1996
			9	Francia	Schwarzbrod, <i>et al.</i> , 1989
			1-8	EUA	USEPA, 1992
			6	Ucrania	Ellis <i>et al.</i> , 1993
Coliformes fecales, NMP/100 mL	0.7-1.5	1.03	10^7 - 10^9	México	Jiménez <i>et al.</i> , 1997, 1999
			10^4 - 10^5	Reino Unido	Stott <i>et al.</i> , 1996
			10^5	Egipto	Stott <i>et al.</i> , 1996
			10^3 - 10^5	EUA	USEPA, 1992 Medena, 1998
Salmonella spp.	0.7-1.5 ancho 2.5-5.0 largo	1.11	10^6 - 10^9	México	Jiménez <i>et al.</i> , 1997, 1999
			10^2 - 10^4	EUA	USEPA, 1992
			10^3	Reino Unido	Stott <i>et al.</i> , 1996
Quistes de protozoarios ¹ , Organismos/L	4-12	1.03	979-1817	México	Jiménez <i>et al.</i> , 1997, 1999
			1500	Reino Unido	Hall T y Croll, 1997
			28	Este de los UEA	USEPA, 1992
			*0.9 (13 máx.) **1.6 (10.8 máx)	Alemania	Karanis <i>et al.</i> , 1998
Virus, UFP/100 mL	15 nm		10^2 - 10^3	EUA	USEPA, 1992
			10^3 - 10^6	Nueva Zelanda	Turner and Lewis, 1995
			10^2	Reino Unido	Stott <i>et al.</i> , 1996
			10^4	Egipto	Stott <i>et al.</i> , 1996

2.1.3 Normatividad

Para aprovechar los beneficios económicos y sociales que representa el reúso de aguas residuales en la agricultura es necesario preservar las ventajas y controlar los riesgos. Sin embargo, esto último es interpretado de diversas formas en diferentes países y situaciones económicas. Por ejemplo, en California desde 1977 (USEPA, 1992, Title 22) se usan los criterios más estrictos en cuanto a

parámetros microbiológicos y químicos con el fin de controlar todos los riesgos por el reúso del agua, es decir, se trata de tener cero riesgos (USEPA, 1992; WHO, 2000; Shuval *et al.*, 1984 y 1987 y Blumenthal, 1996). La mayor crítica a esta postura es que, para cumplir este tipo de normatividad, se eliminan los SST y la DBO del agua aún cuando son útiles para el suelo. Se tiene así un instrumento regulador innecesariamente conservador y muy costoso para proteger la salud pública. Aparte de que por el costo, no resulta viable en países con escasos recursos económicos (Blumenthal *et al.*, 2000).

En contraparte, en 1983 el Banco Mundial realizó un estudio sobre el empleo de agua residual para riego y sus efectos en la salud (Shuval, 1991; Helmer, 1991; Blumenthal *et al.*, 1996 y Cifuentes *et al.*, 1994). El Reporte de Engelberg de Suiza en 1985 concluyó que para los cultivos que se consumen crudos, los efluentes deben contener uno o menos de 1 HH/L y un promedio geométrico de coliformes fecales de 1000 NMP/100 mL. En 1987 diversos grupos científicos de la Organización Mundial de la Salud (WHO) adoptaron estos valores como criterios (WHO, 1989; Gaspard y Schwartzbrod, 1993; Cifuentes, 1999; USEPA, 1992; Bouwer *et al.*, 1998 y Blumenthal *et al.*, 1996).

Estudios más recientes apuntan a reevaluar y cambiar dichos criterios, particularmente en lo que concierne al contenido de huevos de helmintos. Se argumenta que el valor de ≤ 1 HH/L es insuficiente para evitar el riesgo en las condiciones que estos organismos sobreviven. Por ello, se sugiere que el valor sea ≤ 0.1 HH/L para todo tipo de cultivos (Blumenthal *et al.*, 2000), aún cuando no existen técnicas analíticas con la suficiente precisión para medir dicho valor ni estudios que demuestren la diferencia en el riesgo.

2.1.3.1 Reglamentación en México

En México, con objeto de contribuir a resolver los problemas de contaminación existentes y promover el aprovechamiento del agua, en 1993 se inició una profunda reforma del marco legislativo. Como resultado, en 1996 se sustituyeron 44 normas para las descargas de aguas residuales de diversos giros por la NOM-001 ECOL/96, hoy en día NOM-001 SEMARNAT/1996 la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma tiende a proteger los cuerpos receptores en función de sus usos o características independientemente del tipo de descarga. En el desarrollo de la norma se consideró que una parte importante de las aguas negras están concesionadas a los agricultores para su uso y como consecuencia existe una alta incidencia de enfermedades gastrointestinales. Por este motivo se introdujo, para el caso de las descargas al suelo, el control de los huevos de helmintos, fijando un valor menor a 1 HH/L cuando el agua se emplea para todo tipo de riego y, menos de 5 HH/L cuando el uso del agua se restringe a cierto tipo de cultivos que no se consumen o usan de manera directa. El contenido de coliformes fecales se fijó en 1000 número más probable por 100 mL de agua para ambos casos.

La Tabla 2.7 muestra una comparación entre diversas normatividades o criterios de calidad para riego agrícola a nivel internacional y la norma nacional. De acuerdo con lo establecido en la Tabla, se observa que para algunos países los criterios son más laxos que para otros y que no todos consideran los mismos parámetros. Por ejemplo, Arabia Saudita limita la Demanda Bioquímica de Oxígeno, los Sólidos Suspendidos Totales y el contenido de Coliformes Fecales, mientras que para México estos parámetros no son importantes. Los compuestos orgánicos sólo son considerados en Arabia Saudita y Túnez.

II. Antecedentes

Tabla 2.7. Comparación de algunas normas de calidad para agua en riego agrícola. Fuente: Adaptado de NOM-001 SEMARNAT-1996, USEPA, 1992 y Shelef, 1991

Parámetros, en mg/L excepto cuando se indique otra cosa	MÉXICO, NOM-001-SEMARNAT-1996		EUA		Israel	Japón	Kuwait	Arabia Saudita	Túnez
	PM	PD	Largo Plazo	Corto Plazo					
Microbiológico									
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1,000	1,000	2.2/100 mL (PM) 23/100 mL (PD)				100-10000	2.2 / 100 mL	
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	< 1	< 1				ND			< 1
Huevos de helmintos (organismos/L)									
Químicos									
Demanda bioquímica de oxígeno total	N.A.	N.A.	<10-30		15-60		10	10	30
Demanda bioquímica de oxígeno Soluble	N.A.	N.A.							
Demanda química de oxígeno soluble	N.A.	N.A.							
Demanda química de oxígeno total	N.A.	N.A.					40		90
Grasas y aceites	15.0	15.0							Ausente 2000
Cloruro								280	
Cloro residual libre o combinado			1.0			> 0.4	1.0		
Físicos									
Conductividad (mS/cm)									7000
Materia flotante (adimensional)	Ausente()	Ausente()							
Oxígeno disuelto	5 - 10	5 - 10	6.0*		0.5			6-8.4	6.5-8.5
pH (adimensional)									
Sólidos disueltos totales			500-2000*						
Sólidos suspendidos totales	N.A.	N.A.	<10-30		5-50		10	10	30
Temperatura	N.A.	N.A.							
Turbiedad (UTN)								1.0	
Metales									
Aluminio total			5.0	20.0				5.0	
Arsénico total	0.2	0.2	0.10	2.0				0.1	0.1
Berilio			0.10	0.5				0.1	
Cadmio total	0.05	0.05	0.01	0.05				0.01	0.01
Cobre total	4.0	4.0	0.2	5.0				0.4	0.5
Cromo total	0.5	0.5	0.1	1.0				0.1	0.1
Hierro			5.0	20.0				5.0	5.0
Manganeso			0.2	10.0				0.2	0.5
Mercurio total	0.005	0.005	0.01	0.05				0.001	0.001
Molibdeno			0.01	0.05				0.01	
Níquel total	2.0	2.0	0.2	2.0				0.02	0.2
Litio			2.5	2.5				0.07	
Manganeso			0.2	10.0				0.2	0.5
Mercurio total	0.005	0.005						0.001	0.001

II. Antecedentes

Tabla 2.7. Comparación de algunas normas de calidad para agua en riego agrícola. Fuente: Adaptado de NOM-001 SEMARNAT-1996, USEPA, 1992 y Shelef, 1991

Parámetros, en mg/L excepto cuando se indique otra cosa	MÉXICO, NOM-001-SEMARNAT-1996		EUA		Israel	Japón	Kuwait	Arabia Saudita	Túnez
	PM	PD	Largo Plazo	Corto Plazo					
Molibdeno			0.01	0.05				0.01	
Tungsteno & Titanio			--	---					
Plomo total	5.0	5.0	5.0	10.0				0.1	1.0
Vanadio			0.1	1.0					
Zinc total	10.0	10.0	2.0	10.0				4.0	5.0
No Metales									
Boro			0.75	2.0				0.5	3.0
Cobalto			0.05	5.0				0.05	0.1
Selenio			0.02	0.02				0.02	0.05
Inorgánicos									
Cianuros totales	2.0	2.0						0.05	
Fluoruro			1.0	15.0				2.0	3.0
Nitritos								10.0	
Orgánicos									
Hydrocarburos halogenados									
Fenoles								0.002	0.001

• Recomendable, ND= No detectado, NA= No aplica, PD= Promedio diario, PM= Promedio mensual.

2.2. Alternativas de Tratamiento para Remover Huevos de Helmintos, Coliformes Fecales y otros Microorganismos

Hasta ahora, los procesos de tratamiento más estudiados para remover los huevos de helmintos han sido los de tipo biológico y la experiencia ha demostrado que su capacidad es limitada, poco confiable y que para incrementar su eficiencia deben estar acompañados de alguna otra operación unitaria como la filtración (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Remoción de huevos de helmintos en algunos sistemas de tratamiento.

Proceso	Contenido de HH en el afluente	Contenido de HH en el efluente	Eficiencia de remoción, %	Observaciones	Referencias
Filtros rociadores	SD	SD	90-99		Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
	2000	1520-1640	18-26		
	28.3	3.1	89	Ismalia, Abu Attwa	Stott <i>et al.</i> , 1996
FR+SS	2000	260	87		Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
Lagunas anaerobias	184	16.5	91	Brasil	Blumenthal <i>et al.</i> , 1996
Lagunas de maduración	184	3.7	99.8	Brasil	Blumenthal <i>et al.</i> , 1996
Lagunas de oxidación	SD		99.9		Schwartzbrod, 1989
Lodos activados	SD		90-100		Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
	SD		77		Schwartzbrod, 1989
	28.3	3.0	89.3	Ismalia, Abu Attwa	Stott <i>et al.</i> , 1996
Sedimentación primaria	SD		35-90		Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
	28.3	3.2	88.8	Ismalia, Abu Attwa	Stott <i>et al.</i> , 1996
SP+FR+SS	66	0.0	100	Karkov, URSS	Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
Tanque séptico	SD		99	3 días de TRH Estudio realizado en la India	
Tanques Imhoff	2000	60	97		Env. Biol.& Epid. Helm., 1986
TPA+ filtración	8-96	0.2	99.8	México	Jiménez <i>et al.</i> , 1997 y 1999

SP= Sedimentación primaria; FR= Filtros rociadores; SS= Sedimentación secundaria; LA= Lodos activados; HH= Huevos de helmintos; TRH= Tiempo de retención hidráulica, SD= Sin dato

En 1992 la USEPA sugirió nueve procesos capaces de remover los microorganismos (huevos de helmintos, bacterias, virus y quistes), siendo las lagunas de estabilización mencionadas como las de mejor eficiencia de remoción (1 a 3 unidades logarítmicas, Tabla 2.9). De hecho, Schwartzbrod *et al.*, 1989; Lee, 1991; Ouano, 1986; Feigin *et al.*, 1984; Shuval, 1991; Strauss, 1991, USEPA, 1992; Guillaume y Xanthoulis, 1996 y WHO, 1989 y 2000, recomiendan este proceso para el reúso de agua residual con la ventaja adicional de tener un bajo costo. Por ello, durante varias décadas, las lagunas de estabilización constituyeron un sistema de

tratamiento de aguas muy común en países en vías de desarrollo. No obstante, la experiencia práctica (Camp Dresser y McKee, 1993 y Huntington y Crook, 1993) demostró que deben ser instaladas lejos de ciudades por el olor que producen y que la operación se complica por problemas de cortocircuitos (Yates, 1998). En ocasiones, la aplicación de lagunas se ve limitada por la poca disponibilidad de terreno barato¹ o si éste no es geológicamente adecuado para la construcción (Tsukamoto, 2002). Además, en la actualidad se considera que se necesita un sedimentador primario para evitar su frecuente azolvamiento y que en zonas áridas con alta tasa de evapo-transpiración, significan una pérdida neta importante de agua. Por todo ello, las lagunas instaladas están siendo sustituidas o asociadas con otras formas de tratamiento. Como dato, del total de lagunas en México (490), 45% están fuera de operación (CNA, 2000).

Tabla 2.9. Remoción esperada de microorganismos para varios sistemas de tratamiento de agua residual municipal ^(a)

Tipo de Proceso	Remoción en Unidades Logarítmicas				Observaciones
	Bacterias	Huevos de Helmintos	Virus	Quistes	
Sedimentación primaria convencional	0-1	0-2	0-1	0-1	a) En la TABLA original no se incluye la filtración
Tratamiento Primario Avanzado ^(b) (sedimentación ayudada químicamente)	1-2	1-3 ^(g)	0-1	0-1	b) Se requiere investigación adicional para confirmar la eficacia
Lodos Activados	0-2	0-2	0-1	0-1	c) Incluye laguna con sedimentación secundaria
Biofiltración	0-2	0-2	0-1	0-1	d) Cloración u ozonación
Lagunas aeradas ^(c)	1-2	1-3 ^(g)	1-2	0-1	e) El comportamiento depende del número de lagunas y de factores ambientales
Zanjas de oxidación	1-2	0-2	1-2	0-1	f) Depende del tiempo de retención
Desinfección ^(d)	2-6 ^(g)	0-1	0-4	0-3	g) Con buen diseño y operación se puede alcanzar las recomendaciones de la OMS (< 1 HH/L y < 1000 MPM/100 mL).
Lagunas de estabilización ^(e)	1-6 ^(g)	1-3 ^(g)	1-4	1-4	
Efluentes de embalses ^(f)	1-6 ^(g)	1-3 ^(g)	1-4	1-4	

Además del sistema de lagunas de estabilización, los autores de la Tabla 2.9 señalaron que el empleo de procesos de sedimentación primaria asistida químicamente (proceso denominado Tratamiento Primario Avanzado, TPA, o Chemical Enhanced Primary Treatment, CEPT), podría ser una buena opción para remover los microorganismos. Pero señalaron que este proceso aún se encontraba en desarrollo y, por lo tanto resultaba necesario efectuar estudios para determinar su eficiencia.

Posteriormente, autores como Adin y Sacks (1993), Ødegaard 1998, Nenov, 1995, Parter *et al.*, 2001 Shao *et al.*, (1993), Jiménez *et al.*, (1997) y Harleman y Murcot (1999 y 2001) han recomendado el Tratamiento Primario Avanzado (ATP) como una

¹ el costo del terreno se eleva por la producción de cultivos exportables o por la distorsión del mercado creado en zonas donde se cultivan estupefacientes.

opción para tratar agua residual y producir efluentes de calidad apta para reuso agrícola. Además, es considerado una alternativa de saneamiento sustentable para las mega ciudades de diversos continentes como Asia (Bombay, Calcuta, Jakarta, Manina, Seúl, Beijin, Shanghai y Tianjin), África (Lagos) y latino América (Ciudad de México, São Paulo, Río de Janeiro y Buenos Aires), que exceden los diez millones de habitantes. El TPA presenta las ventajas presentadas en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Ventajas del proceso primario avanzado (TPA)

- Tecnología de punta con bajo costo
- Aplicable para el reuso agrícola de agua municipal
- Retiene el nitrógeno, fósforo y materia orgánica necesarios para la agricultura, mejorando el suelo (pobre, erosionable y salino)
- Se adapta a variaciones de flujo, resultando ideal para drenajes combinados con lluvias de corta duración y concentradas en una época definida del año
- Cuenta con la capacidad de amortiguar picos, tanto de calidad como de cantidad
- Funciona en condiciones climáticas extremas

2.2.1 Fundamentos del Proceso Físicoquímico

Las etapas fundamentales del proceso físicoquímico son la coagulación, la floculación y la sedimentación. La *coagulación* es, por definición, el fenómeno de la desestabilización de las partículas coloidales, producido por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas negativas. Se lleva a cabo en una cámara de agitación rápida diseñada con un gradiente y tiempo de contacto óptimos para mezclar el coagulante (sales de aluminio, hierro o calcio) con el agua (Thiem *et al.*, 1999; Weber, 1992; Stumm y O'Melia, 1968; Metcalf y Eddy, 1996).

La *floculación* significa formar flóculos y consiste en agrupar las partículas ya desestabilizadas y aglomerarlas. Ocurre por la formación de un puente químico o por la creación de una red física. En la práctica para flocular se construyen una o varias cámaras de agitación lenta (mecánica o hidráulica) (Fetting *et al.*, 1990, Metcalf y Eddy, 1996 y Tambo, 1990).

Finalmente, el término *sedimentación* se refiere a la separación de los flóculos del agua (Thiem *et al.*, 1999; Weber, 1992; Fetting y Ratnaweera 1993 y Mühle y Domasch, 1990).

Los procesos físicoquímicos tienen más de 100 años de ser aplicados pero su empleo en aguas residuales se abandonó en 1930, en favor de los procesos biológicos, debido a su costo elevado ocasionado por la gran cantidad de lodos que producían. Actualmente, su aplicación ha retornado con dos fines: la eliminación del fósforo y la obtención de efluentes de calidad media, que suelen destinarse para descargar al mar o para riego agrícola a costos inferiores a los convencionales (Shao, 1996; Heinzmann, 1994; Fetting y Ratnaweera, 1993; Ødegaard, 1992 y 1998). Este nuevo auge se debe a la síntesis de polímeros de alto peso molecular y de alta densidad de

carga que permiten emplear bajas dosis de coagulantes y producir menor cantidad de lodos sin decremento de la calidad del efluente producido (Bache, 1999 y Fettig y Ratnaweera, 1993).

Shao *et al.*, 1993 y 1996 clasifican al tratamiento físico químico en cuatro configuraciones de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2.2 y referidas como sigue:

- a) **Primario convencional.** Consiste en una desarenación y sedimentación primaria. Su eficiencia es del 65% en remoción de sólidos suspendidos totales, 30 % de la demanda bioquímica de oxígeno y 11% de fósforo.
- b) **Primario asistido químicamente (Tratamiento Primario Avanzado).** La configuración es igual a la anterior pero se añaden reactivos (generalmente cloruro férrico o sulfato de aluminio) con dosis de 10 a 40 mg/L combinadas con pequeñas cantidades de polímero aniónico (0.2 hasta 1 mg/L). Remueve entre 80 y 85% de los sólidos suspendidos y entre 50 y 55% de la demanda bioquímica de oxígeno. Se adapta muy fácilmente a plantas en operación. En general, este proceso suele estar acompañado de un sedimentador secundario de alta tasa.
- c) **Químico primario.** Tiene una unidad de coagulación-floculación antes de la sedimentación. Se emplean dosis altas de coagulantes (150 mg/L de cloruro férrico o sulfato de aluminio) acompañado con polímero catiónico o aniónico en dosis que varían desde 0.2 hasta 2 mg/L y se acopla a un sedimentador convencional. Se logran eficiencias de remoción de 90% para los sólidos suspendidos, 75% para la demanda bioquímica de oxígeno y 95 % para el fósforo en agua residual doméstica.
- d) **Químico secundario.** Consiste en añadir reactivos en dos etapas. La primera es un tratamiento primario avanzado, la segunda es un proceso de floculación. El proceso remueve el 83% de los sólidos suspendidos, 52% de la demanda bioquímica de oxígeno y 80% de fósforo.

2.2.1.1 Tratamiento Primario Avanzado

El Tratamiento Primario Avanzado (TPA) se emplea en países nórdicos, combinado con procesos biológicos o solos. Es útil para efluentes que no precisan cumplir con los 30 mg/L tradicionales tanto para la DBO como los SST como ocurre con los efluentes secundarios.

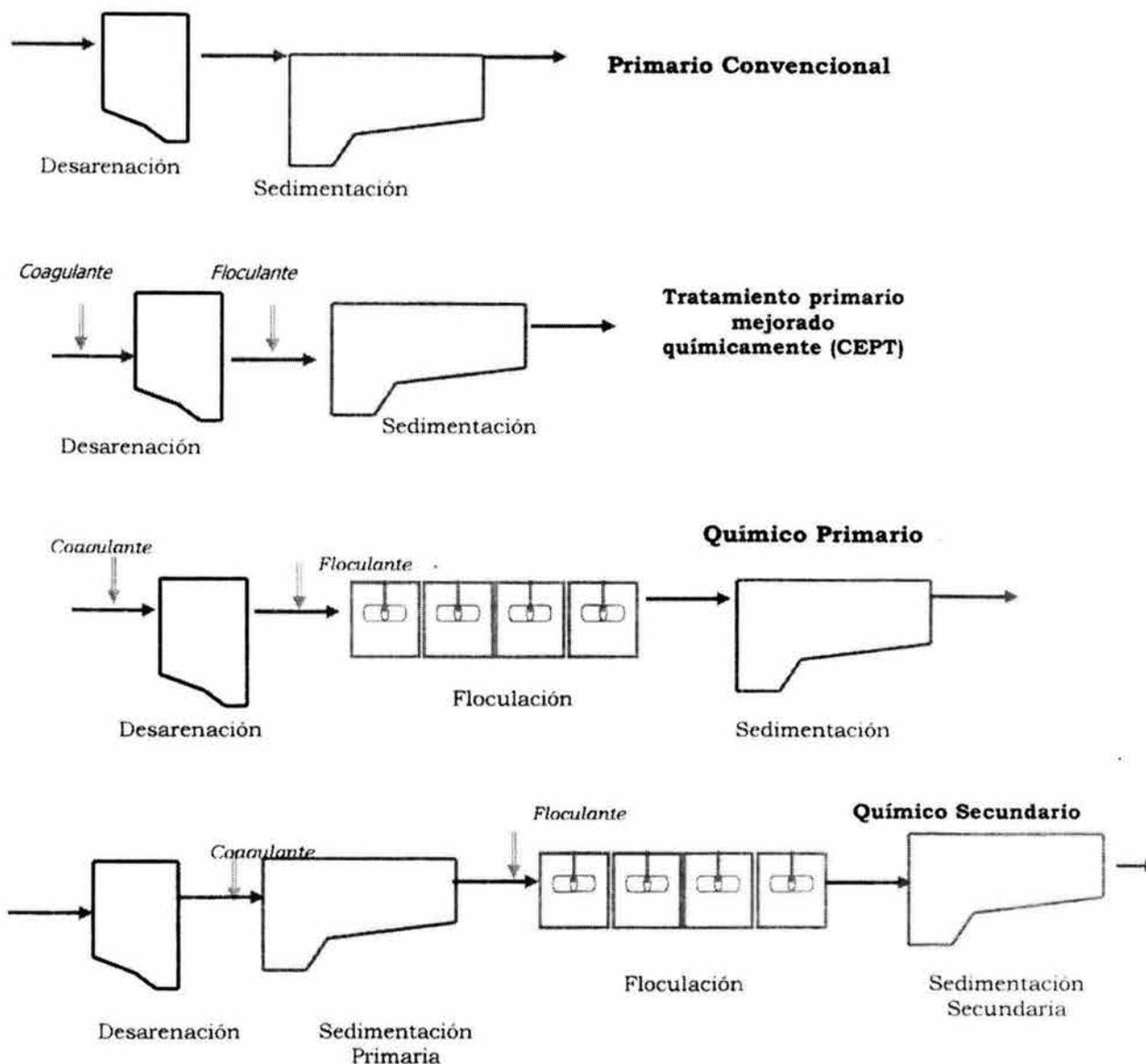


Figura 2.2. Configuraciones básicas del tratamiento fisicoquímico. Fuente: Shao et al., 1993 y 1996.

El sistema es útil cuando se desea emplear el agua tratada para riego y es necesario preservar su contenido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica, o bien, cuando la descarga se hace al mar en zonas de alta dilución y resulta intrascendente eliminar DBO pero sí fósforo. Además, el TPA incrementa la capacidad de las plantas biológicas, como consecuencia de la disminución de la cantidad de oxígeno que se requiere para degradar la materia orgánica aeróbicamente, y reduce así el tamaño del reactor biológico. Cabe mencionar que para mantener una eficiencia constante con efluentes de alta variabilidad, en cantidad y calidad, el tratamiento primario avanzado no tiene comparación con los procesos biológicos ya que su flexibilidad es muy buena (Hatuakai et al., 1997; Elmitwalli, 2001; Leigh, 1999; Thiem, 1999; Horowitz, 1997; Shao et al., 1996 y Ødegaard, 1992).

2.2.2 Experiencias Mundiales y Nacionales con procesos de tratamiento físico químico

2.2.2.1 Experiencias en Países Nórdicos

Antes de los 70, Noruega sólo contaba con algunas plantas de tratamiento de aguas residuales. En 1972, el Ministro del Medio Ambiente estableció el cumplimiento de la *Clean Water Act 72*, por lo que durante esa época se construyeron diversas plantas (la mayoría de ellas con procesos físico-químicos). Actualmente, el 77% de la población está conectada al sistema de drenaje municipal y el 74% del agua residual es tratada en plantas que descargan al mar (Ødegaard, 1992). El 75% de las plantas de tratamiento (167 plantas) son de tipo físico-químico y tienen una etapa de pre-sedimentación, precipitación química y sedimentación primaria y/o secundaria. Las eficiencias promedio de remoción alcanzadas son del 80% de la materia orgánica (DBO de 40 mg/L) y 90% del fósforo total (0.5 mg/L) (Ødegaard, 1992).

2.2.2.2 Experiencias en los Estados Unidos de Norteamérica

Hyperion en Los Ángeles, California.- Construida en 1950, da servicio a más de 4 millones de personas. Opera a un flujo de 15 m³/s. En 1956, su capacidad se expandió hasta 16.6 m³/s y, en 1998, a 19.7 m³/s. La ampliación se efectuó al usar un tratamiento primario avanzado previo al proceso biológico de lodos activados, adaptación que se empleó para mejorar la calidad del efluente. En esta planta se añade cloruro férrico y un polímero aniónico de extremadamente alto peso molecular (10 mg/L y 0.15 mg/L, respectivamente) para remover el 84% de los SST y el 52% de la DBO sólo, con una concentración a la entrada de 330 mg/L en ambos casos (Shao *et al.*, 1993 y 1996).

San Diego, California.- La planta fue construida en 1963 para sanear la bahía de San Diego. Su capacidad promedio es de 9 m³/s y descarga a través de un emisor submarino al Océano Pacífico. Hasta 1985 operó como una planta de tratamiento primario convencional que removía entre el 40 y 60% de los sólidos. En el proceso de coagulación-floculación se aplican de 30 a 35 mg/L de cloruro férrico y 0.2 a 0.6 mol/m³ de polielectrolito. Las eficiencias de remoción para esta planta son de: 80% para SST, 57% para DBO, 42% para grasas y aceites y 75% para fósforo (Harleman, 1992).

Ows Heal en Brooklyn, Nueva York.- El gasto promedio es de 5.3 m³/s. Se aplican alrededor de 24 mg/L de coagulante (sulfato de aluminio o cloruro férrico) acompañado de 1 mg/L de polímero aniónico, para obtener remociones del 54% de SST y 36% de la DBO. Las concentraciones de entrada son de 107 y 115 mg/L, respectivamente (Chack *et al.*, 1994).

2.2.2.3 Experiencias en Francia

Edar en Marsella.- La planta de esta ciudad tiene una capacidad de 7.5 m³/s. Opera con 17 mg/L de cloruro férrico y 0.5 mg/L de polímero. Las eficiencias de remoción son del 85% para SST, 48% para la DBO y 20% para el nitrógeno total

(Bacquet y Bentabat, 1993). La selección de este proceso se basó en la falta de área disponible en la zona turística, pues la planta debía estar debajo de una cancha de fútbol.

2.2.2.4 Experiencias en Hong Kong

En 1989 el departamento de protección ambiental de Hong Kong (EPD) encargó un estudio estratégico para recolectar, tratar y disponer sus aguas residuales. En 1994, diversos consultores analizaron las opciones de tratamiento de agua y seleccionaron un tratamiento primario avanzado seguido de una desinfección como etapa final. El estudio en la planta piloto mostró que con una dosis de cloruro férrico de sólo 10 mg/L como coagulante y 0.1 mg/L de polímero como floculante se remueve el 80% de sólidos suspendidos y el 67% de DBO (Harleman *et al.*, 1997).

En mayo de 1997, se terminó la construcción de la planta de TPA más grande del mundo, con capacidad de 40 m³/s; 20 m³/s en una primera etapa. Los datos de operación muestran que su rendimiento excede al pronosticado por el estudio ya que la remoción es de 91% de SST y 80% de DBO. El efluente producido presentó una transmitancia al UV entre 13 y 30% que indica que puede ser desinfectado sin problema alguno (Harleman y Murcott, 1999 y 2000).

2.2.2.5 Experiencias en Brasil

En 1997, el Banco Mundial solicitó una prueba tecnológica del TPA en una de las plantas de tratamiento existentes en Río de Janeiro. El objetivo fue demostrar si la tecnología debía ser usada en futuras plantas de tratamiento planeadas para resolver graves problemas de eutroficación dentro de la Bahía Guanabara. En Río de Janeiro, se demostró que la remoción de fósforo controla el crecimiento de algas, las cuales causan la disminución de oxígeno y producen olores en la bahía. Las pruebas de laboratorio demostraron que el tratamiento primario avanzado es capaz de remover cerca del 90% de fósforo, así como altos niveles de sólidos suspendidos totales y DBO (>85%) (Harleman y Murcott, 1999).

2.2.2.6 Experiencias en México

Valle de México.- En 1995 la Comisión Nacional del Agua encargó al Instituto de Ingeniería una serie de estudios para apoyar el proyecto para sanear 45 m³/s del agua residual de la Ciudad de México y continuar reúsandola en el riego de 90,000 ha sin restricción alguna. A partir de 1996 se analizó la viabilidad de emplear un tratamiento primario avanzado y confirmar la eficacia de remoción de huevos de helmintos, ya que la experiencia hasta el momento era insuficiente. Los resultados del tratamiento realizados durante un período de 5 años, tanto a nivel de prueba de jarras como piloto (5 plantas de 20 L/s cada una), determinaron que para tratar el agua se debe aplicar una dosis de 50 mg/L de Al₂(SO₄)₃ y 0.4 mg/l de polímero aniónico. Con estas condiciones, se logra remover el 85% de los SST y 65% de la DQOt, 12% del nitrógeno total y 25% de los ortofosfatos. Los huevos de helmintos se reducen de 23±13 HH/L hasta 1.2 ± 1 HH/L, condición en la cual, el efluente producido sólo se podrá emplear en riego agrícola restringido de acuerdo con la NOM 001-SEMARNAT, 2002 (Jiménez 1997, 1998 y 1999). Para que este efluente se pueda

utilizar para riego de todo tipo de cultivo, se necesita acompañar al tratamiento de un sistema adicional de pulimento (filtración, por ejemplo) para cumplir con un valor de < 1.0 HH/L en el 100% de los casos (Jiménez *et al.*, 2000). Además, se determinó que la desinfección de este efluente puede realizarse aplicando una dosis de cloro de 12 mg/L con un tiempo de contacto de 2 h, circunstancias que permiten disminuir el contenido de coliformes fecales desde 1×10^9 hasta 4×10^2 NMP/100 mL

Acapulco, Gro.- La planta de tratamiento Aguas Blancas ubicada en Acapulco, Guerrero fue diseñada para tratar 1350 L/s de agua residual municipal. El tratamiento se efectúa mediante un proceso fisicoquímico de coagulación-floculación, con la adición de 35 mg/L de sulfato de aluminio y 1 mg/L de polímero aniónico. El efluente se desinfecta con 15 mg/L de cloro. El sistema presenta eficiencias de remoción del 70% de DQO, 65% de DBO, 80% de SST y 4.2 unidades logarítmicas de coliformes fecales. Después del proceso, el agua es descargada al mar en un sitio denominado Playa Olvidada, que se encuentra fuera de la bahía de Acapulco (Jiménez *et al.*, 1999).

Ciudad Juárez, Chihuahua.- Existen dos plantas de tratamiento de aguas residuales (Norte de 2000 L/s y Sur de 1000 L/s). El agua tratada se emplea para uso en riego agrícola. El proceso de tratamiento es un Primario Avanzado tipo Densadeg; el cual es el primero en su tipo en el país. El tratamiento se efectúa mediante la adición de 30 mg/L de sulfato de aluminio y 0.5 mg/L de polímero aniónico acoplado con un sistema de desinfección con dosis de 5-25 mg/L de cloro. El tren de tratamiento remueve el 73% (53 mg/L remanentes) de SST, 44% (134 mg/L) de DBOt, 65% (28 mg/L) de grasas y aceites y 74% (0.3 HH/L) de huevos de helmintos y sólo 0.7 Unidades logarítmicas para coliformes fecales.

Culiacán, Sinaloa.- En esta ciudad la planta tiene una capacidad de 1700 L/s. Entró en operación en el 2002 y debe cumplir con NOM 001-SEMARNAT, 2002 El proceso consiste en un Tratamiento Primario Avanzado donde se aplican dosis de 50 mg/L de sulfato de aluminio, 1 mg/L de polímero aniónico, seguido de cloración con 12 mg/L de cloro. El proceso de tratamiento presenta una eficiencia de remoción del 70% de SST, 45% de DBO y DQO, 66% de grasas y aceites, 100% de huevos de helmintos y 7 unidades logarítmicas para coliformes fecales. El tratamiento de lodos se realiza con un sistema de digestión anaerobia.

Puebla, Puebla .- La Ciudad cuenta con cuatro plantas de tratamiento Primario Avanzado tipo Densadeg. Durante el tratamiento se aplican 35 mg/L de coagulante (Sulfato de aluminio) y 0.4 mg/L de floculante. Adicionalmente, se aplican 13 mg/L de cloro con un tiempo de contacto de 30 minutos para desinfectar. El agua se destina para el riego de 800 ha de cultivos previo a su paso por una presa (Valquesillo). En la Tabla 2.11 se presenta la calidad del agua obtenida en cada una de las plantas, en ella destaca que en promedio, el sistema remueve 54% de la DBO, 55% de los SST y 4.8 unidades logarítmicas de coliformes fecales.

Tabla 2.11 Eficiencias de remoción de contaminantes del sistema de tratamiento de Puebla

PTAR	Gasto, L/s	DBO, mg/L			SST, mg/L			Coliformes Fecales, NMP/100 mL		
		Inf	Efl	η	Inf	Efl	η	Inf	Efl	η
Alsaseca Sur	1000	211	105	50	630	105	50	4.3×10^7	< 1000	4.6
Atoyac Sur	600	265	93	65	791	69	74	8.5×10^7	<1000	4.9
San Francisco	1500	135	67	50	420	78	42	8.3×10^7	<1000	4.9
Barranca el conde	500	164	83	49	377	73	55	5.7×10^7	<1000	4.8

PTAR = Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Inf= Influyente, Efl = Efluente

2.2.3 Costos del Tratamiento de Agua Residual con un Proceso Primario Avanzado

La Tabla 2.12, presenta el costo de construcción y el área per capita requerida por los distintos procesos de tratamiento de aguas residuales de acuerdo con Tsukamoto, 2002 y Von Sperling, 1998. Estos datos se deben tomar como un indicador general ya que durante la evaluación no se consideró el factor de escala ni los costos de operación que afectan de manera distinta el costo del tratamiento. Se destaca en la misma Tabla que el tratamiento primario avanzado requiere un costo de construcción similar al de las lagunas de estabilización pero con un área 500 veces menor.

Tabla 2.12. Costos de construcción y área requerida por los procesos de tratamiento de aguas residuales. Fuente Von Sperling, 1998 y Tsukamoto, 2002

Procesos de tratamiento	Costo de construcción (US\$/hab)	Área requerida (m ² /hab)
Lagunas de estabilización		
Laguna facultativa	10-30	2.5-5.0
Laguna anaerobia + Laguna facultativa	10-25	1.5-3.5
Laguna aireada facultativa	10-25	0.25-0.50
Laguna aireada mezcla completa + Laguna de sedimentación	10-25	0.2-0.5
Laguna + Estanques de maduración	15-35	3.0-6.0
Laguna + Lago de alta tasa	15-35	2.0-5.5
Laguna + Remoción de algas	15-35	1.5-5.0
Tratamiento Anaerobio (y similares)		
Estanque séptico + Lecho anaerobio	30-70	0.2-0.4
Estanque séptico + Infiltración	25-50	1-5
UASB (Reactor anaerobio de flujo ascendente)	20-40	0.05-0.10

Tabla 2.12. Costos de construcción y área requerida por los procesos de tratamiento de aguas residuales. Fuente Von Sperling, 1998 y Tsukamoto, 2002

Procesos de tratamiento	Costo de construcción (US\$/hab)	Área requerida (m ² /hab)
UASB + Lodos activados	40-80	0.25-0.35
UASB + Lecho anaerobios	35-60	0.15-0.25
UASB + Lecho biológico de baja carga	40-80	0.5-0.7
UASB + Laguna de maduración	30-50	1.5-2.5
UASB + Esgurrimiento superficial	25-50	1-6
Tratamientos Aerobios.-variación de lodos activados (LA)		
LA convencional	20-60	0.20-0.30
LA por aireación prolongada	40-80	0.25-0.35
LA por reactor por lote	40-80	0.20-0.30
LA con remoción biológica de N	70-120	0.20-0.35
LA con remoción biológica de N/P	70-140	0.25-0.35
LA con remoción química y biológica de N/P	80-160	0.30-0.40
LA con remoción biológica de N/P + filtración	80-160	0.30-0.40
LA + Desinfección	70-120	0.20-0.30
Tratamiento Aerobio.- Variación de biopelícula fija		
Lecho biológico con baja carga	50-90	0.50-0.70
Lecho biológico con alta carga	40-70	0.30-0.45
Biofiltro aireado sumergido (BAF)	60-120	0.04-0.10
Biodisco	70-120	0.15-0.25
Tratamiento Físico-químico		
Tratamiento Primario Avanzado (CEPT-TPA)	7-25	0.002-0.005

Por otro lado, el National Research Council (1996 y 1998) realizó un estudio de los costos de construcción y operación en 100 plantas de tratamiento en Estados Unidos de Norteamérica. Resultó que el tratamiento biológico es 1.7 veces mayor que el costo de un sistema de tratamiento primario avanzado. En cuanto a la eficiencia de remoción de los contaminantes, los mismos autores señalan que el proceso biológico solo es mejor para remover SST (85% vs 91%) y mejor para remover la DBO (57 vs 85%) con la clara idea de que esto último no siempre es necesario, sobre todo si se pretende usar el agua para riego agrícola (Tabla 2.13).

Tabla 2.13. Comparación de costos de tratamiento y eficiencia de remoción por diversos procesos (National Research Council, 1996 y 1998)

Proceso de Tratamiento	Costo en USD/10 ³ m ³ d			eficiencia de remoción de diversos contaminante en %				
	De capital	O&M	Total	SST	DBO	PT ¹	NTK ²	G&A ³
Primario convencional	3.1 - 4.2	0.8 - 0.9	1.7 - 2.1	55	35	20	15	51
Primario convencional + biológico secundario	9.1 - 9.8	1.2 - 1.6	3.5 - 4.3	91	85	30	31	98
Primario avanzado	4.2 - 5.3	0.9 - 1.1	2.1 - 2.6	85	57	85	37	71

¹ fósforo total, ² nitrógeno total, ³ grasas y aceites

2.2.3.1 Costo de tratamiento para las plantas de la Cd. de México

Respecto de los costos del proceso, el Tratamiento Primario Avanzado con filtración y desinfección resulta una opción viable para México de acuerdo con lo calculado por la Comisión Nacional del Agua, 2000 (Tabla 2.14). Este cálculo se realizó utilizando el programa CAPDET (*Computer Assited Program for the Desingn of Wastewater Treatment Facilities* Versión 2.04 de Hydromantys, Inc), el cual considera los costos de construcción, operación y mantenimiento para una planta de 1 m³/s. En la Tabla se destaca que el tren de tratamiento primario avanzado + filtración + desinfección tiene un costo dos veces menor al presentado por el tren de tratamiento de lodos activados + filtración + desinfección y que ambos procesos producen una calidad de agua similar en cuanto al contenido de Coliformes Fecales, huevos de helmintos y Sólidos Suspendidos Totales. La diferencia principal es la remoción de la Demanda Química de Oxígeno que para los fines de reúso agrícola no tiene relevancia.

Tabla 2.14. Costos comparativos para una planta de 1 m³/s

Procesos de Tratamiento	Coliformes fecales	Huevos de helmintos	Remoción de SST, %	Remoción de la DQOt	Costo (US\$/m ³)
Agua residual	2.4E08	9-380	--	--	--
Tratamiento primario	3.5E07	20	25	10	0.03
Primario avanzado + filtración + desinfección	<1000	1-5	>85	65	0.07
Lodos activados + filtración + desinfección	<1000	1-8	85	85	0.15

Fuente: CNA (Comisión Nacional del Agua, 2000)

2.2.4 Contenido de huevos de helmintos y su relación con los SST

Con base en lo expuesto arriba, se concluye que el reúso del agua residual es una estrategia efectiva que tiene como resultado, por un lado, la preservación de la contaminación de ríos y embalses y, por otro, el desarrollo de la agricultura, siendo este último, de fundamental importancia para aquellos países donde el agua es un recurso muy escaso y el reúso del agua residual constituye la única posibilidad de desarrollo agrícola. Sin embargo, el reúso del agua residual implica necesariamente el tratamiento de ésta, enfocado principalmente a la remoción de microorganismos patógenos, en especial, de los huevos de helmintos. En este aspecto, los procesos biológicos aún cuando presentan una remoción aceptable de patógenos reducen de manera considerable la materia orgánica y los nutrientes (nitrógeno y fósforo), compuestos favorables para la agricultura y a un costo mucho mayor.

Por otro lado, el tratamiento primario avanzado seguido de un proceso de desinfección es una alternativa interesante para tratar un agua residual con fines de riego agrícola ya que reduce de manera considerable el contenido de huevos de helmintos (principal riesgo contra la salud), preserva la materia orgánica y nutrientes y reduce los costos de tratamiento lo cual hace que sea un proceso atractivo. Su funcionalidad ha sido demostrada en algunas partes del mundo y en el país.

Por la importancia que tiene para nuestro país la remoción de microorganismos patógenos en el agua residual, los estudios realizados han sido encaminados a determinar su eficiencia. Uno de los resultados más relevantes es la relación encontrada entre el contenido de huevos de helmintos y los sólidos suspendidos totales presentes en el agua residual (Figura 2.3). Con ello, se logran reducir de manera considerable los costos de operación de las plantas de tratamiento ya que el costo de la determinación de huevos de helmintos es 10 veces mayor que la de los sólidos suspendidos totales. No obstante, la relación huevos de helmintos *vs* sólidos suspendidos totales presenta la desventaja **(a)** ser una técnica de poca precisión ya que de acuerdo Levine *et al.*, 1991 durante su realización puede ocurrir una obstrucción de los poros del filtro, de hecho, se ha observado que 6.5 mg de partículas con un diámetro de 6.0 μm pueden obstruir un filtro de 5.0 μm y, 0.5 mg de partículas con 5.0 μm pueden obstruir el filtro de diámetro de 0.45 μm ; aunado a que un pobre control de calidad en la manufactura de los filtros puede conducir a problemas de reproducibilidad y por ello, el valor de SST obtenido es relativo. **(b)** Es tardada (3 horas *vs* 5 minutos) y **(c)** no se puede realizar en línea.

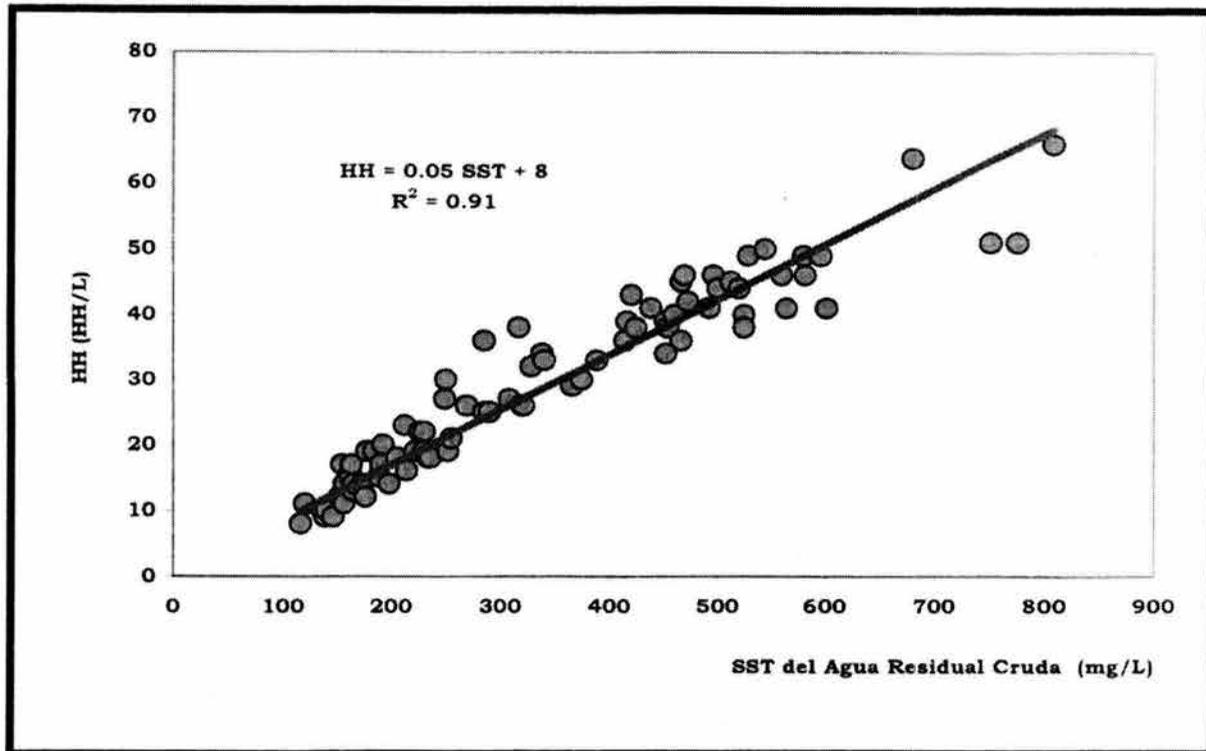


Figura 2.3 Relación entre la concentración de SST y el contenido de huevos de helmintos en las aguas residuales del Valle de México. Fuente: Jiménez *et al.*, 1996, 1997 y 1999.

Debido a esto, es necesario emplear otras técnicas que relacionen el contenido de microorganismos y que se apliquen tanto en el agua residual cruda como en la tratada. Por tanto, en la actualidad, es importante reconceptualizar los parámetros indicadores de contaminación e incluir en ellos el tamaño de las partículas. Este parámetro se asocia con el tipo de mecanismos de remoción y por tanto con la eficiencia del proceso de tratamiento empleado. Para medir este parámetro destaca la técnica de distribución del tamaño de las partículas.

3. OBJETIVO Y METAS

3.1 Justificación

En México, la norma en materia de reúso agrícola limita el contenido de coliformes fecales a < 1000 NMP/100 mL en todos los casos y el de los huevos de helmintos a < 1 HH/L para todo tipo de cultivo y a < 5 HH/L para los cultivos que no se consumen crudos o se usan para otros fines. Sin embargo, para usar el agua en riego agrícola se requiere contar con técnicas analíticas que midan el contenido de estos microorganismos. Comúnmente, estas técnicas se basan en análisis microbiológicos complejos, costosos y tardados de realizar. Por otra parte, se sabe que los microorganismos son partículas que presentan un tamaño específico que suele asociarse con el contenido de sólidos suspendidos totales, sin embargo, su medición es imprecisa y tardada. Afortunadamente se sabe que el tamaño de los huevos de helmintos varía entre 20 y 80 μm y los coliformes fecales de 0.7 a 1.5 μm . Debido a estas características, se establece que es posible determinar su contenido en el agua residual y tratada a través del número o volumen de partículas por tamaño.

Cabe mencionar que en el país, en la mayoría de las plantas instaladas se monitorea parcialmente la entrada y la salida, debido a los costos que representa medir su calidad. Por ejemplo, tan sólo monitorear el contenido de huevos de helmintos y de coliformes fecales y los sólidos suspendidos totales en las 1000 plantas de tratamiento existentes en México, se debe invertir \$511,000,000, para el primer caso, \$109,500,000 para el segundo y 65,000,000 para el tercero. Es decir, un total de \$685,500,000. Aún más, los resultados de estos parámetros se obtienen en 5 y 1 días y 3 horas respectivamente. Por lo cual el tiempo en el que se obtiene la respuesta impide el ajuste para corregir la operación del proceso. Ante esta situación, la determinación de la distribución del tamaño de las partículas, que es una técnica que permite medir partículas de tamaño específico a un costo de \$26 por muestra, en 5 minutos y en línea es una opción para evaluar los microorganismos. Además, con esta técnica es posible realizar una selección más precisa del tipo y dosis de coagulante y floculante en términos del intervalo de tamaño de partícula que se desea remover así como de conocer la manera como afectan cada uno de los componentes que afectan el desempeño de tratamiento.

3.2 Premisas

La presente investigación tomó en consideración las siguientes premisas:

- Es importante conocer el contenido microbiológico del agua residual, en particular, de huevos de helmintos para definir la posibilidad de su reúso en riego agrícola.
- Los microorganismos presentes en el agua residual son partículas que presentan un tamaño determinado.
- Dada una suspensión, es posible clasificar a las partículas que contiene a través del análisis denominado distribución del tamaño de las partículas.
- La determinación del número o volumen de las partículas por tamaño es más barata y más rápida que el análisis microbiológico y los sólidos suspendidos totales.

3.3. Hipótesis

Las hipótesis de este estudio fueron:

- El contenido microbiológico del agua residual cruda y tratada, por un proceso fisicoquímico, puede ser determinado a través de una relación entre las partículas medidas por intervalos de tamaño ya sea en número o volumen y microorganismos específicos.
- El Tamaño de la Partícula se puede utilizar como un parámetro que permite determinar, con mayor precisión que los Sólidos Suspendidos Totales, la manera en que cada uno de los factores (gradiente, tiempo de contacto, coagulantes y floculantes) afectan el desempeño del proceso de tratamiento primario avanzado.

3.4 Objetivos

Emplear la distribución de tamaño de las partículas (DTP) como una técnica capaz de determinar con mayor precisión y rapidez, la forma en la que cada uno de los factores involucrados afecta el desempeño del proceso de tratamiento físico-químico y en términos de los sólidos y del contenido microbiológico.

Determinar el contenido de Coliformes fecales, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos presentes en un agua residual doméstica por medio de la técnica de distribución de tamaño de partícula

3.5 Metas

- Desarrollar una serie de modelos (de tipo lineal y exponencial) que permitan conocer el contenido de los microorganismos de interés (huevo de helmintos, coliformes fecales y *Salmonella spp.*) a través del número y volumen de partículas presentes en el agua residual destinada para riego agrícola.
- Establecer el valor crítico de remoción de partículas del sistema de tratamiento fisicoquímico a través de la distribución del tamaño de la partícula presente.
- Obtener la distribución de diversos parámetros de evaluación de la calidad del agua y de las partículas mayores y menores a 20 μm .
- Comparar dos técnicas de tamaño de partícula como una herramienta de análisis del desempeño del proceso de TPA, que permita entender los mecanismos mediante los cuales el sistema logra una mejor remoción de partículas.
- Evaluar el efecto del coagulante, polímero, gradientes y tiempos de contacto aplicados a un sistema de tratamiento fisico-químico con base en la distribución del tamaño de las partículas.

3.6 Alcances

La investigación se llevó a cabo con el agua residual doméstica de la ciudad de México, por lo que los resultados obtenidos sólo aplican para este tipo de agua o similar.

De la misma forma, estos resultados sólo son válidos para los tipos de coagulante estudiados y bajo condiciones de tratamiento establecidas.

Además, los cambios y distribución del tamaño de partícula fueron determinados en el agua residual doméstica tratada mediante un proceso físico químico por lo que para otro tipo de procesos será necesario establecer su distribución.

4. REVISION BIBLIOGRÁFICA

4.1 Las Partículas en el Agua Residual

De acuerdo con Levine *et al.* (1991) y UEICH (1999), una partícula es una subunidad discreta de materia. En 1966, Phelps definió la partícula en agua como una esfera rígida, lisa, completamente dispersa en soluciones con baja concentración y con un movimiento lento a través del medio donde se encuentra suspendida. Irani y Clayton (1963) y Riyad y Clayton (1963), en cambio, describen a la partícula como una subdivisión de la materia que tiene una forma, la cual depende de los procesos por los cuales ha sido formada y presenta fuerzas de unión intramolecular. Por ello, dicha partícula puede ser un simple cristal, una gota líquida o un material amorfo. Definición que es la que más aplica al caso del agua residual.

Para caracterizar a las partículas se puede medir su tamaño que es una representación numérica de una longitud física (Levine *et al.*, 1991). Sólo en el caso de una esfera perfecta el tamaño de la partícula puede ser representado por una sola dimensión (el diámetro). La exactitud de la medición depende del método empleado (Broadwell., 2000). Debido a que en el agua residual las partículas no son regulares ni uniformes (UEICH, 1999 y Broadwell, 2000) para caracterizarlas se deben tomar en cuenta propiedades físicas como la dimensión lineal, el área superficial y/o proyectada, el volumen, la masa, la velocidad de sedimentación y la respuesta a un campo (eléctrico, óptico o acústico). Y, puesto que todas las partículas son diferentes no se habla de un tamaño promedio de partículas sino de una distribución.

La distribución del tamaño de las partículas es la cantidad presente (en número, peso o masa de partículas) de diversas clases de partículas en una suspensión (UEICH, 1999). De acuerdo con Beddow (1980), Goldman 1987), Lewis (1984) y Levine *et al.* (1985 y 1991), la medición de la distribución del tamaño de partícula se clasifica en dos tipos. El Tipo I comprende mediciones absolutas y es un número finito de observaciones. El Tipo II son datos medidos de forma indirecta que reportan la distribución como fracciones de la muestra en masa, volumen o área superficial. Los parámetros estadísticos que se usan para evaluar los datos de la distribución del tamaño de la partícula dependen de la distribución que presenten dichos datos, aunque normalmente se usan la media (tendencia central) y la varianza (dispersión) (Levine *et al.*, 1985 y 1991).

4.1.1 Tamaño de Partícula en el Agua Residual Cruda y Tratada

Las partículas que se encuentran en el agua residual se pueden clasificar, por su tamaño, en cuatro intervalos: disueltas, coloidales, supracoloidales y sedimentables (Tabla 4.1). Los límites de los intervalos varían de acuerdo a cada autor.

Tabla 4.1. Clasificación de las partículas con base en el tamaño. Fuente: Much *et al.*, 1980, Levine, 1985 y 1991 y Boller *et al.*, 1993 y 1998

Clasificación, μm	Munch <i>et al.</i> , 1980	Levine, 1985 y 1991	Boller <i>et al.</i> , 1993 y 1998
Disuelta	< 0.03	<0.08	< 0.001
Coloidal	0.03-3	0.08-1	0.001-1
Supracoloidal	>3-106	1-100	1-100
Sedimentable	> 106	> 100	>100-1500

4.1.2 Tamaño de la materia orgánica en aguas residuales

Durante la década de los años 1950, los estudios de tratamiento de agua residual se orientaron a fraccionar la materia orgánica en diferentes tamaños (Figura 4.1) y demostraron la diferente biodegradabilidad de cada fracción (Balmat, 1957, Heukelekian y Balmant, 1959; Richert y Hunter, 1971; Munch *et al.*, 1980). Hoy en día se sabe que los contaminantes presentes en el agua residual varía entre 0.001 y 100 μm . Los que conforman la DBO y los SST usualmente son menores de 50 μm . Los SST son mayores a 1.2 μm y la fracción orgánica de éstos incluye protozoarios, algas, flóculos bacteriológicos y detritos; sin embargo, algunas bacterias, fragmentos de células, los virus y las macromoléculas miden de 0.1 a 1.2 μm y, en parte no pueden ser determinados por esta técnica (Ran *et al.*, 2000, Levine, 1991, Adin y Asano, 1998 y Thiem, 1999).

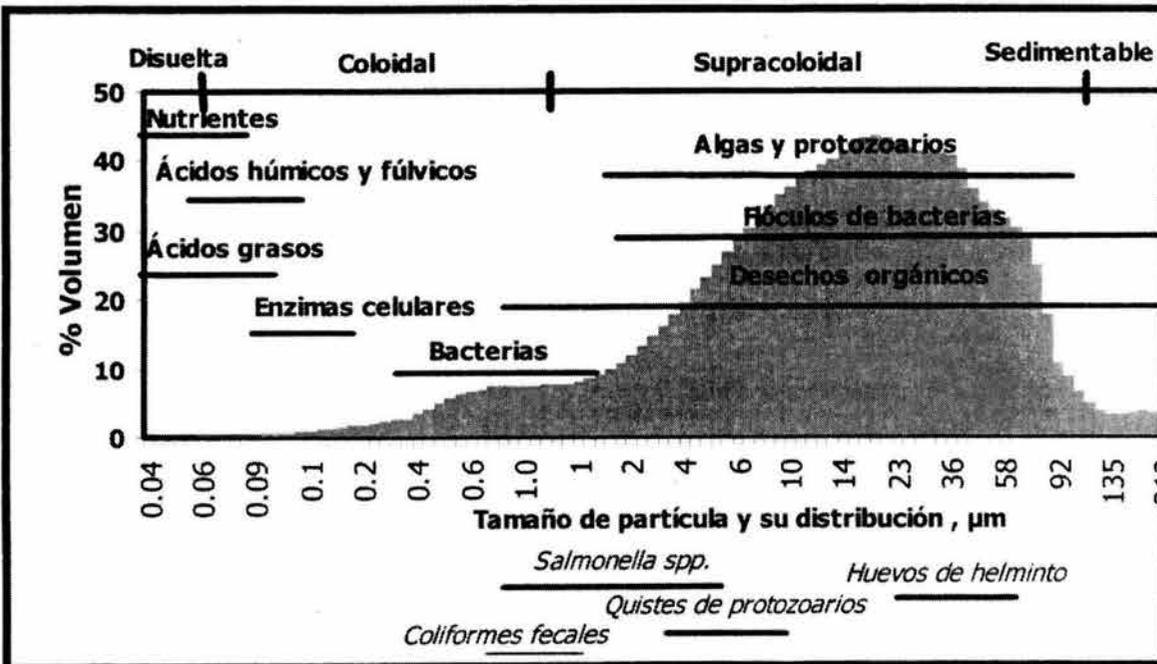


Figura 4.1. Tamaño de los diversos contaminantes y microorganismos de interés en el tratamiento del agua.

La Tabla 4.2 presenta la distribución del contenido de materia orgánica en el agua con base en su tamaño (medida de diversas formas). Se observa una variación del porcentaje debida al tipo de técnica con la cual fue medida la distribución del tamaño de partícula así como otros factores específicos de menor importancia. Levine *et al.*, en 1985, determinaron que del 63 al 75% de la materia orgánica medida como COT se asocia con partículas mayores a 0.1 μm y su contribución es prácticamente nula en el intervalo de 0.01 y 0.1 μm .

Tabla 4.2. Contenido de materia orgánica del agua residual con base en su tamaño. Adaptada Marquet, 1999, Hatuka *et al.*, 1997, Neis and Thiem, 1997, Ødegaard, 1997.

Parámetros	Contenido, mg/L	Porcentaje de materia orgánica, μm	
		< 0.1	>0.1
SST		71	21
DQOt	95-418	15-91	8-84
COT	29-76.5	12-51	49-85
DBO		17	83
Grasas y aceites		1-12	94-99
Proteínas		4	70
Carbohidratos		58	18

4.1.3 Tamaño de partícula y nutrientes

Los estudios que evalúan el contenido de nutrientes en función del tamaño de partículas son contradictorios. Los trabajos de Levine *et al.* (1991 y 1997); Thiem *et al.* (1999) y Yeoman *et al.* (1989) concluyen que los datos disponibles no son suficientes para conocer cuál de las fracciones es la más importante, mientras que Marquet, 1999 y Ødegaard, 1992 determinaron que la mayor concentración de fósforo corresponde a la fracción soluble (Tabla 4.3). Ello concuerda con los estudios realizados por Thiem (1999) en cuatro plantas de Alemania donde se determinó que la mayor concentración de fósforo se encuentra en las partículas menores de 0.1 μm (Tabla 4.4).

Tabla 4.3. Datos de distribución de fósforo asociado con la fracción filtrable. Adaptada de Marquet, 1999 y Ødegaard, 1992.

Tipo de Muestra	concentración mg/l	Porcentaje (%) de fósforo retenido en un intervalo de tamaño, μm				
		<0.1	>0.1<1	>1<3	>3<5	> 5
Agua residual	3.5-8	15-36	0.5-5.0	18-32	3.3-13	24-53
Primario químico	1.5-5	16-53	10-67	1-15	3-8	3.5-26
Filtros rociadores	0.5-3.5	53-80	11-15	0.5-17	10-35	8.5
Efluente secundario	0.5-2.5	7-83	6.5-30	1.5-26	4-14	7.5

Por otra parte, la distribución del fósforo también depende del proceso. Ødegaard, 1998; Lartiges *et al.*, 2001 y Thiem, 1999, determinaron que del 35 al 80% del fósforo se encuentra asociado con sólidos en efluentes primarios mientras que en efluentes secundarios el valor va de 54 al 81%.

Tabla 4.4. Contenido de fósforo en agua residual y tratada para cuatro plantas de Alemania. Fuente: Thiem, 1999.

Tipo de proceso	SS < 0.1 μm	Fósforo		
		total	< 0.1 μm	P/SS
	mg/l	mg/l	%	$\mu\text{g}/\text{mg}$
Agua residual	1540	36.8	79	19
Sedimentación primaria	143-211	8-9	35-67	23-28
Sedimentación secundaria	6-40	0.5-2	54-81	34-48

Respecto del contenido de nitrógeno, Munch. *et al.*, 1980; Marquet, 1999; Hatukai *et al.*, 1997; Neis y Thiem, 1997 y Ødegaard, 1997, determinaron que del 75 al 85% se relaciona con partículas menores a 0.1 μm en el agua residual cruda y tratada. Es decir, el nitrógeno se encuentra básicamente en las partículas solubles. La Tabla 4.5 presenta el contenido de nitrógeno en cada intervalo de tamaño.

Tabla 4.5. Contenido de nitrógeno en el afluente de acuerdo con el tamaño de partícula

Tamaño	Contenido de N % masa seca	Tamaño	Contenido de N % masa seca
Sedimentable	4	Coloidal	4
Supracoloidal	7	Disuelta	1

4.1.4 Tamaño de partícula de metales pesados

De acuerdo con Levine, 1985 y 1991, los metales pesados pueden ser fáciles de evaluar a partir del tamaño de la partícula. Lartiges *et al.*, 2001, encontraron que la fracción supracoloidal (1-100 μm , Boller *et al.*, 1998) y coloidal (0.001-1 μm Boller *et al.*, 1998) contiene prácticamente la totalidad de Cu, Cr, Zn, y Cd, mientras que Hatukai *et al.*, 1997, especifican que la mayor concentración de Mg, Ca, Na, Cu y Zn se presenta en las partículas coloidales dado que éstas tienen una gran capacidad para absorber contaminantes y acarrear elementos trazas. Así mismo, Kavanaugh *et al.*, 1978 observaron que los metales pesados se absorben sobre la superficie de las partículas coloidales y, por esta razón, las partículas medida en el tamaño < 0.3 μm puede dar información más relevante que un análisis de metales en la fase suspendida. Finalmente, estudios adicionales realizados en lixiviados por Park en 1999 se determinó que los metales Cu, Pb y Cd están relacionados con partículas < 8 μm . Por estas

asociaciones es posible suponer que se puede evaluar el contenido de metales a través de la distribución del tamaño de partícula.

4.1.5 Tamaño de partícula y microorganismos

Como se mencionó, la fracción orgánica medida en los sólidos suspendidos totales incluye a los protozoarios, algas, bacterias (solas o aglomeradas), productos de desecho y otros fragmentos. Sin embargo, no mide a todos pues se escapa la fracción menor a 1.2 μm . El uso de la medición del tamaño de las partículas permite obtener información de todos estos sólidos si se logra establecer correlaciones con los parámetros de interés (Ran *et al.*, 2000). Por ejemplo, Boller y Blazer en 1997, determinaron una relación entre el número de partículas y el contenido de microorganismos en plantas con procesos de tratamiento biológico, en Alemania. Durante este estudio se observó que cuando hay una alta remoción de partículas < 8 μm existe una alta reducción de microorganismos. Además se estableció la correlación expresada como microorganismos (mL/L) = 0.166*N (mL/L) + 4225, ecuación que puede utilizarse tanto para influentes como para efluentes.

Ødegaard, 1992 demostró que efluentes cuyo tamaño de partícula remanente es menor a 1 μm , tienen una buena remoción de bacterias, aunque no señala el porcentaje de remoción alcanzado.

Lartiges *et al.*, 2001; Elvers, 1999; Hall y Croll, 1997, realizaron estudios en agua potable donde relacionaron el tamaño de partícula con quistes de *Giardia murris* (con tamaño de 3-9 μm ,) y *Cryptosporidium parvum* (2-5 μm). Con esta información se diseñan los sistemas de filtración para agua potable en los Estados Unidos de Norteamérica, con la finalidad de eliminar toda probabilidad de encontrar estos dos tipos de microorganismos en el agua de consumo (Broadwell, 2001).

Otro problema es el de los helmintos cuya remoción se produce al remover los SST del agua, ya que los helmintos son también partículas con tamaño de 20 a 80 μm y, además, se adhieren a éstas. A pesar de ello, el análisis de la distribución del tamaño de partículas no ha sido aplicado para estudiar y optimar procesos que remueven este tipo de patógenos aunque se ha señalado su utilidad para obtener mejores resultados en los procesos de separación de sólidos (Levine, 1995 y Metcalf & Eddy, 1996).

Para efluentes destinados a riego agrícola, Adin (1999) recomienda que los parámetros de calidad que deban ser medidos en el agua residual sean el número de partículas y su distribución, SST, turbiedad, conteo de algas, conteo de microorganismos patógenos, material disuelto y otros parámetros "de menor importancia" como la conductividad, la temperatura, el oxígeno disuelto, el carbono orgánico total, la demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno.

Desde otra perspectiva, la determinación del tamaño de las partículas es muy importante en un efluente destinado al riego agrícola dado que los sólidos pueden

obstruir o tapar los sistemas de riego (principalmente si se realiza por aspersión), o el propio suelo (Levine, 1991 y Adin, 1999).

4.1.6 Importancia del tamaño de partícula en el desempeño de los procesos fisicoquímicos

En los procesos fisicoquímicos, la eficiencia de remoción de las partículas (en cada intervalo) varía considerablemente, particularmente durante la etapa de coagulación. Adin 1999 y Hall y Croll, 1997 consideran al tamaño de la partícula como uno de los parámetros que más influye en la desestabilización de la suspensión coloidal.

Adin, 1999; y O'Melia *et al.*, 1997 y Lawler, 1997 determinaron que la demanda de coagulante aumenta con un incremento en el porcentaje de partículas muy pequeñas en la suspensión (partículas coloidales).

Tchobanoglous, 1995 y Levine (1991), concluyen que los gradientes en la mezcla rápida y lenta, así como los tiempos de contacto recomendables, se ven considerablemente afectados por el tamaño de la partícula, mientras que Neis y Thiem (1997) indican que el conocimiento de la distribución del tamaño de la partícula permite conocer el desempeño del proceso y la capacidad de remoción del sistema.

Cambios significativos de la concentración de las partículas y la distribución de su tamaño, pueden observarse en diferentes pasos del tratamiento de un sistema de tratamiento primario avanzado; las partículas coloidales y supracoloidales predominan en la masa de la distribución, mientras que, después del tratamiento, el volumen de partículas disminuye, lo que permite obtener un agua de mejor calidad (Boller 1993 y Chávez y Jiménez, 2000).

4.2 Técnicas analíticas para determinar el tamaño de partícula y su distribución

Para determinar el tamaño de partícula y su distribución en medios líquidos se utilizan *técnicas de separación y medición*. Las primeras clasifican las partículas en al menos dos fracciones (fina o ligera y gruesa o pesada), para posteriormente cuantificar el material. Estas técnicas se basan en la relación del tamaño de las partículas con características físicas y químicas (masa, peso o velocidad de sedimentación). Las segundas miden el tamaño en función de diferencias físicas que caracterizan a las partículas (dimensión lineal, área superficial, volumen, respuesta eléctrica u óptica). Para su medición, las partículas no son separadas del medio que las contiene y se usan equipos complejos con características muy diversas.

4.2.1 Técnicas de separación

Las técnicas de separación incluyen mallas, membranas de filtración, sedimentación, centrifugación, fraccionamiento en campo de flujo (Fiel-Flow Fractionation) y cromatografía por filtración en gel.

4.2.1.1 Mallas (Figura 4.2).- Es la forma más antigua, simple y ampliamente usada para determinar el tamaño de las partículas. Data de los egipcios y se estandarizó en 1907 de acuerdo con Riyad and Clayton (1963), Collins (1975) y Allen, (1997). Las mallas están disponibles en tamaños que van desde 3/16 pulgadas (4.8 mm) hasta 4 cm y convienen para medir tamaños por arriba de 100 μm , de acuerdo con Wiedemann, 1998.

El proceso de separación se lleva a cabo al apilar un conjunto de mallas con aperturas de diversos tamaños ordenadas en forma decreciente en una columna. Las partículas se hacen pasar a través de las aperturas por vibración y son retenidas de acuerdo con su tamaño. El tiempo requerido para esta operación es de 20 minutos. Finalizado dicho tiempo, se pesa la proporción de la muestra retenida en cada malla (Scarlett, 1980, Allen, 1997y Ullmann; 1999). Las mallas deben ser estandarizadas y calibradas de acuerdo con el *American Society for Testing and Materials* (ASTM) y estar certificadas y fabricadas de acuerdo con la norma ISO 9002. La desventaja que presenta esta técnica es lo poco reproducible que es al usar diferentes tipos de aguas residuales y operadores de las mallas. Además tiene un bajo límite de detección.

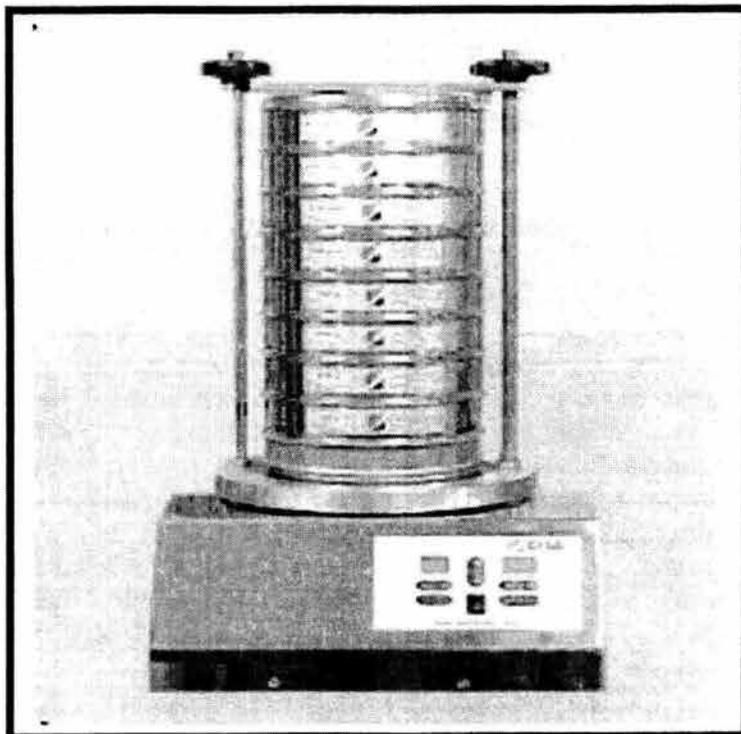


Figura 4.2. Sistema de mallas

4.2.1.2 Filtración con membranas.- Los filtros utilizados deben estar hechos de celulosa o policarbonato, con un tamaño de poro bien definido. Collins *et al.*, 1975, especifican los tamaños disponibles: 0.2, 0.3, 0.45, 0.65, 0.8, 3, 5, 1.2, 10, 50 y 100 μm . La técnica consiste en hacer pasar una suspensión diluida (agua residual o tratada) a través de una sucesión de filtros, iniciando con el de tamaño de poro mayor (Figura 4.3). Al inicio y al final de la operación, las membranas se pesan. Las fracciones de las partículas mayores al tamaño del poro corresponden a la ganancia neta en el peso del filtro dividida por el peso del material filtrado a través de la membrana (Collins *et al.*, 1975, Levine *et al.*, 1991, Allen, 1997 y 1999). El manejo de los filtros se debe hacer con cuidado ya que una de sus principales desventajas es que durante la operación se obstruyen (6.5 mg de partículas con diámetro de 6.0 μm pueden obstruir un filtro de 5.0 μm y 0.5 mg de partículas con 5.0 μm obstruyen el filtro de diámetro de 0.45 μm , Levine 1991). Otro problema es el deficiente control de calidad de su manufactura lo que provoca problemas de reproducibilidad (Levine *et al.*, 1991).



Figura 4.3. Sistema de filtración

4.2.1.3 Fraccionamiento en campo de flujo (Field Flow Fractionation).- La separación de las partículas se hace por medio de un "campo" de fuerza (gravitacional, centrífuga, eléctrica, magnética, térmica o química) que se acopla con un perfil de flujo que se emplea para lograr una migración diferencial de partículas. Las propiedades físicas de las partículas, tales como tamaño, forma y densidad, controlan la separación de las mismas. Por tanto, las partículas son separadas en diversos intervalos basados en la dinámica que las partículas adquieren en el campo de fuerza.

Las muestras se introducen dentro de canales rectangulares profundos contenidos dentro de dos platos de vidrio (Figura 4.4). Después de una

sedimentación pasiva, se bombea una solución buffer a través del canal para transportar a las partículas. Se provoca un flujo laminar para que las partículas sean separadas por tamaño conforme a las líneas de corriente. Las partículas separadas son recolectadas para su análisis (químico, bioquímico o microscópico) al final de los platos.

Con este sistema es posible separar macromoléculas, biopolímeros, partículas sintéticas y naturales y microorganismos (Levine *et al.*, 1991). El intervalo de separación varía de 1000 uma a 100 μm (Janca, 1988).

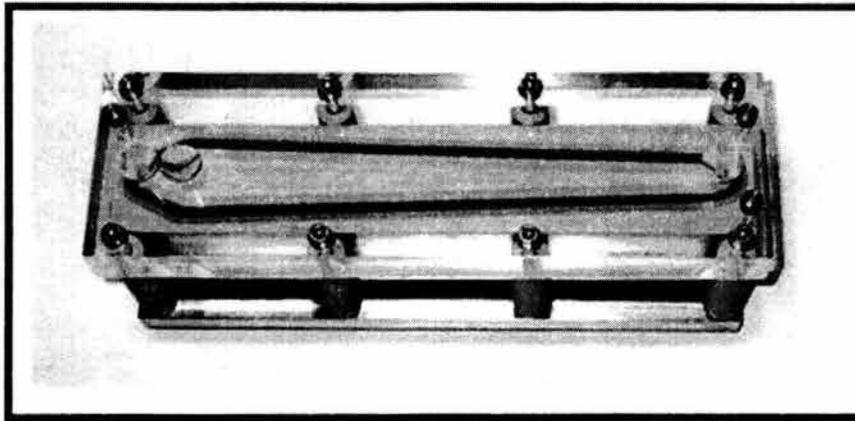


Figura 4.4. Fraccionamiento por flujo de campo

4.2.1.4 Sedimentación.- Esta técnica se basa en el comportamiento de una esfera simple bajo acción de la gravedad en un fluido de extensión infinita, es decir, utiliza la dependencia de la velocidad de sedimentación con el tamaño de la partícula (Riyad y Clayton, 1963, Ullmann, 1999, Allen, 1997). Para ello, se emplea la ley de Stokes en un flujo laminar con bajo número de Reynolds (Allen, 1997).

La sedimentación se aplica bajo dos principios. El primero se basa en el análisis del incremento de la velocidad. En este, las partículas son medidas en un punto fijo por debajo de la superficie del medio líquido en varios intervalos, o bien, diferentes puntos después de iniciada la sedimentación (Allen, 1997, Ullmann, 1999, Clyde, 1959, Levine, 1991). Para ello se usa la pipeta Andreasen (Figura 4.5), la cual consiste en tomar una alícuota del líquido en diversos intervalos, registrar las velocidades de sedimentación de las partículas y luego analizar el contenido de sólidos suspendidos totales en cada submuestra. En cada segmento se hayan partículas de un tamaño que corresponde a la velocidad de descenso dada por la ley de Stokes, ya que todas las partículas de igual tamaño caen en la punta de la pipeta al mismo tiempo (Allen, 1997). Con esta técnica es posible analizar partículas menores de 2.0 hasta 60 μm . Sus desventajas son que durante la medición puede ocurrir una floculación, la distribución del líquido se altera al momento de sacar la muestra y el volumen empleado para el análisis de los sólidos suspendidos es muy pequeño. Finalmente, el hecho fundamental de

que las partículas no son esféricas, como se supone, es un factor muy importante en la inexactitud de los resultados.

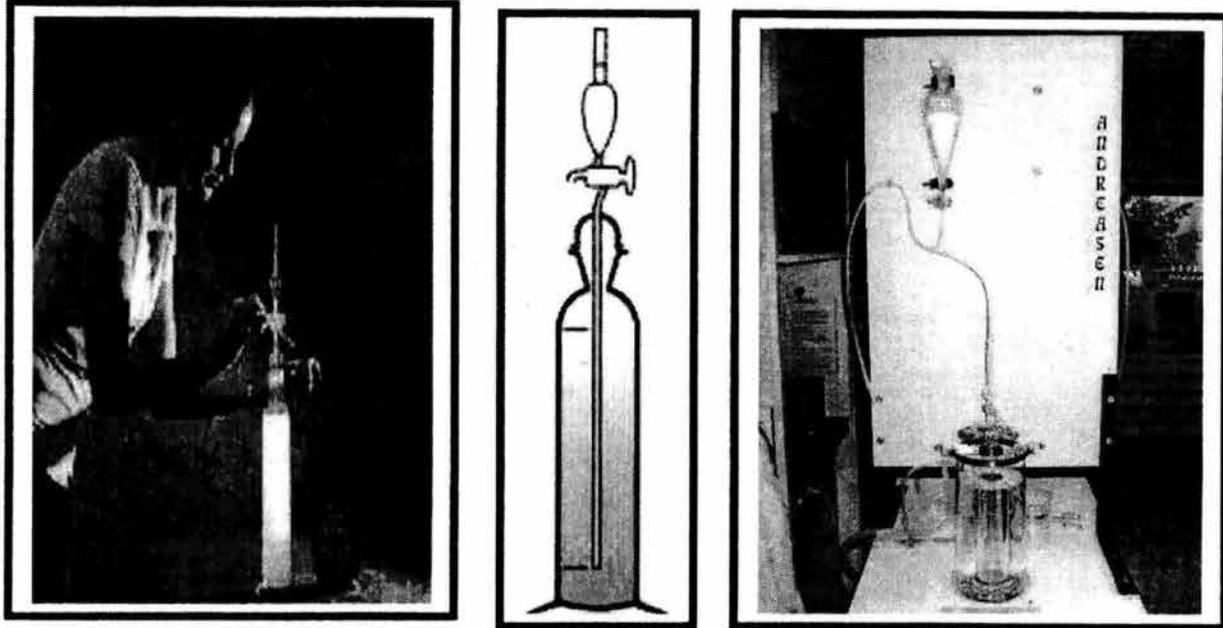


Figura 4.5. Pipeta Andreasen. (Allen, 1997).

El segundo principio de la sedimentación se basa en un análisis acumulativo. Se usa cuando la suspensión es muy concentrada y la velocidad de sedimentación de las partículas es relativamente independiente debido a la baja fricción entre los sólidos. La acumulación de partículas es medida en un punto fijo donde todas las del mismo tamaño sedimentan (Figura 4.6)

El pionero en utilizar las centrifugas fue Marshall en 1930 (Allen, 1997); sin embargo, no fue sino hasta 1955 que Whitby describió la metodología. El principio básico de la técnica consiste en medir la materia particulada que sedimenta en una distancia específica abajo de la superficie de suspensión en un tiempo determinado de centrifugación (Riyad y Clayton, 1963). La velocidad de sedimentación de una centrifuga varía con el cuadrado de la velocidad angular y linealmente con el radio del rotor (Levine, 1991). Esta técnica tiene la ventaja de separar partículas muy finas en poco tiempo y mejor resolución (Clyder y Dallau, 1959).

La principal desventaja es que se requieren numerosas réplicas para obtener una buena distribución de partículas, por lo que algunas veces suele combinarse con otros métodos que obtiene la distribución de partículas por arriba de 30 μm y las centrifugas por debajo de este valor.

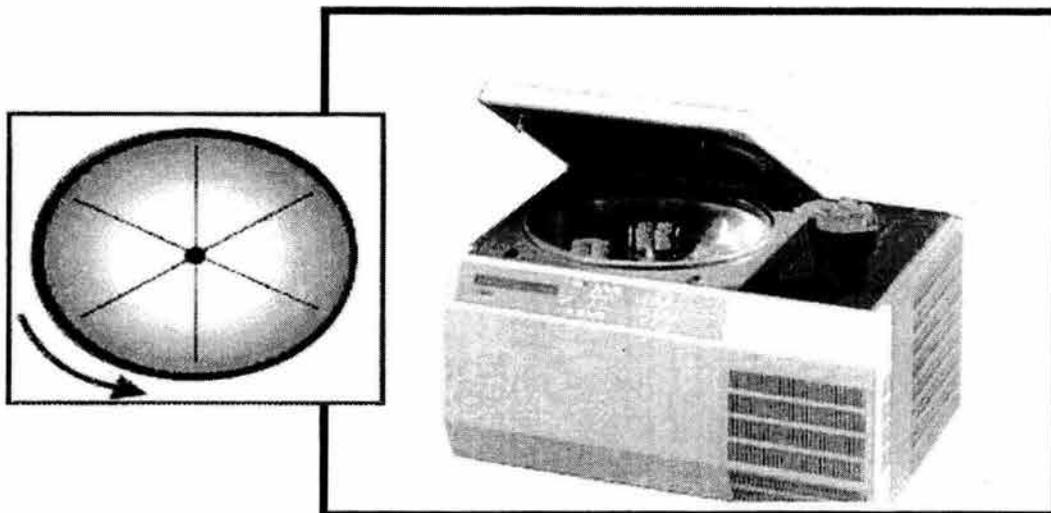


Figura 4.6. Centrifuga

En la Figura 4.7 se presentan las principales técnicas de separación de partículas así como el intervalo de medición para cada una y, como se observa, con el empleo de una sola técnica no se logra medir todos los intervalos de tamaño de partícula (de disuelta a sedimentable) por lo que siempre es necesario combinar dos o más técnicas para lograrlo.

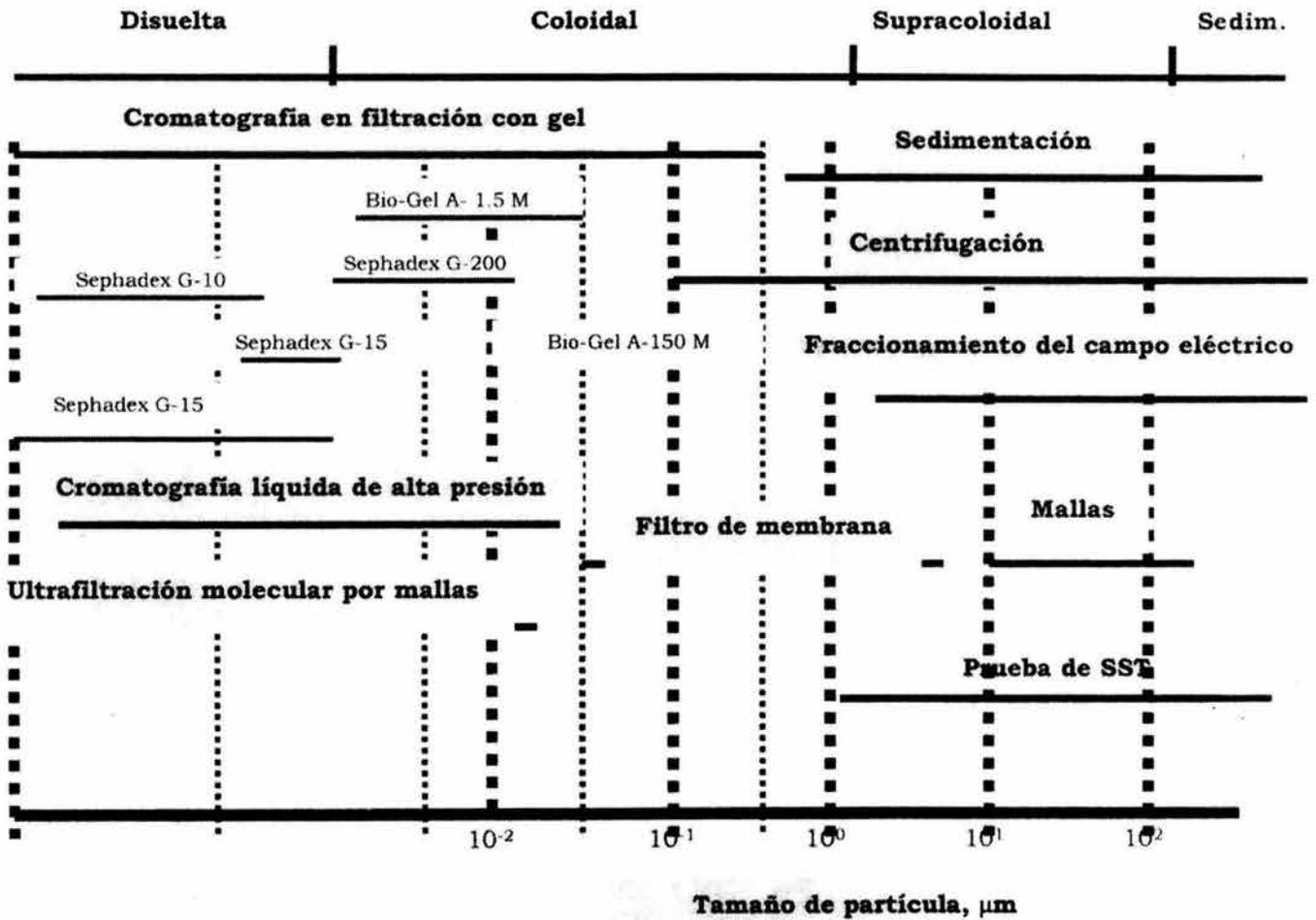


Figura 4.7. Formas de separación de las partículas mediante diversas técnicas. Fuente: Levine *et al.*, 1991.

4.2.2 Técnicas de medición

Las técnicas para medir el tamaño de las partículas se basan en diferencias físicas y son útiles en ciertos intervalos. Puesto que las partículas presentes en el agua residual tienden a ser de forma irregular, es muy difícil cuantificar su tamaño; por esta razón, éste es representado como un diámetro equivalente a la forma esférica (Allen, 1997 y Ullmann 1999, Levine *et al.*, 1991) y, debido a que la medición del tamaño de partícula se basa en diferentes propiedades de la misma, es muy difícil comparar los datos obtenidos con diversos métodos.

Las técnicas que se emplean para medir el tamaño en medios líquidos incluyen:

- a) Microscopía.- Mide la dispersión de luz visible, la transmisión de electrones, dispersión de electrones o hace un análisis de la imagen y,
- b) Contadores de partículas.- Mide la dispersión de luz láser, el bloqueo de luz o los cambios de la resistencia eléctrica.

A continuación se describe cada una de ellas.

4.2.2.1 Microscopio óptico (Figura 4.8).- Es el único método absoluto de análisis en el cual las partículas son observadas y medidas. Con este método se estima el tamaño de las partículas y su dispersión (Allen, 1997 y Ullmann, 1999). De acuerdo con Riyad y Clayton (1963) es posible medir tamaños de 0.8 a 150 μm , aunque Levine *et al.*, (1991) sugieren que el límite mínimo de detección confiable es de 1 μm .

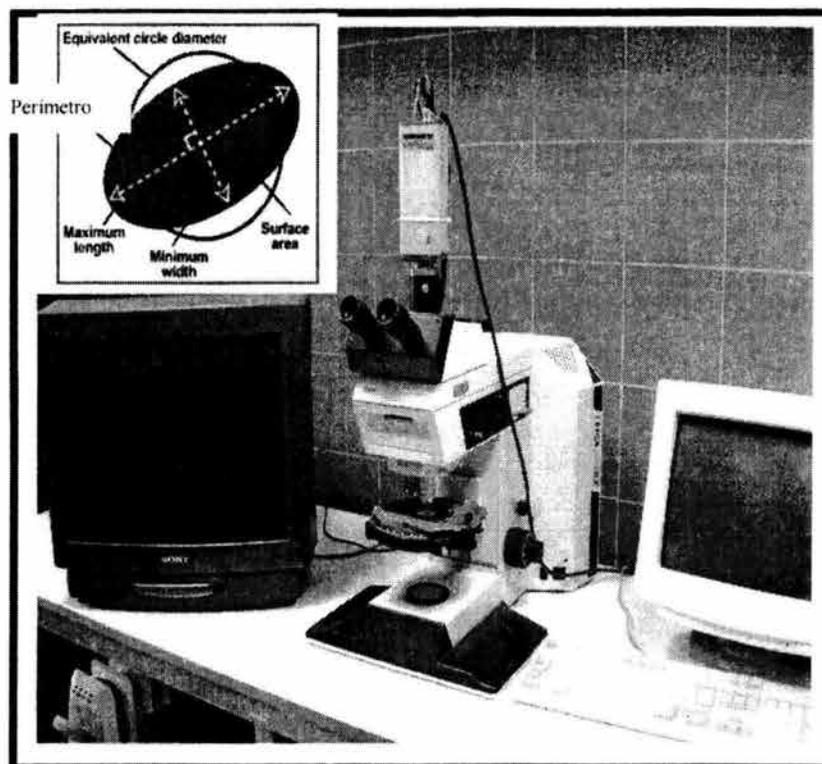


Figura 4.8. Microscopio óptico.

4.2.2.2 Sensores de zona eléctrica (Figura 4.9). El sistema fue patentado en 1949 para contar y medir células aunque en la actualidad es el más utilizado para contar partículas en agua residual (Allen, 1997, Ullmann, 1999 y Broadwell, 2000). El principio se basa en medir los cambios de la resistencia eléctrica que se producen cuando una partícula se suspende en una solución electrolítica y pasa a través de un pequeño orificio. Para ello se aplica una corriente constante o un potencial entre los electrodos en cualquiera de los lados del orificio y se mide el cambio de resistencia causada por la partícula al salir de éste. El contador electrónico amplifica y ordena los pulsos de voltaje o corriente según su tamaño y los presenta de manera ordenada.

El sistema proporciona información sobre el número, volumen y área superficial. Mide partículas con tamaños entre 0.04 y 1200 μm al usar diferentes sensores (diámetro de la apertura de tubo).

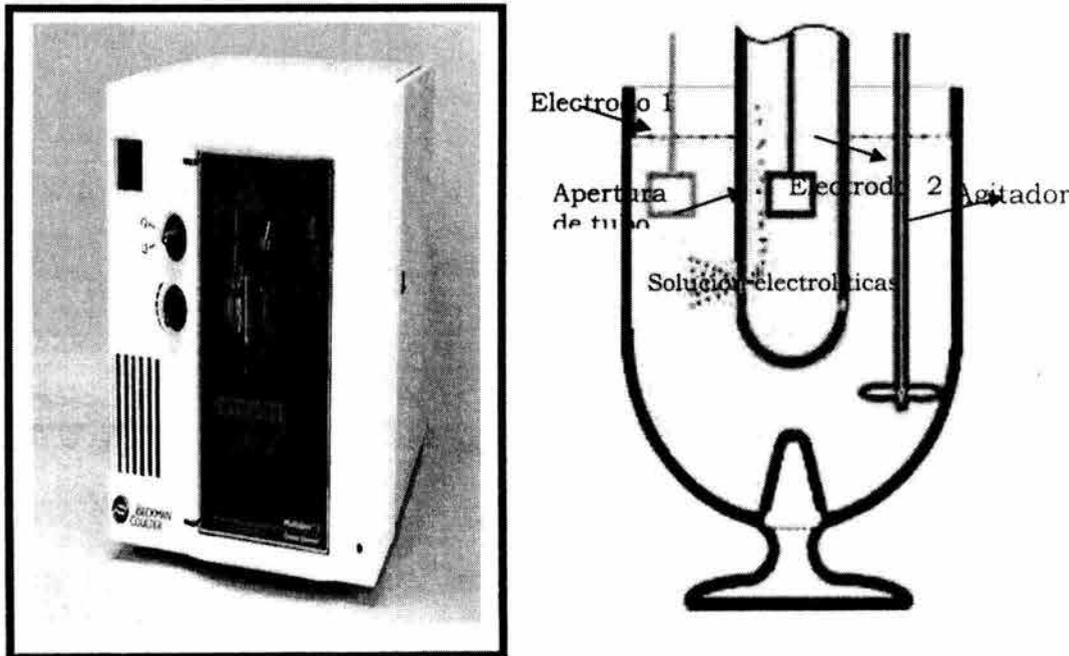


Figura 4.9. Contador de partículas con sensor eléctrico

4.2.2.3 Contador de partículas basado en la dispersión de luz.- La mayoría de los equipos emplean un rayo (láser) para iluminar las partículas. La principal diferencia entre ellos radica en cómo se mide la interacción entre la luz y la partícula. Cuando la luz incide sobre una partícula puede ocurrir que sea reflejada, absorbida o transmitida. Por ello hay diferentes tipos de sensores.

a) *Sensor de reflexión.* Mide la luz reflejada por cada partícula. Contiene un detector (fotodiodo) que convierte esta luz en energía eléctrica y la cuantifica. El detector es colocado en un ángulo de 20 a 40° respecto de la fuente de luz para

detectar la energía faltante. Las partículas son medidas por la cantidad de luz que esparce la cual es proporcional a su tamaño.

b) *Sensor por absorción de luz.*- También se conoce como sensor de extinción o de bloqueo de luz. La fuente de luz se enfoca directamente al detector. Las partículas bloquean o absorben la luz en función de su tamaño. Este sistema es muy usado en agua potable ya que tiene la ventaja de emplear un diseño óptico muy simple, fácil de construir y calibrar (Broadwell, 2000).

4.2.2.4 Contadores de partículas con luz láser (Figura 4.10).- Se basan en el principio de que las partículas de tamaño pequeño se dispersan en un haz de luz con un patrón simétrico característico. La intensidad y el ángulo de la luz dispersada es proporcional al volumen de la partícula siempre y cuando esta sea opaca (alto índice de refracción). Estos contadores utilizan una fuente de luz láser para iluminar una pequeña sección de la muestra. La luz se hace pasar a través de un orificio de aproximadamente 1x1 mm. El espesor del rayo láser es también de 1 mm por lo que el área de visión activa es de 1 mm² o menor. Durante el conteo, el rayo láser pasa a través de una ventana transparente en cualquiera de los lados de la celda. El haz ilumina el detector del lado opuesto el cual convierte la energía lumínica en energía eléctrica que es medida con un circuito electrónico.

Cada partícula produce una pulsación de salida que es proporcional en amplitud (altura) a su tamaño. Cada pulso se clasifica en un contador eléctrico de acuerdo con su tamaño se cuenta durante un período fijo de tiempo. Los sistemas basados en dispersión láser permiten conocer la distribución del tamaño de las partículas de la muestra, pero no su concentración. Miden partículas de 0.04 a 2000 μm .



Figura 4.10. Contador láser

La Tabla 4.6 presenta las diversas técnicas de separación y medición de partículas con los intervalos que pueden medir y el tipo de información que se obtiene en cada caso. En el contador Coulter, la medición proporciona información del número, volumen y área proyectada de la partícula y sirve para medir partículas de 0.06 hasta 200 μm .

Tabla 4.6. Límites de medición de las técnicas que se emplean para determinar el tamaño de la partícula

Técnicas analíticas	Intervalo aproximado del tamaño de la partícula, μm	Dimensiones
Campo de registro o de exploración		
Microscopio	Desde 1 hasta 100	Longitud, área proyectada, diámetro
Microscopio electrónico	Desde 0.001 hasta 5	
Microscopio electrónico con registro (escaneo)	Desde 0.1 hasta 100	
Sedimentación		
Pipetas	Desde 3 hasta 60	Diámetro de Stoke
Centrífugas	Desde 5 hasta 100	
Corriente de exploración (escaneo)		
Counter coulter	Desde 0.06 hasta 200	Número, volumen y área proyectada
Luz dispersa	Desde 0.3 hasta 10	Volumen y área proyectada
Dispersión con luz láser	Desde 0.001 hasta 800	
Clasificación		
Mallas	De 5 hasta 4000	Tamaño efectivo
Membranas de celulosa	De 0.2 hasta 100	Tamaño de poro

La selección de una técnica y del equipo, tanto de separación como de medición, depende en gran medida de las características fisicoquímicas del agua, del intervalo de tamaño de partícula que se requiere medir, de la rapidez con la que se quiere la respuesta, de la información que se desea obtener, del objetivo de la investigación y del costo. La Figura 4.11 presenta el costo de diferentes técnicas así como la rapidez con la que se obtiene la información. Una de las de reciente introducción para medir partículas en agua residual es la que se basa en el principio Coulter. Esta técnica permite medir partículas entre 0.06 y 200 μm , proporciona información sobre el número, volumen y área proyectada de las partículas en un tiempo aproximado de 5 min.

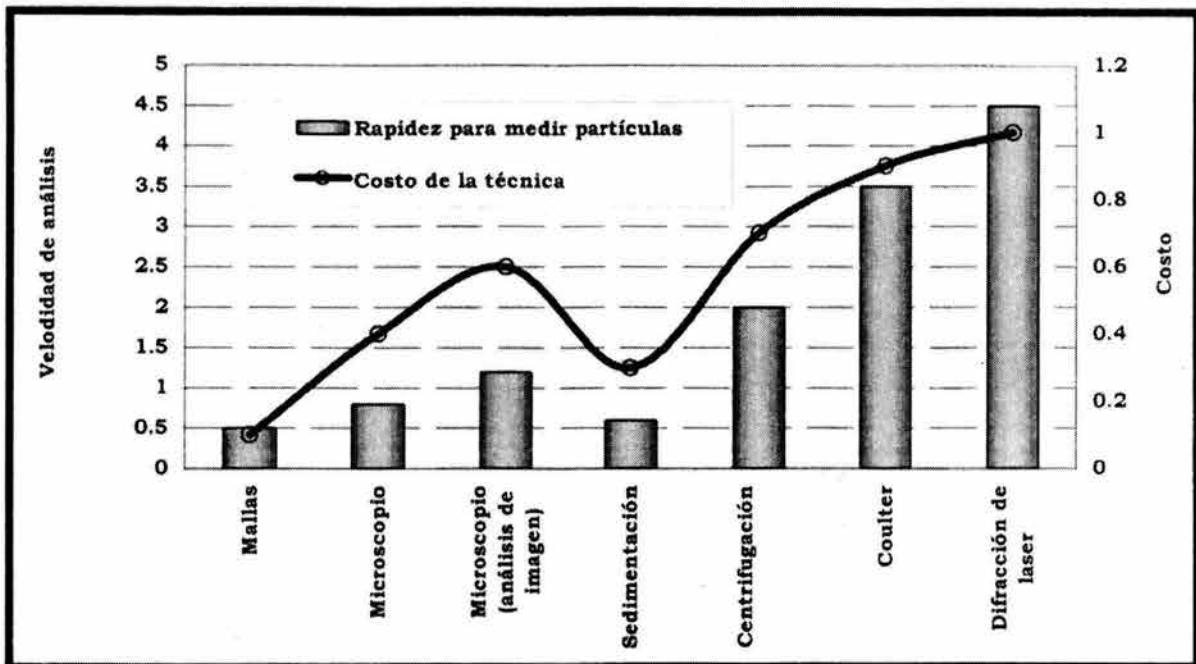


Figura 4.11. Velocidad y costo de análisis de acuerdo con las técnicas

4.2.3 Tamaño de las partículas de acuerdo con el tipo de proceso de tratamiento empleado.

En la Tabla 4.7 se presenta la distribución de los contaminantes en los intervalos de tamaños para las partículas disueltas, coloidales, supracoloidales y sedimentables en el agua residual y residual tratada mediante procesos químicos y biológicos; Se observa, que para cada intervalo de tamaño existe una variación del contenido de partículas que puede ser atribuido a la variabilidad de la calidad del afluente, las eficiencias alcanzadas por los proceso de tratamiento, fallas en la operación del sistema y el tipo de reactivos empleados (en el caso de los procesos fisicoquímicos). En otras palabras la distribución del tamaño de partícula es específica para cada tipo de agua y tratamiento al cual se someta.

Tabla 4.7. Distribución de los contaminantes en el agua residual y agua residual tratada por diversos procesos

Porcentaje de materia orgánica contenida en el intervalo de tamaño indicado, μm				Referencias
< 0.001 disuelta	0.001-1 coloidal	1-100 supracoloidal	100 Sedimentable	
Afluentes				
12-50	9-19	10-31	15-42	Balmat, 1957; Helfgott <i>et al.</i> , 1970; Hunter y Heukelekian, 1965; Munch <i>et al.</i> , 1980; Painter y Viney, 1959; Rickert and Hunter, 1971 y Walter, 1961 a y b.
Efluente primario con aplicación de químicos				
9-51 ^a	2 ^b -48	13 ^c - 34 ^c	7 ^d - 60	Munch <i>et al.</i> , 1980, Levine, 1985
Efluentes secundarios				
Lodos activados				
26 ^a - 79	2- 9 ^b	16- 49 ^c	1- 49 ^d	Rickert y Hunter, 1971, Helfgott, 1970, Levine, 1985
Filtros rociadores				
40	60	----	----	Painter, 1973
^a <0.1 μm ; ^b 0.1-1 μm ; ^c 1-12 μm ; ^d >12 μm				

4.2.3.1 Tamaño de las partículas del agua tratada mediante un proceso físico-químico

Estudios realizados por Hatukai *et al.* (1997) en una planta físico química para agua potable en Israel, demuestran que la distribución del tamaño de las partículas es una técnica importante para determinar el deterioro de la calidad del agua después de un período de almacenamiento (Tabla 4.8). Al mismo tiempo se comprobó la eficiencia de remoción de partículas cuando se aplican diversas dosis de polímero. Además, se estableció que la turbiedad, como parámetro de medición de calidad del agua, da un mayor margen de error, sobre todo para aguas con efluentes inferiores a 1 UNT.

Tabla 4.8. Contenido de partículas entre 2-5 μm determinada en diversas etapas de tratamiento

Tipo de agua	Número de partículas		Turbiedad	
	Conteo/mL	Remoción, %	UNT	Remoción, %
ARC	20580	-----	3.350	-----
Agua sedimentada	4533	77.9	0.833	75.1
Agua almacenada	7438	63.8	0.923	72.4
AR filtrada	246	98.8	0.096	97.1
Proceso Físicoquímico				
Al= 4.0 mg/	246	96.7	0.098	89.4
Al = 3.0 mg/L+PC= 0.1 mg/L	116	98.2	0.058	92.6
Al= 3.0 mg/L + PC= 0.3 mg/L	108	98.7	0.040	96.4

La determinación de la distribución del tamaño de partículas se perfila como una herramienta útil que permite predecir a través de correlaciones la eficiencia de remoción en términos de huevos de helmintos (20 – 80 μm), sólidos suspendidos totales (1.2 μm), coliformes fecales (0.7 – 1.5 μm) y *Salmonella spp.* (4-8 μm) ya que dichos parámetros son partículas que presentan un tamaño definido. De hecho, las investigaciones al respecto se han enfocado a determinar las relaciones que existen entre la materia orgánica, los nutrientes, los SST, y algunos microorganismos. La distribución de estos parámetros depende de diversos factores, entre los que destacan la calidad del influente, el tipo de proceso empleado y la técnica o método que se empleó para su determinación, por lo que dichas asociaciones deben hacerse para cada caso en particular.

Dada la importancia que tienen los microorganismos y los sólidos suspendidos totales como parámetros de evaluación del desempeño de los procesos de tratamiento de agua destinada para riego agrícola, es necesario realizar una serie de monitoreos, tanto en el influente como en el efluente, esta condición representa un alto costo en la operación ya que tan sólo la determinación del contenido de huevos de helmintos y coliformes fecales tiene un costo de \$700 y \$230 por muestra respectivamente, mientras que el costo de los sólidos suspendidos totales es de \$125 y, además, los resultados estarán disponibles en 5 y 1 día y 3 horas en cada caso, tiempo en el cual no es posible realizar alguna modificación en las operaciones involucradas en el sistema de tratamiento.

Finalmente, con la determinación de la distribución del tamaño de partícula se puede determinar la afectación que tienen los diversos factores que intervienen en el desempeño del proceso de tratamiento, con la ventaja de poder hacerse en línea.

5. METODOLOGÍA

5.1 Sitio de Muestreo del Agua Residual

Todas las muestras fueron tomadas del Emisor Central (Figura 5.1) localizado en El Salto, Tepeji del Río, Hidalgo. Dicho Emisor conduce la mayor parte del agua negra de la Ciudad de México.

El muestreo se realizó de manera sistemática, una vez por semana (martes), a la misma hora (8:00-8:15 a.m.), durante la época de estiaje (Octubre a Marzo) del año 1999 a 2002, en un punto fijo (en el centro del Emisor) y a una profundidad de 2 m.

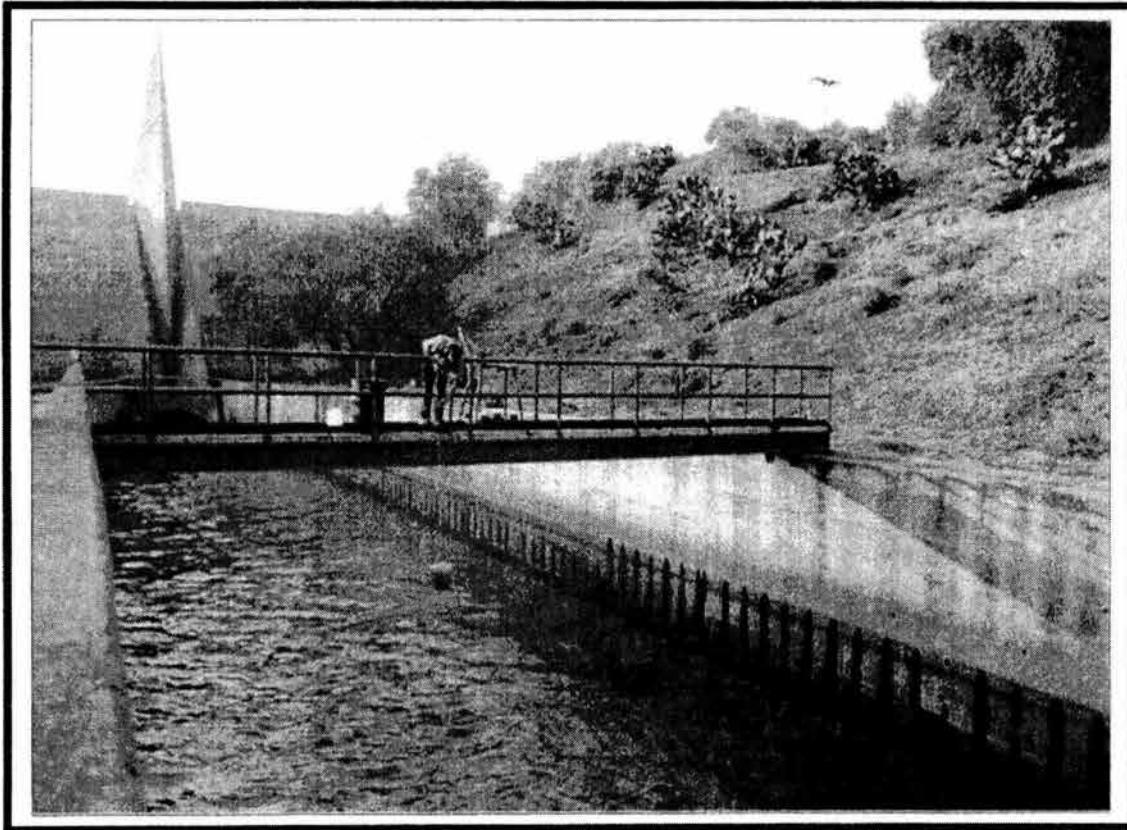


Figura 5.1. Lugar de toma de la muestra del agua residual; Emisor Central Profundo (El Salto, Tepeji del Río, Hgo).

El volumen de muestra varió de 50 a 70 L dependiendo de las necesidades de cada una de las etapas experimentales. El agua colectada se depositó en un recipiente de plástico previamente lavado. Antes de su uso se homogeneizó siempre el contenido (Figura 5.2).



Figura 5.2. Homogenización del agua residual

5.2 Toma y Conservación de Muestras para la Evaluación de Calidad del ARC y ART

5.2.1 Mediciones en campo

Se preparó una bitácora con un formato en donde se registraron las muestras con sus claves correspondientes. Adicionalmente se anotó el lugar, fecha y hora de muestreo, incluyendo otras observaciones relacionadas con el desarrollo de las pruebas y su respectivo análisis. Después de homogeneizar el agua residual y el agua la tratada, se tomaron 200 mL de muestra de cada una para medir *in situ* el pH, temperatura, conductividad eléctrica, alcalinidad y turbiedad.

5.2.2 Conservación de la muestra

Uno de los principales aspectos en el que se puso en cuidado especial fue la conservación de las muestras, ya que la distribución del tamaño de la partícula se modifica con el tiempo. Esto es también señalado por Levine *et al.*, 1991, APHA, AWWA, WEF, 1998 y Lars, 1995. Por este motivo después de finalizar la etapa de sedimentación, se tomaron aproximadamente 250 mL de muestra (Figura 5.3a), en envases previamente lavados y etiquetados, a los cuales se les añadieron 330 μ L de formaldehído por cada 100 mL de muestra, con el fin de preservar la muestra y medir la distribución del tamaño de partícula.

En otro envase, más pequeño, (Figura 5.3b) se colocaron aproximadamente 50 mL de muestra, sin aplicar formaldehído, esta muestra se destinó para el análisis de N-NH₃ y la DQOt.

Para los análisis bacteriológicos, se emplearon bolsas de plástico estériles (Figura 5.6c), que contenían una pastilla de tiosulfato de sodio, como preservador; en estas bolsas se depositaron aproximadamente 50 mL de agua (cruda o tratada).

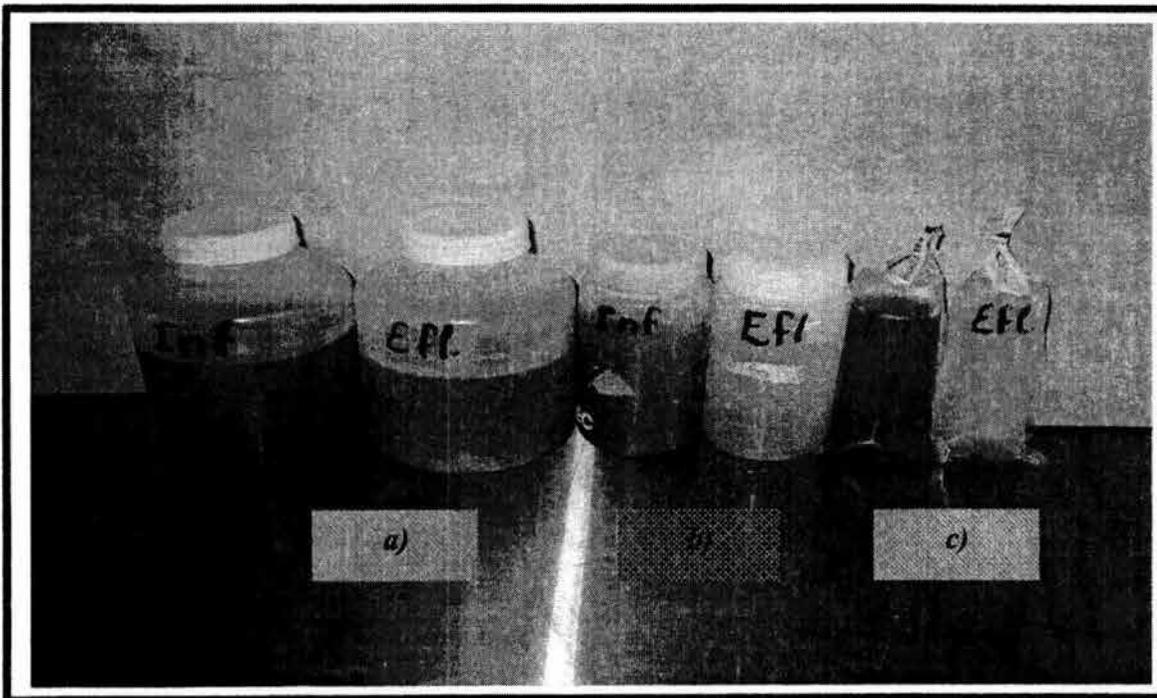


Figura 5.3. Envases utilizados en el muestreo para determinar los parámetros de a) Tamaño de Partícula, b) fisico químicos y c) microbiológicos

Todos los envases y bolsas que contenían las muestras fueron transportados en una hielera a 4°C (Figura 5.4) para su posterior análisis en laboratorio (85 km de distancia de las instalaciones del Instituto de Ingeniería).

La conservación de la muestra destinada para determinar el contenido de huevos de helmintos, se emplearon garrafones de plástico aforados, en donde se recogieron 5 L de muestra, tanto de agua residual como tratada (Figura 5.5). Estos envases fueron previamente desinfectados y etiquetados.



Figura 5.4. Sistema para preservar las muestras

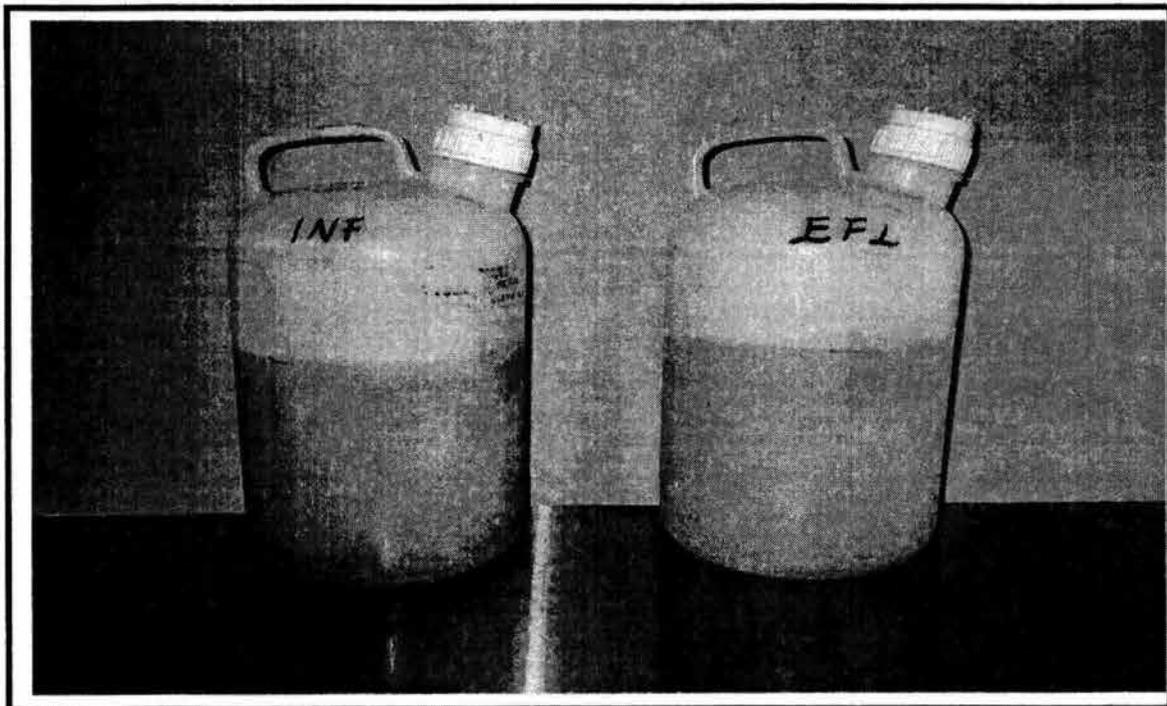


Figura 5.5. Envases de muestreo para análisis de huevos de helminto

5.3 Métodos y Técnicas de Análisis

Las técnicas y métodos utilizados se presentan en la Tabla 5.1. Como se observa, la mayoría corresponde a las señaladas en el APHA, AWWA, WEF, 1998. En cada una de las etapas de estudio se determinó, como parámetro de respuesta, el tamaño y el tamaño de las partículas. Aunado a esto y con la finalidad de determinar ciertas distribuciones, también se evaluaron parámetros fisicoquímicos como SST, N-NH₃ P-PO₄, DQOt y turbiedad y parámetros microbiológicos como el contenido de huevos de helmintos, coliformes fecales y *Salmonella spp.*

Tabla 5.1. Métodos y técnicas para la determinación de parámetros de evaluación

Parámetro	Método	Técnica
Fisicoquímicos		
SST	Gravimétrico	*2540D
Turbiedad	Nefelométrico	*2130B
Conductividad	Conductímetro	*2510B
Temperatura	Termómetro	*2550B
Alcalinidad	Titulométrico	*2320B
pH	Potenciométrico	*4500-HB
N-NH ₃	Colorimétrico	Salicilato, HACH (*4500-Norg B)
P-PO ₄	Colorimétrico	Molibdeno-vanadio, HACH (*4500-PC)
Microbiológicos		
Coliformes fecales	Membrana	NMX-AA-042-87
<i>Salmonella spp</i>	Filtro en membrana	Filtro de membrana
Huevos de helminto (únicamente a las mejores condiciones de tratamiento)	Flotación por diferencia de densidades y función difásica	NMX-AA-113-99

* APHA, AWWA, WEF, 1995

El conteo de tamaño de partícula se determinó con dos técnicas. Para la técnica de corriente eléctrica se contó con un equipo Coulter Counter ® Multisizer™ III, (Figura 5.6), con él se determinó el número y volumen, el tamaño y la distribución de la partícula (DTP). El equipo contaba con tres tubos que presentaban un orificio de 30, 100 y 200 µm de diámetro respectivamente; esto con la finalidad de cubrir el intervalo de tamaño de partículas de coloidales hasta sedimentables. Las partículas se analizaron en cuatro intervalos de tamaño con límites (a)<1.5, b)<8, c)<20, d)20-<80 µm. Los límites a, b y d corresponden al tamaño de los coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helminto, respectivamente. Para analizar la muestra, se diluyeron de 1 a 5 mL de muestra

(de acuerdo con la calidad del influente o efluente hasta alcanzar entre 5 y 10% de concentración de la muestra) en 100 mL de solución electrolítica.

La solución electrolítica empleada fue ISOTON II (basada en 0.9% de sales, Allen, 1997), la cual se filtró previamente a través de una membrana de 0.22 μm . Para examinar el tamaño de las partículas, se hicieron pasar 500 μL de la muestra en el contador, repitiendo la medición cinco veces en cada caso.

El conteo se realizó entre 1 y 8 h después del tratamiento.

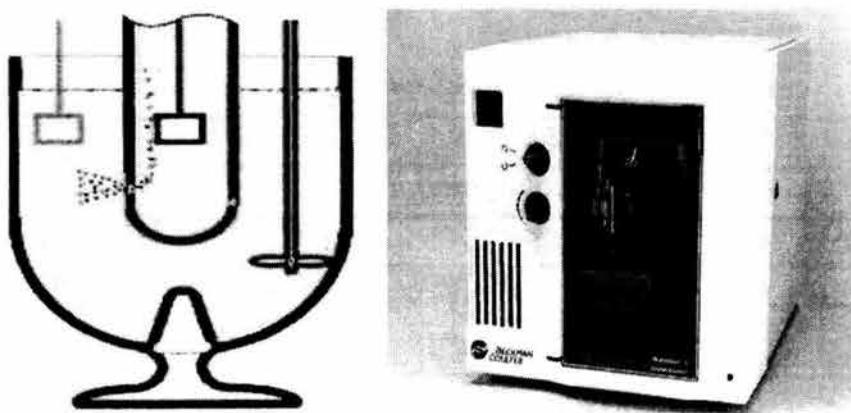


Figura 5.6. Contador de partículas, Coulter Multisizer III.

Para determinar el tamaño de la partícula en el contador de Sensor eléctrico se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Estandarizar las curvas para cada uno de los tubos (30, 100 y 200 μm de diámetro); para ello se emplearon materiales estandarizados de acuerdo con la ASTE de 2, 20 y 40 μm respectivamente.
- Determinar el coeficiente de variación para cada uno de los tubos empleados.
- Añadir el volumen correspondiente de ISOTON II a un vaso (o copa específica del aparato) y agregar un volumen de muestra conocida.
- Agitar la muestra suave e ininterrumpidamente dentro del dispositivo de medición.
- Abrir la llave de paso para iniciar el conteo de partículas de acuerdo con el volumen que se deseó medir y, finalmente,

- Una vez que el resultado del conteo de partículas sea mostrado en la pantalla de control del contador, enviar todos los datos a la memoria de la computadora y guardarlos.

En el caso de la técnica con luz láser, se contó con un contador Coulter LS 230. El procedimiento para determinar la partícula consistió hacer pasar un volumen determinado de muestra hasta obtener una obscuración del 70%. Posteriormente, se presentaba la distribución del tamaño de partícula en la memoria de la computadora y se guardaba. Previo a la determinación, se realizaba una curva estándar; para ello se emplearon materiales estandarizados de acuerdo con la ASTE de 100 μm .

5.4 Simulación del Proceso físico-químico en la Prueba de Jarras

5.4.1 Conversión de rpm a gradiente, s^{-1}

Previo al estudio, fue necesario calibrar el equipo de prueba de jarras y realizar la conversión de velocidad (rpm) a gradientes (s^{-1}). Esto se hizo con la metodología establecida por Kawamura (1991) la cual establece la ecuación

$$G = \sqrt{\frac{C_D * A * v^3}{2 * \mu * V}} \quad (1)$$

donde

C_D : Coeficiente de arrastre = **2.0**

A: Área transversal de las paletas; igual a $A = D * h = 0.05\text{m} * 0.03\text{m} = \mathbf{1.5 * 10^{-03} \text{ m}^2}$

v: Velocidad relativa de la paleta con respecto al fluido, que se encuentra en el intervalo de 0.5 a 0.75. Para este caso se empleó el valor de **0.5**

μ : Viscosidad cinemática del fluido; igual a **$1.003 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$**

V: Volumen del tanque de sedimentación; igual a **$1000 \text{ mL} = 1 * 10^{-03} \text{ m}^3$**

n: rpm/60 s

Por tanto

$$G = \sqrt{\frac{2 * 1.5 * 10^{-3} \text{ m}^2 * \left(\frac{1}{2} * \pi * D * n\right)^3}{2 * \mu * V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{0.003 \text{ m}^2 * \frac{1}{8} * \pi^3 * (0.05)^3 * n^3}{2 * 1.003 * 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1 * 10^{-3} \text{ m}^3}}$$

$$G = \frac{1.4534 * 10^{-6} * n^3}{2.006 * 10^{-9}}$$

$$G = 724.5314 * n^3$$

$$G = 26.917 * n^{3/2}$$

La Figura 5.7 presenta la curva de calibración realizada para la prueba de jarras que se usó durante el estudio. A partir de ella se establecieron los gradientes máximos permitidos por la prueba.

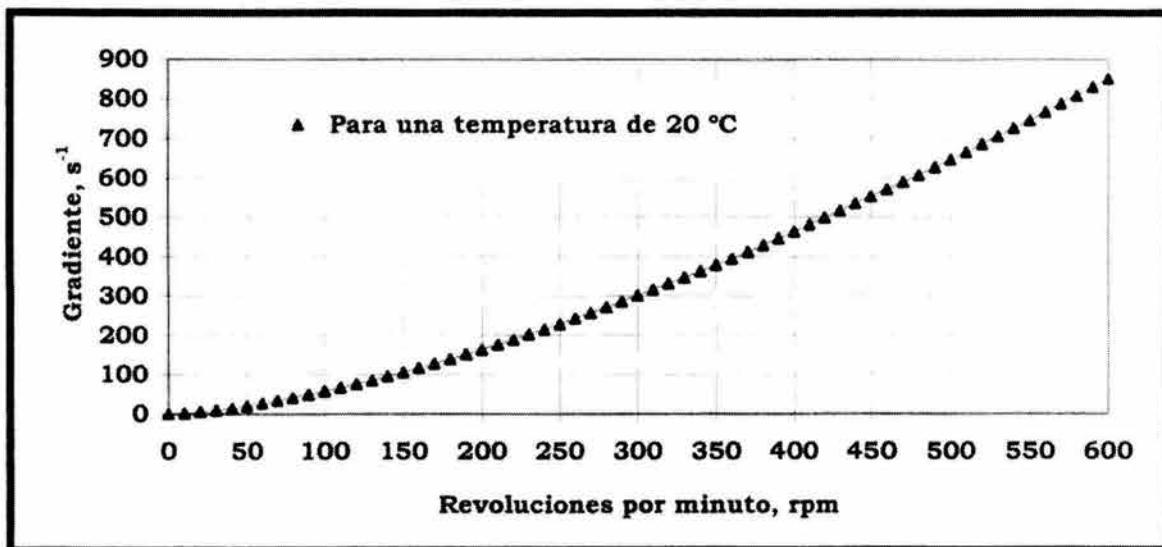


Figura 5.7. Curva de calibración de la velocidad del gradiente

5.4.2 Realización de las pruebas de jarras

La simulación de la coagulación, floculación y sedimentación del proceso de tratamiento físico-químico se realizó *in situ* con un equipo de prueba de jarras con floculador automatizado (Figura 5.8), de seis vasos de precipitados, cada uno con capacidad de 1 L. Las pruebas de jarras se llevaron a cabo de la siguiente manera:

- Se programó el equipo a las revoluciones por minuto y tiempos de mezcla deseados, para las etapas de coagulación, floculación y sedimentación.
- Se homogeneizó el agua residual durante algunos minutos antes de vaciar 1000 mL en cada vaso de precipitado.

- Se aplicó el coagulante de acuerdo con los tratamientos establecidos para el estudio.
- Se adicionó 0.5 mg/L de polímero Prosifloc A-252.
- Se dejó sedimentar durante el tiempo de 5 minutos.

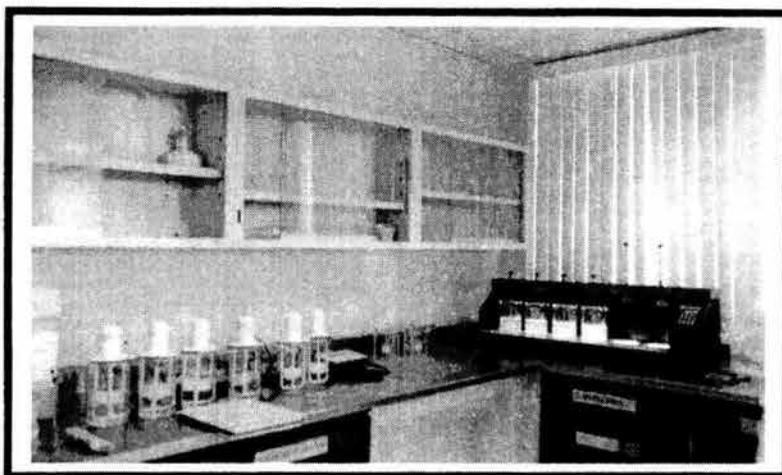


Figura 5.8. Equipo de Prueba de jarras

En todas las etapas, las muestras para determinar los huevos de helmintos fueron obtenidas en una prueba de jarras. En cada tratamiento se producían un total de 5 litros de agua residual tratada.

5.5 Planeación de la metodología experimental

La metodología experimental se dividió en cinco etapas que se diferencian por el objetivo que se persigue en cada una de ellas. Las etapas que constituyen el estudio se describen a continuación en la Figura 5.9. Cabe hacer mención que sólo en los estudios correspondientes a la etapa 2 hasta la 4 se determinó el tamaño de partícula con las dos técnicas pero en fechas diferentes.

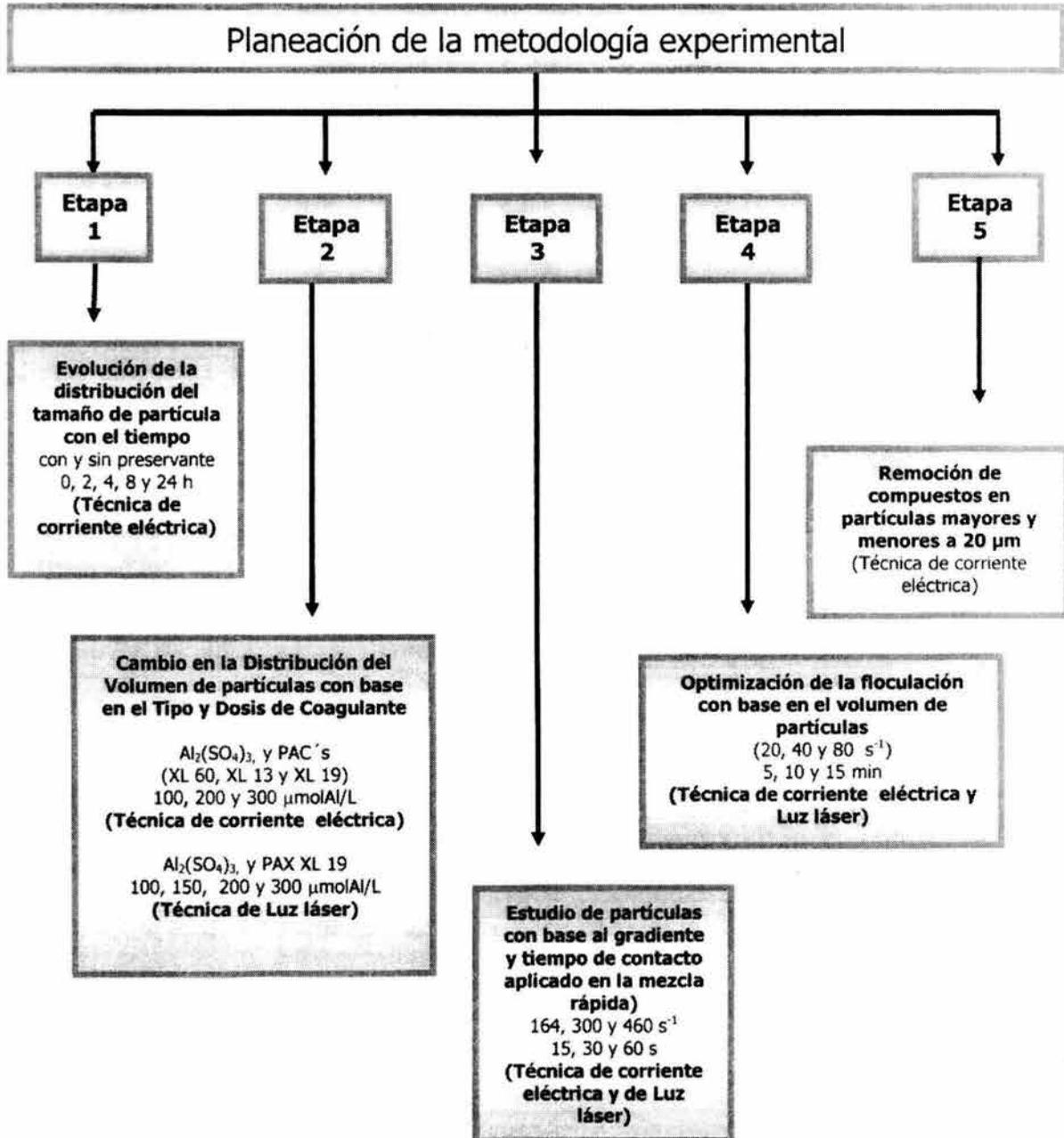


Figura 5.9. Esquematzación de la metodología experimental.

5.5.1 Evolución de la distribución del tamaño de la partícula con el tiempo con y sin preservador

En la primera etapa, el efecto de la aplicación de formaldehído tanto en el agua residual cruda como en la tratada mediante un proceso físico químico. El preservador utilizado fue formaldehído de acuerdo con lo sugerido por Leigh y Hyne (1999), Ongley *et al.* (1992), Lars (1998) y Kellie *et al.* (1999) para estudios de tamaño de partícula.

Este estudio se realizó en la ciudad de Oulú, Finlandia, como parte de una estancia académica entre los meses de mayo a septiembre de 2000. Posteriormente, se repitió el estudio en la Ciudad de México durante los meses de marzo a abril del 2001, para confirmar la validez de los resultados.

La metodología consistió en someter el agua residual a un tratamiento físico-químico aplicando una dosis de 200 $\mu\text{molAl/L}$ de un policloruro de aluminio.

Las condiciones empleadas tanto para la coagulación como para la floculación son las que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Condiciones de trabajo empleadas en las prueba de jarras

Etapa	Tiempo	Gradiente, s^{-1}
Coagulación	30 s	380
Floculación	10 min	50
Sedimentación	5 min	0

Al finalizar la etapa de sedimentación en cada muestra se tomó un volumen de 200 mL del sobrenadante del agua residual tratada. Este mismo volumen se tomó del agua cruda. En ambos casos, a la mitad del volumen (100 mL) se les añadió 330 μL de formaldehído. El tratamiento se realizó por triplicado.

A cada muestra se le determinó la distribución del tamaño de partícula (DTP) en intervalos de tiempo de 0, 2, 4, 8 y 24 horas para partículas con diámetros de 0.7 a 7.5 μm . Durante esta etapa experimental 1, se analizaron 10 intervalos de tamaño con límites de 0.7, 1, 1.2, 1.5, 1.9, 2.8, 3.7, 4.5, 5.7 y 7.5 μm . El análisis de la distribución del tamaño de partícula se cuantificó por triplicado en cada muestra.

Por otro lado, para los estudios que se realizaron en la ciudad de México se utilizó un procedimiento similar de las condiciones de operación, tratamiento y determinación de tamaño de las partículas establecido previamente. Adicionalmente, a cada muestra se le determinó el contenido de coliformes fecales en los intervalos de tiempo de 0, 2, 4, 24 y 48 horas.

5.5.2 Estudio del efecto del tipo y dosis de coagulante aplicado en la remoción de partículas

Para determinar dicho efecto, se emplearon cuatro coagulantes: sulfato de aluminio y tres PAC's. Estos últimos con distintas basicidades [Pax xl-60 (basicidad baja, 40 %), Pax xl 13 (media, 65 %) y Pax xl-19 (alta 85 %)]. Cada coagulante se aplicó en tres dosis distintas (100, 200 y 300 μmol de Al/L). Estas condiciones se utilizaron cuando se empleó la técnica de corriente eléctrica.

Por otro lado, con la técnica de luz láser se estudió sólo el sulfato de aluminio y el Pax xl 19 con las mismas dosis (100, 200 y 300 μmol de Al/L)

Los estudios se llevaron a cabo en el período correspondiente a los meses de Octubre de 1999 (luz láser) y Febrero del 2001 (corriente eléctrica).

La simulación del proceso fisicoquímico se efectuó en pruebas de jarras. Se programó el equipo para proporcionar los gradientes y tiempos establecidos previamente en la Tabla 5.2, esto fue tanto para la etapa de coagulación, como para la de floculación y la de sedimentación.

La principal variable de respuesta fue el cambio del tamaño de partícula y la Distribución del Tamaño de Partículas (DTP). Además, tanto al agua residual como a cada uno de los tratamientos, se les determinaron los parámetros previamente establecidos.

5.5.2.1 Método de análisis de datos

Durante esta etapa se utilizó un diseño de experimentos de bloques completos y de efectos fijos de tal manera que se pudiera controlar sistemáticamente la variabilidad producida por diversos factores de confusión.

El modelo estadístico para el diseño de efectos fijos con bloques completos al azar fue

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde

Y_{ij} : Cambio del contenido de partícula en volumen (y para cada uno de los parámetros de respuesta)

μ : Valor promedio del volumen de las partículas

τ_i : Efecto que el coagulante tiene sobre el volumen de partículas (y cada uno de los parámetros de evaluación)

β_j : Efecto que la dosis de coagulante tiene sobre el volumen de la partícula (y cada uno de los parámetros de evaluación)

ϵ_{ij} : Error aleatorio para cada etapa (disposición del dato)

5.5.3 Estudio de la Remoción de Partículas con base en el Gradiente y Tiempo de Contacto Aplicados durante la Coagulación

En la tercera etapa se estudiaron los gradientes de 160, 300 y 460 s⁻¹ y los tiempos de contacto de 15, 30 y 60 s para la coagulación. La selección de estos gradientes y tiempos fueron tomados de (Eckenfelder, 1995, Park, 2000, Dilejs, 1997, Dégremont, 1979, Rissini *et al.*, 1999 y Han y Lewler, 1992, Fetting *et al.* 1990, Metcalf y Eddy, 1995, Odergaard, 1998 y Al-Malack *et al.* (1999) como las condiciones óptimas, mínimas y máximas para que el proceso de coagulación del sistema fisicoquímico funcione, también se tomó en consideración límites máximo de gradiente y tiempo de la prueba de jarras. En esta etapa se aplicó una dosis de 100 µmAl/L de coagulante de basicidad alta (Pax xl 19) de acuerdo con las mejores condiciones determinadas en la etapa 2. La floculación fue simulada aplicando un gradiente de velocidad de 50 s⁻¹ con un tiempo de contacto de 10 min en todos los casos y como ayudante de floculación, se aplicó 0.5 mg/L de polímero aniónico de alto peso molecular (prosifloc A-252), dosis óptima económica obtenida por Jiménez *et al.* 1997. En la etapa de sedimentación se dejó reposar la muestra dentro del vaso durante un tiempo de 5 minutos. Posteriormente, se tomó una submuestra del sobrenadante en cada caso. Nuevamente las variables de respuesta fueron las establecidas previamente en la segunda etapa y los estudios se llevaron a cabo en el periodo correspondiente a los meses de Noviembre de 1999 con la técnica de luz láser y Octubre de 2001 para la técnica de corriente eléctrica.

5.5.3.1 Método de análisis de datos

El objetivo que se persiguió con el diseño experimental, en primera instancia, fue: determinar el efecto de las condiciones de mezclado y tiempo de contacto en la etapa de coagulación. El modelo estadístico para el diseño de efectos finos con bloques completos al azar fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde

Y_{ij} : Cambio del volumen de partículas (o para cada uno de los parámetros de respuesta)

μ : Valor promedio del volumen de partículas

τ_i : Efecto del gradiente en la mezcla rápida sobre el volumen de partículas

β_j : Efecto del tiempo de mezcla rápida sobre el volumen de partículas

ϵ_{ij} : Error aleatorio para cada etapa (disposición del dato)

5.5.4 Optimización de la Floculación con Base en el Volumen de Partículas

Durante este estudio, y durante la etapa de floculación se analizaron los gradientes de 20, 40 y 80 s⁻¹ combinados con 5, 10 y 15 min de tiempo de contacto. De manera similar a la anterior etapa, estos tiempos fueron seleccionados de acuerdo con estudios previos realizados durante 1999 y lo establecido por Han and Lewler, 1992, Leu and Ghosh 1988 Narkis *et al.*, 1990 y Thomas *et al.*, 1999, Narkis y Rebhun, 1997 y Haarhoff and Joubert, 1997. En la etapa de coagulación se mantuvo fijo el gradiente en 164 s⁻¹ y el tiempo de contacto a 60 s, los cuales, fueron determinados como óptimos en la etapa anterior. Se aplicó una dosis de 100 µmolAl/L y 0.5 mg/L de polímero aniónico de alto peso molecular (prosfloc A-252) durante la fase de coagulación y floculación respectivamente, mientras que la sedimentación se emuló dejando reposar la muestra dentro del vaso por 5 min.

El estudio se efectuó durante los meses de Enero de 2000 con la técnica de luz láser y Noviembre de 2001 para la técnica de corriente eléctrica.

En todos los estudios se realizaron 3 pruebas en cada tratamiento durante 3 ocasiones como mínimo.

5.5.4.1 Método de análisis de datos

Durante la etapa dos hasta la quinta se llevó a cabo un diseño de experimentos de bloques completos y de efectos fijos de tal manera que se pudiera controlar sistemáticamente la variabilidad producida por diversos factores de confusión.

El modelo estadístico para el diseño de efectos finos con bloques completos al azar fue

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde

Y_{ij} : Cambio del volumen de partículas (o para cada uno de los parámetros de respuesta)

μ : Valor del volumen de partículas

τ_i : Efecto del gradiente en la mezcla rápida

β_j : Efecto del tiempo de mezcla lenta

ϵ_{ij} : Error aleatorio para cada etapa (disposición del dato)

Para todos los resultados obtenidos, se efectuó un análisis estadístico empleando el paquete Statgrafics 6, Manugistics, Inc 1992.

5.5.5 Remoción de compuestos en partículas mayores y menores de 20 μm .

Para esta etapa, se realizó una serie de pruebas de jarras empleando las condiciones óptimas de operación obtenidas en las etapas anteriores y presentadas en la Tabla 5.3. Durante la coagulación se utilizó una concentración de 100 $\mu\text{molAl/L}$ del coagulante Pax xl- 19 y en la floculación se aplicó 0.5 mg/L de polímero aniónico prosifloc A-252 en todos los casos. Las pruebas se realizaron entre marzo y abril de 2002. Las determinaciones de los parámetros microbiológicos y físico químicos se llevaron a cabo cada caso por triplicado.

Tabla 5.3. Condiciones de trabajo utilizadas en las pruebas de jarras

Etapa de tratamiento	Gradiente (s-1)	Tiempo (min)
Coagulación	164	1
Floculación	50	5
Sedimentación	0	5

Al finalizar la etapa de sedimentación, se recogió un volumen aproximado de 400 mL de cada tratamiento. La mitad del volumen se hizo pasar por un filtro Whatman con tamaño de poro de 20 μm , mientras que el resto se conservó para que en ambas muestras se realizaran las determinaciones correspondientes.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Evolución de la distribución del tamaño de la partícula con el tiempo con y sin preservador.

Autores como Tchobanoglous (1995) y Levine (1991) establecen que en el estudio de distribución de tamaño de partícula se debe poner especial atención a tres consideraciones: la selección de las técnicas de medición de partículas, la interpretación de los resultados y aplicación de los datos y, sobre todo, la técnica de muestreo y preservación de la muestra ya que este último aspecto afecta de manera significativa los resultados de la distribución del tamaño de partícula de la muestra original y por lo tanto puede producir errores de conteo de las mismas. Por otro lado, Lars (1998) establece que para determinar de manera más clara los efectos de los factores involucrados en el desempeño de los procesos de tratamiento, las propiedades del agua residual cruda no se deben alterar.

De acuerdo con Lars (1998) y Kellie *et al.* (1999) entre los biocidas más utilizados para preservar las muestras destinadas al conteo de partículas se encuentra el de la azida de sodio y el formaldehído, no obstante, se prefiere el formaldehído por presentar las siguientes ventajas: (a) ser más barato, (b) tener una menor influencia con la fuerza iónica del sistema y (c) ser menos tóxico a los seres humanos. Estudios de Lars (1995) en diversas aguas de Europa recomiendan aplicar el formaldehído en dosis de 0.03% v/v para mantener tanto el número de partículas como de bacterias en concentraciones similares a las iniciales. Sin embargo solo recomiendan realizar el conteo de partículas inmediatamente después de la toma de muestra, aunque esas son las condiciones ideales en la práctica esto no se logra.

Con el objeto de evaluar el efecto de la aplicación de formaldehído tanto en el agua residual cruda como en la tratada mediante un proceso físico químico se llevaron a cabo dos estudios con aguas de diferente calidad. Uno de ellos se realizó en Oulú, Finlandia durante una estancia académica (Mayo a Septiembre, 2000) y el otro se efectuó en la Cd. de México (Marzo - Abril, 2001) para confirmar los resultados. Adicionalmente, en este último estudio se determinó el efecto de la aplicación de formaldehído en el contenido de coliformes fecales.

6.1.1. Efecto de la aplicación del formaldehído en el Agua residual cruda y tratada de la Cd. de Oulú, Finlandia

6.1.1.1 Agua Residual Cruda

La Tabla 6.1 presenta el contenido de partículas con tamaño entre 0.7 y 7.5 μm del Agua Residual Cruda (ARC) con y sin preservador. En primera instancia, se establece que en ambas muestras se incrementó el volumen de partículas conforme varío el tiempo sin embargo, el efecto fue más severo en aquella donde no se aplicó el preservador. En efecto, sin la aplicación de formaldehído se determinó un incremento porcentual con respecto al volumen inicial que fue de 87 mL/m³ del 15, 23, 33 y 52% en 2, 4, 8 y 24 horas respectivamente. En contraparte, la muestra de agua residual cruda a la que se aplicó el formaldehído presentó una variación del volumen de partículas mínima al determinar que el volumen inicial de 90 mL/m³ se

incrementó en 2, 6, 5 y 15% con los mismos tiempos de contacto. De acuerdo con Leigh y Hyne (1999) y Ongley *et al.* (1992) dicho incremento en el volumen se produce por la agregación de las partículas en presencia de bacterias que forman flocúlos por lo que se cambia, de esta manera, las características del agua a tratar. Mientras que con la presencia de un preservador, las propiedades del agua residual permanecieron constantes durante un tiempo relativamente largo (8 h).

Tabla 6.1. Contenido de partículas en el agua residual cruda sin y con preservador y de acuerdo al tiempo transcurrido después de aplicar el formaldehído

Tipo de muestra	Tiempo transcurrido, h				
	0	2	4	8	24
	Volumen de partículas, mL/m ³				
Agua Residual Cruda y con preservador	90	92	95	94	103
Agua Residual Cruda y sin preservador	97	100	107	116	133

La Figura 6.1 presenta los cambios de la distribución de partículas del agua residual cruda con y sin preservador para diversos tamaños de partícula. Con el incremento en el volumen de las partículas los diámetros de partículas que mostraron una mayor afectación con respecto al tiempo fueron las mayores a 3.7 μm en cuyo caso, el tamaño se incrementó hasta 3 veces en proporción al tiempo cero. Por otro lado, la presencia de formaldehído permite conservar la misma calidad del agua tratada en todos los tamaños de partículas en un intervalo de tiempo de 0 a 8 horas. 24 horas después, las partículas mayores a 3 μm se incrementaron en aproximadamente el 30% por lo que se recomienda que su medición se realice en un lapso no mayor de 8 horas después de aplicar el preservador.

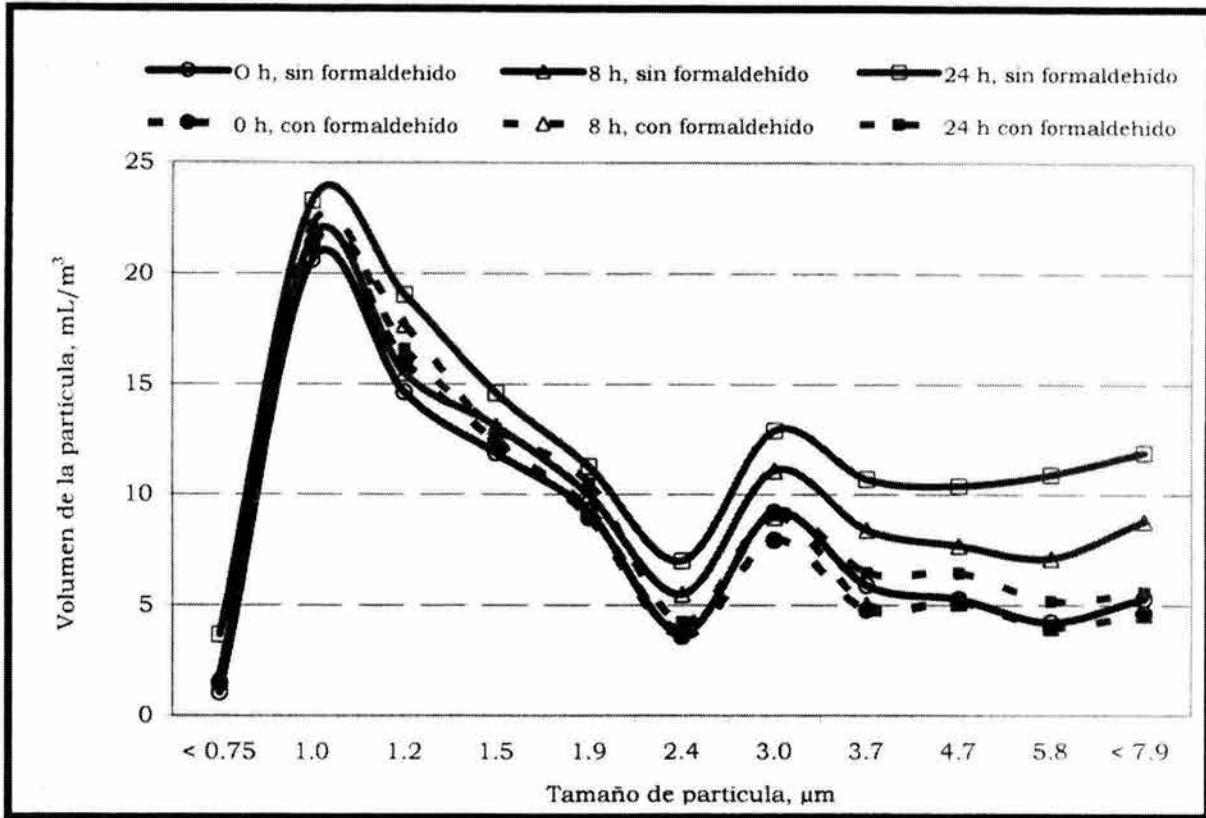


Figura 6.1. Distribución del volumen de partículas del agua residual cruda con y sin preservador

6.1.1.2 Agua Residual Tratada con un proceso fisico químico

La Tabla 6.2 muestra los resultados del cambio en el contenido de partículas para el agua tratada con un proceso fisico químico con y sin preservador. El incremento del volumen de partículas en el agua donde no se aplicó formaldehído fue del 8, 29, 44 y 95% en un tiempo de 2, 4, 8 y 24 h respectivamente. Por otra parte, en presencia de formaldehído, el volumen de partículas con respecto al tiempo no mostró alteración alguna o sólo un ligero incremento que se considera despreciable debido a que la agregación sólo fue del 2% en un periodo de 24 horas.

Tabla 6.2. Contenido de partículas en el agua residual tratada con 200 µmolAl/L con y sin preservador y de acuerdo al tiempo transcurrido después de aplicar el formaldehído

Tipo de muestra	Tiempo transcurrido, h				
	0	2	4	8	24
	Volumen de partículas, mL/m ³				
Agua Residual Tratada y con preservador	10.4	10.7	10.9	11.2	11.4
Agua Residual Tratada y sin preservador	12.3	12.8	15.4	17.1	23.2

En la Figura 6.2 se presenta la variación del volumen de partícula para los diversos intervalos de tamaño en función del tiempo. En el agua residual tratada y sin preservar, el incremento en el volumen de partículas nuevamente se efectuó en los tamaños $> 3.7 \mu\text{m}$ donde el incremento fue de 7 veces más en un periodo de 24 horas. En el agua residual tratada y preservada con formaldehído, se presentó una mínima alteración del volumen en todos los tamaños de partícula, ya que para el mismo intervalo de tiempo (24 h) las partículas tuvieron un incremento menor al 1%.

Con base en los resultados de las muestras preservadas, se determina que bajo las condiciones de dosis aplicada, se alcanzó en el sistema un 88% remoción de partículas (en volumen). La remoción en el agua residual tratada y sin preservar varió de 87% (hora cero) a 85% y 83% (5 y 24 horas después respectivamente) lo que reveló que bajo estas condiciones se dará un resultado impreciso sobre el efecto de la aplicación de coagulante durante el tratamiento.

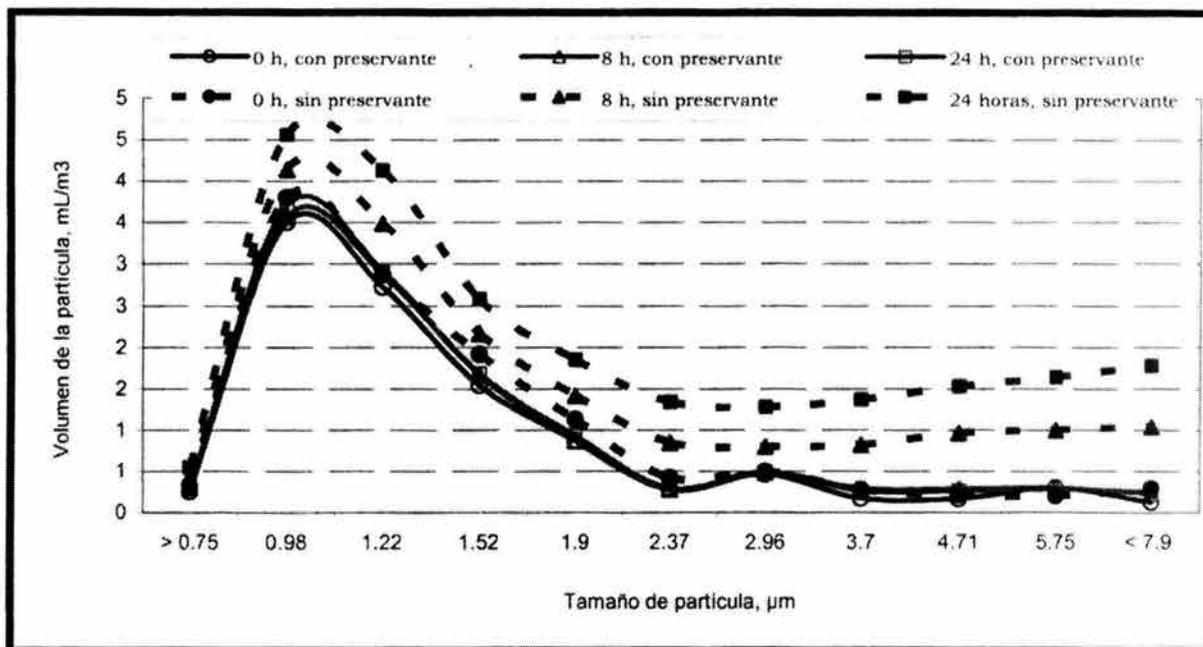


Figura 6.2. Distribución del volumen de las partículas del agua residual cruda y tratada con respecto al y preservada con formaldehído

Por ello, la determinación del tamaño de partícula debe realizarse preferentemente *in situ* inmediatamente después de la toma de muestra o al finalizar el tratamiento, sin embargo, en términos prácticos las condiciones adecuadas no se dan cuando los estudios se realizan a nivel laboratorio. Por ello, para mantener una calidad similar a la original se debe utilizar formaldehído como preservador en dosis de 0.03% v/v tanto en el agua residual como en la tratada y hacer la determinación de partículas en un periodo no mayor a 8 horas. En caso contrario se originará una agregación de las partículas por lo que la calidad y la distribución de las mismas con las que se compone el agua residual cruda variará y el efecto real del tratamiento no podrá medirse de manera adecuada.

6.1.2 Efecto de la aplicación del formaldehído en el agua residual cruda y tratada de la Ciudad México.

Como se mencionó previamente, con la finalidad de fortalecer los resultados determinados en la Cd. de Oulú, Finlandia y determinar si era posible utilizar el formaldehído en el agua residual cruda y tratada de la Ciudad de México se llevó a cabo un estudio similar, como parte complementaria, se determinó el efecto de la aplicación del preservador con respecto al contenido de coliformes fecales.

6.1.2.1 Variación en el volumen de partículas

En el caso del agua residual cruda de la Ciudad de México, la aplicación del formaldehído al 0.03% v/v mostró un efecto similar al determinado para las aguas residuales de la Cd. de Oulú al mantener un contenido de partículas semejante a lo largo del tiempo como se establece en la Tabla 6.3 aún cuando este tipo de agua presentó un mayor contenido de partículas (en volumen). En presencia de formaldehído el volumen de partículas se incrementó sólo 6% después de 24 horas de su aplicación. Por otro lado, en las muestras donde no se aplicó el preservador tienden a incrementar su volumen con el tiempo determinando una adición hasta del 45% en un periodo de 24 horas con respecto al observado en el tiempo cero.

Tabla 6.3. Contenido de partículas en el agua residual cruda de la Cd. de México con y sin preservador en función del tiempo

Tipo de muestra	Tiempo transcurrido, h				
	0	2	4	8	24
	Volumen de partículas, mL/m ³				
Agua Residual Cruda y con preservador	200	202	211	206	213
Agua Residual Cruda y sin preservador	217	244	264	287	315

En el caso del agua residual tratada y sin preservar se determinó que el contenido del volumen de partículas de 124 mL/m³ se incrementó hasta 230 mL/m³ en un tiempo de 24 h, lo que indica que existió un incremento del 84% (Tabla 6.4). En tanto que en las muestras donde se aplicó el formaldehído, el volumen de partículas contenidas no manifestó alteración o sólo un ligero incremento del 7% conforme transcurrió el tiempo (24 h) por lo que indica que la calidad del agua no se alteró

Tabla 6.4. Contenido de partículas en el agua residual tratada de la Cd. de México con y sin preservador en función del tiempo

Tipo de muestra	Tiempo transcurrido, h				
	0	2	4	8	24
	Volumen de partículas, mL/m ³				
Agua Residual Cruda y con preservador	122	122	127	126	131
Agua Residual Cruda y sin preservador	124	147	160	181	230

6.1.2.2 Variación en la Distribución del Tamaño de Partícula

La Figura 6.3a muestra los resultados de los cambios en la distribución de las partículas del agua residual cruda. En las muestras sin preservar se observa un incremento en el volumen de partículas en todos los intervalos de tamaño, sin embargo, las partículas más afectadas son las comprendidas entre los diámetros de 1.5 a 8 μm incrementando el volumen 6 veces durante un tiempo de 24 horas como resultado de la agregación de las mismas. La Figura 6.3b presenta la distribución de las partículas en el agua residual tratada. Nuevamente, se observa que sin formaldehído existió una agregación de las partículas de 1.5 a 8 μm incrementando su volumen entre 3.5 a 7 veces en un tiempo de 24 horas. Los resultados obtenidos son comparables a los observados por Leigh y Hyne (1999) en aguas superficiales contaminadas, los cuales proponen una aplicación de formaldehído del 2% v/v para evitar la agregación de flóculos y la inactivación total de contenido microbiológico. Cabe aclarar que en este estudio no se investigó la inactivación de las bacterias (por afectación de la membrana y cambio de la estructura cuaternaria de las proteínas) sino el de mantener la misma calidad original por un largo periodo de tiempo.

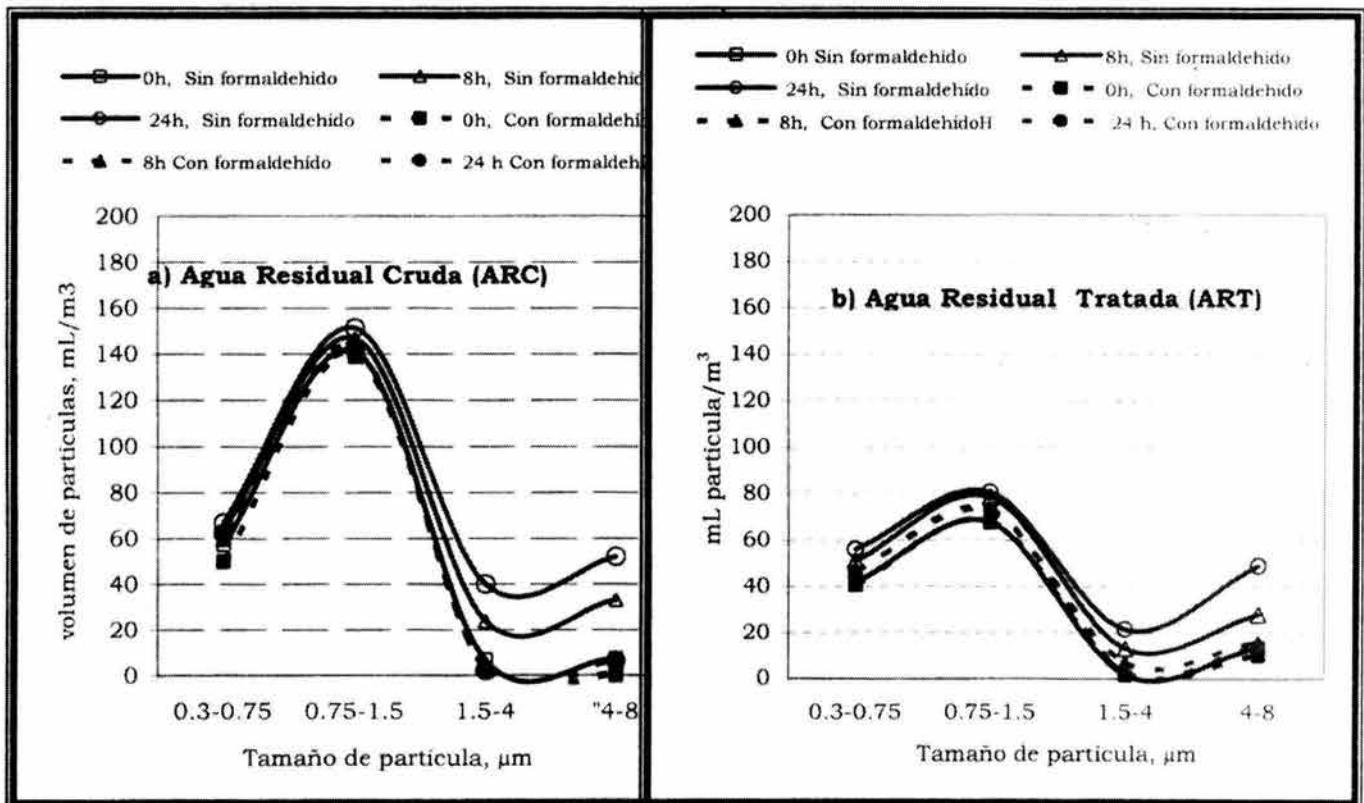


Figura 6.3. Cambio de la Distribución del Tamaño de Partículas en (a) ARC y (b) ART con respecto al tiempo

6.1.3 Efecto del formaldehído en el contenido de coliformes fecales

La Figura 6.4 muestra el contenido de coliformes fecales tanto del agua residual cruda como de la tratada con y sin preservador con respecto al tiempo. Con la aplicación del formaldehído en dosis de 0.03% v/v se garantiza que el contenido de coliformes fecales se mantiene en la misma concentración a lo largo del tiempo. En efecto, en el agua residual cruda preservada, el contenido de coliformes fecales varío desde 8.3 unidades logarítmicas en el tiempo cero hasta 8.6 unidades logarítmicas en un tiempo de 24 horas, de hecho, cuando se midió el contenido de coliformes fecales después de 48 horas no se observó un cambio alguno en la concentración de este indicador. Mientras que las muestras donde no se aplicó el preservador se observó un decremento de la concentración como resultado de la agregación de estos microorganismos con las partículas presentes.

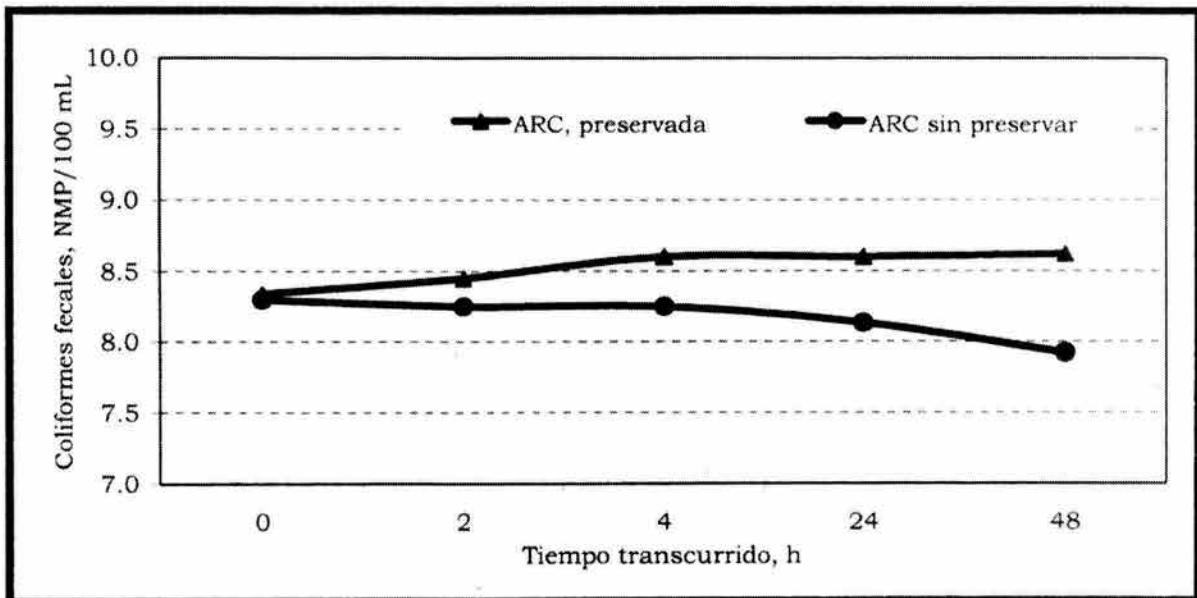


Figura 6.4. Contenido de coliformes fecales en agua residual cruda (ARC) con respecto al tiempo.

Para el caso del agua residual y tratada con un proceso fisico-químico (Figura 6.5), se observó un comportamiento similar, es decir, cuando la muestra se preservó hubo variación en la concentración de coliformes fecales (7.9 unidades logarítmicas en la hora cero a 8.1 unidades logarítmicas en un tiempo de 24 h); este comportamiento se atribuye al efecto inhibitor del recrecimiento bacteriano. Por otro lado, en las muestras sin preservar, los coliformes fecales tendieron a reducirse de 7.9 hasta 7.6 unidades logarítmicas como resultado de lo antes mencionado. La reducción del contenido de coliformes fue mayor en el agua residual que en el agua tratada debido probablemente a que en el primer caso existe un mayor número de partículas donde se pueden adherir estos microorganismos

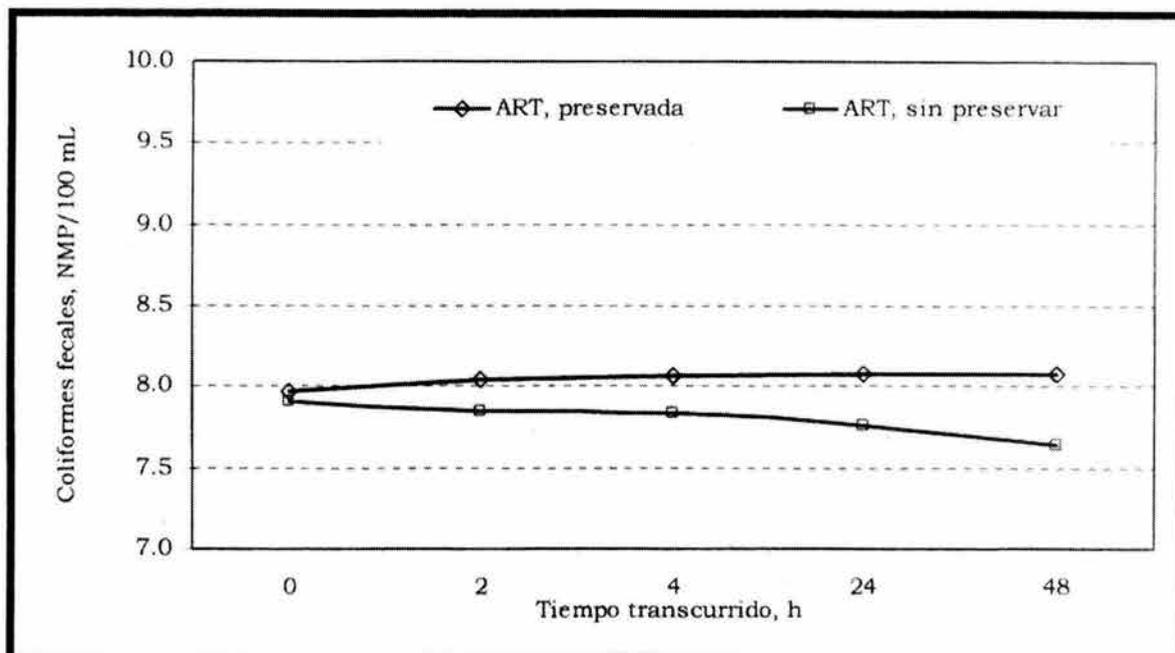


Figura 6.5. Contenido de coliformes fecales en agua residual tratada (ART) con respecto al tiempo.

Ante ello, para que el análisis de la distribución del tamaño de la partícula se realice de manera adecuada y se pueda determinar el efecto real de los factores que afectan el desempeño de un sistema de tratamiento, es importante utilizar un preservador después de la toma de la muestra (tanto del agua cruda como la tratada) debido a que si la determinación de partículas se realizara 24 horas después y se decidiera no aplicar dicho preservador, el conteo de partículas sería erróneo debido a que el volumen de éstas tiende a incrementarse hasta 7 veces más. El tamaño de partículas más afectado será el de diámetros mayores a $1.5 \mu\text{m}$ que tiende a agregarse para formar flóculos. Por otro lado, aún cuando el agua residual cruda como la tratada de la Cd. de México presentó un volumen mayor de partículas, la dosis de formaldehído aplicada fue suficiente para preservar la muestra.

6.2 Evaluación de la Distribución del Tamaño de Partícula

La evaluación del tamaño de partícula y Distribución del Tamaño de Partícula (DTP) del agua residual cruda y tratada con diversas condiciones de operación de un proceso físico-químico (aplicación de diversos tipos y dosis de coagulante, gradientes y tiempos de contacto en la coagulación y floculación), se realizó con dos técnicas diferentes. En la primera, se usó un contador de corriente eléctrica (Counter coulter), que permitió determinar de manera **cuantitativa** el número y volumen de las partículas y con ello realizar las correlaciones con los microorganismos de interés. En la segunda se utilizó un contador de luz láser el cual proporciona información **cualitativa** sobre la distribución y tamaño de la partícula. A continuación se describen los resultados para cada técnica.

6.2.1 Etapa 1. Resultados con la Técnica de Corriente Eléctrica

La técnica de Corriente Eléctrica es una de las propuestas para determinar el tamaño de partículas en agua residual por APHA, AWWA y WEF 1998. Autores como Levine desde 1985, señalan la importancia de contar con una técnica única y estandarizada de medición así como la metodología estadística apropiada para procesar los datos. La técnica de Corriente Eléctrica es la respuesta a lo primero y la distribución del tamaño de partícula en volumen y número. Finalmente, autores como Thiem, 1997 y Gregory, 1997 señalaron la conveniencia de relacionar el tamaño de las partículas del agua residual con su tratabilidad.

Con la técnica mencionada se obtuvo información sobre el número, volumen y la distribución que ocupan las partículas tanto en el agua residual cruda como en la tratada mediante coagulación-floculación para las tres etapas de operación: (1) Tipo y dosis de coagulante aplicado; (2) Gradiente y tiempo de la coagulación y (3) Gradiente y tiempo de floculación.

Los límites de medición del diámetro de la partícula que se lograron al emplear tres tubos fueron de 0.5 micras, como mínimo, y 84 micras, como máximo. El primer tubo empleado tenía un diámetro de apertura nominal de 20 μm y permite medir partículas entre 0.04 y 18 μm . El segundo, de 100 μm de diámetro, mide partículas entre 2.8 y 84 μm y el tercero de 200 μm de diámetro que mide partículas entre 4 y 120 μm . A partir de la información obtenida con ambos tubos, el equipo automáticamente realiza la distribución total y el conteo de las partículas en volumen y número.

Con los resultados así obtenidos, se determinó la relación entre: (a) el total de partículas (en número y volumen) con el contenido de SST, (b) las partículas de diámetros entre 0.7 y 1.5 μm y el contenido de coliformes fecales (c) las partículas de tamaños entre 1.5 a 4 μm y el contenido de *Salmonella spp.* y finalmente, entre las partículas de diámetros entre 20 y 80 μm y el contenido de huevos de helmintos.

6.2.2 Partículas en el Agua Residual Cruda

6.2.2.1 Distribución del tamaño de partícula en volumen

En la Figura 6.6 se presenta la distribución de los tamaños de las partículas contenidas en el agua residual de la Ciudad de México en volumen correspondiente a los tres periodos que comprendió el estudio (Febrero, Octubre, y Noviembre). Se encontró que las partículas se encuentran distribuidas en los tamaños comprendidos entre 0.06 y 80 μm . Autores como Tiehm *et al.*, 1997 señalan que el agua residual para cuatro influentes de Alemania (Ahrensburg, Stellingen, Seevetal y Bad Bramstedl) contienen partículas con tamaños entre 0.1 hasta 100 μm . Mientras que Darby *et al.*, 1991 establecen que las partículas contenidas en el agua residual pueden variar desde nanómetros a valores mayores a 100 μm .

De acuerdo con la clasificación de diámetros establecida por Levine *et al.*, 1985 y 1991, el agua residual de la Ciudad de México se constituye por un 0.3% de partículas disueltas ($< 0.08 \mu\text{m}$), 1.5% de partículas coloidales (entre 0.08 y 1 μm) y 98.2% de partículas supracoloidales (entre 1 y 100 μm). Se observa en la Figura que los cambios en la distribución con el tiempo ocurren principalmente en la fracción supracoloidal. Lo anterior coincide con lo señalado por Levine *et al.* 1991, quien afirma que esta fracción es la que más cambios sufre, tanto en el agua residual como en la tratada. El encontrar una gran cantidad (98.2%) de partículas supracoloidales implica que mediante la aplicación de la coagulación-floculación se logrará una importante disminución de los sólidos suspendidos en el agua residual.

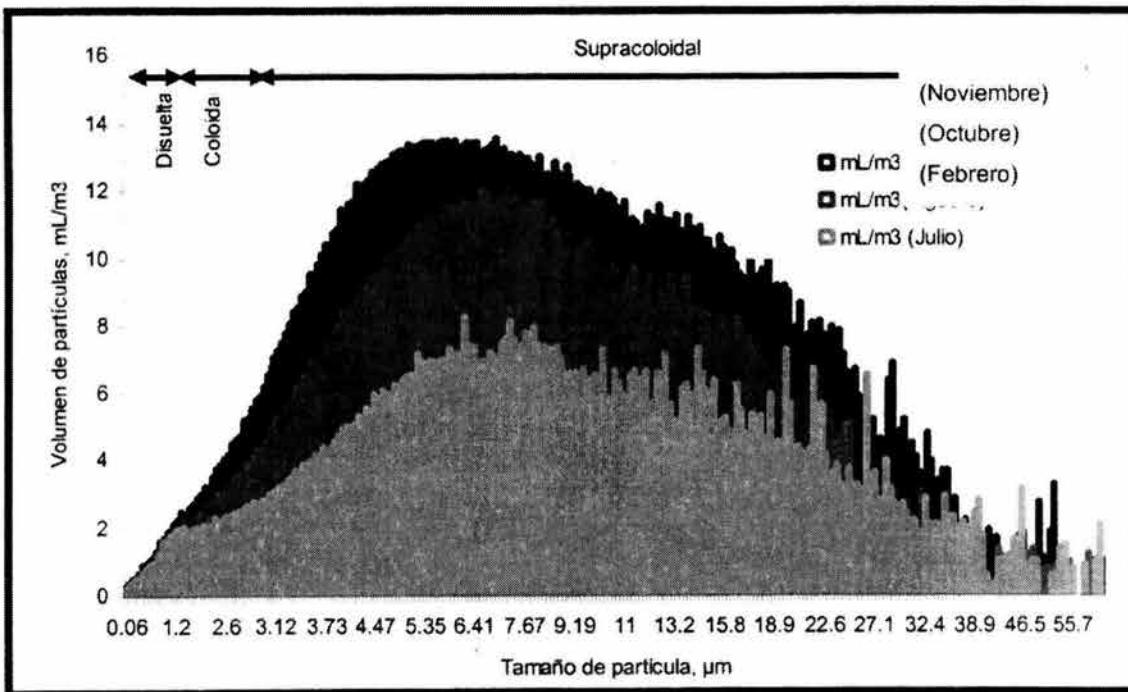


Figura 6.6. Cambio en la distribución del volumen de partículas del ARCM

Los resultados de la Tabla 6.5 muestran el volumen promedio de partículas por tamaño de interés obtenido para los tres periodos. En el primer periodo, el agua residual presentó un volumen total de 997 ± 527 mL/m³, en el segundo de 1498 ± 418 mL/m³ y, en el último, de 1954 ± 124 mL/m³. Los cambios en el volumen de partículas se deben en gran parte a la variabilidad de SST y los Huevos de Helmintos, ya que se determinó un contenido de SST de 245 ± 138 mg/L, 324 ± 232 mg/L, y de 469 ± 77 mg/L, mientras que los huevos de helmintos variaron en 25 ± 13 , 33 ± 10 y 52 ± 3 HH/L en cada etapa respectivamente

Tabla 6.5. Contenido en volumen de partículas para los tres periodos que comprendió estudio

Intervalo de tamaño, μm	Febrero	Octubre	Noviembre
	mL/m ³ (%)		
0.7-1.5 (Coliformes fecales)	18 (2)	16 (1)	18 (2)
1.5-4 (<i>Salmonella spp</i>)	126 (13)	161 (14)	264 (14)
4-8	336 (34)	419 (35)	651 (33)
8-20	339 (34)	417 (35)	736 (38)
20-80 (Huevos de helmintos)	178 (18)	180 (15)	285 (15)
Total de partículas	997	1192	1954
SST, mg/L	245 +138	283 +143	469 +77
Huevos de helmintos, mg/L	25 + 13	33+10	52+3

* Unidades logarítmicas

6.2.2.2 Distribución del tamaño de partículas en número

La Figura 6.7 muestra la distribución del tamaño de partícula en cuanto al número. Se encontró que el agua residual contenía en promedio 2.2×10^{13} partículas/m³, valor superior al establecido como típico para un agua residual por Levine *et al.*, 1991a (10 unidades logarítmicas), pero similar a lo reportado por Hudson y Wolfner en 1967 (13 unidades logarítmicas). La diferencia con lo que Levine encuentra se puede explicar por los largos tiempo de retención del agua residual en el Drenaje Profundo, el cual se estima en 24 h, y que promueve por biodegradación la formación de materia coloidal a partir de la materia orgánica soluble, y en consecuencia el incremento de partículas en número.

Por otra parte, el alto contenido de partículas incrementa la probabilidad de que en el agua exista una gran cantidad de contaminantes sólidos y de microorganismos, estos últimos ya sean libres o asociados a ellas. Además, favorece el éxito de tratamiento que promueva la aglomeración de partículas y con ello habrá una mejor eliminación de huevos de helmintos, *Salmonella spp* y coliformes fecales en ese orden.

También, en la medida en que se detecte una menor presencia de partículas en los tamaños correspondientes para cada tipo de microorganismo en el agua tratada habrá una menor concentración de estos como lo señalan Odegaard, 1998; Emolke y Brown, 2001, Medema *et al.*, 1998 y AWWA, 2000). Por otra parte, el lograr determinar en el agua la distribución por tamaño de partículas conduce a afirmar que es posible obtener condiciones de tratamiento con las que el sistema aglomere y sedimente a una mayor velocidad. Los tamaños de interés

específico y así eliminar microorganismos que finalmente también son partículas de tamaño determinado (Levine, 1991 b y AWWA, 2000). En la Figura 6.7 se muestra la distribución de diversos tipos de microorganismos, como *Cryptosporidium* (entre 4 y 8 μm) y *Giardia* (entre 8 y 12 μm) en los diferentes intervalos de tamaño.

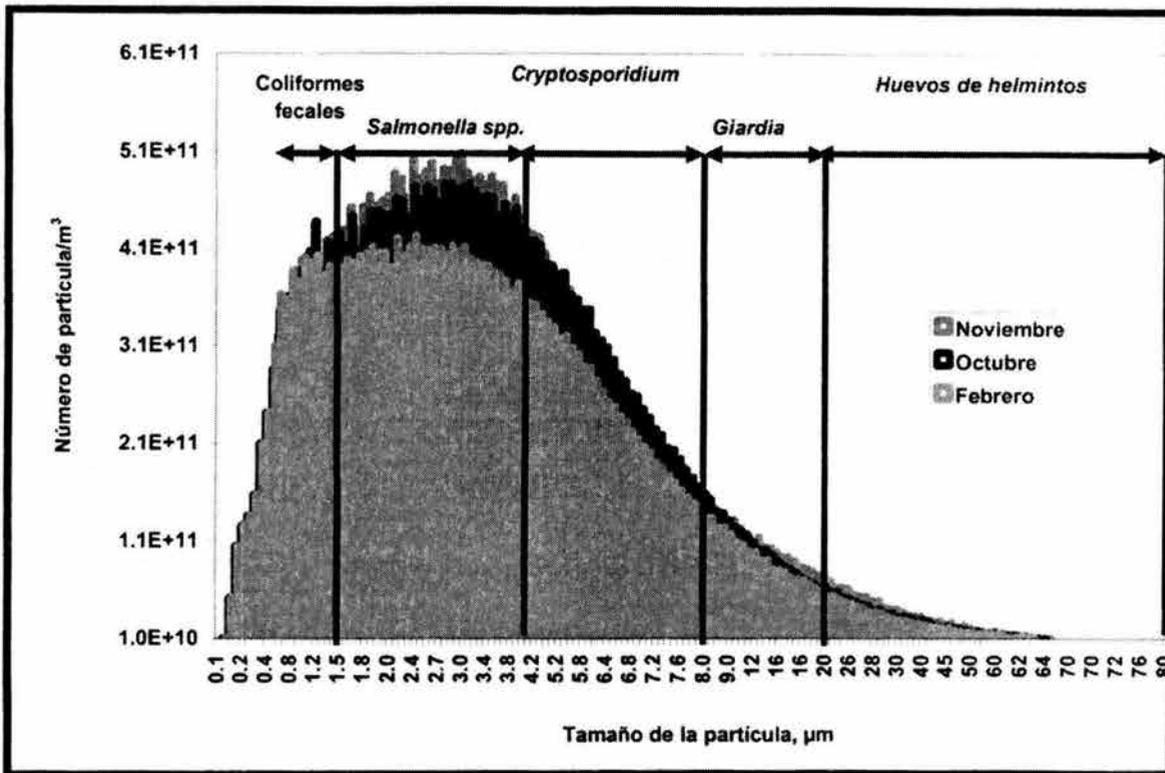


Figura 6.7. Cambio en la distribución del número de partículas del ARCM

6.2.2.3 Clasificación de las partículas contenidas en el agua residual por su volumen

De acuerdo con los intervalos de tamaño de partículas de interés para esta tesis, la composición del agua residual en cuanto al volumen queda constituida de la siguiente manera:

- En el intervalo de tamaño de los huevos de helmintos (20 y 80 μm) es de 10 al 19%
- En el intervalo de tamaño de los coliformes fecales (0.7 a 1.5 μm) es del 1 al 2 %.
- En el intervalo de tamaño de la *Salmonella* spp (1.5 y 4 μm) es de 13 al 14% y, finalmente,

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

6.2.2.4 Clasificación de las partículas contenidas en el agua residual por su número

El número de partículas en por ciento contenido en el agua residual de la Ciudad de México en los intervalos de interés es (Tabla 6.6):

- 15 al 19 % en el intervalo de tamaño de los coliformes fecales es
- 53 al 57% en el intervalo de tamaño de la *Salmonella spp* y, finalmente,
- 0.1% en el intervalo de tamaño de los huevos de helmintos

Tabla 6.6. Contenido en número partículas para los cuatro periodos de estudio

Intervalo de tamaño, μm	1er periodo	2do. periodo	3er. Periodo
	No. de partícula/ m^3	No. de partícula/ m^3	No. de partícula/ m^3
0.7-1.5 (Coliformes fecales)	3.0×10^{12}	3.0×10^{12}	3.3×10^{12}
1.5-4 (<i>Salmonella spp</i>)	8.5×10^{12}	1.0×10^{13}	1.7×10^{13}
4-8	$3.9 \text{E} \times 10^{12}$	5.1×10^{12}	8.0×10^{12}
8-20	$5.4 \text{E} \times 10^{11}$	5.7×10^{11}	9.9×10^{11}
20-80 (huevos de helmintos)	1.8×10^{10}	1.8×10^{10}	3.1×10^{10}
TOTAL	1.6×10^{13} (13.2)*	1.9×10^{13} (13.3)*	2.9×10^{13} (13.5)*

* Unidades logarítmicas

6.2.2.5 Aplicación de las distribuciones encontradas al objetivo de la tesis

Aún cuando existen estudios sobre la determinación de microorganismos con base en el tamaño de las partículas, tanto en Europa como en Norteamérica (Boller y Blazer en 1997, Ødegaard, 1992 Lartiges *et al.*, 2001; Elvers, 1999; Hall y Croll, 1997, Broadwell, 2001), éstos se han enfocado a relacionar microorganismos como *Cryptosporidium*, *Giardia* y coliformes totales en sistemas de agua potable y efluentes de procesos de tratamiento biológico. No existe en la literatura estudios que relacionen el número y volumen de partículas con el contenido de huevos de helmintos, coliformes fecales, *Salmonella spp* presentes tanto en aguas residuales como tratadas con un proceso físico químico. De ahí la importancia de los presentes resultados.

SST

La Figura 6.8 muestra la relación entre el contenido de SST y el volumen que ocupan todas las partículas, es decir, de todos los tamaños medidos. Estos parámetros guardan una relación que queda representada por:

$$\text{SST en mg/L} = 0.48 * \text{volumen de partículas (mL/m}^3) - 172, R^2 \text{ de } 0.85 \quad (1)$$

De esta ecuación se deduce que hay un valor mínimo de 600 mL/m^3 de partículas en el agua residual que corresponde a 116 mg/L de SST, mientras que el valor máximo de 3381 mL/m^3 equivale a 1450 mg/L de SST. Es decir que esta ecuación tiene validez en un amplio intervalo de SST (116 hasta 1450 mg/L) aún cuando por extrapolaciones podrá contabilizar el contenido de SST para aguas muy diluidas ($< 150 \text{ mg/L}$), de mediana concentración ($< 220 \text{ mg/L}$) y de alta

concentración (>500 mg/L). Igualmente, la buena relación entre estos parámetros permitirá determinar el contenido de SST en sólo 5 minutos y con ello disminuir el error de análisis debido a la obstrucción de partículas. Levine en 1991 encontró que 6.5 mg de partículas con diámetro de 6.0 µm pueden obstruir un filtro de 5.0 µm y 0.5 mg de partículas con 5.0 µm obstruyen el filtro de diámetro de 0.45 µm. Además, con la relación establecida entre el volumen de partículas y el contenido de SST se puede asegurar que el agua tratada que se entrega al usuario presenta la calidad aceptable, ya que éste parámetro es uno de los que se utiliza el pago de agua tratada.

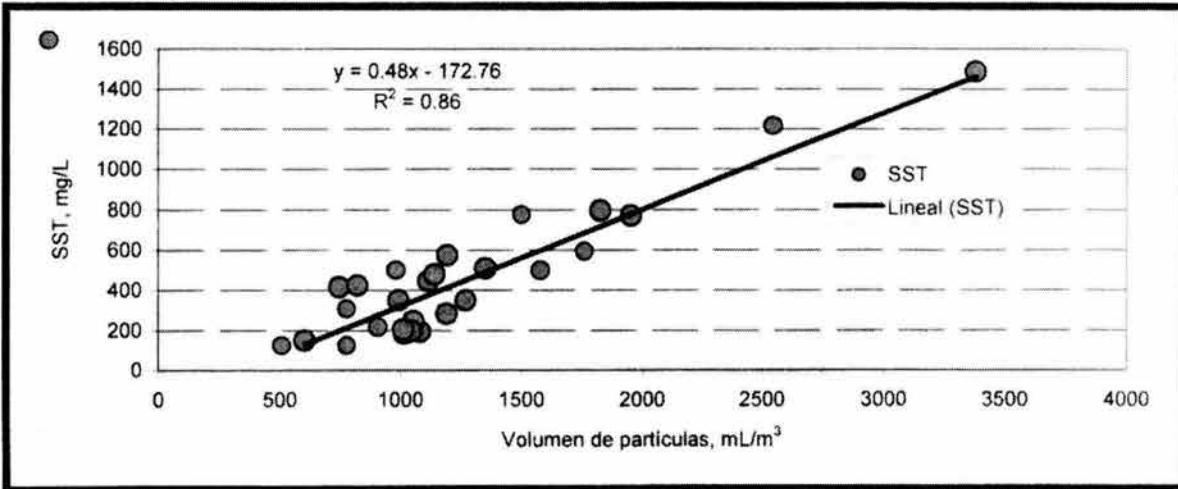


Figura 6.8. Relación entre el volumen de partículas y los SST del agua residual de la ciudad de México

La Figura 6.9 muestra la relación entre el número de partículas y el contenido de SST y se observa que, en este caso, la correlación no es buena. De hecho, autores como Levine *et al.*, 1991 y Odeggard, 1998 señalan que esto ocurre no sólo para la relación con los SST sino también para los compuestos orgánicos donde recomiendan el empleo de la distribución en volumen o masa.

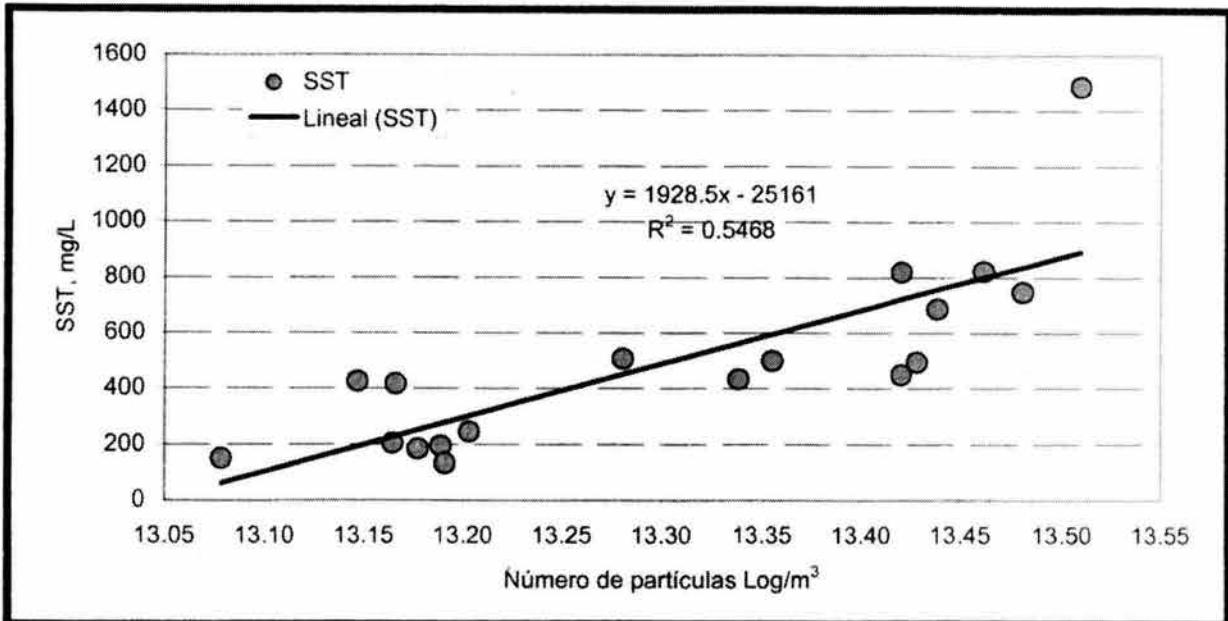


Figura 6.9. Relación entre el número de partículas y los SST del agua residual de la ciudad de México

Microorganismos

Huevos de helmintos.- En los distintos muestreos realizados en el agua residual de la Ciudad de México, el contenido de huevos de helmintos mostró una relación aceptable con el volumen de las partículas comprendidas entre los tamaños de 20 a 80 μm pero no con el número de partículas (Figuras 6.10 y 6.11) y la expresión obtenida para modelar la curva en volumen es:

$$HH \text{ (HH/L)} = 0.1 * N + 4.3, R^2 = 0.88 \quad (2)$$

Donde:

N = volumen de partículas con tamaños entre 20 y 80 μm en mL/m^3

Con base en esta ecuación se determinó que el Agua Residual de la Ciudad de México puede contener un mínimo de 9 HH/L y un máximo de 56.8 HH/L. El contenido de este patógeno, determinado con la técnica estandarizada, varió entre 6.3 y 60 HH/L. Jiménez *et al.*, 1998 y 2000 reportan valores máximos de huevos de helminto de 98 HH/L para el mismo tipo de agua residual. El valor máximo no coincide con los determinados en este estudio debido a que la cuantificación sólo se hizo durante la época de estiaje mientras que el valor de 120 HH/L fue determinado en época de lluvia con una concentración de 3336 mg/L de SST. Además, que ambos estudios se realizaron en diferentes años.

La ecuación aquí presentada, se puede utilizar para determinar el contenido de huevos de helmintos en otro tipo de agua residual, siempre y cuando ésta

contenga un volumen similar de partículas en el mismo intervalo de tamaño. En un caso diferente es necesario ajustar la ecuación de acuerdo a las variaciones de la calidad del influente.

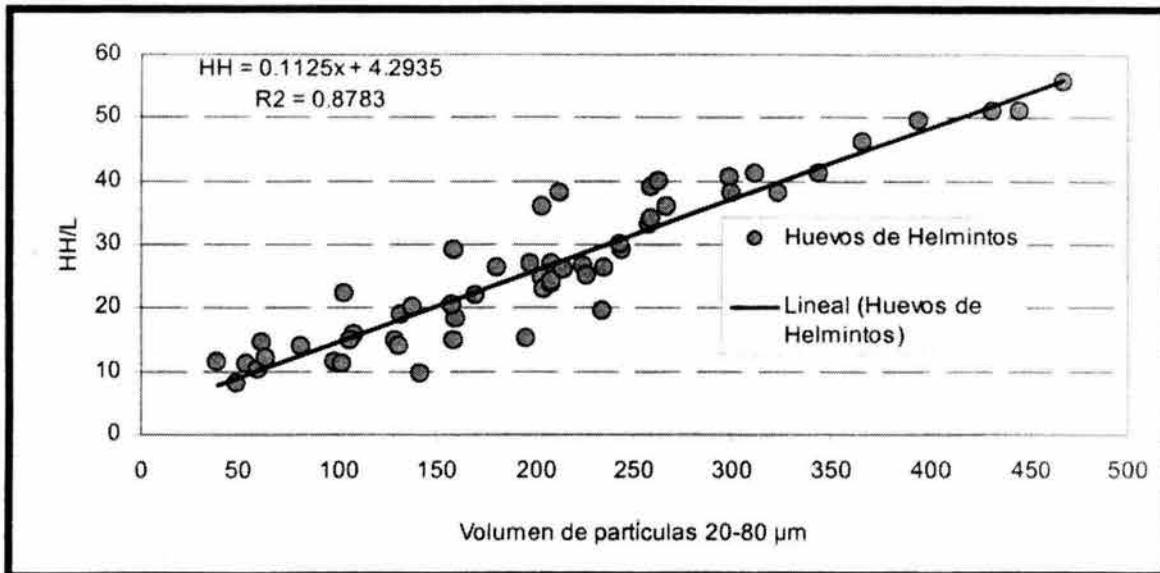


Figura 6.10. Relación entre el contenido de huevos de helmintos y el volumen de partículas del Agua Residual

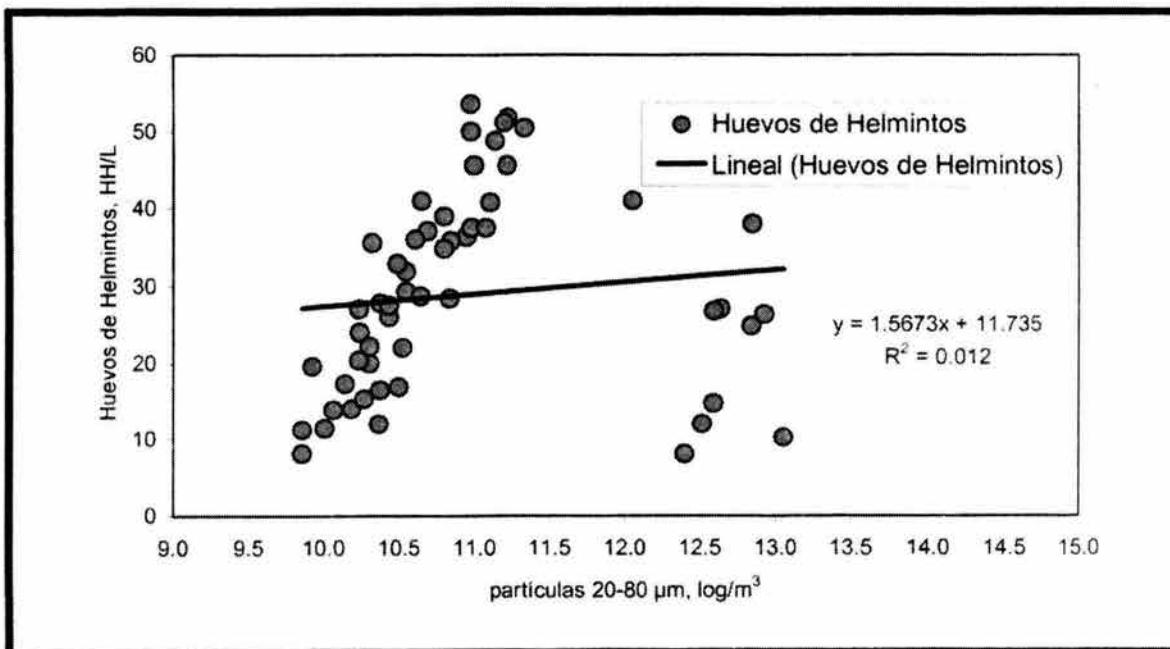


Figura 6.11. Relación entre el número de huevos de helmintos y el volumen de partículas del Agua Residual

Coliformes fecales.- Debido a las elevadas concentraciones que se presentan en el agua residual (del orden de 10^7 a 10^9) las ecuaciones que mejor se ajustaron fueron las que correlacionan su concentración con el número de partículas (Figura 6.12 a) y no el volumen que estas ocupan (Figura 6.12 b) para el intervalo de 0.7 a 1.5 μm . Las ecuaciones obtenidas en cada caso fueron:

$$\text{Coliformes fecales en Log /100 mL} = N_n - 12/0.07, R^2 = 0.80 \quad (3)$$

$$\text{Coliformes fecales en Log /m}^3 = N_v + 0.3/2.1, R^2 = 0.45 \quad (4)$$

Donde:

N_n = Número de partículas correspondiente al tamaño de 0.7-1.5 μm en Log/ m^3

N_v = volumen de partículas correspondiente al tamaño de 0.7-1.5 $\mu\text{m}/\text{m}^3$

Así la ecuación referente al contenido de coliformes sólo se puede emplear cuando el número de partículas de tamaños entre 0.7-1.5 μm sea de 12.3 a 12.7 log/ m^3 y el contenido de coliformes fecales de 7 y 8.5 log/100 mL. Es decir, será aplicable para aguas residuales de países en desarrollo donde la concentración mínima de este indicador es de 10^7 (USEPA, 1999). Para valores diferentes a estos intervalos, se deberá realizar otro tipo de ensayos microbiológicos en laboratorio para calibrar la ecuación. La utilidad de esta ecuación es mayor cuando se quiere optimar el proceso de desinfección, ya que de esta manera obtendremos información de manera inmediata (5 minutos) de los cambios en el contenido microbiológico. El incremento en el contenido de *Coliformes fecales* es directamente proporcional al número y volumen de partículas presentes en el agua residual.

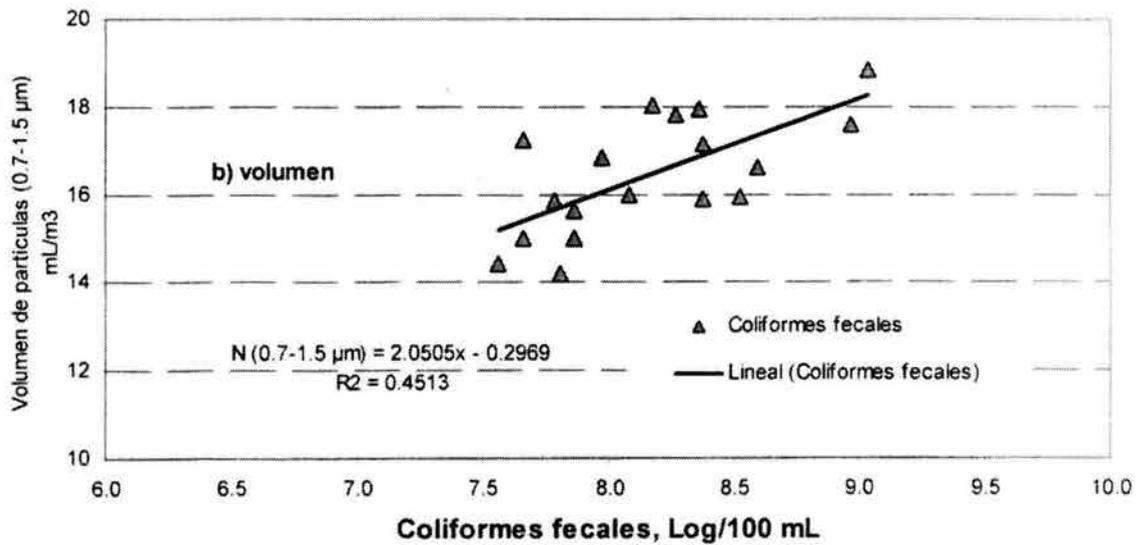
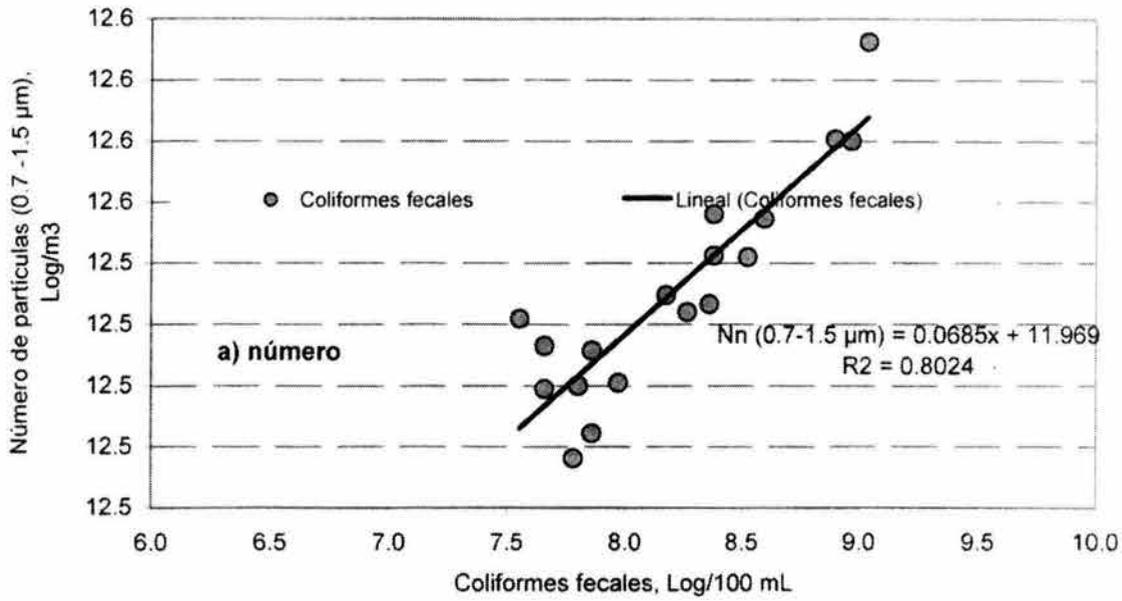


Figura 6.12. Correlación entre el número (a) y volumen (b) de partículas y el contenido de coliformes fecales del Agua Residual de la Ciudad de México

Salmonella spp.- Respecto al contenido de *Salmonella* spp, nuevamente la ecuación que mejor se ajustó fue la que correlaciona su concentración con el número de partículas (Figura 6.13 a) y no el volumen que estas ocupan (Figura 6.13 b). La relación que guardan en ambos casos queda representada por:

$$\text{Salmonella spp en Log /100 mL} = Nn - 10.4 /0.36, R^2=0.73 \quad (5)$$

$$\text{Salmonella spp en Log /m}^3 = Nv+705/121, R^2=0.53 \quad (6)$$

Donde:

Nn = Número de partículas correspondiente al tamaño de 1.5 - 4 μm en Log/m³

Nv = volumen de partículas correspondiente al tamaño de 1.5 -4 $\mu\text{m}/\text{m}^3$

La ecuación relacionada al contenido de *Salmonella* spp es útil cuando el número de partículas con diámetros de 1.5 a 4 μm varía entre 12.7 a 13.3 log/m³ y su contenido de este microorganismos patógeno de 6.8 a 7.8 log/100 mL. Para valores diferentes a los establecidos se deberá realizar una serie de verificaciones en el laboratorio para determinar una nueva calibración de la ecuación.

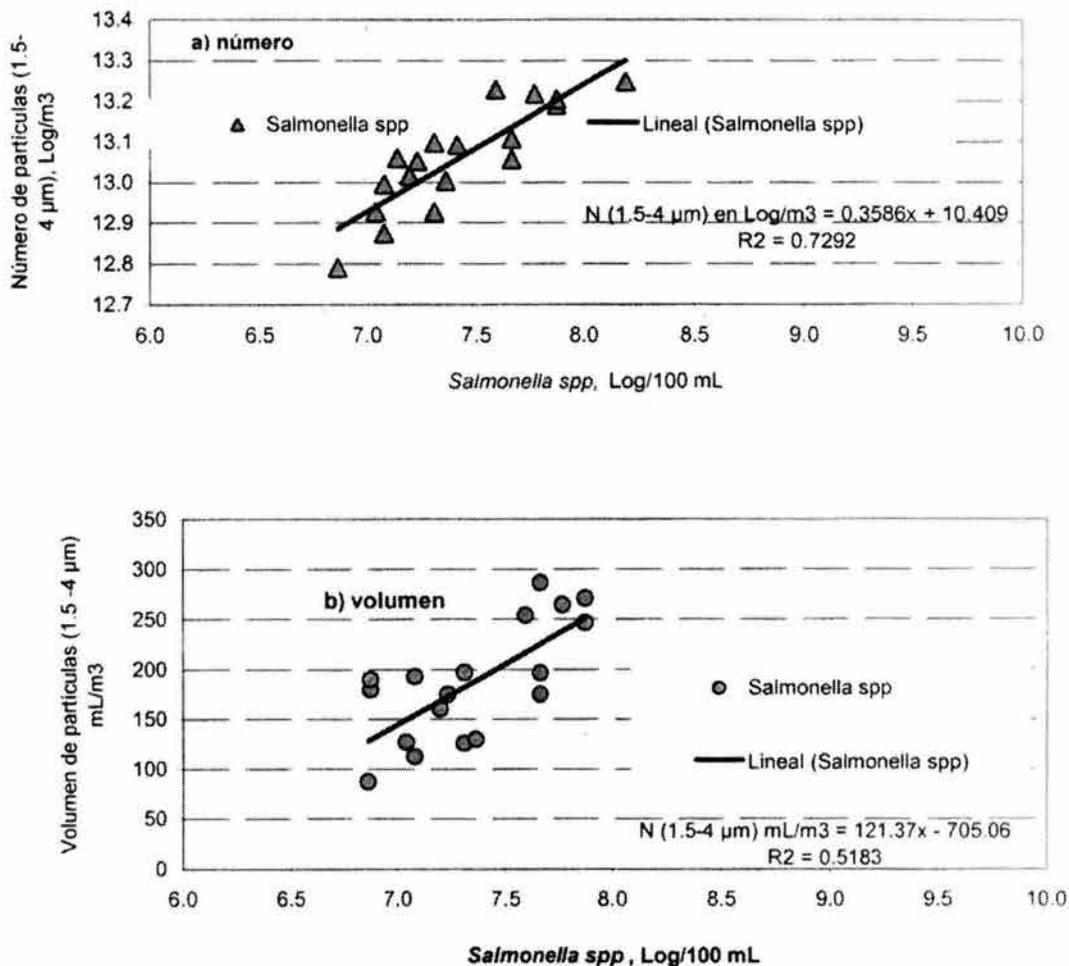


Figura 6.13. Correlación entre el número (a) y volumen (b) de partículas y el contenido bacteriológico del Agua Residual de la Ciudad de México

de partículas y microorganismos que presentó el agua residual, ambas ecuaciones tienen límites de aplicación ya que sólo se pueden utilizar para el intervalo de tamaño de partícula y concentración de microorganismos determinados (de 10^6 hasta 10^9 Log).

Con base en lo expuesto hasta el momento, se puede señalar que la técnica de corriente eléctrica es capaz de medir el número y volumen de partículas que, por su tamaño se relacionan con el contenido de los huevos de helmintos, los coliformes fecales y la *Salmonella* spp. La presencia de estas partículas indican la probabilidad de estos microorganismos estén presentes en el medio acuoso y de acuerdo con Lawler *et al.*, 1980 y Levine *et al.*, 1985, el desempeño de los procesos químicos utilizados para remover contaminantes (SST, microorganismos, nutrientes, metales pesados) puede optimarse al conocer cada uno de los parámetros está asociado con las partícula, ya que la mayoría de los contaminantes se incorporan dentro de ellas. Por último, la técnica de tamaño de partícula es capaz de determinar los cambios de calidad que se tienen en el agua residual en cuestión de minutos.

6.2.3 Cambio en la Distribución del Volumen y Número de Partícula con Base en el Tipo y Dosis de Coagulante Aplicado

El sulfato de aluminio es el coagulante más empleado en potabilización, su uso data de 1920 (Tang *et al.*, 1998, Gray, 1995 y AWWA, 1997). En agua residual su empleo es común hoy en día (Gregory y Dupont, 2001) aunque existe la tendencia a sustituirlo por coagulantes pre-hidrolizados como los policloruros de aluminio (PAC's). Éstos compuestos presentan las siguientes ventajas: *a)* menor consumo de alcalinidad y por ende menor alteración del pH; *b)* no añaden sulfatos al agua; *c)* producen bajas concentraciones de aluminio residual; *d)* funcionan a bajas temperaturas; *e)* producen una menor cantidad de lodos, y *f)* forman un flóculo con buena sedimentabilidad. Aunque tiene estas ventajas también poseen algunos inconvenientes: *a)* son más caros que el sulfato de aluminio (el doble); *b)* tienen una menor estabilidad (Matsui *et al.*, 1989, Lars, 1998 y Eaglebrook, 2003) y *c)* sobre todo, han sido poco estudiados. En particular, en relación con este último punto, se desconoce su eficiencia para remover microorganismos, el mecanismo por el cual actúan y la eficiencia para reducir la concentración de partículas de diferentes tamaños (Lars, 1998). Dentro de las diferencias que existen entre los PAC's y el sulfato de aluminio destaca la basicidad, propiedad de la cual se cree depende la capacidad para remover contaminantes ya que determina la cantidad de iones prehidrolizados (Lars, 1998 y Najm *et al.*, 1998). En el caso del sulfato de aluminio, la basicidad es nula, en tanto que en los policloruros varía en función de la relación OH:Al entre 1 y 3. Con base en esta característica, los policloruros se clasifican en baja, media y alta basicidad (Lars, 1998 y Najm *et al.*, 1998).

Por lo antes expuesto, en esta etapa se compararon tres tipos de PAC's (basicidad baja (40%) con Pax xl 60, basicidad media (60%) con Pax xl 13 y basicidad alta (80%) con Pax xl 19) contra el sulfato de aluminio (basicidad nula) todos con dosis de 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$. La evaluación se realizó en términos de su capacidad para remover partículas de diferentes tamaños, en volumen y número, así como para remover microorganismos (huevos de helmintos, coliformes fecales, *Salmonella* spp) y los SST.

6.2.3.1 Comparación de los coagulantes para remover partículas de diferentes tamaños con base en el volumen total que ocupan

La Tabla 6. 7 y Figura 6.14 muestran el volumen total que ocupan las partículas tanto del agua residual cruda como de la tratada con los diversos coagulantes en dosis de 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$. Con base en estos resultados se establece que puesto que la concentración de aluminio es la misma, la basicidad de los coagulantes es un factor determinante de la capacidad para remover las partículas de diferente tamaño. De forma general, a mayor basicidad y dosis bajas mayor remoción de partículas; ello corresponde a reducir el volumen inicial de partículas de 816 mL/m^3 a valores de 128 (84%), 133 (81%), 168 (79%) y 228 mL/m^3 (72%), con los coagulantes de alta, media, baja y nula basicidad, respectivamente. Lo anterior significa que con la misma dosis de aluminio, el sulfato de aluminio de basicidad nula remueve 12% menos de partículas que el Pax xl 19 de basicidad alta para la dosis de 100 $\mu\text{molAl/L}$.

El aumento de la dosis de 100 a 200 $\mu\text{molAl/L}$ mostró que la basicidad de los coagulantes deja de tener importancia y mejora en la calidad del efluente se logra con todos los coagulantes al incrementar la dosis. De hecho, al aplicar de 100 a 200 $\mu\text{molAl/L}$ se logran 86 a 94%, para todos los coagulantes. En forma particular, tanto con 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$, el coagulante de basicidad media es el que presentó un mejor desempeño (94 y 93%) incluso que el de basicidad alta, el cual tuvo 88 y 92%. La razón de esto es que el Pax xl 13 es el único que no provoca la resuspensión de partículas. Este fenómeno de resuspensión se atribuye a la sobredosificación de las especies poliméricas de aluminio con alta proporción molar OH:Al que conducen a la conversión inmediata del producto excedente en Al(OH)_3 inactivo. Este efecto se ha reportado por Gregory y Dupont (2001); Matsui (1998); Lars (1996) y Eaglebrook (2003), quienes indican además, que el efecto es irreversible y adverso a la remoción.

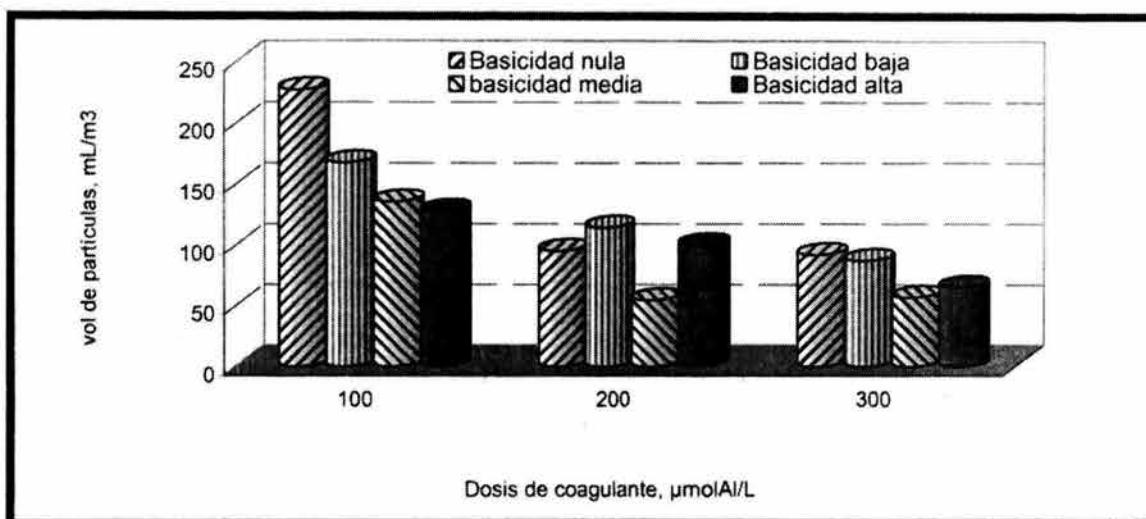


Figura 6.14. Contenido de partículas en volumen de acuerdo a la dosis y tipo de coagulante

Tabla 6.7. Reducción del volumen total de partículas con base en el tipo y dosis de coagulante

Coagulante	100 $\mu\text{molAl/L}$		200 $\mu\text{molAl/L}$		300 $\mu\text{molAl/L}$	
	Volumen de partículas, mL/m³	(Remoción, %)	Volumen de partículas, mL/m³	(Remoción, %)	Volumen de partículas, mL/m³	(Remoción, %)
Agua residual cruda	816	(0)	816	(0)	816	(0)
Sulfato de aluminio (basicidad nula)	228	(72)	95	(88)	92	(89)
Pax xl 60 (basicidad baja)	168	(79)	114	(86)	88	(89)
Pax xl 13 (basicidad media)	133	(81)	55	(94)	57	(93)
Pax xl 19 (basicidad alta)	128	(84)	100	(88)	65	(92)

Con base en lo expuesto, se considera que 200 $\mu\text{molAl/L}$ es la dosis óptima y que el mejor coagulante resultó el Pax xl 13 de basicidad media.

6.2.3.2. Análisis estadístico de la selección de las condiciones de operación con base en el volumen total de partículas

El efecto que presenta el tipo de coagulante y la dosis aplicada en un proceso físico químico pueden ser evaluados a través del *volumen total de partículas* y el análisis de variancia soporta lo antes mencionado. El tipo de coagulante y la dosis aplicada sobre la eficiencia demostró tener un efecto significativo al resultar una F calculada mayor que la F de tablas para ambos factores (Tabla 6.8) rechazando con ello la hipótesis nula que señala que los tratamientos se comportan de igual manera. Asimismo, se determinó, que ninguna F calculada fue menor que la unidad, por lo tanto, el modelo es adecuado y no tiene un error inflado. En el **Anexo 2a** se encuentran los resultados del análisis de variancia para otros parámetros de evaluación.

Tabla 6.8. Análisis de variancia, con base en el volumen de partículas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancia
Basicidad	379	3	126	31	2.92	0.0001
Dosis	878	2	439	110	3.32	0.0001
Interacción	499	6	83	21	2.42	0.0002
Residual	143	36	4			0.0001
Total	1899	47				

Además, de acuerdo con la prueba de mínima diferencia significativa (MDS) se concluyó que los coagulante de basicidad media y alta tenderán a comportarse de la misma manera, es decir, ambos coagulantes removerán una cantidad similar de partículas a medida que se amplía la dosis de coagulante. Los tratamientos en donde se aplicó un coagulante de basicidad nula y basicidad baja fueron distintos marcando una diferencia significativa con el coagulante de basicidad media y alta (Tabla 6.9).

Con base en la respuesta del factor dosis, se determinó que los tratamientos donde se aplicaron 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ mostraron una remoción diferente del volumen de partículas, diferencia debida al incremento de la remoción de partículas del efluente tratado con el coagulante de basicidad media (Pax xl 13).

Tabla 6.9. Análisis de intervalos múltiples basicidad, volumen y dosis con el 95% de significancia

Coagulantes (basicidad y dosis)	Números	Mínima diferencia significativa (MDS)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
Basicidad nula	12	71.9	X				
Basicidad baja	12	76.8		X			
Basicidad media	12	80.1			X		
Basicidad alta	12	80.6			X		
100	16	84	X				
200	16	78		X			
300	16	82			X		
Contraste							
Nula - Baja						-4.89	4.65
Nula - Media						-8.27	4.65*
Nula - Alta						-8.71	4.65*
Baja - Alta						-3.82	4.65
Baja - Media						-3.38	4.65

Coagulantes (basicidad y dosis)	Números	Mínima diferencia significativa (MDS)	Homogeneidad del grupo	Diferencia +/-	Límites
Alta -Media				0.44	4.65
100 - 200				-15.7	4.03*
100 - 300				-9.4	4.03*
200 - 300				-5.3	4.03*

* Estadísticamente denota una diferencia significativa

6.2.3.3 Comparación de la selección de coagulantes con base en los SST y la distribución de partículas

El contenido de SST como parámetro de evaluación de la dosis y el tipo de coagulante puede llevar a una mala toma de decisiones como se manifiesta en la Figura 6.15 la cual conduce a no poder seleccionar fácilmente la dosis y el coagulante óptimos. Los resultados más útiles que se evidencian en esta Figura son que la mejora en la remoción se debe al incremento en la dosis de coagulante. Además, se observa que con 100 y 200 $\mu\text{molAl/L}$ el sulfato de aluminio removerá una menor cantidad de SST que los policloruros y solo hasta 300 $\mu\text{molAl/L}$ será similar. Por otra parte, los policloruros no muestran una diferencia significativa en su desempeño. Los Policloruros en dosis de 200 $\mu\text{molAl/L}$ producen un efluente con un contenido de SST que fluctúa entre 31 y 33 mg/L, que prácticamente es lo mismo. Con 300 $\mu\text{molAl/L}$ el contenido disminuye entre 18 y 21 mg/L y, no se observa resuspensión promovida por el incremento de la dosis. Asimismo, para ambas dosis la mayor concentración se presentó con el coagulante de baja basicidad y la menor con el de alta basicidad (presentando una diferencia de una unidad entre cada coagulante en ambas dosis). Así, si uno usa los SST como parámetro se elegirá la dosis de 300 $\mu\text{molAl/L}$ de cualquiera de los policloruro que como fue demostrado no es la óptima además resulta más costosa.

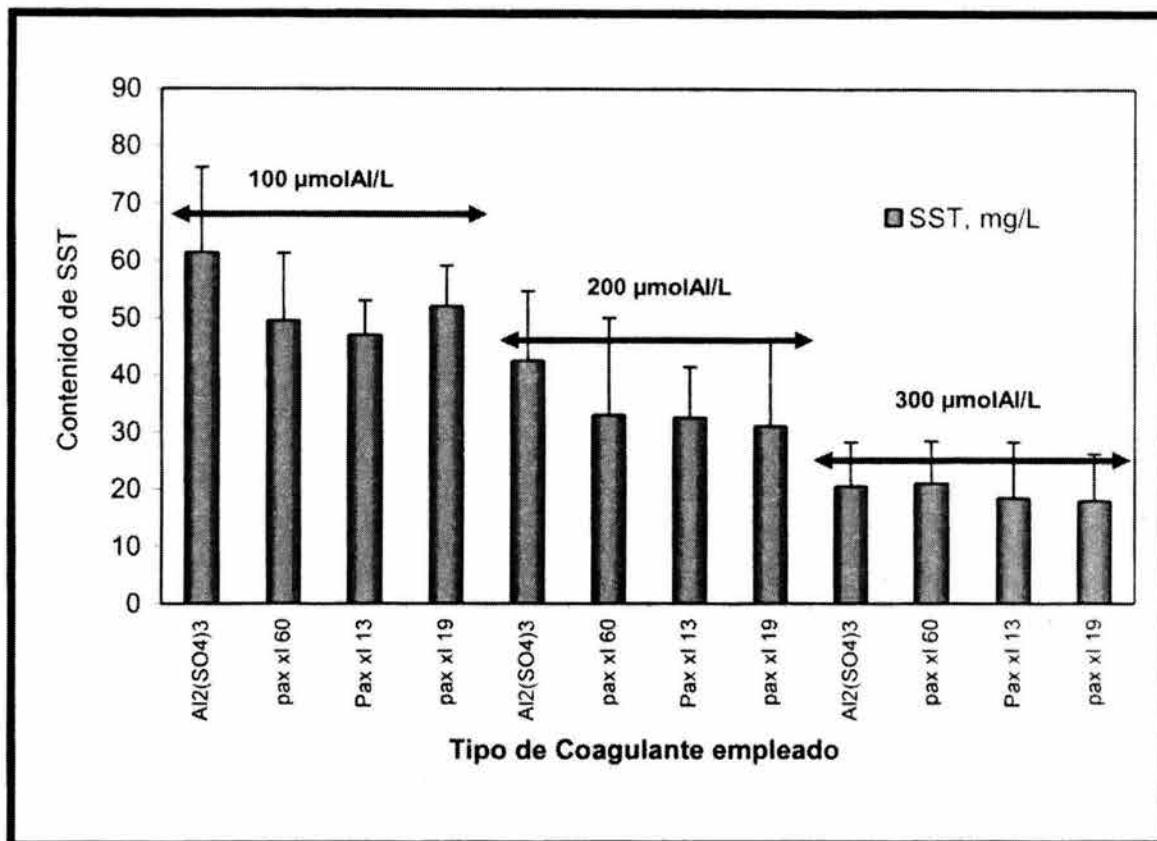


Figura 6.15. SST remanente de acuerdo al tipo y dosis de coagulante empleado

6.2.3.3.1 Relación entre partículas y SST

Se determinó que el contenido de SST está relacionado con el volumen total de partículas. La expresión queda representada por (Figura 6.16):

$$\text{SST, mg/L} = 0.2 * \text{volumen de partículas (mL/m}^3\text{)} + 13.9, \quad R^2 = 0.85 \quad (7)$$

Con base en la ecuación (6) es posible determinar el contenido de SST en el intervalo de 19 a 70 mg/L (que abarcan límites máximos y mínimos obtenidos en este tipo de sistema de acuerdo con Jiménez *et al.*, 1997 y 1998) y que corresponde a tener un volumen de partículas en los efluentes entre 25 y 285 mL/m³ en un máximo de 5 minutos. Ello indica que también sería posible evaluar en línea los SST en una planta.

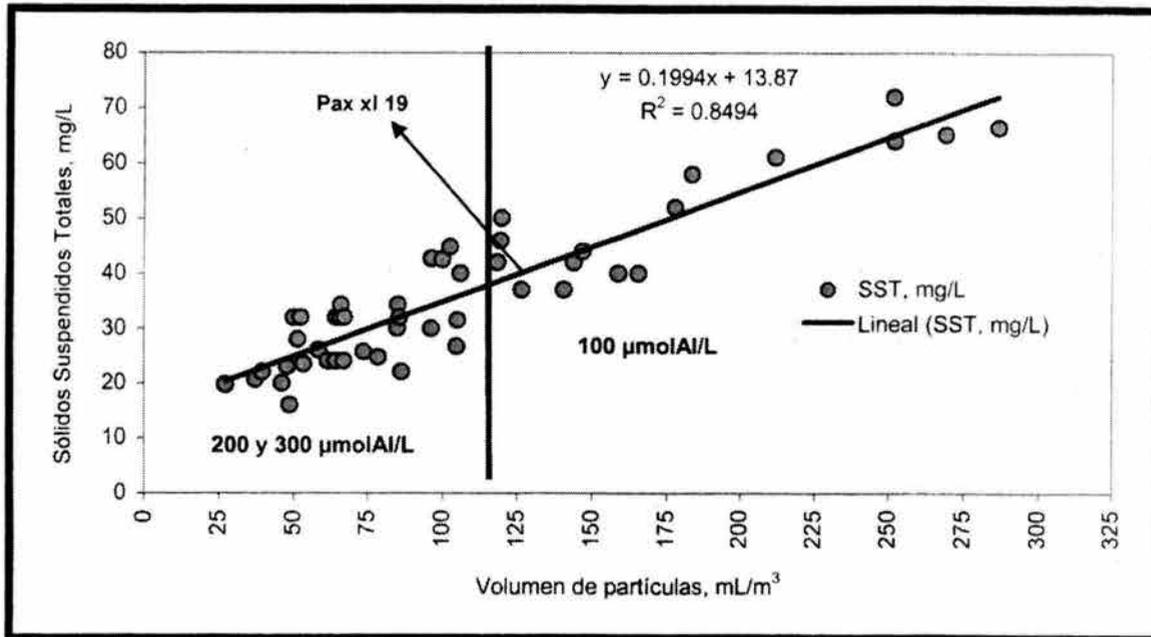


Figura 6.16. Relación entre el contenido de SST y el volumen de partículas del AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes

Una de las principales metas de este estudio, es analizar el efecto del tipo y la dosis de coagulante con base la remoción de las partículas contenidas en los intervalos de tamaño de interés, en particular, entre 0.7 y 1.5 μm , 1.5 y 4 μm y de 20 a 80 μm pues son los tamaños donde presumiblemente se asocian con el mayor contenido de los Coliformes fecales, *Salmonella spp* y huevos de helmintos, respectivamente. Por ello, en las siguientes secciones se presenta este análisis, aunque para agilidad de lectura sólo se muestra los resultados del coagulante de basicidad nula (Sulfato de aluminio) y el coagulante de basicidad media (Pax xl 13), considerados como el peor y el mejor coagulante. Los resultados para los otros coagulantes se presentan en el **Anexo 1**.

6.2.3.4 Efecto del coagulante sobre la remoción de partículas por intervalo de tamaño

6.2.3.4.1 Sulfato de aluminio (basicidad nula)

En la Figura 6.17 se encuentran los resultados del contenido de volumen de partículas para diversos tamaños al aplicar dosis de 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ de sulfato de aluminio. Con bajas dosis de coagulante (100 $\mu\text{molAl/L}$) se observa que las partículas con diámetros mayores a 1.5 μm se aglomeran con mayor facilidad. Por ello, las de 0.7 a 1.5 μm (tamaño de los coliformes fecales) sólo disminuyeron de 11 mL/m^3 hasta 9 mL/m^3 (20%). Por otro lado, las partículas mayores a este tamaño se removieron en más del 50%; así, las comprendidas entre 1.5 a 4 μm (tamaño de la *Salmonella spp*) disminuyeron de 117 a 49 mL/m^3 (58%) y, finalmente, las de 20 a 80 μm (tamaño de los huevos de helmintos) se redujeron de 123 hasta 56 mL/m^3 (55%).

Con el aumento de la dosis a 200 $\mu\text{molAl/L}$ se mejoró la reducción de las partículas en todos los tamaños y de manera general la remoción se incrementó en un 30% con respecto a la obtenida con 100 $\mu\text{molAl/L}$. Con ello, las partículas de 0.7 a 1.5 μm , de 1.5 a 4 μm y de 20 a 80 μm se redujeron de los volúmenes iniciales mencionados anteriormente a 4 mL/m^3 (59%), 21 mL/m^3 (82%) y 17 mL/m^3 (86%), respectivamente. Sin embargo, al aplicar 300 $\mu\text{molAl/L}$ sólo se mejoró la remoción de las partículas comprendidas entre los tamaños de 0.7 a 20 μm y, en contraparte, se ocasiona la resuspensión o el rompimiento de las partículas con diámetros de 20 a 80 μm , pues en este último intervalo, el volumen de partículas fue de 32 mL/m^3 (8% mayor con respecto al obtenido con 200 $\mu\text{molAl/L}$). Es decir, la dosis de 300 $\mu\text{molAl/L}$ fue menos eficiente para remover las partículas de tamaño igual al tamaño de los huevos de helmintos.

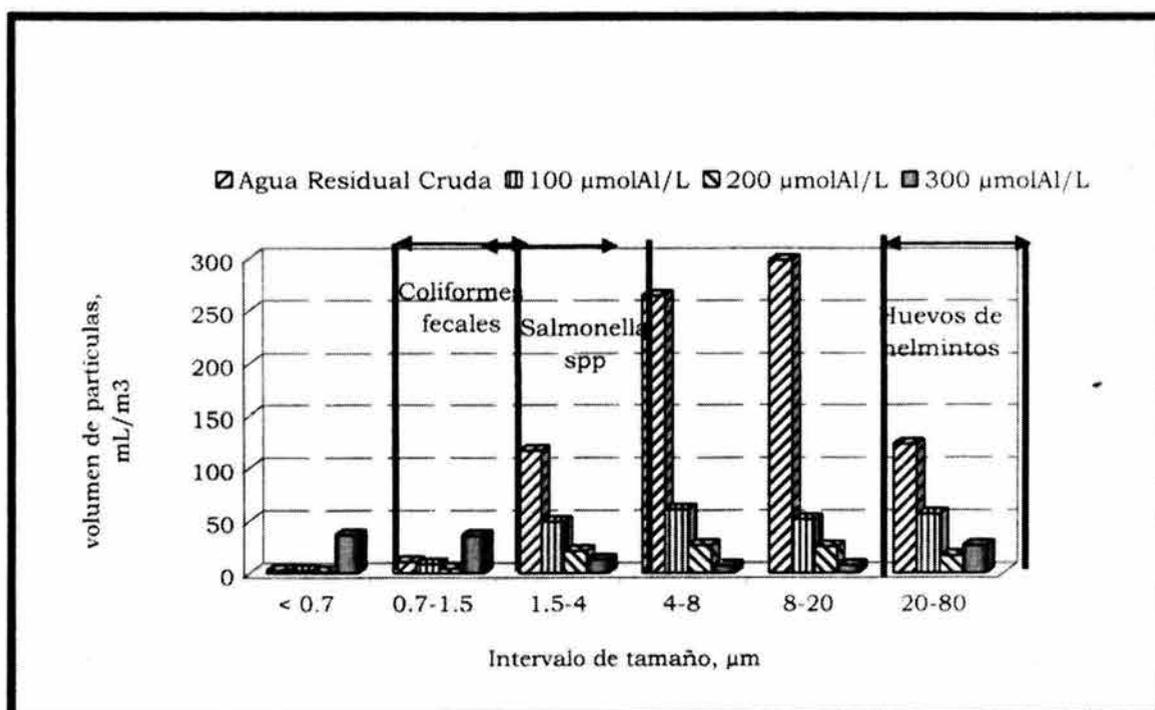


Figura 6.17. Volumen de partículas por tamaño de interés al aplicar diversas dosis de sulfato de aluminio (basicidad cero)

6.2.3.4.2 Pax xl 13, basicidad media

Con el coagulante Pax xl 13 (basicidad media), se determina que a dosis bajas (100 $\mu\text{molAl/L}$), se produjo una mayor reducción de las partículas pequeñas (< 20 μm), pero no así, para las partículas entre 20 y 80 μm donde la remoción alcanzada fue la mínima lograda por los coagulantes. En efecto, la reducción en porcentaje para las partículas entre 0.7 y 1.5 μm fue de 46%, las de 1.5 y 4 μm lo hicieron hasta 81% y las de 20 a 80 μm sólo a 35% (Figura 6.18). El incremento de la dosis hasta 200 $\mu\text{molAl/L}$ permitió reducir el volumen de partículas en todos los intervalos de tamaño pero destaca el efecto en las partículas con diámetros de 20 a 80 μm , condición que permitió alcanzar la máxima remoción de estas partículas y mejorar sustancialmente la calidad del efluente. Así, la remoción se incrementó hasta 57% para las partículas entre 0.7 y 1.5 μm , a 85% para las de 1.5 y 4 μm y finalmente a 95% en las de 20 a

80 μm . La dosis de 300 $\mu\text{molAl/L}$ causó una ligera mejora en la remoción de las partículas pequeñas, sin embargo, provocó la resuspensión de partículas mayores a $> 20 \mu\text{m}$.

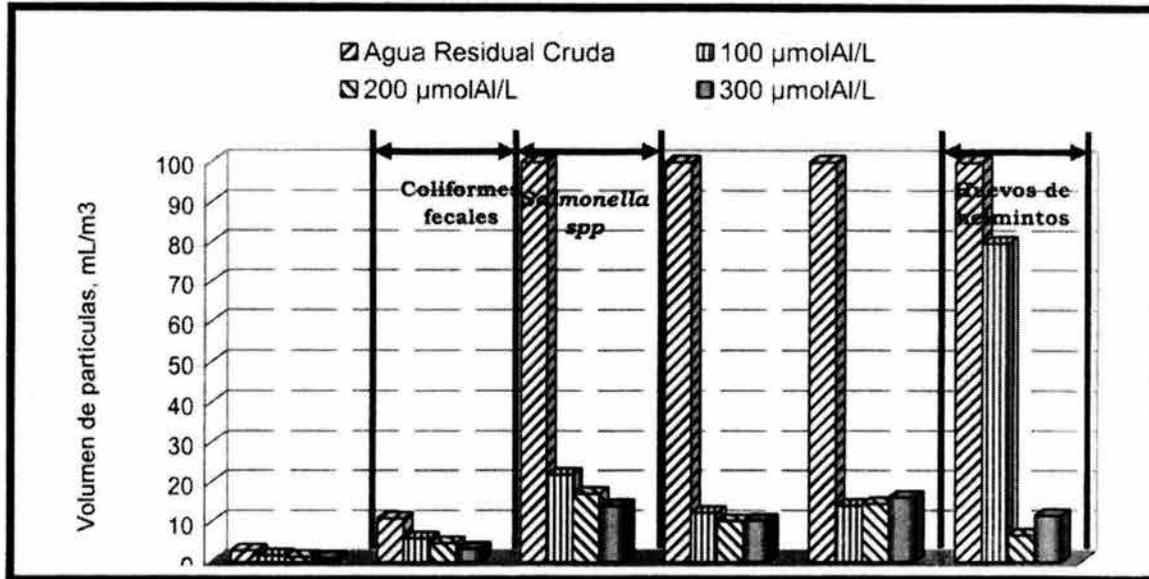


Figura 6.18. Contenido del volumen de partículas por intervalo de tamaño al aplicar diversas dosis de Pax xl 13 (basicidad media)

6.2.3.5 Comparación de la distribución del volumen de partículas para sulfato de aluminio y Pax xl 13

Otra consideración importante durante la evaluación de los coagulantes es la manera en cómo se distribuyen en por ciento las partículas remanentes que se muestran en la Figura 6.19a para el sulfato de aluminio y 6.19b para el Pax xl 13. Con el sulfato de aluminio, el volumen total remanente que varió de 92 y 228 mL/m^3 quedó distribuido entre los tamaños de 0.7 a 80 μm . De este volumen se destaca que entre un 17 y 35% está formado por partículas con tamaños entre 20 y 80 μm (tamaño de los huevos de helmintos), el mayor porcentaje corresponde al efluente donde se aplicó la dosis más grande, debido a la resuspensión originada y que se traduce en un incremento de la probabilidad de que los huevos de helmintos permanezcan en el sistema. Con respecto a la distribución del volumen de partículas para el coagulante Pax xl 13 (basicidad media) en la Figura 6.32 b se observa que del volumen total que varió de 54 hasta 135 mL/m^3 hubo una reducción significativa sobre las partículas entre 20 y 80 $\mu\text{molAl/L}$ al incrementar la dosis de 100 hasta 200 $\mu\text{molAl/L}$ donde de un 59% del volumen con ese diámetro se redujeron hasta 12% para posteriormente incrementarse a 21% debido a una resuspensión. También, se puede observar que a medida que la dosis de coagulante se incrementa, el efluente está constituido principalmente por partículas $< 20 \mu\text{m}$ ($< 80\%$).

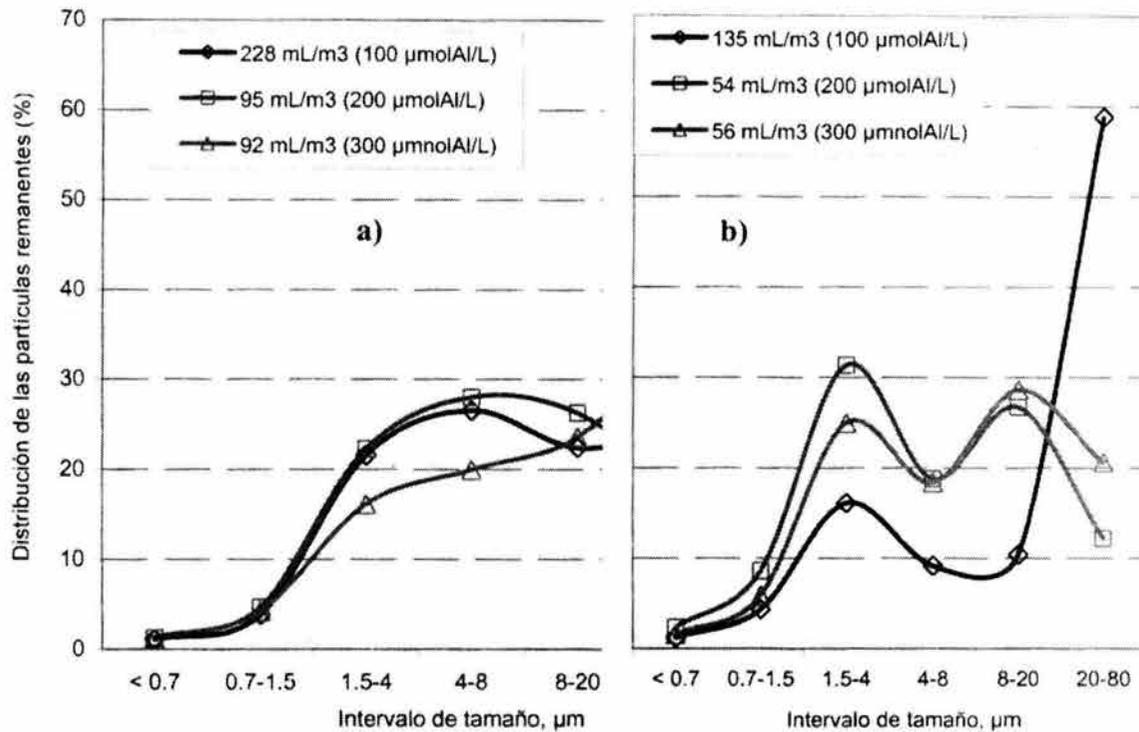


Figura 6.19 Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con a) Sulfato de Aluminio (basicidad nula) y b) Pax xl 13

La Figura 6.20 presenta los resultados de la distribución encontrada al aplicar 200 $\mu\text{molAl/L}$ de los diversos coagulantes. De acuerdo con los resultados, se determinó que cada coagulante tiene diferente capacidad para remover las partículas. En cualquier caso, el efluente obtenido contendrá partículas de 0.7 hasta 80 μm . Sin embargo, para fines de este estudio lo más importante es señalar el volumen remanente de las partículas con tamaños entre 20 y 80 μm por involucrar de manera directa a los huevos de helmintos. Como se muestra en la Figura, el 35% del volumen total de partículas contenido en el efluente tratado con Pax xl 60 (114 mL/m³) se presenta en el intervalo de 20 a 80 μm , el efluente donde se aplicó sulfato de aluminio (95 mL/m³) representa el 18% y el efluente con Pax xl 19 (100 mL/m³) y Pax xl 13 (54 mL/m³) solo el 12%; considerando este último coagulante removerá la mayor cantidad de partículas de este diámetro.

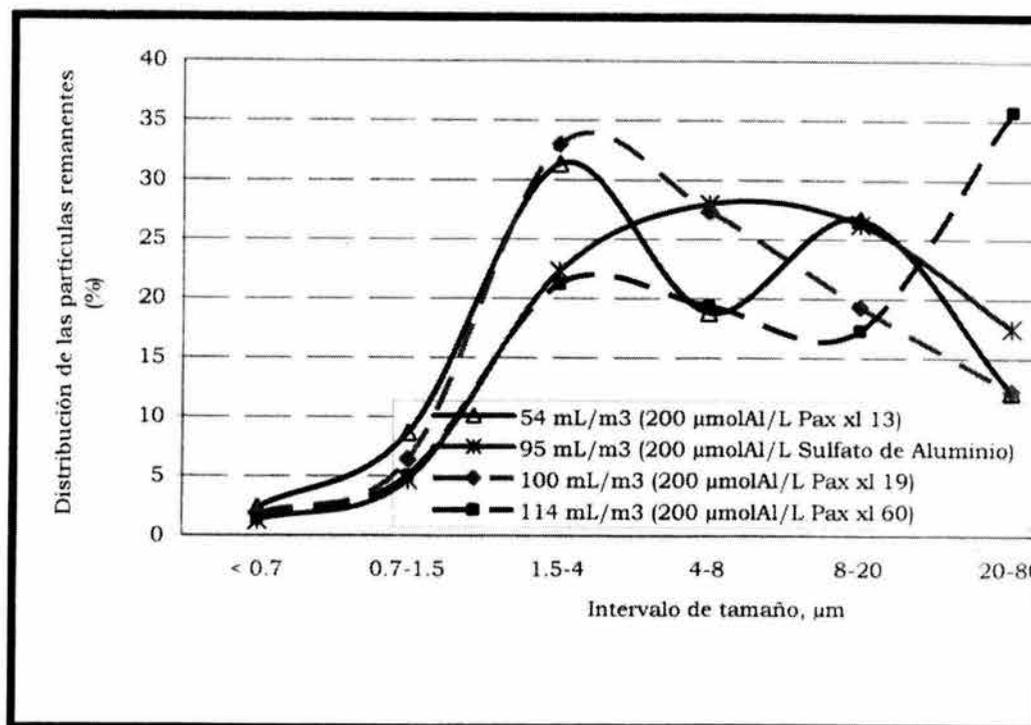


Figura 6.20. Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con 200 µmolAl/L de diversos coagulantes

6.2.3.6 Remoción en volumen de partículas entre 20 y 80 µm y la aplicación del estudio en la remoción de huevos de helmintos

El diámetro de los huevos de helmintos es de 20 a 80 µm y es el de mayor interés para este estudio. La Tabla 6.10 presenta la reducción de partículas entre 20 y 80 µm de acuerdo al tipo y dosis de coagulante aplicado. De acuerdo con ella, se confirma que con 100 µmolAl/L, el coagulante de basicidad alta (Pax xl 19) logró reducir el volumen de partículas de 123 mL/m³ a 22 mL/m³ (82%), mientras que con los otros coagulantes, se lograron remociones inferiores al 50%. Con un incremento de la dosis hasta 200 µmolAl/L fue posible incrementar la remoción hasta en un 95%. Bajo las mismas condiciones, el coagulante de basicidad media (Pax xl 13) mostró ser más eficiente, lo que indica que la basicidad (contenida) deja de tener importancia.

Tabla 6.10. Contenido de partículas de 20 a 80 µm en efluentes tratados con diversas dosis de coagulantes.

Coagulante	100 µmolAl/L	200 µmolAl/L	300 µmolAl/L
	Volumen de partículas, mL/m ³ , (Remoción, %)		
Agua residual cruda	123 (0)	123 (0)	123 (0)
Sulfato de aluminio (basicidad nula)	56 (54)	17 (86)	32 (74)
Pax xl 60 (basicidad baja)	69 (44)	41 (67)	39 (68)
Pax xl 13 (basicidad media)	80 (35)	6.7 (95)	11.7 (90)
Pax xl 19 (basicidad alta)	22 (82)	12.3 (90)	14.8 (88)

6.2.3.7 Relación entre volumen de partículas y los huevos de helmintos

Durante este periodo experimental, se determinó que el contenido de huevos de helmintos en el agua tratada con los diversos coagulantes en distintas dosis está relacionado con el volumen de partículas con tamaño entre 20 y 80 μm con un coeficiente de relación de 0.92 (Figura 6.21) pero no así con el número de partículas donde el coeficiente relación fue de 0.50. La expresión lineal que explica este comportamiento quedó establecida por la ecuación:

$$\text{HH, HH/L} = 0.04 * \text{volumen de partículas (mL/m}^3, 20\text{-}80 \mu\text{m)}, r^2 = 0.92 \quad (8)$$

De esta forma y para garantizar que el efluente tratado con un sistema físico químico cumpla con la NOM 001-SEMARNAT-96, en cuanto al contenido de huevos de helmintos para riego no restringido (<1 HH/L) es necesario garantizar que el efluente producido contenga un volumen de partículas con tamaños entre 20 y 80 μm menor a 26 mL/m^3 , condición que se logra cuando se aplican las dosis de 100 a 300 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 19 (basicidad alta), 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 13 (basicidad media, 200 $\mu\text{molAl/L}$ de sulfato de aluminio (basicidad nula). En todos los efluentes donde se aplicaron 100 $\mu\text{molAl/L}$ (excepto para Pax xl 19), con el policloruro de baja basicidad y en aquellos casos donde las partículas se resuspendieron (300 $\mu\text{molAl/L}$ de sulfato de aluminio), se obtuvo un contenido de huevos de helmintos para riego restringido > 1 y < 3 HH/L, que corresponde a un volumen de partículas menor a 80 mL/m^3 .

Con estos resultados se concluye que para lograr el objetivo del estudio no es obligatorio tener una máxima remoción de partículas entre 20 y 80 μm para producir un efluente con < a 1 HH/L, es decir, no es necesario incrementar la dosis a 200 $\mu\text{molAl/L}$ con el Pax xl 13 sino con el empleo de la dosis óptima económica de 100 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 19 (basicidad alta) se producirá un efluente con 0.8 ± 0.5 HH/L.

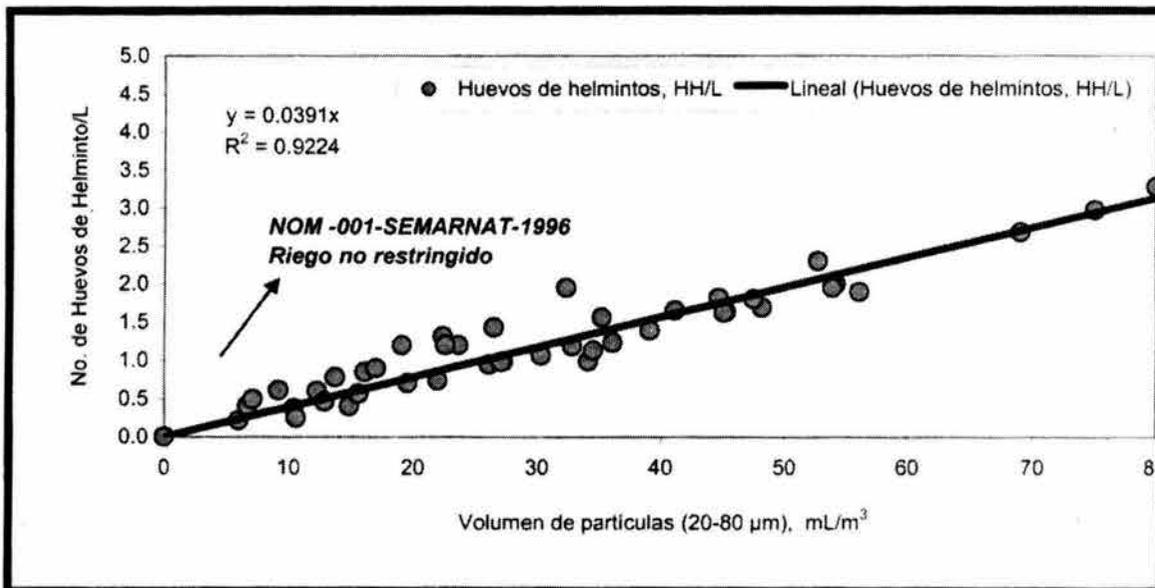


Figura 6.21. Relación entre el contenido de huevos de helmintos y volumen de partículas de los efluentes tratados con diversos tipos y dosis de coagulantes

6.2.3.8. Evaluación de coagulantes a través del número total de partículas

Como se recordará, el equipo usado para medir el contenido de partículas permite obtener información en volumen y en número. Una vez realizado en la sección anterior el análisis en cuanto al volumen, ahora se hará para el número de partículas. Desafortunadamente, el evaluar la eficiencia de los coagulantes con base en el número de partículas no necesariamente conlleva a la mejor decisión sobre la selección de la dosis y el tipo de coagulante. De hecho, debido al orden de magnitud que presenta tanto el agua residual cruda como la tratada (10^{13} unidades logarítmicas) los resultados de este parámetro sólo tienen significado si se relacionan con el contenido bacteriológico (Coliformes fecales y *Salmonella spp*). Sin embargo, en términos de remoción estos valores no muestran importancia alguna. Por ello se omitieron de esta tesis la presentación detallada de los resultados en número y sólo se analizarán de manera general los resultados en los intervalos de tamaño de interés.

En la Tabla 6.11 se presenta la remoción de partículas en número para cada tratamiento. Independientemente de la basicidad contenida, cada coagulante mostró una capacidad diferente de remoción, aunque en términos generales, el coagulante de basicidad alta (Pax xl 19) es menos eficiente. De un total de 13.2 Ulog/m^3 se observa una mejora de manera gradual a medida que hay un incremento en la dosis de todos los coagulantes, a pesar de ello, con $300 \mu\text{molAl/L}$, la remoción máxima que se alcanzó fue de 0.9 unidades logarítmicas, es decir, muy baja y fue con sulfato de aluminio. Este valor, sin embargo, es del orden del determinado por Hatukai (1997), quien afirma que para este tipo de proceso, la máxima remoción que se alcanza es de 1 unidad logarítmica.

Tabla 6.11. Remoción del número total de partículas con base en el tipo y dosis de coagulante aplicado

Coagulante	100 $\mu\text{molAl/L}$	200 $\mu\text{molAl/L}$	300 $\mu\text{molAl/L}$
	Número de partículas, Ulog/m^3 (Remoción, %)		
Agua residual cruda	13.2 (0)	13.2 (0)	13.2 (0)
Sulfato de aluminio (basicidad nula)	12.9 (0.3)	12.5 (0.7)	12.3 (0.9)
Pax xl 60 (basicidad baja)	12.7 (0.5)	12.6 (0.6)	12.4 (0.8)
Pax xl 13 (basicidad media)	12.6 (0.6)	12.5 (0.7)	12.4 (0.8)
Pax xl 19 (basicidad alta)	12.8 (0.4)	12.7 (0.5)	12.5 (0.7)

6.2.3.8.1 Comparación de la distribución del tamaño de partículas en número con diversas dosis de Pax xl 19 y Sulfato de aluminio

En la Figura 6.22 se presenta la distribución de las partículas remanentes en porcentaje de acuerdo a la dosis de a) sulfato de aluminio y b) Pax xl 19. En ella se destaca que el número de partículas que permanecieron en el sistema varió entre 12.4 y 12.7 unidades logarítmicas/ m^3 , es decir, quedaron prácticamente iguales y que de éstas, el 89.4% quedó incluido en los tamaños $< 4 \mu\text{m}$ y, por ende, los coliformes fecales y la *Salmonella spp* por su tamaño

permanecerán en concentraciones similares al agua residual. El 11.5% de las partículas son de tamaño entre 4 y 20 μm y, finalmente, sólo el 0.1% corresponde a los tamaños entre 20 y 80 μm (tamaño de los huevos de helmintos). Cabe mencionar que el efluente producido en el sistema contiene sólo el 1.6% de partículas $< 8 \mu\text{m}$, esto es importante porque indica que bajo ninguna circunstancia las partículas presentes afectaran el desempeño de la desinfección, operación unitaria que es primordial dentro de un esquema de tratamiento para reúso. Además los resultados obtenidos son similares a los reportados por Boller y Blazer (1998) los cuales determinaron que en los efluentes tratados físico químicamente las partículas $< 8 \mu\text{m}$ contribuyen al 99% de la masa total. Los resultados muestran finalmente, que para el objetivo del estudio no es tan determinante analizar la remoción en número de partículas como el volumen que ocupan y su distribución.

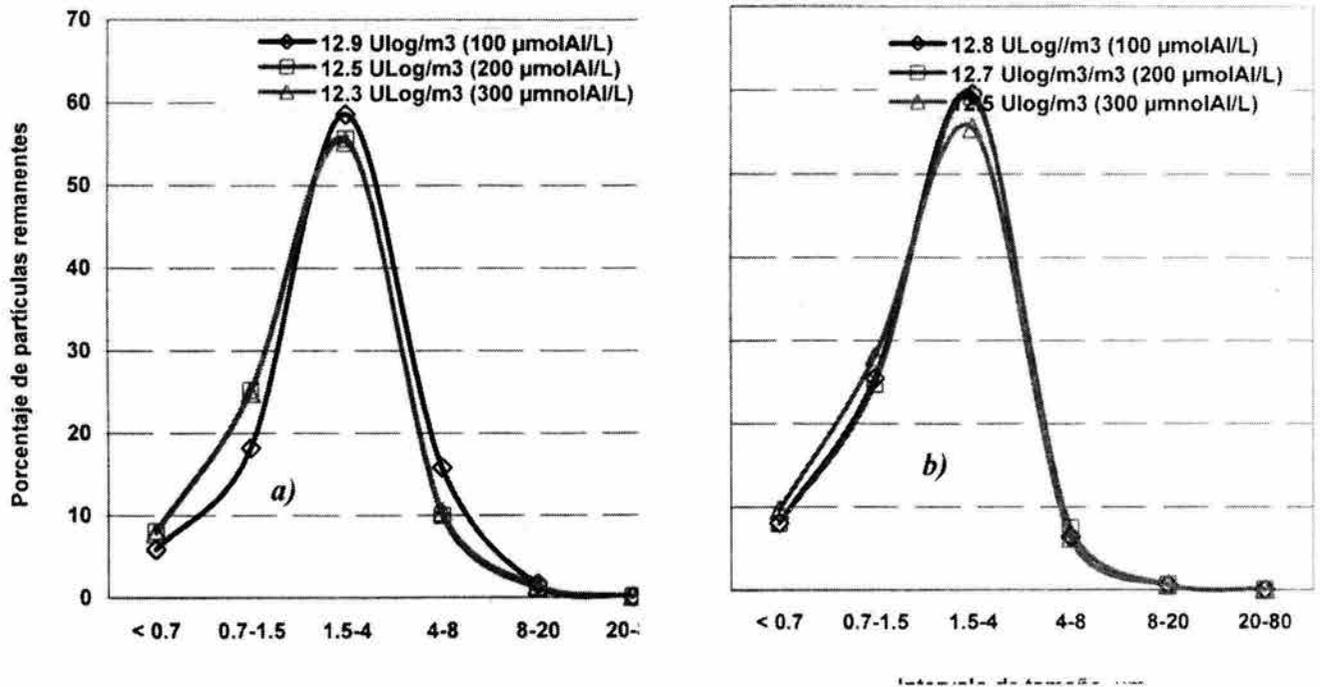


Figura 6.22. Distribución por intervalo de tamaño al aplicar diversas dosis de a) Sulfato de aluminio y b) Pax xl 19

La Figura 6.23 presenta la distribución de las partículas para los diversos coagulantes al aplicar una dosis de 300 $\mu\text{molAl/L}$. Nuevamente se observa que las diferencias son marginales lo que resta utilidad práctica a este parámetro.

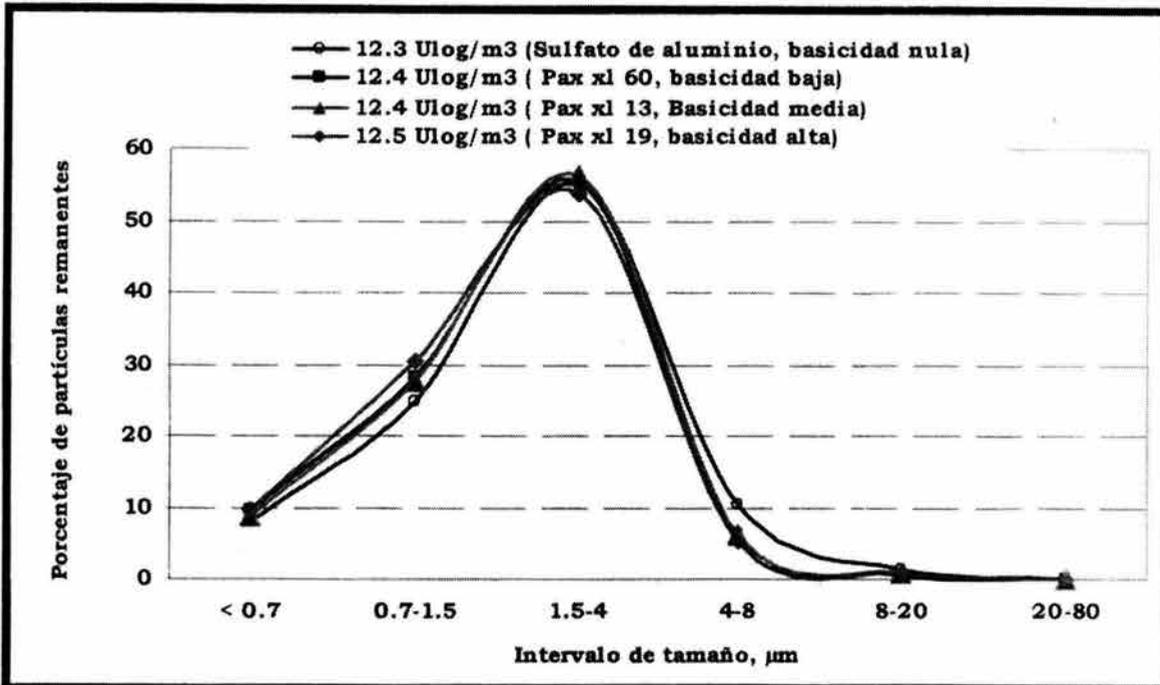


Figura 6.23. Distribución por intervalo de tamaño al aplicar 300 µmolAl/L de diversos coagulantes

6.2.3.9 Remociones del número de partículas entre 0.7 y 1.5 µm (coliformes fecales)

De manera general, se encontró que el sistema fisicoquímico tiene límites para remover las partículas pequeñas y por ende los microorganismos asociados. La Tabla 6.12 presenta los resultados de la remoción de partículas con tamaños de 0.7 hasta 1.5 µm. Aún cuando la aplicación de una mayor dosis de coagulante logra incrementar la remoción de partículas, el sistema no logra separarlas totalmente. Con una dosis de 100 µmolAl/L la reducción de las partículas comprendidas entre 0.7 y 1.5 µm (tamaño de los coliformes fecales) varía de 0.1 Unidades logarítmicas (coagulante de basicidad alta) a 0.2 (basicidad nula, baja y media). Con el incremento de las dosis de coagulante a 200 y 300 µmolAl/L la remoción de las partículas se vio beneficiada al obtener valores máximos de 0.4 y 0.6 unidades logarítmicas, respectivamente y, en este caso el sulfato de aluminio fue el más eficiente, mientras que el coagulante de basicidad alta fue menos eficiente.

Tabla 6.12. Porcentaje de remoción de partículas de 0.7 a 1.5 µm

Coagulante	100 µmolAl/L	200 µmolAl/L	300 µmolAl/L
	Número de partículas, Ulog/m ³ (Remoción, %)		
Agua residual cruda	12.3 (0)	12.3 (0)	12.3 (0)
Sulfato de aluminio (basicidad nula)	12.1 (0.2)	11.9 (0.4)	11.7 (0.6)
Pax xl 60 (basicidad baja)	12.1 (0.2)	12 (0.3)	11.9 (0.4)
Pax xl 13 (basicidad media)	12.1 (0.2)	11.9 (0.4)	11.8 (0.5)
Pax xl 19 (basicidad alta)	12.2 (0.1)	12.1 (0.2)	11.9 (0.4)

6.2.3.9.1 Relación entre el número de partículas (0.7 – 1.5 µm) y los coliformes fecales

La Figura 6.24, muestra la relación encontrada entre el contenido de Coliformes fecales y el número de partículas con tamaño de 0.7 a 1.5 µm. Debido a la mínima cantidad de partículas que este proceso es capaz de reducir, en especial, las comprendidas en los intervalos de tamaño previamente establecidos, los microorganismos asociados permanecerán en el sistema, por lo que bajo ninguna condición se podrá cumplir con la normatividad para el parámetro de coliformes fecales ya que ello implicaría la reducción de al menos 6.5 unidades logarítmicas. Aún así, se elaboró una ecuación que describe el comportamiento:

$$CF \text{ en Log/100 mL} = N - 8.5/0.52, \quad R^2 = 0.74 \quad (9)$$

Donde N representa el número de partículas correspondientes al tamaño de los CF en Log/m³

Esta ecuación sólo es útil para obtener información acerca del contenido de Coliformes fecales entre un valor que varía de 6 a 6.5 Unidades Logarítmicas/100 mL y que corresponde a la presencia de partículas entre 11.5 y 13.8 Ulog/m³ en los efluentes por lo que no tiene utilidad práctica.

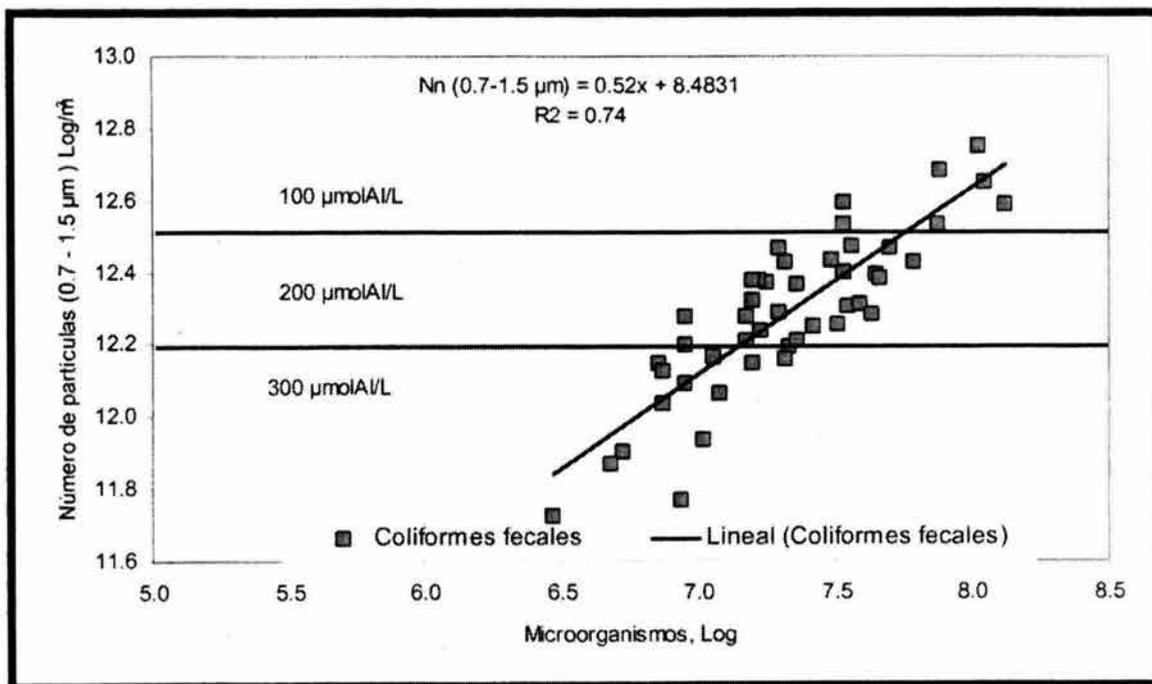


Figura 6.24. Relación entre el contenido de coliformes fecales y el número de partículas del AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes

6.2.3.10 Remociones del número de partículas entre 1.5 y 4 µm (Salmonella spp.)

Los resultados obtenidos con respecto a las partículas comprendidas en el intervalo de 1.5 a 4 µm y que corresponden al tamaño de la *Salmonella* spp, se presentan en la Tabla 6.13. Se determinó que de igual manera que en el caso anterior, el incremento de la remoción de partículas fue totalmente determinada por el incremento de la dosis de coagulante aplicada. Con 100 µmolAl/L se removió el mínimo de 0.2 unidades logarítmicas con sulfato de aluminio, y el máximo de 0.5 con los coagulantes de media y baja basicidad. Con 200 y 300 µmolAl/L se obtuvieron remociones máximas de 0.7 y 1 unidad logarítmica lo que indica que la basicidad deja de ser un factor determinante en la remoción del número de partículas, de hecho, durante esta evaluación la basicidad no tuvo importancia alguna.

Tabla 6.13. Remoción de partículas de 1.5 a 4 µm

Coagulante	100 µmolAl/L	200 µmolAl/L	300 µmolAl/L
	Número de partículas, Ulog/m ³ (Remoción, %)		
Agua residual cruda	12.9 (0)	12.9 (0)	12.9 (0)
Sulfato de aluminio (basicidad nula)	12.7 (0.2)	12.3 (0.6)	12.1 (0.8)
Pax xl 60 (basicidad baja)	12.4 (0.5)	12.4 (0.5)	11.9 (1)
Pax xl 13 (basicidad media)	12.4 (0.5)	12.2 (0.7)	12.1 (0.8)
Pax xl 19 (basicidad alta)	12.6 (0.3)	12.5 (0.4)	12.2 (0.7)

6.2.3.10.1 Relación entre el número de partículas (1.5-4 µm) y la Salmonella spp

De forma similar a los Coliformes fecales y con los mismos comentarios efectuados, se determinó la correlación entre *Salmonella* spp y número de partículas entre 1.5 y 4 µm (Figura 6.25). Así, la ecuación que describe dicho comportamiento está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Salmonella spp en Log/100 mL} = N - 8.2/0.66, R^2=75 \quad (10)$$

Donde N representa el número de partículas correspondiente al tamaño de la *Salmonella* spp en Log/m³

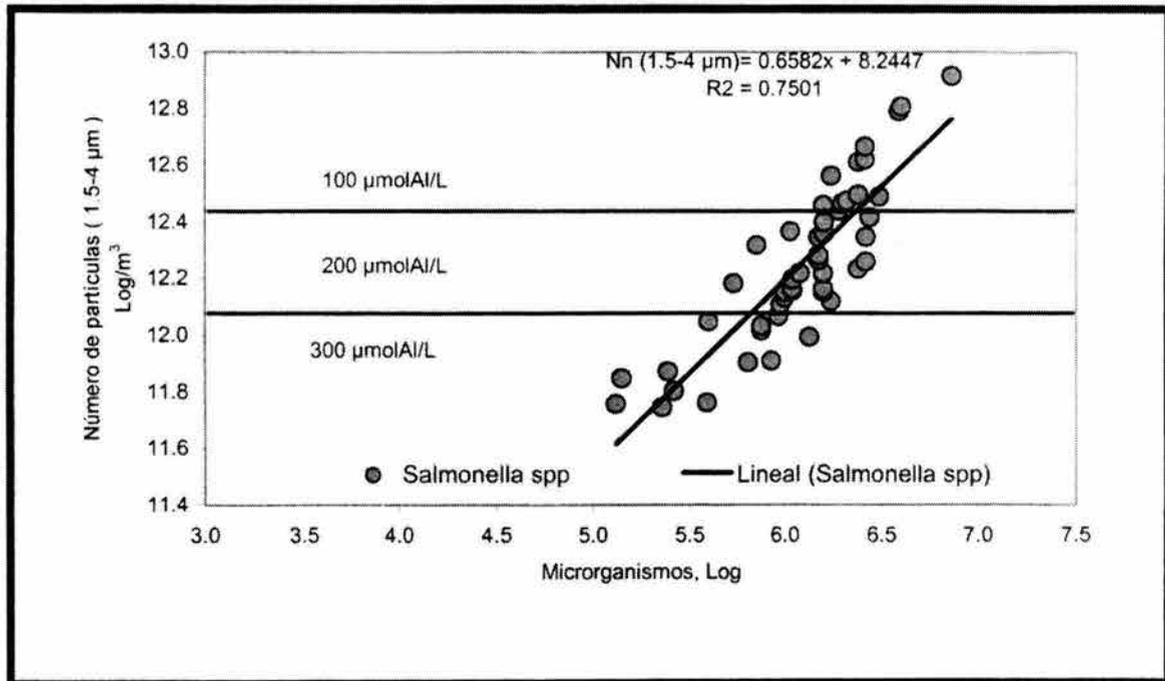


Figura 6.25. Relación entre el contenido de microbiológico y el número de partículas del AR tratada con diversos tipos y dosis de coagulantes

6.2.4 Estudio de la Remoción de Partículas con Base en el Gradiente y Tiempo de Contacto Aplicados durante la Coagulación

Autores como O'Melia *et al.* (1999), Dentel *et al.* (1988), Metcalf y Eddy (1995), Han y Lawler (1992) y Scriven *et al.* (1999), entre otros, establecen la importancia de determinar el gradiente y el tiempo requeridos para mezclar de manera adecuada el coagulante dentro de la cámara de mezcla rápida para desestabilizar partículas a mayor velocidad. Del mismo modo Metcalf y Eddy (1995), Odegaard (1998) y Al-Malack *et al.* (1999) indican que los gradientes en la mezcla rápida varían de 250 a 1500 s^{-1} con tiempos de 5 a 60 segundos. A su vez, Amirtharajah y Mill (1982) establecieron que durante la coagulación el 90% de las partículas se desestabilizan en un tiempo inferior a 5 s. No obstante, en ninguno de estos estudios se señalan las condiciones para desestabilizar partículas por intervalo de tamaño. Por ello, durante esta etapa, se estudió la importancia del gradiente de velocidad y tiempo de mezcla en función de los tamaños de las partículas. Para ello, se aplicaron gradientes de 160, 300 y 460 s^{-1} combinados con los tiempos de contacto de 15, 30 y 60 segundos. En cada tratamiento se aplicaron 100 $\mu mol Al/L$ de Pax xL 19 (basicidad alta y coagulante que resultó como óptimo en la etapa anterior del estudio) durante la coagulación, para la floculación tanto el gradiente como el tiempo de contacto se mantuvieron constantes en 50 s^{-1} y 5 minutos respectivamente, con la aplicación de 0.5 mg/L de polímero aniónico. El tiempo de sedimentación utilizado en todos los casos fue de 5 minutos. Los resultados se discuten a continuación y debido a que durante la evaluación de los coagulantes, el volumen de partículas resultó ser el parámetro determinante para la obtención de la dosis y el tipo de coagulante óptimo económico así como la relación que existe entre las partículas y los huevos de helmintos, objetivo de la tesis, en este apartado se discutirá de manera amplia este parámetro y muy breve el número de partículas.

6.2.4.1 Comparación de los gradientes con base en el tamaño de partículas medidas en volumen

6.2.4.1.1 Remoción total de partículas en función del gradiente

El volumen de partículas que permanece en los efluentes con los diversos gradientes y tiempos de contacto aplicados se muestra en la Figura 6.26 y Tabla 6.14. El Agua Residual Cruda (ARC) empleada en el estudio contenía un volumen de partículas de 1192 mL/m^3 , es decir 0.7 veces más que en la etapa anterior. Al aplicar un gradiente de 160 s^{-1} , el incremento del tiempo de contacto favoreció la remoción de partículas, así, el volumen total inicial se redujo a concentraciones de 76, 56 y 52 mL/m^3 al utilizar 15, 30 y 60 segundos, respectivamente. Con 300 s^{-1} se encontró que el efluente de 15 y 30 segundos contenía un volumen de 52 y 50 mL/m^3 , es decir, en ambos tiempos se tuvo un volumen similar, mientras que para el de 60 segundos se produjo una resuspensión y el volumen se incrementó a 92 mL/m^3 . Finalmente, con el gradiente de 460 s^{-1} ocurre un efecto contrario al de 160 s^{-1} pues conforme aumentó el tiempo de contacto la calidad del efluente se deterioró siendo más evidente a los 60 s donde el incremento fue de 4.1 veces con respecto al obtenido con 15s. Así, de manera general y bajo las condiciones de trabajo estudiadas, para obtener la mejor calidad del agua en cuanto al volumen de

partículas, durante la coagulación, se podría utilizar un gradiente de 160 s^{-1} con 60 segundos o 460 s^{-1} con 15 segundos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rossini *et al.* (1999), al determinar que en la coagulación pueden existir dos diferentes tiempos mínimos el primero de 10s y el segundo entre 60 y 90s, de acuerdo al gradiente aplicado y el tipo de agua. AWWA (1989) determina que este comportamiento se debe a que la etapa de barrido de la coagulación (sweep coagulation) y la neutralización de las cargas de los coloides se realiza de manera similar con ambos tiempos. Sin embargo, cuando se utiliza un gradiente pequeño con y tiempos largos se produce un floc relativamente denso de acuerdo con lo determinado por Tekeppe y Ham (1971), es decir, el efecto mayor se puede determinar durante la etapa de formación del floculo. Por ello, para una decisión más precisa y para fines de este trabajo, se analizará tanto la eficiencia de remoción para las partículas de 20 a $80 \mu\text{m}$ (tamaño de los huevos de helmintos) como el gasto energético que representan ambas condiciones.

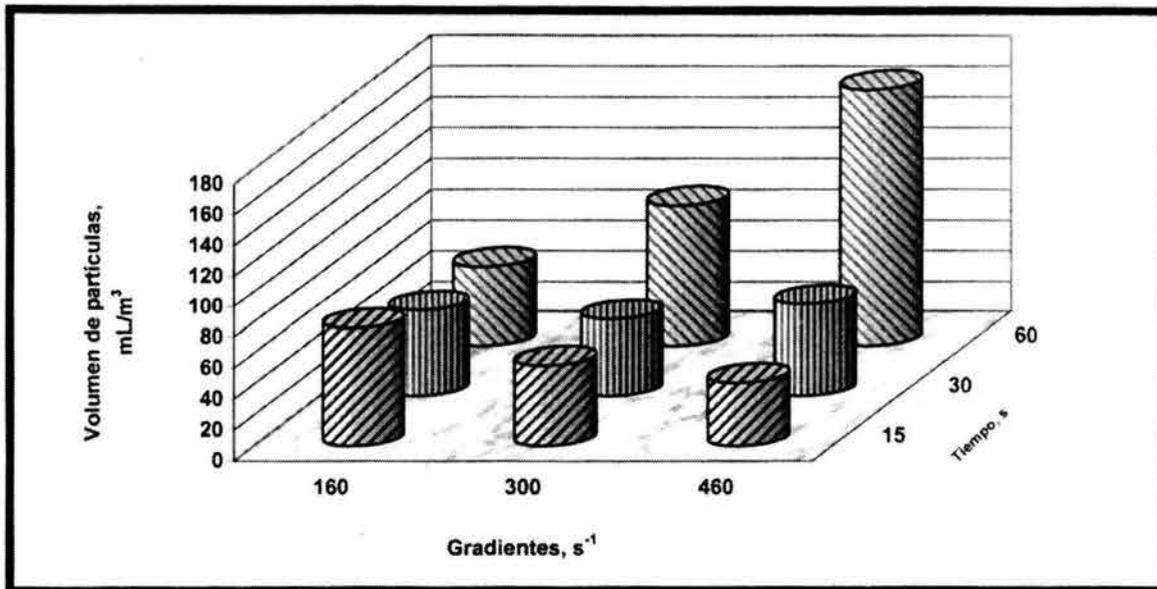


Figura 6.26. Contenido del volumen de partículas en diversos efluentes

Tabla 6.14. Remoción de partículas en volumen con base en el gradiente y tiempo aplicados en la coagulación

Tiempo de contacto	Gradiente, s^{-1}		
	160	300	460
mL partículas/ m^3 (% remoción)			
Agua Residual Cruda	1192 (0%)	1192 (0%)	1192 (0%)
15 segundos	76 (94%)	52 (96%)	41 (97%)
30 segundos	56 (95%)	50 (96%)	60 (95%)
60 segundos	52 (96%)	92 (92%)	167 (86%)

6.2.4.1.2 Análisis estadístico de la elección del mejor gradiente con base en el volumen total de partículas

Estadísticamente y con una probabilidad del 95%, **el gradiente y el tiempo** utilizados mostraron un efecto significativo sobre la remoción del volumen de partículas (Tabla 6.15), por lo que ambos parámetros deben considerarse para el diseño del proceso. De acuerdo con el análisis de variancia, aún cuando todos los tratamientos se comportan de forma diferente, los gradientes 160s^{-1} con 60 s y 460s^{-1} con 15 s muestran la menor diferencia (Tabla 6.16) por lo que estos resultados confirman lo mencionado en la sección anterior. En el **Anexo 2b** se encuentran los resultados del análisis de variancia para otros parámetros de evaluación

Tabla 6.15. Análisis de variancia con base en el volumen de partículas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F Calculada	F Tablas	Nivel de significancia
Tiempo	99.8	2	49.9	3.6	3.44	0.3884
Gradiente	63.2	2	31.6	4.4	3.44	0.5442
Residual	1111	22	50.52			
Total	1274	26				

Tabla 6.16. Análisis de intervalos múltiples volumen, 95% de significancia

Nivel	Número	Minima diferencia significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
160 s ⁻¹	9	74	X				
300 s ⁻¹	9	91		X			
460 s ⁻¹	9	96			X		
15 segundos	9	81	X				
30 segundos	9	93		X			
60 segundos	9	97			X		
Contraste							
160 s ⁻¹ - 300s ⁻¹						21.3	15.7*
160 s⁻¹ - 460 s⁻¹						-5.4	15.7*
300 s ⁻¹ - 460s						15.9	15.7*
15 seg -30 seg						2.7	2.4*
15 seg - 60 seg						1.2	2.4*
30 seg - 60 seg						1.5	2.4*

*Estadísticamente son diferentes

6.2.4.2 Selección del gradiente con base en los SST

Los resultados de la evaluación del gradiente y tiempo con base al contenido de SST remanentes en los diversos tratamientos se presentan en la Figura 6.27. De igual manera que con el volumen total de partículas, al aplicar un gradiente de 160s^{-1} la calidad del efluente se mejora a medida que el tiempo de contacto aumenta pues los SST disminuyeron de 248 mg/L a 33, 27 y 23 mg/L en tiempos de 15, 30 y 60 s respectivamente. Con el gradiente de 300s^{-1} el tiempo deja de ser importante después de 30 s y se observó la resuspensión de partículas para 60s incrementándose de 22 a 28 mg/L. Con 463s^{-1} se observa que con 15 s y 60 s se obtuvo un efluente con 19 y 17 mg/L respectivamente. Con esto, si se realizara la selección del gradiente y del

tiempo con base en el contenido de SST se optaría por el gradiente de 460 s^{-1} en un tiempo de 15 segundos sin considerar el gradiente de 160 s^{-1} con 60 s como se hace con el volumen.

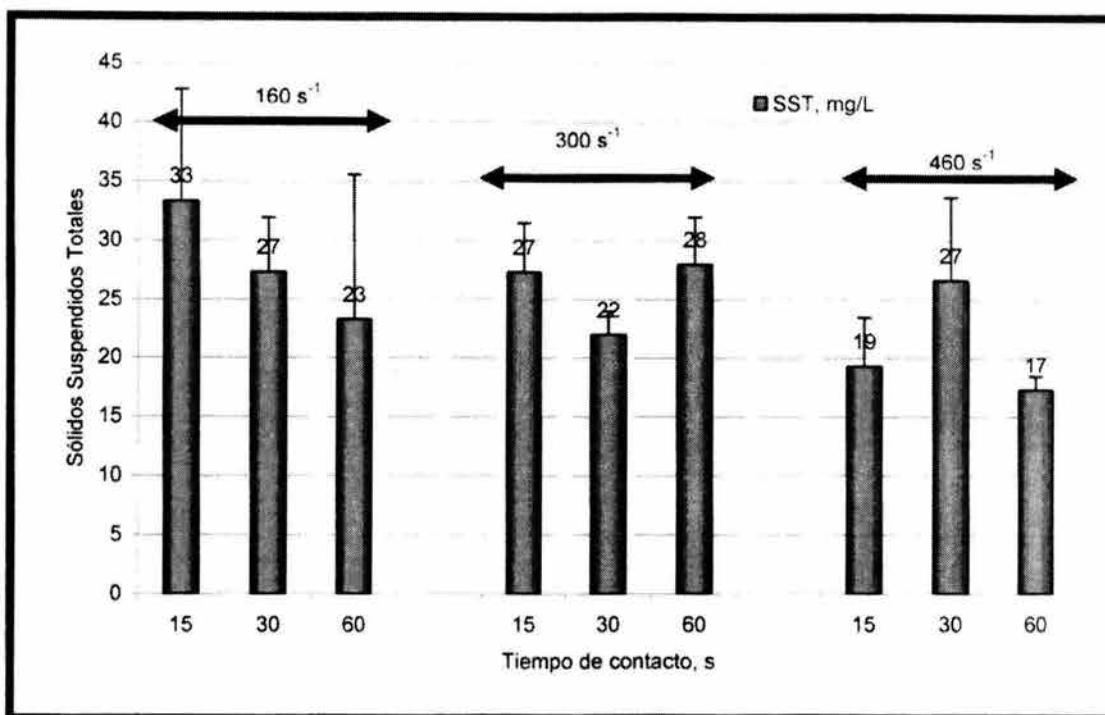


Figura 6.27. Contenido de SST de los efluentes obtenidos con diversas condiciones de gradientes.

6.2.4.3 Efecto del coagulante sobre la remoción de partículas por intervalo de tamaño

A continuación se presentan los resultados con relación a la remoción de partículas para los diámetros de 0.7 a $1.5\ \mu\text{m}$, 1.5 a $4\ \mu\text{m}$ y 20 a $80\ \mu\text{m}$, que corresponden con los tamaños de los Coliformes fecales, *Salmonella spp* y Huevos de helmintos, respectivamente, en función de los diversos gradientes y tiempos de contacto.

Gradiente 160 s^{-1}

La Figura 6.28 presenta el volumen de partículas por intervalos de tamaños de los efluentes tratados a 160 s^{-1} con diferentes tiempos de contacto. Con este gradiente, el factor tiempo fue determinante debido a que su incremento establece la reducción de partículas en todos los intervalos de tamaño y por ende la disminución de microorganismos asociados. En efecto, las partículas de 0.7 a $1.5\ \mu\text{m}$ se redujeron de 16 mL/m^3 a 4 (74%), 3 (81%) y 2 mL/m^3 (85%) con los tiempos de 15, 30 y 60 s. Las de 1.5 a $4\ \mu\text{m}$, lo hicieron de 160 mL/m^3 hasta 11.6 (93%), 6.6 (96%) y 5.9 mL/m^3 (97%). Finalmente, para el intervalo de partículas entre 20 y $80\ \mu\text{m}$ (las de mayor interés) disminuyeron de 180 mL/m^3 hasta 26 mL/m^3 (85%) con 15 s, 23 mL/m^3 (87%) con 30s a 12 mL/m^3 (93%) con 60 s.

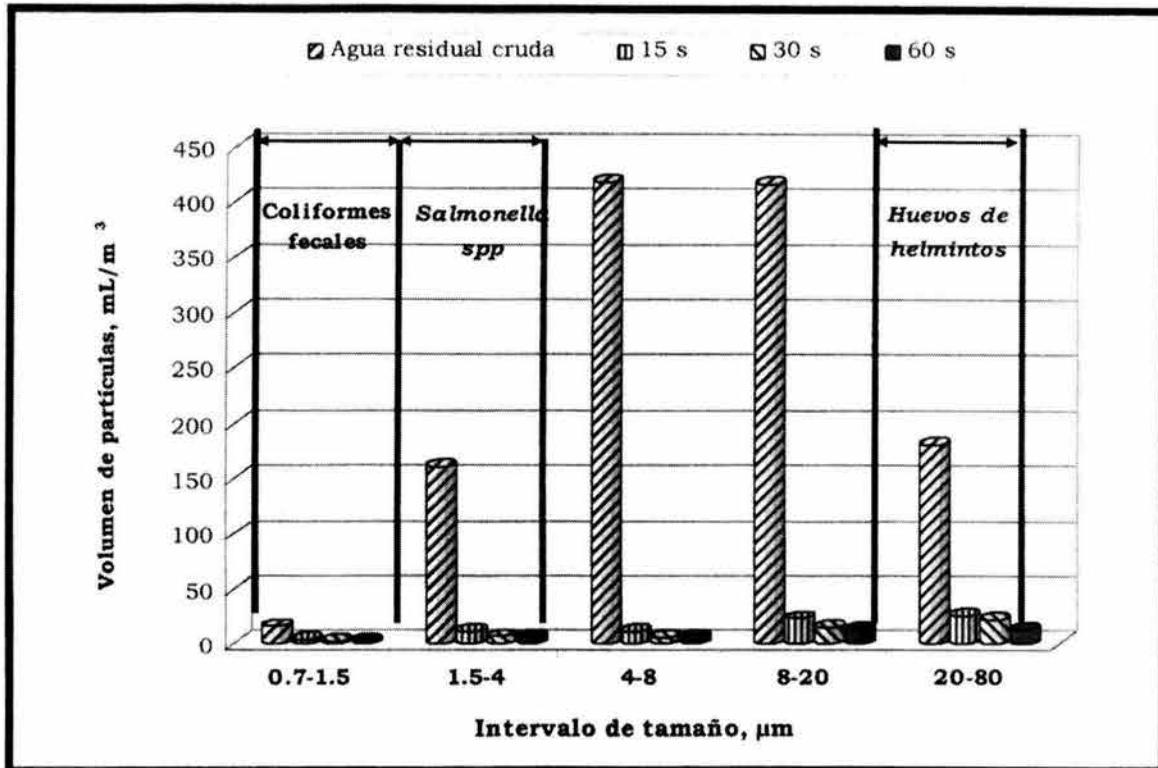


Figura 6.28. Contenido de partículas por intervalo de tamaño al utilizar 160 s^{-1} y diversos tiempos de contactos

Gradiente 300 s^{-1}

La reducción del volumen de partículas para diversos intervalos de tamaño al utilizar un gradiente de 300 s^{-1} está representada en la Figura 6.29. El incremento del tiempo de contacto en este gradiente dejó de tener importancia después de 30 segundos, de hecho, la reducción de las partículas pequeñas entre cada tratamiento fue en el mejor de los casos de una unidad (poco relevantes). De esta forma, las partículas entre 0.7 y 1.5 μm , disminuyeron a 3, 2.7 mL/m^3 y 2.4 mL/m^3 con 15, 30 y 60 segundos respectivamente, mientras que las de 1.5 a 4 μm lo hicieron en 7.7, 7.3 y 6.1 mL/m^3 con los tiempos de contacto ya establecidos. Por otro lado, con 30s se alcanzó la capacidad máxima (90%) para remover las partículas de 20 a 80 μm en tanto que con 60s se redujo a 84%.

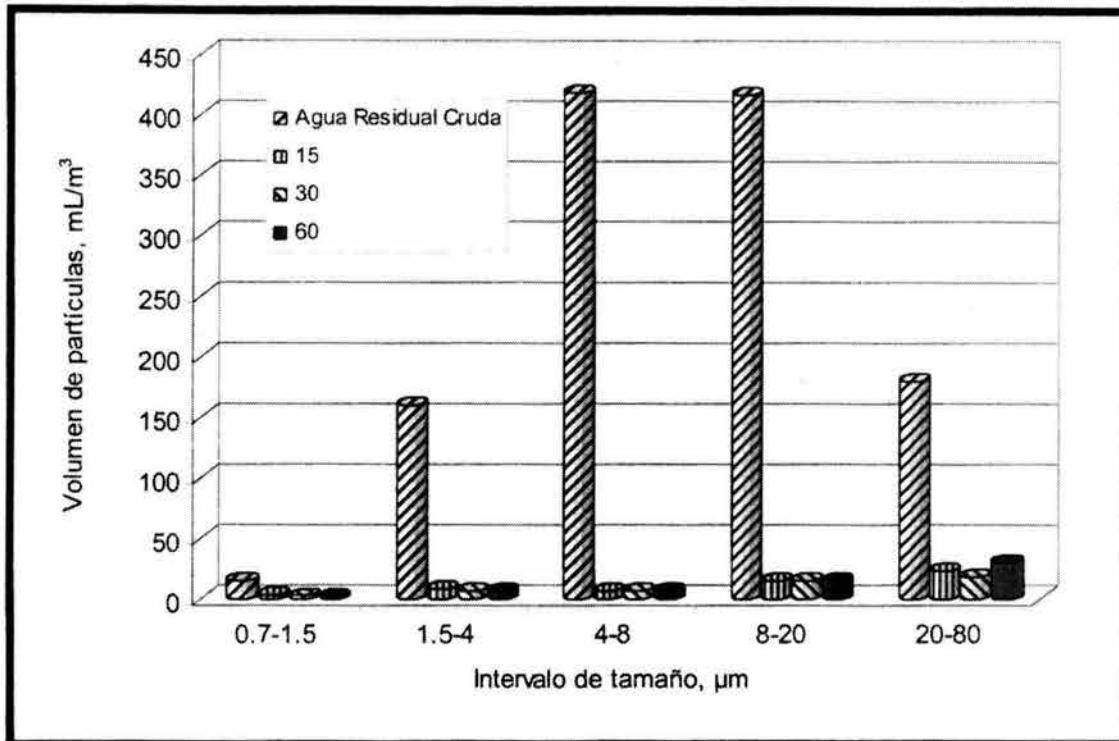


Figura 6.29. Contenido de partículas por intervalo de tamaño al utilizar 300 s^{-1} y diversos tiempos de contactos

Gradiente 460 s^{-1}

En la Figura 6.30 se muestra la disminución de partículas por intervalo de tamaño con el gradiente de 460 s^{-1} y diversos tiempos de contacto. De manera similar que en el caso anterior, el incremento del tiempo permitió mejorar de forma poco significativa la remoción de las partículas entre 0.7 y $4 \mu\text{m}$ y en contraparte provocó la resuspensión de las partículas mayores a $8 \mu\text{m}$. Con estas condiciones, las partículas de 0.7 a $1.5 \mu\text{m}$ disminuyeron a 3 , 2.6 y 2.2 mL/m^3 mientras que las de 1.5 a $4 \mu\text{m}$ se redujeron hasta 9 , 7.4 y 6.1 mL/m^3 ambos, con tiempos de 15 , 30 y 60 s . Finalmente, el efecto adverso en la remoción fue más evidente en las partículas entre 20 y $80 \mu\text{m}$ ya que éstas se removieron hasta 7 mL/m^3 (96%) con 15 s y se incrementaron en 53 (70%) y 130 mL/m^3 (28%) con 30 y 60 segundos respectivamente.

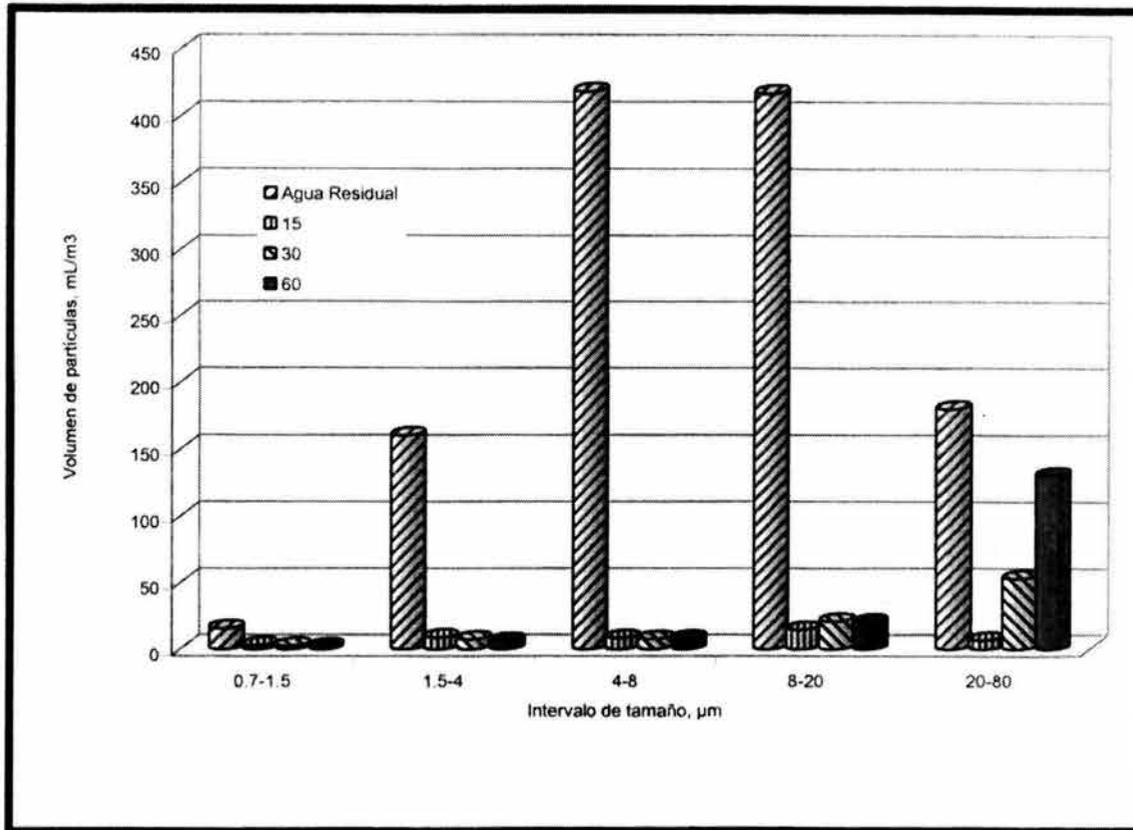


Figura 6.30. Contenido de partículas por intervalo de tamaño al utilizar 460 s^{-1} y diversos tiempos de contactos

6.2.4.4 Distribución de partículas en volumen

En las Figuras 6.31a, b y c se presenta la distribución de las partículas remanentes de los efluentes con los gradientes aplicados (160 , 300 y 460 s^{-1} de manera correspondiente). Los efluentes producidos con cada gradiente muestran una distribución variable entre sí como resultado de la diversa capacidad para remover las partículas. Sin embargo, con el mismo gradiente pero con diferentes tiempos de contacto la distribución es similar y difiere sólo en los casos en que se provoca la resuspensión.

Existen únicamente dos condiciones por las cuales la **proporción** en la distribución puede variar: la primera, ocasionada por el incremento o la reducción del volumen de partículas entre el intervalo de tamaño de 20 a $80 \mu\text{m}$ y; la segunda, cuando el tiempo de contacto es de 60 s con lo cual se produce una disminución en la curva en los diámetros pequeños debido a que como se ha venido mencionando, el incremento en el tiempo favorece la remoción en este intervalo de tamaño.

En la Figura 6.31a que muestra el volumen total de partículas que varío entre 41 y 76 mL/m^3 se observa que menos del 10% se encuentra ocupado por partículas con tamaños de 0.7 a $1.5 \mu\text{m}$, el 16% por partículas entre 1.5 y $4 \mu\text{m}$, mientras que las partículas entre 20 y $80 \mu\text{m}$ representan el 30 y 44% del total. Este último resultado indica, que, aún cuando al incrementar el tiempo la calidad del efluente en volumen mejora, el volumen remanente sigue

presentando un porcentaje considerable de partículas de 20 a 80 μm lo que incrementa la posibilidad de que los huevos de helmintos estén presentes. Con relación al gradiente de 300 s^{-1} (Figura 6.31b) el volumen total de partículas varío entre 50 y 92 mL/m^3 ; las partículas entre 20 y 80 μm representan entre un 40 y 50% del volumen total por lo que con este gradiente se obtienen la mayor probabilidad de que los huevos de helmintos estén presentes. Por último, con el gradiente de 460 s^{-1} se observa que con 15 s las partículas de 20 a 80 μm representan sólo el 10%, porcentaje que será mayor a medida que se incremente el tiempo de contacto e inclusive con 60 segundos el 80% sobre las partículas totales contenidas en el efluente final serán de este tamaño.

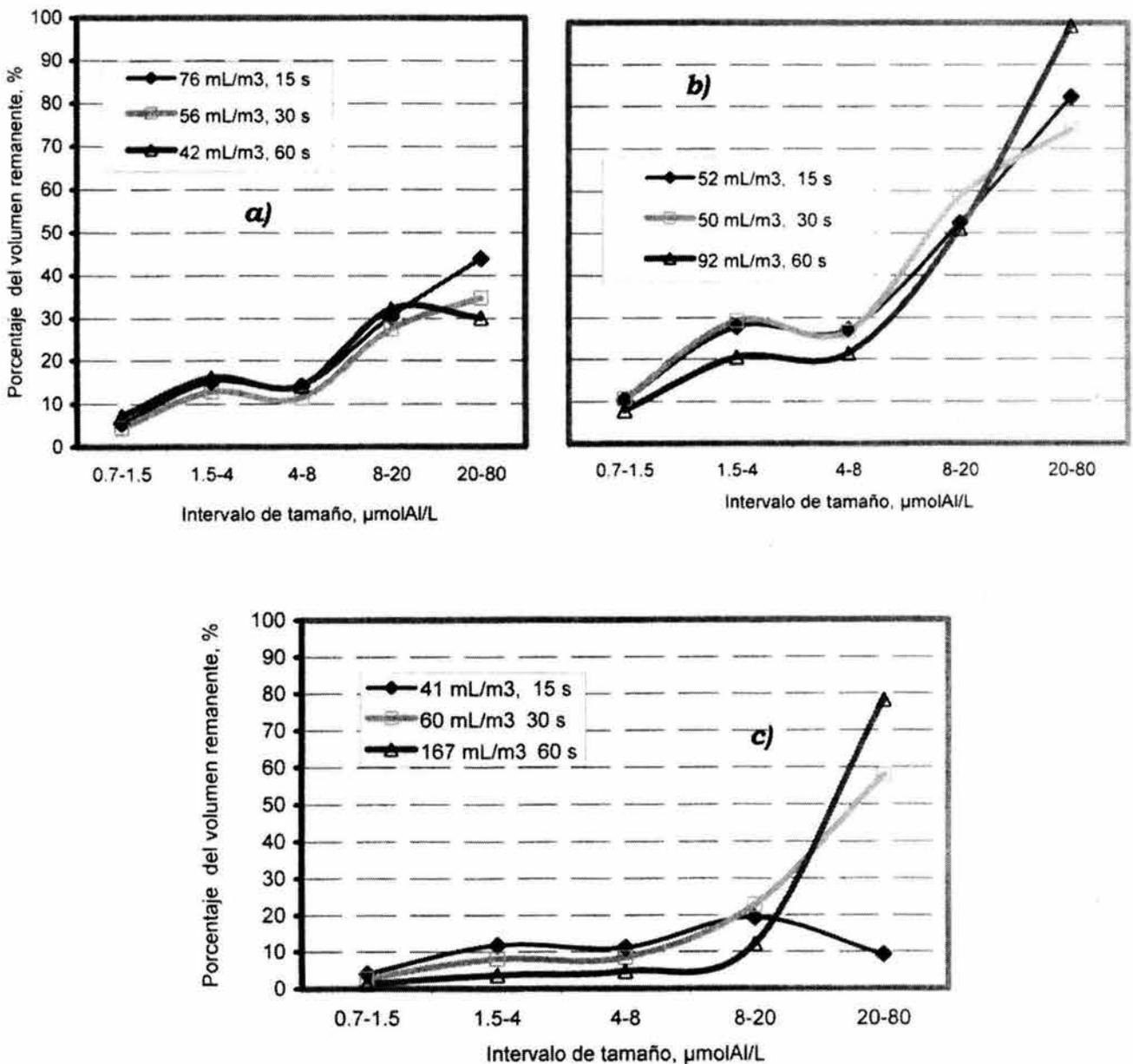


Figura 6.31. Distribución del volumen de partículas en los efluentes tratados con a) 160 s^{-1} , b) 300 s^{-1} y c) 460 s^{-1}

6.2.4.5 Remociones del volumen de partículas para 20 y 80 μm y huevos de helmintos

La Tabla 6.17 presenta la reducción del volumen de partículas entre 20 y 80 μm y de huevos de helmintos para las distintas condiciones de trabajo. Estos datos corroboran lo antes mencionado. Es decir, en términos de remoción de partículas con este intervalo de tamaño, los gradientes pequeños requerirán de tiempos largos para mejorar la calidad del efluente tanto para el volumen de partículas como para los microorganismos. Al incrementar el gradiente a 300 s^{-1} y disminuir el tiempo de contacto a 30 s se obtiene un efluente con menos de 1 HH/L. Por último, con el gradiente de 460 s^{-1} en 15 segundos se obtuvo, por un lado, el mínimo volumen de partículas con este diámetro y por otro lado, la mejor calidad del efluente en cuanto a los huevos de helmintos (7 mL/m^3 y 0.4 HH/L, respectivamente) aunque si se observa en la Tabla 6.27 con el gradiente de 160 s^{-1} y 60s, aún cuando el volumen de partículas fue un poco mayor (12 mL/m^3), el contenido de huevos de helmintos fue de 0.6 HH/L, bajo estas condiciones, ambos efluentes cumplen con la normatividad.

Tabla 6.17. Contenido de partículas de 20 a 80 μm y huevos de helmintos en efluentes tratados con diversos tiempos y gradientes en la mezcla rápida.

Gradientes	Tiempo aplicado, segundos			Tiempo aplicado, segundos		
	15	30	60	60	30	60
	mL partículas/ m^3 (% remoción)			Contenido de huevos de helmintos, HH/L (% remoción)		
160 s^{-1}	26 (85%)	23 (87%)	12 (93%)	1.3+0.2 (95%)	1+0.3 (96%)	0.6+0.3 (98%)
300 s^{-1}	23 (87%)	19 (90%)	30 (84%)	1.2 +0.4 (96%)	0.8+0.5 (97%)	2.4+0.8 (91%)
460 s^{-1}	7 (96%)	53 (71%)	131 (71%)	0.4+0.4 (99%)	2.6+0.9 (91%)	5.2+0.5 (81%)

Relación entre partículas de 20 a 80 μm con los Huevos de helmintos

Durante esta etapa se encontró una relación similar a la determinada en la etapa anterior entre el contenido de huevos de helmintos y el volumen de partículas entre los tamaños de 20 a 80 μm . Esta relación se representa por la siguiente ecuación con un coeficiente de relación de 0.95 (Figura 6.32):

$$\text{HH (HH/L)} = 0.042 * \text{volumen de partículas (20-80 } \mu\text{m)} \text{ en mL}/\text{m}^3 \quad (11)$$

De esta forma, para que haya menos de un huevo del helminto en el efluente se debe asegurar que éste contenga menos de 24 mL/m^3 de partículas, condición que se obtiene para el gradiente de 160 s^{-1} en tiempos de 30 y 60 s, con el gradiente de 300 s^{-1} con 30 s y para el de 460 s^{-1} y 15s. Debido a la mayor resuspensión de partículas obtenida en esta etapa, fue factible ampliar la aplicación de la relación hasta 5 HH/L (valor establecido para la calidad del agua tratada aplicada a los cultivos restringidos). Para producir dicha calidad se pueden aplicar los gradientes de 160 s^{-1} con 5s, 300 s^{-1} con 15 y 60 s (por la resuspensión obtenida) y 460 s^{-1} con 30 y 60 s (por el mismo fenómeno).

Por otra parte, la mejor calidad en el efluente en cuanto a la remoción de partículas se obtiene con 460 s^{-1} y un tiempo máximo de 15 s. Con esta condición la probabilidad de encontrar menos de 1 HH/L es del 85%.

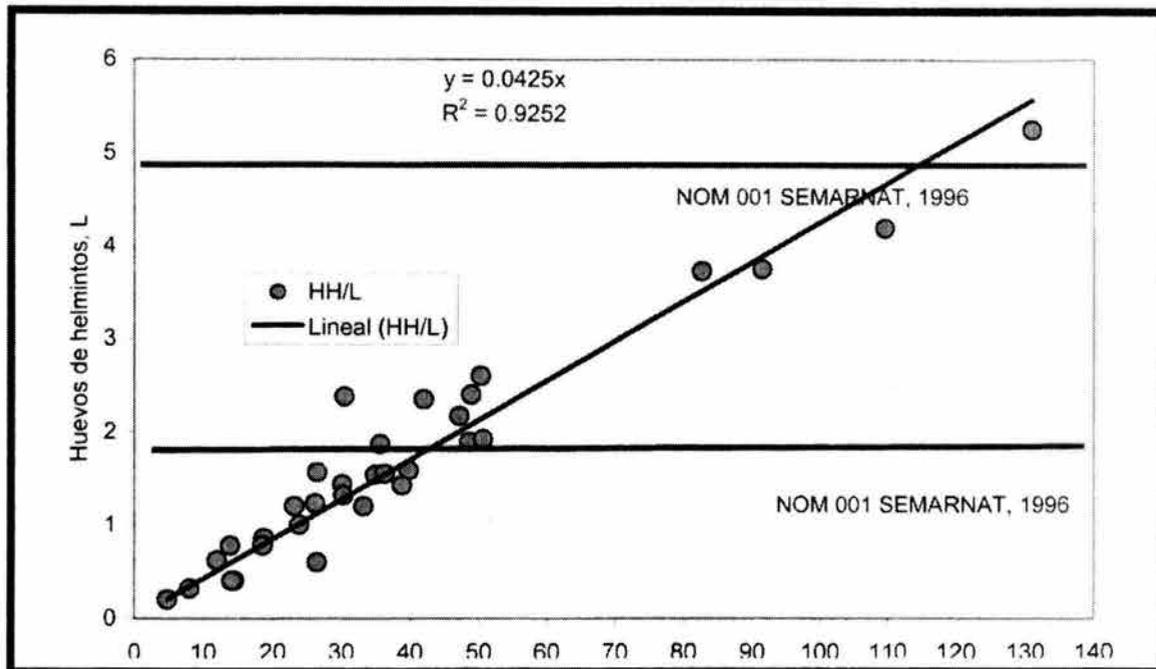


Figura 6.32. Relación entre el contenido de huevos de helmintos y volumen de partículas del AR tratada con diversos gradientes y tiempos de contacto durante la coagulación

6.2.4.6 Comparación del gasto energético

La Tabla 6.18 presenta una comparación entre el gasto energético y los gradientes y tiempos aplicados en la cámara de coagulación para una planta de 1 m^3 . De aquí se destaca que es el incremento en el gradiente y no en el tiempo lo que impacta mayormente en la energía aplicada en la cámara de coagulación. Con base en los resultados, las mejores condiciones de trabajo para la cámara de coagulación son 160 s^{-1} y 60s y no 460 s^{-1} con 15 segundos, ya que este último constituye el doble del costo energético y, en ambos casos, la calidad del efluente, en términos de huevos de helmintos y partículas (totales y de 20 a $80 \mu\text{m}$), es similar. Entonces, la decisión se debe tomar con base en este parámetro (el costo energético por Kwh es de \$0.67 de acuerdo con CFE, 2003).

Tabla 6.18. Gasto energético requerido en la cámara de coagulación de acuerdo al gradiente y tiempo aplicados

Gradientes aplicados, s ⁻¹	Tiempo aplicado en segundos			Energía, Kw/h		
				15 s	30s	60s
160	15	30	60	0.11	0.22	0.45
300	15	30	60	0.38	0.75	1.50
460	15	30	60	0.88	1.77	3.53

6.2.4.7 Evaluación de los gradientes con base en el número total de partículas

Los resultados encontrados en cada uno de los tratamientos con respecto a la remoción en el número total de partículas se presentan en la Tabla 6.19. El agua residual presentó 13.3 unidades logarítmicas/m³ de partículas (0.1 unidades más que la etapa anterior, pero no significativas) y la remoción varió desde 1 hasta 1.4 unidades logarítmicas (0.5 unidades más que en la etapa anterior), se observa también que el incremento favorece la reducción de partículas, no obstante, dicho incremento es poco significativo para fines prácticos.

Tabla 6.19 Contenido de partículas con los diversos gradientes y tiempos aplicados en la cámara de coagulación

Gradientes	Agua residual	15s	30s	60s
	Número de partícula/m ³ (Porcentaje de remoción, %)			
160 s ⁻¹	13.3 (0%)	12.3 (1.0%)	12.0 (1.3 %)	11.9 (1.4 %)
300 s ⁻¹	13.3 (0%)	12.1 (1.2%)	12.1 (1.2 %)	12.0 (1.3 %)
430 s ⁻¹	13.3 (0%)	12.2 (1.1%)	12.1 (1.2 %)	12.0 (1.3 %)

6.2.4.8 Relación entre el número de partículas y el contenido bacteriológico

Partículas de 0.7 a 1.5 µm y los coliformes fecales

La Tabla 6.20 muestra el contenido de partículas y coliformes fecales en el efluente con diversos gradientes y tiempos de contacto. El contenido de partículas para los tamaños entre 0.7 y 1.5 µm varió de 11.6 a 11.9 Ulog/m³ que correspondió a un cambio en los coliformes fecales entre 6.6 y 7.4 Ulog/100 mL. En el mejor de los casos (gradientes 160 y 430 s⁻¹) el incremento en el tiempo mejoró la remoción de estos microorganismos, pero los resultados son poco útiles para el diseño.

Tabla 6.20. Contenido de partículas de 0.7 y 1.5 μm y coliformes fecales

Gradiente	ARC	15 s	30s	60s	ARC	15 s	30s	60s
	Número de partículas/ m^3 (% remoción)				Coliformes fecales, Ulog/100 mL (% remoción)			
160 s ⁻¹	12.5 (0)	11.9 (0.6)	11.6 (0.8)	11.6 (0.9)	7.8 (0)	7.4 (0.4)	7.0 (0.8)	6.6 (1.2)
300 s ⁻¹	12.5 (0)	11.7 (0.7)	11.7 (0.8)	11.7 (0.8)	7.8 (0)	7.2 (0.6)	7.0 (0.8)	7.0 (0.8)
430 s ⁻¹	12.5 (0)	11.8 (0.7)	11.7 (0.8)	11.8 (0.7)	7.8 (0)	6.9 (0.9)	7.0 (0.8)	6.8 (1)

ARC= Agua Residual Cruda

Partículas entre 1.5 y 4 μm y Salmonella spp.

Los resultados del número de partículas y concentración de *Salmonella* spp. para las mismas condiciones que en el caso anterior se presentan en la Tabla 6.21. En este caso, la concentración de partículas entre 1.5 y 4 μm varió de 1.7 a 12 Ulog/ m^3 que correspondió a un cambio de la *Salmonella* spp. entre 6.3 y 6.9 Ulog/100 mL. El mejor gradiente para remover este tipo de partículas fue 164 s⁻¹ con el tiempo de 60 segundos, pero de la misma forma que en el caso anterior, dicha remoción fue poco significativa.

Tabla 6.21. Contenido partículas entre 1.5 y 4 μm y *Salmonella* spp.

Tratamientos	ARC	15 s	30 s	60s	ARC	15 s	30s	60s
	Número de partícula/ m^3 (% en remoción)				Salmonella spp, Ulog/100 mL (% remoción)			
160 s ⁻¹	13.0 (0)	12.0 (1.0)	11.7 (1.3)	11.7 (1.3)	7.2 (0)	6.9 (0.3)	6.5 (0.7)	6.3 (1.1)
300 s ⁻¹	13.0 (0)	11.8 (1.2)	11.8 (1.2)	11.8 (1.3)	7.2 (0)	6.7 (0.5)	6.6 (0.6)	6.6 (0.6)
430 s ⁻¹	13.0 (0)	11.9 (1.1)	11.8 (1.2)	11.7 (1.3)	7.2 (0)	6.6 (0.6)	6.5 (0.7)	6.4 (0.8)

ARC= Agua residual cruda

6.2.5 Optimización de la Floculación con Base en el Volumen de Partículas

El propósito fundamental de una cámara de floculación es provocar la colisión entre las partículas desestabilizadas durante la coagulación para incrementar su tamaño (peso y volumen). Ødeggard (1998) señala la floculación es la clave para mejorar la eficiencia de los tanques de sedimentación y, por su parte Adin (1998) establece que la efectividad de la floculación se fundamenta en el gradiente y tiempo de contacto una vez optimizados las condiciones de trabajo de la coagulación. De acuerdo con Kawamura (1976), Pieterse y Cloot (1997), Gon *et al.* (2000) y Ratnaweera (1999) la frecuencia del contacto entre las partículas y, por consiguiente la razón por la cual crecen los flóculos e incrementa la calidad del efluente, está controlada por las condiciones de mezclado (tiempo de contacto e intensidad). A este respecto, Fetting *et al.* (1990) señalan que se requiere un gradiente entre 10 a 87 s^{-1} para que la floculación se lleve a cabo de manera exitosa, mientras que Kawamura (1973) sostiene que éste se puede ampliar hasta 100 s^{-1} . En cuanto al tiempo de contacto, Herznman (1994) concluye que 6 min son en general suficientes pero que se sugieren 10 min si el contenido de materia orgánica es elevado. Fetting *et al.* (1990) específicamente señalan tiempos entre 10 y 19 minutos para lograr una buena floculación en aguas residuales y remover la DBO, DQO, los sólidos suspendidos totales y turbiedad. En cuanto a las condiciones para flocular partículas por tamaño durante la floculación la información es muy escasa aún en la literatura.

En esta parte de la tesis, se evaluó el efecto del gradiente y tiempo de mezclado durante la floculación sobre la remoción de las partículas de interés (20 a 80 μm) y medidas en volumen y tamaño. Para ello y tomando en cuenta las condiciones de la literatura, se estudiaron gradientes de 20, 40 y 80 s^{-1} con tiempos de contacto de 5, 10 y 15 min en cada caso. La metodología que se siguió consistió en aplicar para la coagulación 100 $\mu mol Al/L$ de Pax xl 19 (basicidad alta) con un gradiente de 164 s^{-1} y un tiempo de contacto de 60 s y tres segundos antes de terminar esta etapa se agregaron 0.5 mg/L de polímero aniónico de alto peso molecular para continuar con la floculación. Posteriormente, en todos los casos, se dejaron sedimentar los flóculos formados durante 5 min.

6.2.5.1 Comparación del efecto del gradiente con base en el volumen total de partículas y los SST.

El agua residual sin tratamiento, presentó la mayor concentración de partículas (1954 mL/m^3) con respecto a las dos etapas experimentales previamente descritas, encontrando también y como consecuencia que las eficiencias de remoción alcanzadas en el sistema fueron también superiores. Ello atribuido a diversos factores entre los que destacan: *a)* el incremento del volumen de partículas en el agua residual cruda por tratar (especialmente de diámetro mayor a 20 μm de fácil separación para este proceso) y, *b)* el empleo de las condiciones óptimas para la coagulación [tipo y dosis de reactivo (100 $\mu mol Al/L$ de Pax xl 19), y gradiente y tiempo (164 s^{-1} con 60 s)].

En la Figura 6.33 se observa que de acuerdo con el gradiente y tiempo aplicados durante la floculación la calidad del efluente obtenido varía. De

forma general, se puede establecer que un gradiente pequeño requiere un mayor tiempo de contacto para lograr remociones mayores del 96% y que al incrementar el gradiente a 40 y 80 s^{-1} , el tiempo deja de tener importancia después de los 10 min. En estas condiciones la eficiencia se estabiliza en aproximadamente 98%. En términos de volumen total de partículas, la mejor calidad se obtuvo con el gradiente de 80 s^{-1} y 5 minutos al producir un efluente con 50 mL/m^3 . También, se encontró que al aplicar un gradiente mayor ocurre una resuspensión de partículas conforme se incrementa el tiempo. Estos resultados fueron validados estadísticamente y los resultados se encuentran en el **Anexo 2c**.

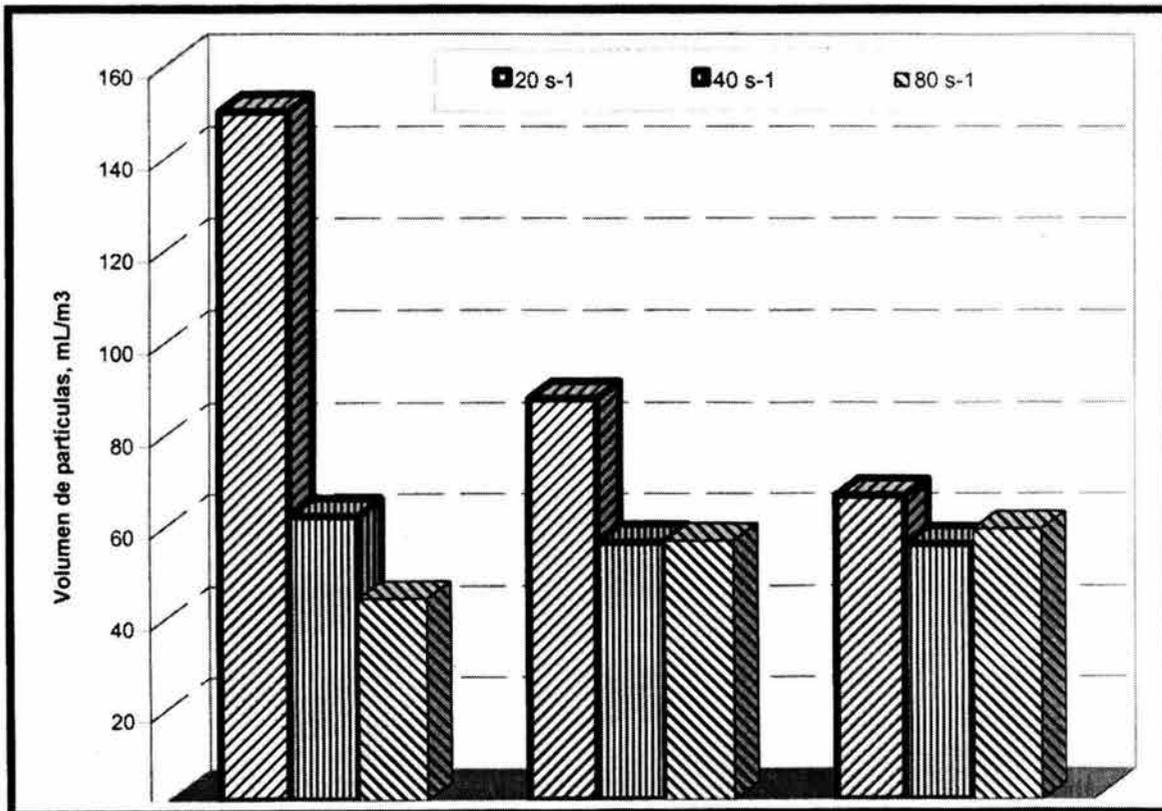


Figura 6.33. Volumen de partículas remanentes de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizados en la cámara de floculación.

Con respecto a la variación de los SST (y debido a las limitaciones que tiene la técnica como taponamiento de los poros), este parámetro fue el menos eficiente para evaluar el efecto del gradiente y tiempo empleados en la cámara de floculación. En efecto, en la Figura 6.34, con el gradiente de 20 s^{-1} y 10 min se obtuvo el efluente con la mejor calidad (concentración de SST de 15 mg/L) que no corresponde al gradiente de 80 s^{-1} y 5 min determinado como el más recomendable a partir del análisis del volumen total de partículas.

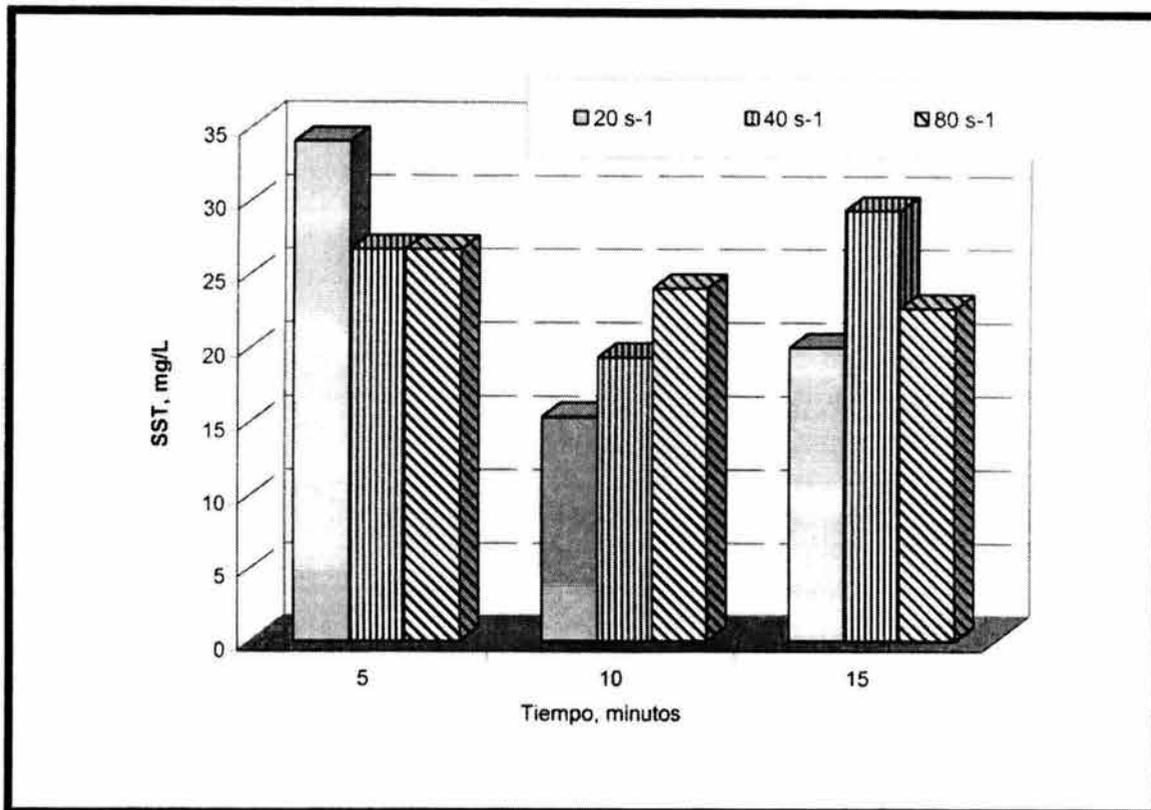


Figura 6.34. Volumen de partículas remanentes y SST de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizados en la cámara de floculación.

6.2.5.2. Remoción de partículas con tamaños entre 20 y 80 μm medidas en volumen

Los resultados de la Figura 6.35 muestran que existen tres condiciones diferentes en las cuales el efluente tratado contiene un volumen igual de partículas (14 mL/m^3) con este diámetro. La primera, al utilizar un gradiente de 20 s^{-1} con 15 min, la segunda con 40 s^{-1} y 10 min y la tercera con 80 s^{-1} y 5 minutos. Con los tres gradientes y tiempos de contacto de igual desempeño (20 s^{-1} con 15 min, 40 s^{-1} con 10 min y 80 s^{-1} con 5 min), el efluente presentó una concentración de huevos de helmintos menor a 1 HH/L y el incremento del volumen de partículas vino acompañado de un aumento en el contenido de este parásito. Es decir, cuando el gradiente aplicado se incrementó al doble, el tiempo de contacto requerido para lograr similar eficiencia (95%) decreció en una tercera parte. Con gradientes y tiempos de contacto mayores de 40 s^{-1} y 10 minutos se producirá una resuspensión de partículas que influye de manera directa sobre el contenido de los huevos de helmintos.

Por otra parte, durante esta etapa experimental, se confirmó nuevamente la asociación que existe entre el volumen de partículas con el diámetro de 20 a $80 \mu\text{m}$ y el contenido de los huevos de helmintos (Tabla 6.22). La relación obtenida fue similar a la establecida en la ecuación 11 y presentada previamente sólo que en este caso se alcanzó un coeficiente de correlación 0.86.

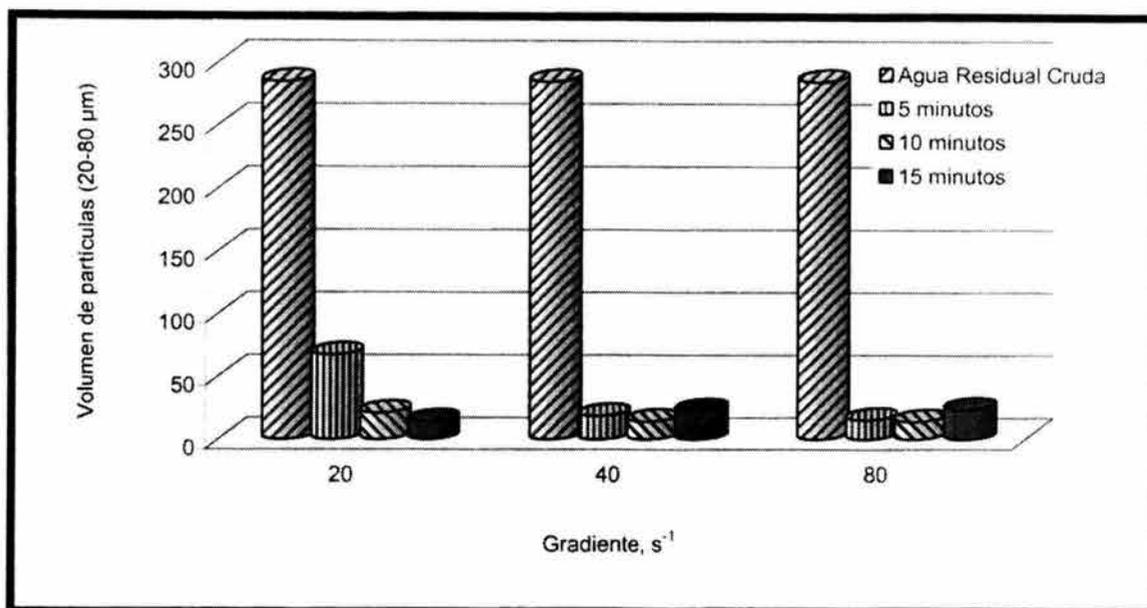


Figura 6.35. Contenido de partículas de 20 a 80 µm de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto

Tabla 6.22. Contenido de huevos de helmintos en efluentes tratados con diversos tiempos y gradientes en la mezcla lenta.

Gradiente, s ⁻¹	Huevos de helmintos, HH/L		
	5 min	10 min	15 min
20	3.2±0.8 (90%)	1±0.3 (97%)	0.6±0.2 (98%)
44	1±0.2 (97%)	0.6±0.4 (98%)	1.2±0.5 (96%)
80	0.8±0.1 (98%)	1±0.7 (97%)	1.4±0.3 (96%)

De esta manera, la ecuación general obtenida para determinar los huevos de helmintos de un efluente tratado con un proceso físico-químico (Tratamiento Primario Avanzado, TPA) se establece de la siguiente manera (Figura 6.36):

$$\text{HH (HH/L)} = 0.041 * \text{volumen de partículas (20-80 } \mu\text{m)} \text{ en mL/m}^3 \quad (12)$$

De ella se desprende que la ecuación se aplica tanto al riego sin restricción como al restringido de acuerdo con los límites establecidos por la NOM 001-SEMARNAT, 1996.

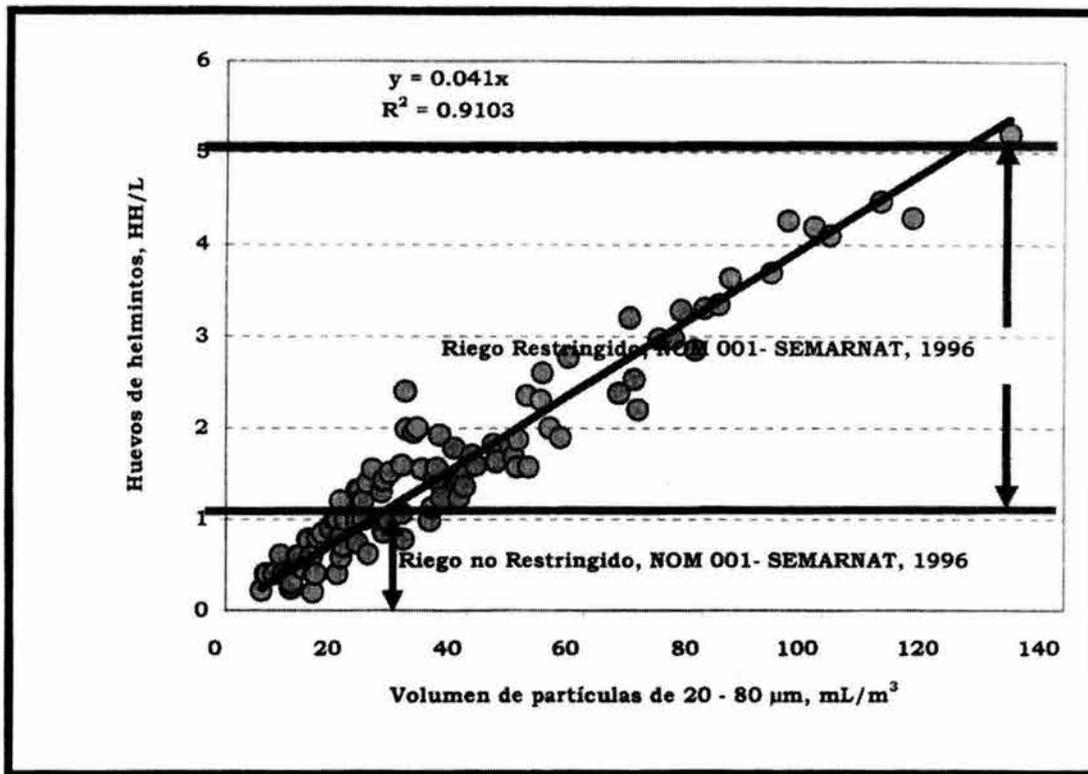


Figura 6.36 Relación entre el volumen de partículas de 20 a 80 µm y los huevos de helmintos de todas las etapas experimentales

Del análisis estadístico y considerando un 95% del nivel de confianza, se establece que los resultados tanto para el parámetro huevos helmintos, como el volumen de partícula muestran un comportamiento normal. En cuanto al contenido de huevos de helmintos (Figura 6.37a), el proceso físico químico presentará un contenido de huevos helmintos entre 1.35 y 1.76 HH/L en el 95% de los casos. En el caso del volumen de partículas, se podrá asegurar un contenido entre 32 y 42 HH/L en el 95% de los casos.

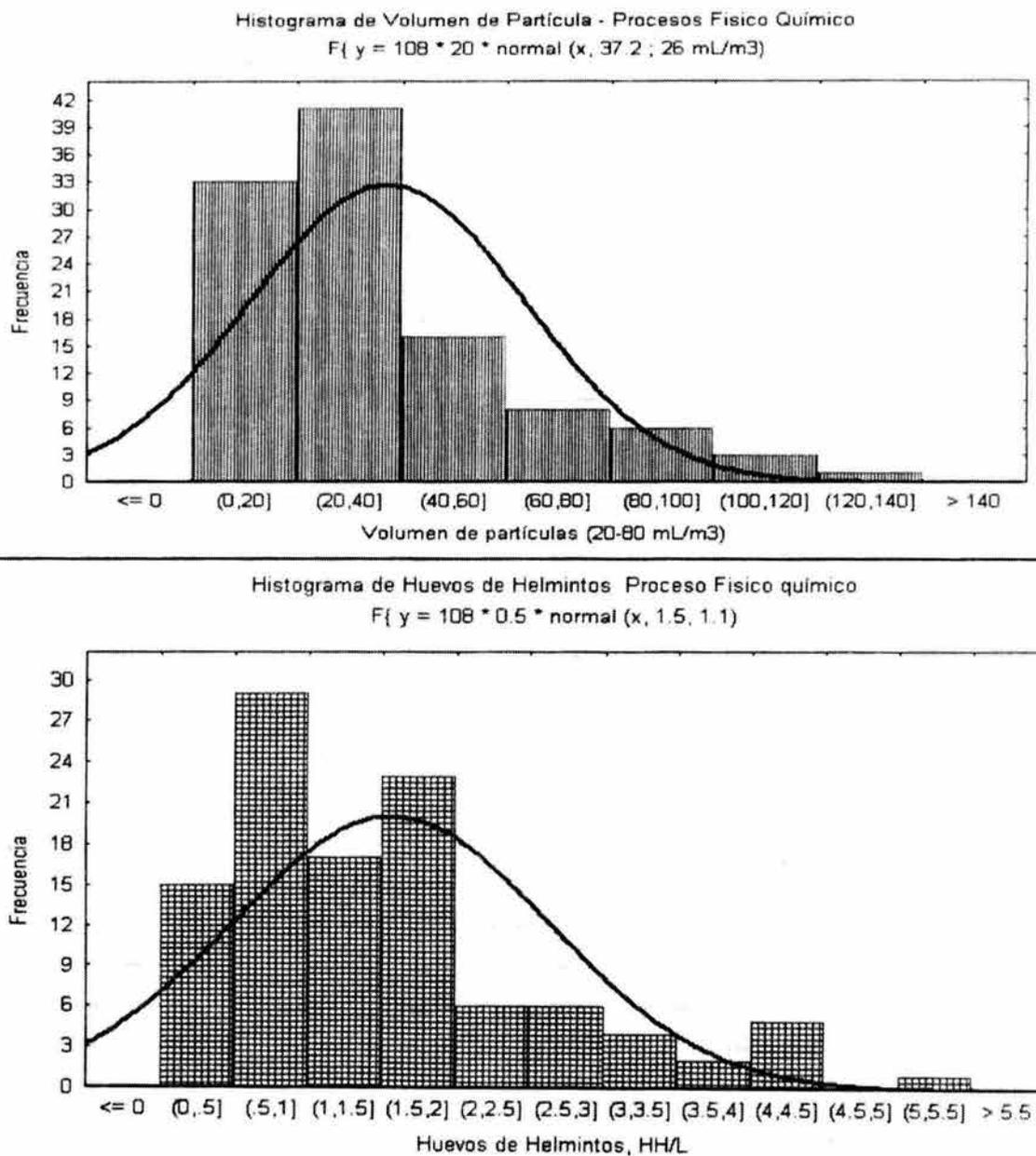


Figura 6.37. Histograma de Frecuencia para a) el volumen de partículas (20-80 μm) y b) el contenido de huevos de helmintos.

6.2.5.3. Remoción del volumen de partículas menores a 20 μm

La Figura 6.38 presenta la remoción de partículas menores a 20 μm que se obtuvo con las tres mejores condiciones de operación en la mezcla lenta. Cada condición presentó diferentes capacidades para remover las partículas de cada tamaño. Con estos resultados se pudo establecer la capacidad máxima de remoción del sistema para diferentes intervalos de tamaño. Con un proceso físico - químico las partículas < 1.5 μm se podrán remover en un máximo de 90% independientemente del gradiente y tiempo utilizados. Las partículas entre 1.5 μm y 4 μm se removieron hasta en un 99% al utilizar un gradiente de 80 s^{-1} y 5 min. En el caso de las partículas entre 8 y 20 μm el gradiente 40 s^{-1} con 10 min fue el mejor al remover el 97.5%. En ninguno de los tratamientos se observó la resuspensión de partículas en estos intervalos de tamaño lo que implica que este fenómeno se presentará sólo en las partículas mayores a 20 μm .

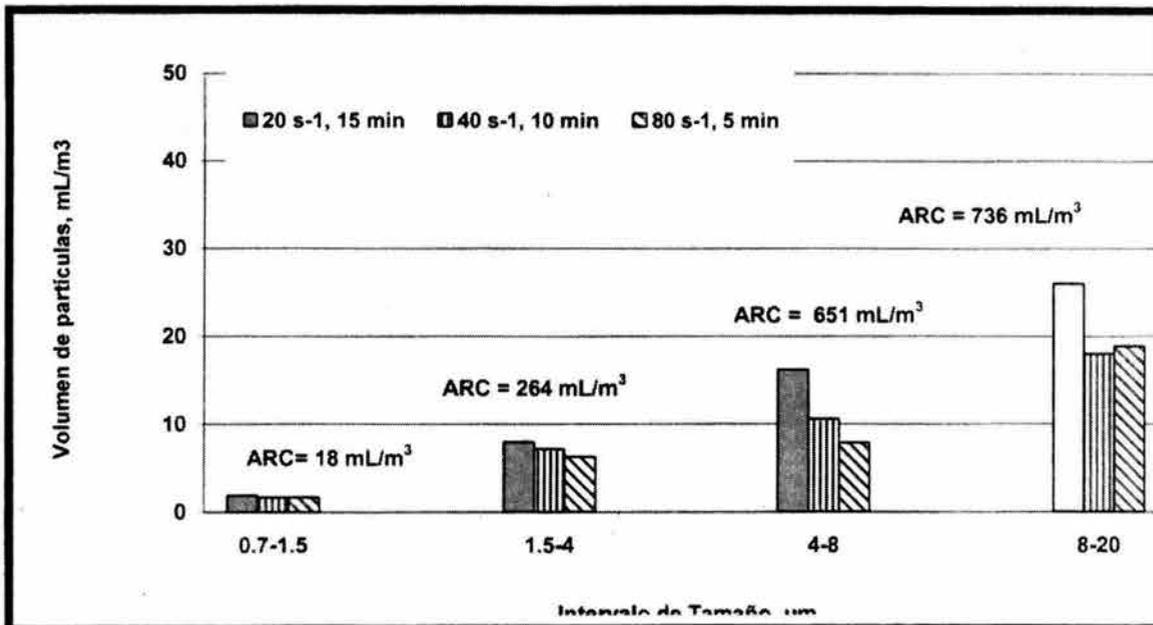


Figura 6.38. Contenido de partículas < a 20 μm de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto

6.2.5.4 Comparación de la distribución de partículas con las condiciones de estudio utilizadas en la floculación.

Con las diferentes condiciones de operación en la cámara de floculación se determinaron cambios significativos en la distribución del tamaño de la partícula como se muestra en la Figura 6.39. Se observa que en el agua residual cruda las partículas coloidales y supracoloidales dominan en volumen (98% del volumen total que fue de 1449 mL/m^3). Durante la aplicación de los diferentes gradientes y tiempos de contacto se mantiene una similar distribución de las partículas remanentes, la única diferencia en ellos es el volumen de partículas contenidas. El efluente producido quedó compuesto por un mínimo de 80% de partículas con tamaños menores a 20 μm y un máximo de 20% fue mayor a este diámetro.

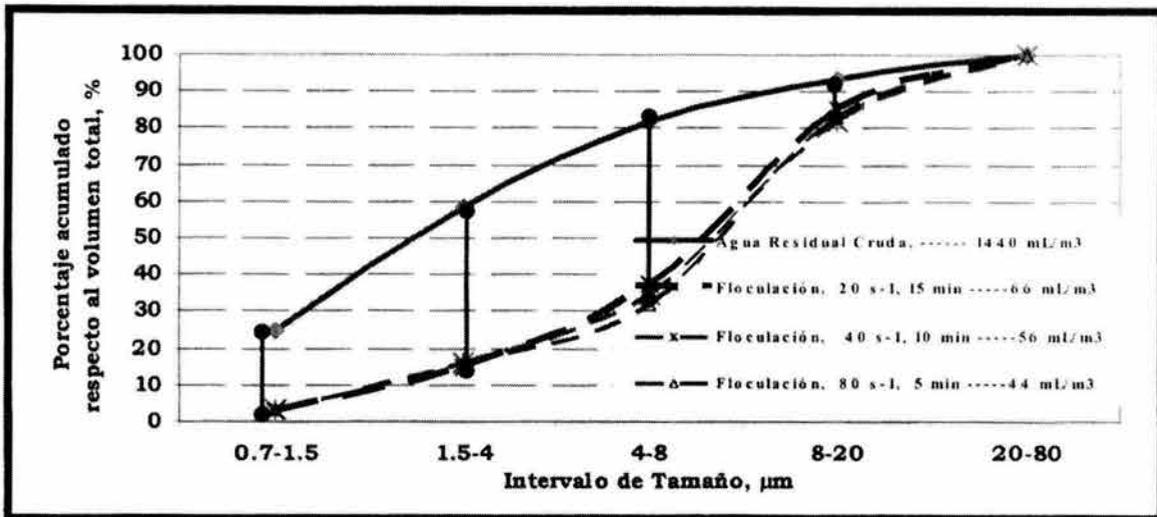


Figura 6.39. Distribución acumulada de las partículas en el ARC y en el efluente tratado con diversas condiciones de operación durante la floculación

6.2.5.5 Comparación de la distribución de partículas con las mejores condiciones encontradas en las tres etapas del estudio.

La Figura 6.40 muestra la distribución de partículas del agua residual cruda y la etapa de coagulación y floculación. Al optimizar la etapa de coagulación existió una remoción de partículas del 94% mientras que en la floculación se podrá obtuvo hasta un 99%. Como se mencionó previamente, a medida que se optimiza las etapas de tratamiento por un lado se reduce el volumen de partículas, y, por otro lado el efluente producido contendrá una proporción pequeña de partículas menores a 20 µm. Con estas características, en el efluente producido la probabilidad de encontrar > 1 huevo de helminto por litro se redujo. Distribuciones similares han sido obtenidas por Boller y Blazer (1993) y Neis y Tiehm (1997) tanto para efluentes biológicos como para físico químicos.

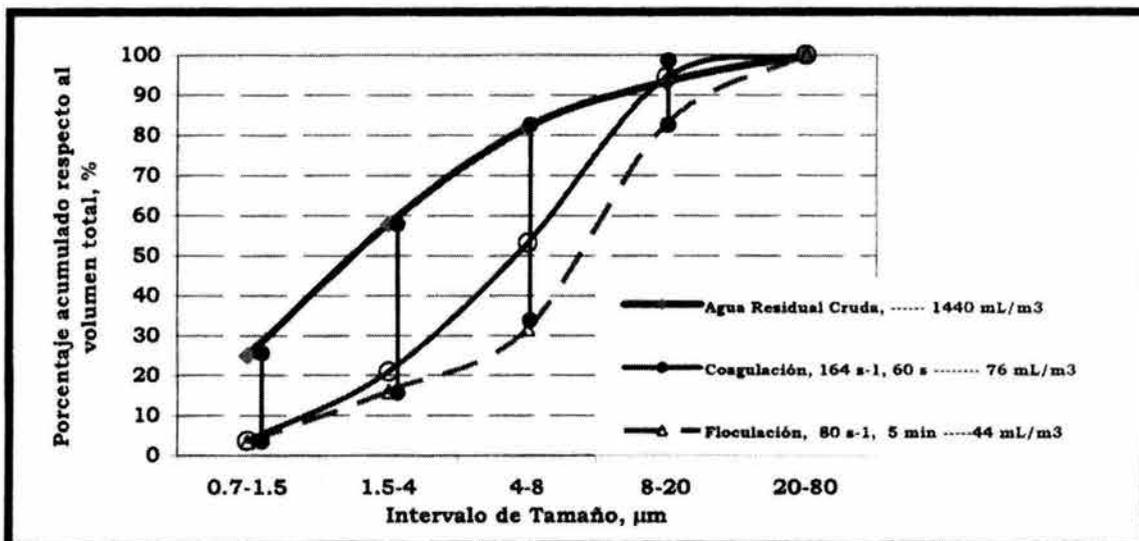


Figura 6.40. Distribución acumulada de las partículas en el efluente tratado con diversas condiciones de operación

6.2.5.6 Costo energético

Dado que durante esta última etapa se determinó que el sistema puede operar eficientemente con tres diferentes condiciones, se hizo una comparación del costo energético de cada una de ellas para seleccionar la más apropiada (Tabla 6.23). Para ello, se calcularon los costos de operación durante 20 años con un reactor con capacidad de 1 m³/s. Así, se establece que al utilizar un gradiente de 20 s⁻¹ durante 15 minutos, la construcción del tanque será 3 veces más cara que en el caso del gradiente 80 s⁻¹ con 5 min (\$1,890,000 vs \$630,000) pero se reducirá 5.3 veces el costo energético (\$3,125,278 vs \$ 16,668,150), por lo que se sugiere utilizar en la cámara de floculación un gradiente pequeño con un tiempo de contacto largo.

Tabla 6.23. Gasto energético requerido en la cámara de floculación de acuerdo al gradiente y tiempo aplicados

Tiempo de contacto aplicado, min	Gradientes aplicados, s ⁻¹			Volumen, m ³	Costos del construcción para el tanque de floculación (\$/m ³ , 2,100)	Costo de energía en la cámara para 20 años de operación		
	20	40	80			20	40	80
	Energía, Kw/h				Energía, \$/ 20 años			
5	120	481	1924	300	\$ 630,000	1,041,759	4,167,037	16,668,150
10	240	962	3848	600	\$ 1,260,000	2,083,519	8,334,075	33,336,300
15	361	1443	5772	900	\$ 1,890,000	3,125,278	12,501,112	50,004,449

*Considerando el costo del kw/h en 0.67

6.2.5.7 Comparación de los gradientes con base en el tamaño de partículas medidas en número y su relación con el contenido bacteriológico

En la Tabla 6.24 se presenta la remoción de partículas en número para cada tratamiento. Nuevamente se observa que las diferencias son mínimas lo que quita utilidad práctica a este parámetro como sucedió en los casos anteriores. A pesar de que las remociones del número de partículas (< 1.6 unidades logarítmicas), coliformes fecales (< 1.1 unidades logarítmicas) y *Salmonella* spp (< 1.9 unidades logarítmicas) fueron poco significativas estos porcentajes fueron los máximos alcanzados en toda la experimentación.

Tabla 6.24. Contenido de partículas totales y por intervalo de tamaño (0.7-1.5 y 1.5-4 μm) y contenido bacteriológico

Gradientes	Tiempo de contacto, min			Tiempo de contacto, min		
	5	10	15	5	10	15
20 s ⁻¹	12.2 (1.3)	12.1 (1.4)	12.0(1.5)	Microorganismo		
40 s ⁻¹	12.1 (1.4)	12.0 (1.5)	11.9 (1.6)			
80 s ⁻¹	12.0 (1.5)	12.0 (1.5)	11.9 (1.6)			
	Número de partículas entre 0.7-1.5 μm, Ulog/m³ (% remoción)			Coliformes fecales, Ulog/100 mL (% remoción)		
20 s ⁻¹	11.6 (0.9%)	11.6 (0.9%)	11.5 (1.0%)	7.2 (1.0%)	7.3 (0.9%)	7.2 (1.0%)
40 s ⁻¹	11.5 (1.0%)	11.5 (1.0%)	11.5 (1.0%)	7.3 (0.9%)	7.2 (1.0%)	7.5 (0.7%)
80 s ⁻¹	11.5 (1.0%)	11.5 (1.0%)	11.5 (1.0%)	7.3 (0.9%)	7.4 (0.8%)	7.1 (1.1%)
Gradientes	Número de partículas entre 1.5-4 μm, Ulog/m³ (% remoción)			Salmonella spp, Ulog/100 mL(% remoción)		
20 s ⁻¹	11.9 (1.3%)	11.8 (1.4%)	11.7 (1.5%)	6.1 (1.6%)	6.1 (1.6%)	6.2 (1.5%)
40 s ⁻¹	11.8 (1.4%)	11.7 (1.5%)	11.7 (1.5%)	6.3 (1.4%)	6.7 (1.0%)	6.7 (1.7%)
80 s ⁻¹	11.7 (1.5%)	11.65 (1.55%)	11.6 (1.6%)	5.8 (1.9%)	6.3 (1.4%)	6.4 (1.3%)

Con base en lo expuesto anteriormente, se puede señalar que la determinación del volumen de partículas, ya sea de manera total o por intervalos de tamaño, es un parámetro útil para evaluar los efectos de los factores que intervienen en la floculación. También, sirve para correlacionar el contenido de parásitos (Huevos de helmintos) con el intervalo de tamaño de las partículas de 20 a 80 μm en una expresión análoga a la anterior. Por otro lado, las condiciones óptimas en este caso se obtienen de criterios económicos ya que diversas condiciones producen un efluente con la misma calidad.

6.2.6 Remoción de compuestos en partículas mayores y menores de 20 µm

Resulta evidente, que un procesos físico químico es eficiente para remover las partículas entre 20 y 80 µm y por ende para remover los huevos de helmintos (problema más importante que enfrentan las aguas residuales que se desean emplear para reúso agrícola en México) y una fracción insignificativa del contenido de Coliformes fecales y la *Salmonella* spp. Sin embargo, se debe considerar que durante el tratamiento se remueven otros compuestos que son necesarios para la agricultura como son el nitrógeno, el fósforo y la materia orgánica, por ello, se buscó su asociación con las partículas mayores y menores a 20 µm. Con esta finalidad, el agua residual cruda y tratada se filtró con una membrana con tamaño de poro de 20 µm. El agua tratada fue producida en lote empleando para la coagulación 100 µmolAl/L de Pax xl 19 (alta basicidad), un gradiente de 164 s⁻¹ y 60 s y para la floculación 0.5 mg/L de polímero aniónico, un gradiente de 80 s⁻¹ y 5 min. Finalmente, los flóculos formados se dejaron sedimentar por 5 min. Las determinaciones de los parámetros microbiológicos (Tabla 6.35) y físico químicos (Tabla 6.36) se llevaron a cabo cada caso por triplicado.

6.2.6.1 Distribución de los microorganismos

De acuerdo con la Tabla 6.25, las partículas menores de 20 µm, como era de esperarse, son las que contienen casi la totalidad de las bacterias, tanto en el influente como en el efluente. En efecto, en las partículas inferiores a 20 µm, se encontró entre 88 y 99% del contenido de coliformes fecales y de 85 a 99% de la *Salmonella* spp para el agua residual cruda y una concentración similar para el agua residual tratada. Con ello se demuestra que debido a la asociación existente entre las partículas pequeñas y las limitaciones del proceso para removerlas, estos microorganismos deberán ser separados o eliminados a través de otro sistema. En contraste, tanto en el influente como en el efluente los huevos de helmintos se encontraron casi en su totalidad (> 95%) en las partículas mayores de 20 µm y, de esta manera, se facilita su separación.

Tabla 6.25. Contenido microbiológico del agua residual y tratada y su asociación con las partículas mayores y menores a 20 µm

Parámetros microbiológicos	Agua residual			Agua residual tratada			Remoción %
	Concentración Promedio	% de concentración de los parámetros		Concentración Promedio	% de la concentración de los parámetros		
		< 20 µm	> 20 µm		< 20 µm	> 20 µm	
Coliformes fecales, NMP/100 mL	2.4X10 ⁰⁸	88-99	1-12	1.3x10 ⁷	98	2	1.3*
<i>Salmonella</i> spp, NMP/100 mL	3.1X10 ⁰⁷	85-97	3-15	8x10 ⁵	97	3	1.6*
huevos de helmintos, HH/L	23	3-5	95-97	0.4	7	93	99.9

* Remoción en unidades logarítmicas

6.2.6.2 Distribución de P-PO₄ y N-NH₃

En cuanto a los nutrientes (Tabla 6.36), éstos quedaron adsorbidos preferentemente en las partículas < 20 µm, lo que implica que al aplicar un tratamiento físico-químico al agua residual sólo parte del fósforo y nitrógeno es eliminado. De esta manera, las partículas del efluente menores de 20 µm así como la fracción soluble son responsables de impartir el 96% de la concentración remanente de nutrientes. Resultados similares fueron obtenidos por Marquet (1999); Ødegaard (1992), Thiem *et al.* (1999) y Lartiges *et al.* (2001), quienes establecen que la fracción soluble y coloidal aportan la mayor cantidad de fósforo y nitrógeno en cantidades variables que dependen del tipo de drenaje y tratamiento.

6.2.6.3 Distribución de la DQO, SST y Turbiedad

En el agua residual cruda las partículas > 20 µm son responsables de aportar hasta un 43% del contenido de la DQO, 70% de la turbiedad y 90% de los SST lo que implica que los últimos parámetros se puede remover con mayor facilidad del influente que el primero. En efecto, en el agua residual tratada hubo una remoción significativa de los SST y de manera parcial de la DQO. La concentración remanente de partículas < 20 µm aportan más de la tercera parte de la DQO del agua tratada y de los SST. En cuanto a la turbiedad y debido a que su contenido no se debe totalmente a los SST mayores a 20 µm eventualmente una concentración importante no será removida.

De los resultados se puede concluir que las partículas > 20 µm son las portadoras más importantes de los contaminantes de interés en México al contener básicamente los huevos de helmintos y SST. Posterior al tratamiento, el efluente estará compuesto fundamentalmente por partículas < 20 µm y contendrá nutrientes y parte de la materia orgánica que podrá aprovechar durante el riego. Adicionalmente, los coliformes fecales y la *Salmonella* spp asociada con este tamaño deberán ser removidos por otro proceso unitario antes de su reúso.

Lo anterior refuerza que un proceso de coagulación-floculación permite tratar de manera adecuada el agua residual destinada para riego agrícola ya que logra separar los patógenos (huevos de helmintos) y los sólidos y no la fracción soluble y las partículas pequeñas por lo que se preserva la materia orgánica y los nutrientes en el agua.

También se determina que la técnica de distribución del tamaño de partículas puede utilizarse para optimar cada uno de los factores que afectan al proceso físico-químico y en la práctica, alertar a los operadores sobre la posible presencia de partículas indeseadas (> 20 µm) y de microorganismos (huevos de helmintos) en un tiempo no mayor de 5 minutos.

Tabla 6.26. Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua residual cruda y tratada y su asociación con las partículas mayores y menores a 20 µm

Parámetros	Agua residual			Agua residual tratada			Remoción %
	Concentración Promedio	% de concentración de los parámetros		Concentración Promedio	% de la concentración de los parámetros		
		< 20 µm	> 20 µm		< 20 µm	> 20 µm	
Nutrientes							
P-PO ₄ , mg/L	5.2	40-95	5-60	3.5	96	4	33
N-NH ₃ , mg/L	16.5	65-93	7-35	14.7	99	1	11
Parámetros fisico químicos							
DQOt, mg/L	350	57-77	23-43	138	74	26	61
SST, mg/L	360	10-29	71-90	22	79	21	94
Turbiedad, UNT	233	33-62	38-70	34	89	11	94

* Remoción en unidades logarítmicas

6.2.6.4 Comparación de Costos para cada una de las Técnicas de Evaluación del Sistema de Tratamiento

Una vez establecidas la viabilidad técnica para emplear el volumen de partículas como parámetro de optimización de un proceso físico químico y las relaciones que permiten conocer el contenido de huevos de helmintos (y SST como opcional) se determinó la competitividad a nivel costo. La comparación se realizó con base en los costos unitarios (actualizados a enero de 2004) de cada una de las técnicas involucradas y presentadas en la Tabla 6.27. En cada parámetro se consideraron los costos de inversión, concepto de consumibles y de personal requerido para ejecutar cada técnica (el análisis de costos se presenta con mayor detalle en el **Anexo 4**).

Para obtener el costo real se realizaron las consideraciones siguientes:

- Una planta que opera las 24 h del día los 365 días del año y en la que, de acuerdo con la NOM-001 SEMARNAT-1996 se deben tomar muestras seis veces al día tanto del influente como del efluente.
- Un laboratorista especializado por técnica con un costo mensual de \$ 10,000.00 de acuerdo con las tarifas establecidas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2004.
- 2% sobre el costo inicial para mantenimiento preventivo de equipos.
- Vida útil de los equipos entre 2 y 10 años de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

De los resultados obtenidos destaca que para determinar parámetros que se establecen en la NOM-001-SEMARNAT,1996 el costo del personal requerido representa una fracción importante (desde 23% para la técnica de tamaño de partícula hasta 48% para la determinación del microbiológicos) del costo total de la determinación del parámetro. En segundo término se encuentra el costo de consumibles y mantenimiento preventivo de los equipos (entre 19% para la técnica de SST y 57% para bacteriológicos y DQOt) y, finalmente el costo inicial requerido para determinar cada una de las técnicas es muy bajo (desde 4.1% para la técnica

de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y hasta 37% para los Huevos de helmintos y SST) con excepción de los equipos para contar partículas (62%). Con base en los resultados se establece que aún cuando la determinación de la Distribución del Tamaño de Partícula requiere un costo de inversión alto, debido principalmente al costo del equipo, accesorios y estándares, con esta técnica se reduce considerablemente el costo del personal requerido (ya que el tiempo para la determinación para cada muestra es de máximo 5 minutos) lo que la hace una opción interesante estableciendo un costo por determinación de \$26. La tendencia actual indica que a medida que se introduzcan en el mercado nuevas marcas de equipos para medir partículas el costo inicial podrá reducirse considerablemente, lo que la hace una opción competitiva.

Finalmente, la determinación de los huevos de helmintos es la más costosa debido a que se requiere mucho tiempo para su determinación (5 días) aunado al alto costo inicial de equipo, de consumibles y de personal altamente especializado obteniendo que el costo es de \$700 por muestra. Ante ello, al lograr una buena correlación entre tamaño de partícula (20 y 80 μm) y este parásito se podrá, por un lado, reducir considerablemente los costos de operación en una planta de tratamiento y, por el otro, asegurar la calidad deseada en el efluente.

En México, es factible realizar la determinación de partículas por ambos métodos (tanto el de luz láser como el de corriente eléctrica) debido a que hoy en día existen alrededor de 10 distribuidores autorizados que cuentan con personal capacitado para la puesta en marcha (capacitación) y mantenimiento de los equipos, por lo que en un futuro se espera que la demanda se incremente y con ello el costo de inversión por la compra del equipo disminuya.

Tabla 6.27. Comparación de costos para cada una de las técnicas empleadas en la determinación de la calidad del agua residual

Técnica	Costo inicial		Costo de consumibles y mantenimiento preventivo		Costo de personal		Costo anualizado	Costo unitario
	\$	%	\$	%	\$	%	\$	\$
Huevos de helminto	1,143,618	37	643,860	21	1,278,522	42	3,066,000	700
DTP (Corriente eléctrica)	71,004	62	17,178	15	26,340	23	114,522	26
DTP (Difracción de luz láser)	77,363	62	25,793	20	23.130	18	126,280	29
SST	56,728	37	29,131	19	67,461	44	153,320	35
Coliformes fecales, <i>Salmonella</i> spp y estreptococos fecales	17,593	5	417,839	57	733,050	48	351,864	80
NTK	7,652	5	78,046	51	67,334	44	153,032	35
P-PO ₄	7,045	5	66,219	47	67,628	48	140,892	32
DQOt	7,036	4	91,144	57	61,722	39	159,902	37

6.2.7 Etapa 2. Resultados con la técnica de luz láser

6.2.7.1 Distribución del tamaño de partícula en el agua residual cruda

El contador de luz láser permite medir el tamaño de partícula y obtener su distribución en porcentaje del volumen. Su intervalo de medición varía de 0.04 a 2000 μm . Con este método se determinó la distribución de partículas del agua residual cruda del sistema de drenaje de la Ciudad de México en los meses de Octubre a Noviembre de 1999 y Enero de 2000 periodos que corresponden a la época de estiaje. Los resultados de esta determinación muestran en la Figura 6.41. En los tres meses de muestreo se mostró poca variabilidad en la distribución por lo que en dicha Figura sólo se presenta la distribución promedio y se deduce que la calidad del agua residual se mantuvo constante.

Las partículas se distribuyeron en un intervalo entre 0.04 y 310 μm y comparado con la calidad del agua residual analizada en la etapa anterior, en este caso, se detectó la presencia de partículas sedimentables. La distribución de partículas corresponde a los intervalos de las fracciones disuelta ($< 0.08 \mu\text{m}$), coloidal (0.08 – 1 μm), supracoloidal (1 – 100 μm) y sedimentable ($> 100 \mu\text{m}$) establecidas por Much *et al.* (1980), Levine (1991) y Boller *et al.* (1998). De acuerdo con los intervalos de tamaño de partícula de interés para la tesis, las partículas menores a 1.5 μm (tamaño de los coliformes fecales) constituyeron el 5% del total de partículas, las de tamaño entre 1.5 y 4 μm (tamaño de las *Salmonella* spp) el 4%, las de 4 a $< 20 \mu\text{m}$ (asociadas con otros microorganismos como *Pseudomonas aeruginosa* y la *Giardia lamblia*) comprendieron el 36% que es una fracción importante de contaminación. Las partículas del mismo tamaño que los huevos de helmintos (20 a 80 μm) que son las de mayor interés en el estudio representaron el 38% y, finalmente, la fracción $> 80 \mu\text{m}$ mostró el 15% del volumen total. No obstante, con esta técnica sólo se establece la presencia o ausencia de las partículas con tamaño deseado y cabe aclarar que los resultados obtenidos no pueden compararse con los presentados con la técnica de porque ambas trabajan con diferente principio.

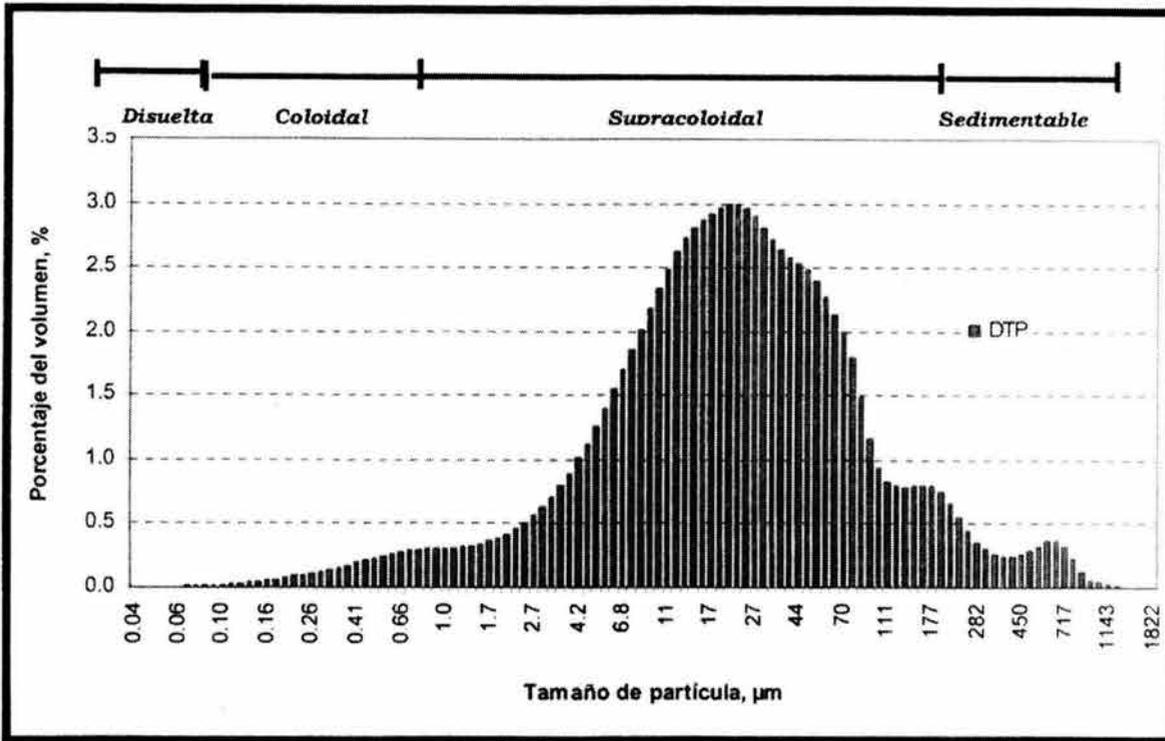


Figura 6.41. Distribución del Tamaño de las partículas en el Agua Residual Cruda con la técnica de Luz láser

6.2.7.2 Calidad Físico-química y microbiológica

La Tabla 6.28 presenta la calidad físico química y microbiológica promedio del agua residual cruda durante esta etapa. Basados en la desviación estándar se confirma que existe poca variabilidad en la calidad del agua residual. Este hecho ya se había mencionado previamente durante la distribución de tamaño y es precisamente en esta donde radica la variación la importancia de la técnica. Con base en el contenido de SST se considera un agua de mediana concentración (Metcalf & Eddy, 1985). Los huevos de helmintos se encuentran por arriba del promedio determinada por Jiménez *et al.* en 1997 para el agua residual del mismo sitio y para la misma época del año.

Tabla 6.28 Calidad Físicoquímica y Microbiológica del Agua Residual Cruda

Parámetros					
SST, mg/L	Huevos de helminto, HH/L	DQOt, mg/L	Turbiedad, UNT	CF, NMP/100 mL	Salmonella spp, NMP/100 mL
273 ₊₂₃	28 _{+8.2}	567 ₊₅₀	175 ₊₁₃	3x10 ⁹ _{+1x10²}	3x10 ⁷ _{+1.3x10²}

6.2.7.3 Distribución del tamaño de la partícula del efluente fisicoquímico sometido a diversas condiciones de operación

6.2.7.3.1 Evaluación del efecto del tipo y dosis de coagulante aplicados

El estudio se realizó comparando la eficiencia de remoción de partículas de dos coagulantes: Sulfato de aluminio y Pax xl 19. En ambos casos se experimentó con tres dosis diferentes (100, 200, 300 μmol de Al/L). Cada una de las pruebas se realizó por triplicado, como mínimo. Durante la floculación se aplicó 0.5 mg/L de polímero aniónico de alto peso molecular y se trabajó con un gradiente de 80 s^{-1} con 5 min de acuerdo con las condiciones obtenidas por Jiménez *et al.*, 1997.

Sulfato de aluminio

La Figura 6.42 presenta el porcentaje acumulado del volumen de partículas que aún permanecen en el sistema con el tratamiento de sulfato de aluminio. Con la aplicación de un coagulante en el sistema hay una reducción de partículas que se determina por el cambio en la distribución del volumen de partícula, este es dependiente de la dosis que se aplique. Para garantizar un efluente libre con el menor volumen de partículas $> 20 \mu\text{m}$ se requiere aplicar al sistema 300 $\mu\text{molAl/L}$ y obteniendo un contenido de huevos de helmintos fue de 0.8 HH/L. Con dosis menores, el efluente presentó entre 15 y 26% de este tamaño de partícula (en 200 y 100 $\mu\text{molAl/L}$ respectivamente) y como consecuencia se presentó una concentración de 1.8 y 2.3 HH/L, en cada caso. En la misma Figura se observa que el agua residual tratada se compone de una importante cantidad de partículas $< 8 \mu\text{m}$ y que representan entre un 43 y 86% del volumen total. Estas partículas por sus tamaños, incluyen a los coliformes fecales y la *Salmonella* spp.

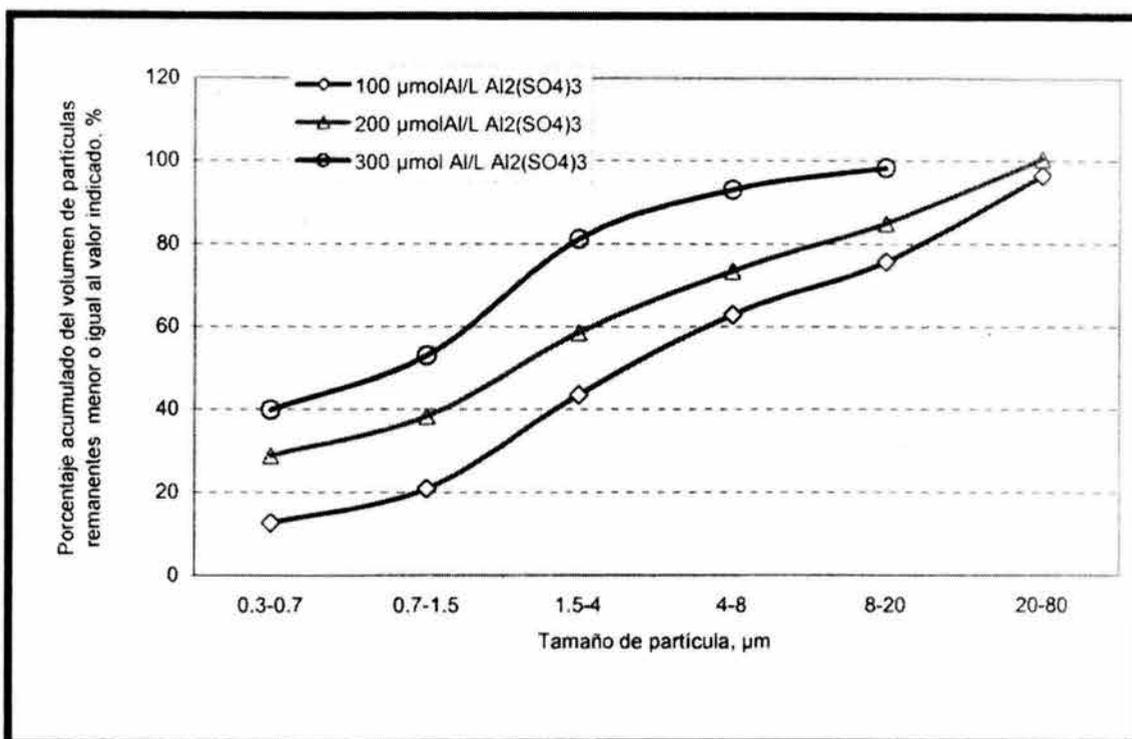


Figura 6.42. Distribución del volumen de partículas remanentes cuando se aplica $Al_2(SO_4)_3$

La Distribución de Tamaño de Partícula (DTP) obtenida con esta técnica pudo relacionarse con el contenido de SST (Figura 6.43). Al aplicar las dosis de 100, 200 y 300 $\mu molAl/L$ se obtuvo una reducción de SST de 65, 58 y 50 mg/L, de manera correspondiente, y se observa que, en efecto, la reducción en la masa de partículas es mayor a medida que la dosis de coagulante aumenta o que el contenido de SST en el efluente disminuye.

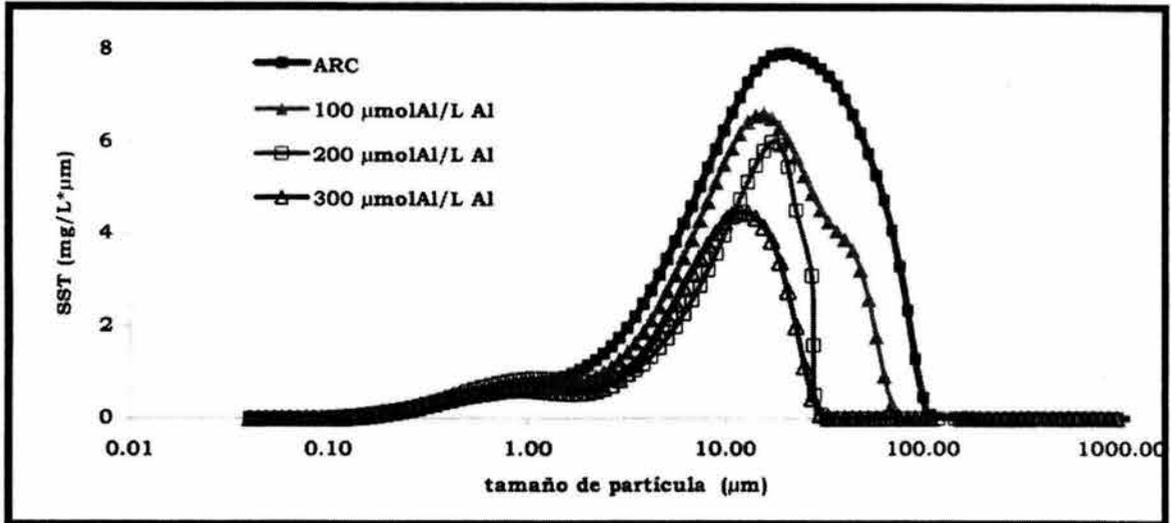


Figura 6.43. Distribución de los SST de acuerdo al tamaño de partícula al aplicar diversas dosis de Sulfato de Aluminio

Policloruro de aluminio (Pax xl 19)

Con el policloruro de aluminio, se determinó que una dosis de 100 $\mu\text{mol Al/L}$ fue suficiente para producir un efluente con un contenido menor al 3% de partículas $> 20 \mu\text{m}$ como se presenta en la Figura 6.44. El incremento en la dosis por arriba de la concentración mencionada, no promovió una mejora en la remoción de partículas en ningún intervalo de tamaño; de hecho, a medida que la dosis se incrementó, se encontró la presencia de partículas mayores a 20 μm , es decir, hubo una resuspensión. Esta situación fue provocada por el exceso de dosis en el sistema de acuerdo con Lars (1998). Este resultado concuerda con el obtenido en la etapa anterior donde se estableció que este tipo de coagulante sólo es selectivo para remover partículas más grandes.

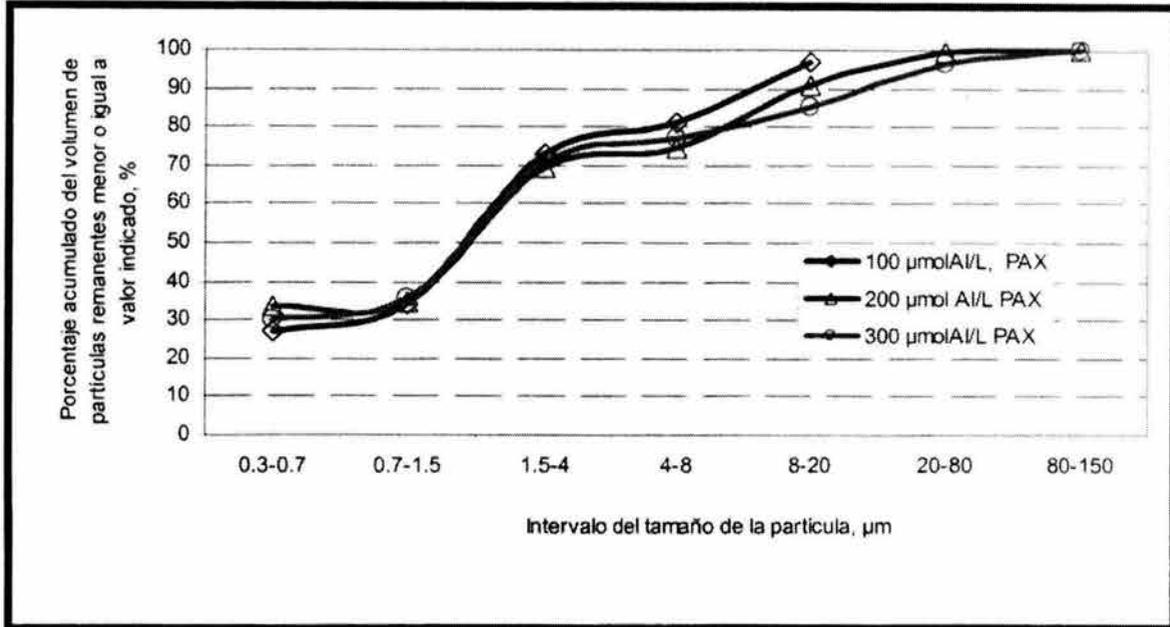


Figura 6.44. Distribución del volumen de partículas remanentes cuando se aplica Pax xl 19

Los SST determinados con este coagulante fueron menores (48, 52 y 57 mg/L para 100, 200 y 300 µmolAl/L) que con el Sulfato de aluminio. Como se observa en la Figura 6.45 la resuspensión de partículas se determina a partir de la dosis de 200 µmolAl/L como resultado del incremento de SST. La distribución de tamaño de la partícula evidencia este cambio al detectar un incremento en las partículas más grandes.

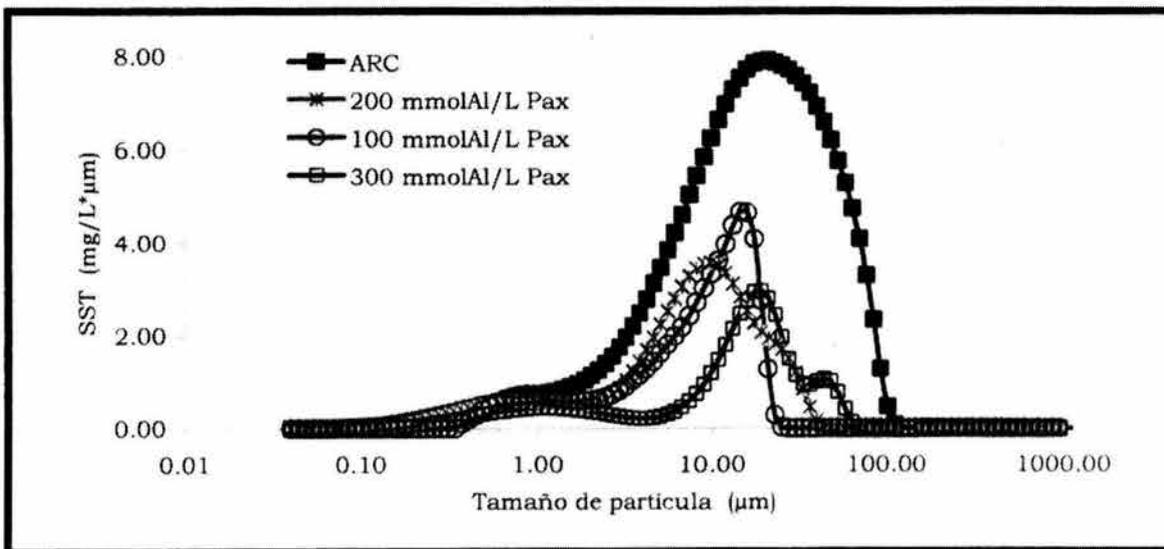


Figura 6.45. Distribución de los SST de acuerdo al tamaño de partícula al aplicar diversas dosis de Pax xl 19

Con los cambios en la distribución del tamaño de partícula y el volumen residual del tamaño de partículas presentes en el agua es factible determinar el mejor coagulante y la dosis óptima para aplicar en el sistema. La información obtenida sólo nos indica la ausencia o presencia de partículas con el tamaño deseado en el efluente. Bajo este criterio se determinó que al igual que en la etapa anterior, el Pax xl 19 en dosis de $100 \mu\text{molAl/L}$ podrá aplicarse en un proceso físico – químico para reducir principalmente las partículas $> 20 \mu\text{m}$ (Figura 6.46), de hecho, este coagulante presenta mayor selectividad para remover este intervalo de tamaño.

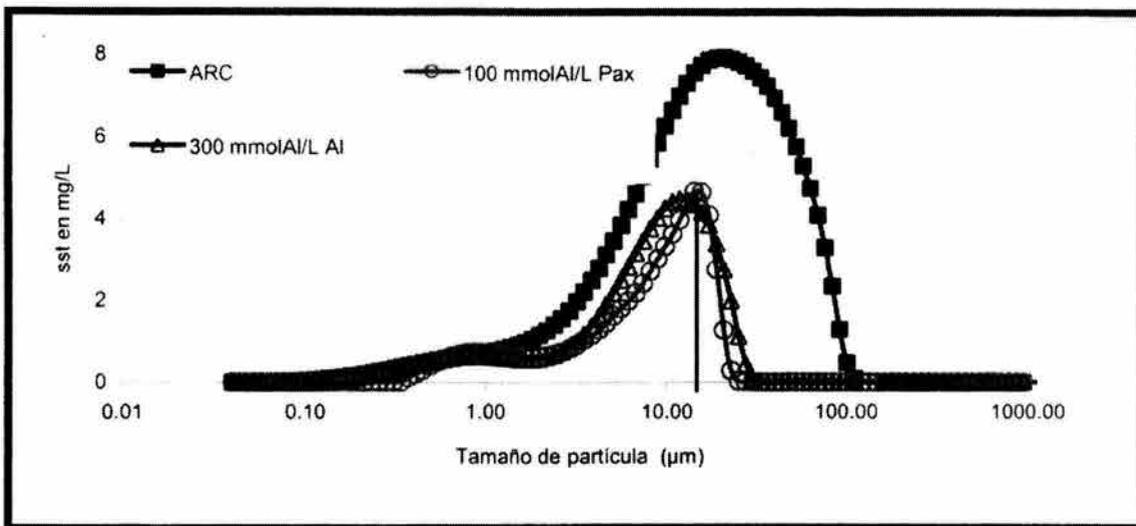


Figura 6.46. Distribución de los SST de acuerdo al tamaño de partícula y las mejores dosis de cada coagulante.

Comparación de la calidad físico química con las dosis óptimas para cada coagulante

En cuanto a la calidad físico-química y microbiológica las mejores dosis para cada coagulante se presentan en la Tabla 6.29. Se observa que $100 \mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 19 y $300 \mu\text{molAl/L}$ de Sulfato de aluminio produjeron un efluente con calidad similar, excepto en el contenido de huevos de helmintos, donde el Pax xl 19 tuvo un mejor desempeño ya que con este coagulante se removió una mayor cantidad de partículas entre 20 y $80 \mu\text{m}$, partículas relacionadas con dicho patógeno. Se destaca, la remoción mínima que presenta el sistema para los bacteriológicos. En efecto la reducción para Coliformes fecales y *Salmonella* spp es de 1.3 y 1.5 unidades logarítmicas respectivamente, debido a que en su mayoría, las partículas entre 1.5 y $4 \mu\text{m}$ permanecieron aún en el efluente.

Tabla 6.29 Calidad Fisicoquímica y microbiológica con las mejores dosis de cada coagulante

Dosis y Tipo de coagulante	Parámetros evaluados					
	SST, mg/L	Turbiedad, UTN	DQOt, mg/L	Huevos de helmintos, HH/L	CF, NMP/100 mL	Salmonella spp, NMP/100 mL
Pax xl-19 100 µmAl/L	48±6	63 ± 43	322 ± 63	0.7 ± 0.1	1.5x10 ⁰⁷⁺ 2x10 ⁰²⁻	1.8x10 ⁰⁶ +2x10 ⁰²
Al ₂ (SO ₄) ₃ 300 µmAl/L	50±11	37± 28	283 ± 53	0.8± 0.6	4.6x10 ⁰⁷⁺ 5.4x10 ⁰²⁻	1.9x10 ⁰⁶ +2x10 ⁰²

6.2.7.3.2 Cambio en la distribución del tamaño con base en el gradiente y el tiempo de contacto utilizados en la cámara de coagulación

Para determinar el efecto del gradiente y del tiempo de contacto en el proceso físico - químico, se utilizaron 3 gradientes (160, 330 y 460 s⁻¹) con tres tiempos de contacto (15, 30 y 60 s) cada uno durante la coagulación y se aplicó la dosis de 100 µmAl/L de Pax xl 19 (mejor coagulante obtenido en la etapa anterior). En la floculación se mantuvo constante el gradiente en 50 s⁻¹ con un tiempo de 5 min. La sedimentación se simuló dejando reposar el sobrenadante durante 5 minutos.

Gradiente 160 s⁻¹

Durante la etapa de coagulación, el gradiente y el tiempo de contacto aplicados son los parámetros relevantes que permiten garantizar la remoción de partículas del tamaño deseado. Con el gradiente pequeño (160 s⁻¹) fue necesario incrementar el tiempo hasta 60 segundos para permitir la remoción máxima de 97% de partículas > 20 µm como se muestra en la Figura 6.47. Si en el sistema se utiliza un tiempo entre 15 y 30 s, entonces, un remanente de partículas < 20 µm permanecerá en el sistema y con ello la probabilidad de que los huevos de helmintos estén contenidos. En efecto, el porcentaje de partículas con este diámetro será de 25 y 17%, respectivamente, y bajo estas condiciones los huevos de helmintos cuantificados en el sistema fueron de 1.6 y 1.2 HH/L respectivamente.

Gradiente 330 s⁻¹

De la misma forma que en el caso anterior, con un gradiente de 330 s⁻¹ y un tiempo de contacto de 15 s no fue posible remover el tamaño de partícula deseado (20 µm y Figura 6.48). Al incrementar el tiempo de contacto hasta 30 s, la calidad del efluente mejoró y, de hecho, se observa que el efluente está compuesto por partículas < 8 µm lo que indica que el sistema puede utilizar estas condiciones y obtener una calidad excelente (pero no lo suficiente para remover las partículas donde se supone se asocian los coliformes fecales) de agua residual tratada. Existe un cambio en distribución del tamaño de la partícula al utilizar un tiempo

de 60s, esto como resultado de una resuspensión de las partículas por lo que el efluente presentó un 9% de partículas > 20 μm

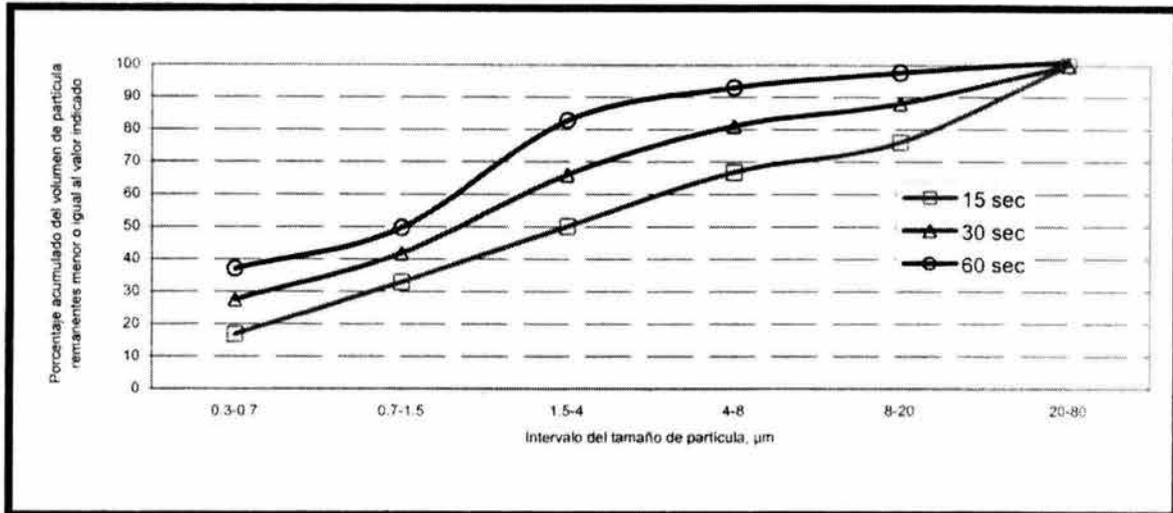


Figura 6.47. Remoción del volumen de partículas empleando 160 s^{-1} y diversos tiempos de contacto

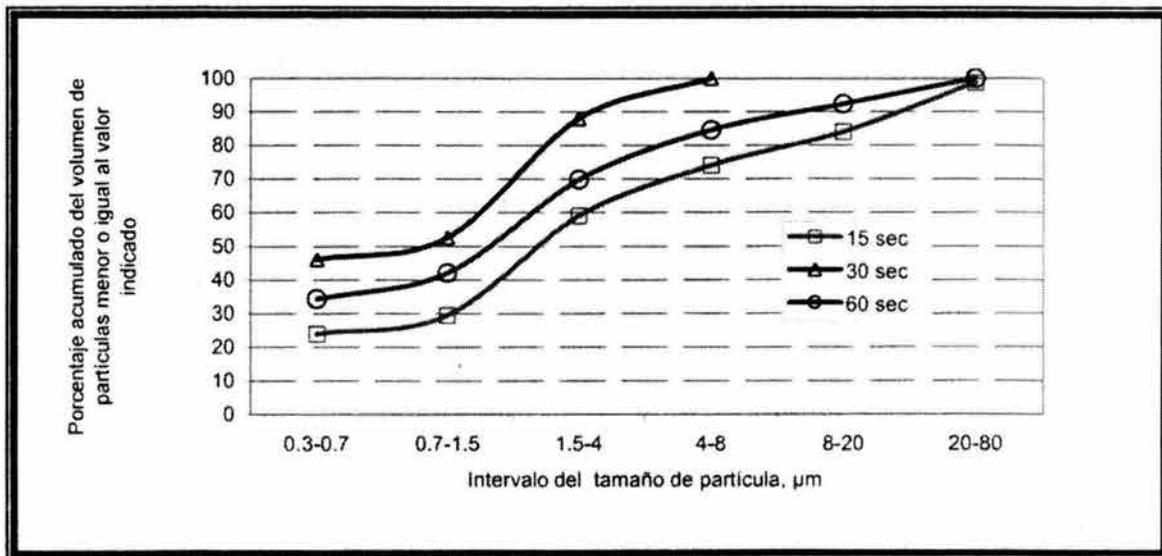


Figura 6.48. Remoción del volumen de partículas empleando 330 s^{-1} y diversos tiempos de contacto

Gradiente 460 s^{-1}

Si en el sistema se incrementa el gradiente hasta 460 s^{-1} con 15 s de tiempo de contacto se eliminarán las partículas $>$ a $20 \mu\text{m}$, de hecho, el efluente producido se constituye de principalmente de partículas $<$ $8 \mu\text{m}$. Si el tiempo de contacto se incrementa hasta 30 y 60 segundos, el sistema presentará una resuspensión de partículas en todos los intervalos de tamaños, siendo más evidente cuando se aplica un tiempo de 60 s (Figura 6.49).

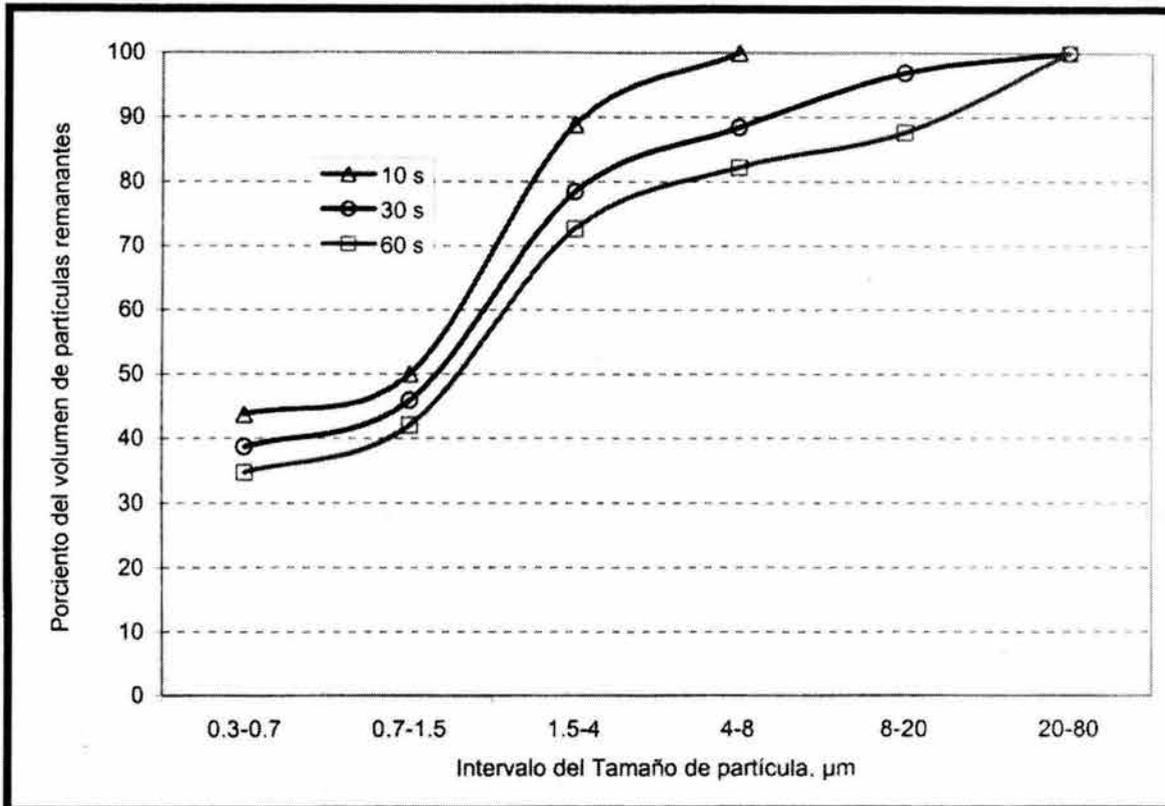


Figura 6.49. Remoción del volumen de partículas empleando 460 s^{-1} y diversos tiempos de contacto

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos queda señalado que, para producir un efluente con un menor contenido de partículas mayores de $20 \mu\text{m}$ las condiciones óptimas en la etapa de coagulación son: un gradiente de 163 s^{-1} y un tiempo de contacto de 60s. Si se quiere mejorar la calidad, se puede utilizar un gradiente de 336 s^{-1} con 30 s ó 463 s^{-1} con 10 s; además, bajo estas dos condiciones el efluente final se compondrá principalmente de partículas $<$ $8 \mu\text{m}$, aunque en la práctica, esto no es necesario. Por otro lado, de acuerdo con el gasto energético establecido en la etapa anterior, se opta por utilizar el gradiente pequeño con un tiempo grande.

6.2.7.3.3 Cambio en la Distribución del tamaño de la partícula de acuerdo al gradiente y al tiempo de contacto aplicados en la floculación

Durante esta etapa del estudio se determinó la importancia del gradiente y tiempo de contacto en la cámara de floculación. Para ello, se tomaron en cuenta los resultados de las dos etapas anteriores y durante la coagulación se utilizó un gradiente de 160 s^{-1} con 60 s y $100 \mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 19. Los gradientes aplicados durante la floculación fueron de 20, 40 y 80 s^{-1} con tiempos de contacto de 5, 10 y 15 min.

A continuación, la Tabla 6.30 presenta los resultados del porcentaje de partículas mayores y menores a $20 \mu\text{m}$ (por considerarlo como el tamaño de mayor importancia para la tesis) de acuerdo con el gradiente y tiempo aplicados y se compara con el contenido de SST y huevos de helmintos presentes en cada caso.

Cuando se aplicó un gradiente pequeño (20 s^{-1}), se requirió un tiempo de contacto de 15 min para producir un efluente en el que sólo el 15% de las partículas remanentes fue $>$ a $20 \mu\text{m}$ y que cumpliera con el contenido de huevos de helmintos requerido en la normativa para el reúso no restringido. Un efecto similar se obtuvo cuando el gradiente utilizado fue de 40 s y el tiempo de contacto de 10 min. La mejor calidad del agua se produce con el gradiente de 80 s^{-1} con 5 min; con estas condiciones sólo el 11% de las partículas remanentes presentan un tamaño $>$ a $20 \mu\text{m}$. En el efluente al presentarse un menor contenido de partículas con dicho diámetro se reduce el contenido de este patógeno y el contenido de SST, sin embargo, queda establecido que para cumplir con la normatividad no necesariamente el agua debe estar libre de partículas $>$ $20 \mu\text{m}$ en el 100% de los casos.

Con un proceso físico-químico se favorece la remoción de partículas $>$ $20 \mu\text{m}$ y por ende, la remoción de huevos de helmintos y una parte de los SST. Los efluentes producidos por este tipo de proceso contendrán básicamente partículas del tamaño coloidal por lo que se manifiesta la baja remoción de coliformes fecales y la *Salmonella* spp.

Tabla 6.30. Contenido de partículas mayores y menores de $20 \mu\text{m}$ de acuerdo al gradiente y tiempo de contacto utilizados durante la floculación

Gradientes s^{-1}	Tiempo min	Porcentaje de partículas remanentes, %		SST mg/L	HH HH/L
		$< 20 \mu$	$> 20 \mu\text{m}$		
20	5	72+5	28+4	58+8	1.3+0.5
	10	75+8	25+5	53+11	1.1+0.2
	15	85+3	15+3	48+5	0.8+0.3
40	5	83+6	17+5	47+6	1.0+0.6
	10	86+2	14+3	45+4	0.8+0.3
	15	85+5	15+3	50+8	1.3+0.5
80	5	89+3	11+5	43+3	0.6+0.3
	10	82+7	18+8	45+3	0.8+0.6
	15	70+11	30+15	63+5	1.6+0.5

La Figura 6.50 muestra la comparación de la distribución de los SST con respecto al tamaño de partícula para el mejor tiempo de contacto de cada gradiente. La mejor distribución se obtiene con el gradiente de 84 s^{-1} con 5 min debido a que se produce una menor concentración de SST y el porcentaje de partículas $> 20 \mu\text{m}$ es de sólo el 11%. En la misma Figura se observa que con esta condición se redujo una concentración considerable de partículas $< 10 \mu\text{m}$. La técnica de luz láser tiene utilidad práctica sólo si se requiere conocer la presencia o ausencia de un tamaño de partícula específico y en un intervalo de tamaño más amplio.

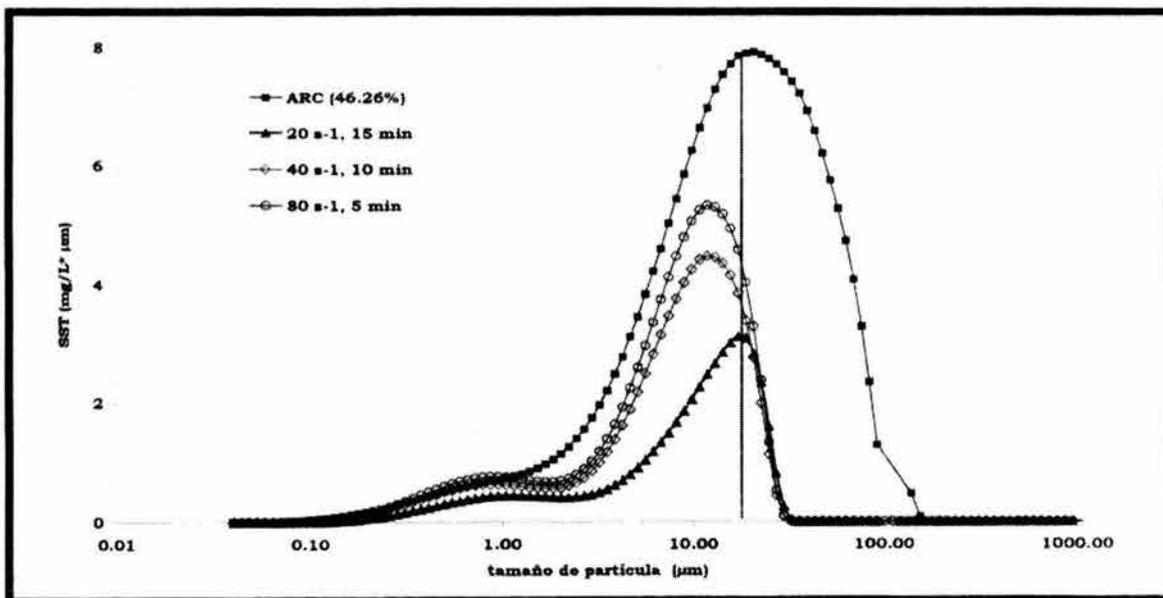


Figura 6.50. Distribución de los SST con los gradientes y tiempos de contacto en la cámara de floculación

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados, las conclusiones más importantes del estudio son:

- Es factible aplicar la técnica de distribución del tamaño de partícula (en volumen) para determinar el contenido de huevos de helmintos en el agua residual municipal cruda y tratada con un proceso físico químico. La ventaja de utilizar dicha técnica en una PTAR es que se puede conocer el contenido de este patógeno en línea, en un tiempo no mayor a cinco minutos y con un costo de 2.6 USD, en lugar de hacerlo en forma puntual, en cinco días y a un costo de 70 USD y, en la práctica, puede alertar a los operadores sobre la presencia de partículas indeseadas ($> 20 \mu\text{m}$) y de parásitos (huevos de helmintos). No obstante, las relaciones obtenidas se consideran válidas (al menos por lo pronto) sólo para un tipo de agua en particular (Emisor Central, época de estiaje).
- De igual manera, con dicha técnica se pueden establecer las condiciones óptimas con las cuales se debe operar un proceso de tratamiento físico-químico para garantizar la calidad del efluente deseado, mismas que no necesariamente coinciden con las que arroja el estudio comparativo con base en los SST.
- De las dos técnicas utilizadas para medir el tamaño de partícula, la de luz láser tiene poca utilidad práctica ya que su determinación sólo es cualitativa. La técnica del sensor con corriente eléctrica es la más adecuada para cumplir con los objetivos y metas de la investigación ya que permitió determinar el número y volumen de las partículas de manera cuantitativa.
- En términos de volumen y número de partículas, el Agua Residual Municipal de la Ciudad de México se puede clasificar como de alta concentración al presentar un volumen promedio de 1981 mL/m^3 y un número de partículas de 10^{13} unidades logarítmicas/ m^3 las cuales son principalmente partículas supracoloidales (98.2%). El volumen de partículas guarda cierta relación con los SST ($r = 0.85$) y los huevos de helmintos ($r = 0.88$) por lo que su variación afecta de manera directa la calidad del agua residual municipal del valle de México.

- Se estableció que existe una relación entre la distribución del tamaño de partícula en volumen con el contenido de huevos de helmintos y presumiblemente el número con el contenido de coliformes fecales y *Salmonella spp.* presente en el agua residual doméstica. En cuanto a su aplicación práctica, la expresión para determinar los huevos de helmintos es mucho más útil al determinar una correlación lineal con un coeficiente de relación del 0.91 y un grado de confianza del 95%.
 - ⇒ Las ecuaciones para conocer la concentración de huevos de helmintos deberán aplicarse en forma separada en el influente y el efluente tratado. Para el efluente tratado con un proceso físico químico se podrá utilizar la ecuación general $HH/L = 0.041 * \text{volumen de partículas de } 20\text{-}80 \mu\text{m en mL/m}^3$ y aplicarse tanto al riego sin restricción como al restringido de acuerdo con los límites establecidos por la NOM 001-SEMARNAT, 1996.
 - ⇒ Las ecuaciones desarrolladas para determinar el contenido de Coliformes fecales y *Salmonella spp.*, fueron establecidas en condiciones de 11.6 a 12.8 Ulog/m³ de partículas y de 6.5 a 8.3 Ulog/100 mL de bacteriológicos. Por las diferencias tan marginales que existen entre los intervalos de aplicación en ambos parámetros, las ecuaciones tienen poca utilidad ya que el coeficiente de relación fue de 0.75.
- La distribución y el tamaño de partícula en volumen es una técnica idónea para determinar con mayor rapidez y precisión el efecto de los factores que afectan la eficiencia del proceso de tratamiento físico químico del agua residual municipal del valle de México. De esta manera, se establece que este proceso debe trabajar bajo las siguientes condiciones de operación: la mezcla rápida debe operarse con un gradiente de 160 s⁻¹ con 60 s y utilizar 100 μmolAl/L de Pax xl 19; la mezcla lenta debe utilizar un gradiente de 20 s⁻¹ con 15 min y aplicar 0.5 mg/L de polímero aniónico y; por último, el tiempo de sedimentación de los flóculos formados deberá ser de 5 minutos. Con estas condiciones óptimas, el efluente presentará un volumen de partículas totales de 50 mL/m³ (valor crítico para el proceso físico-químico). De éstas, el 80% deberán ser menores a 20 μm y sólo una pequeña fracción (20%) deberá ser mayor a 20 μm para asegurar una baja probabilidad de que los huevos de helmintos estén presentes. Por otro lado, para el conteo de las partículas (y de coliformes fecales) se debe utilizar 0.03% de formaldehído como preservador y determinar el parámetro en un periodo no mayor de 6 horas ya que en caso contrario, el volumen de partículas aumentará y se modificará la distribución de las mismas por lo que no se podrá determinar el efecto real de los factores que afectan el desempeño del proceso.
- Los análisis estadísticos a un grado de significancia del 5% muestran que el volumen de partículas como parámetro de evaluación permite evaluar los factores involucrados en un proceso primario avanzado cuando se emplean diversas condiciones de operación por lo que si se incorpora el concepto a la selección, diseño y operación de los sistemas de tratamiento,

se podrá obtener un mejor aseguramiento de la calidad del agua residual tratada.

- En el proceso físico químico, el incremento de la dosis de coagulante y el tiempo de contacto en las cámaras de coagulación y floculación favorecerá la remoción de partículas menores a 20 μm , sin embargo, bajo algunas condiciones (gradientes altos en ambas cámaras) se provocará la resuspensión de partículas mayores a 20 μm y por ende el incremento en el contenido de huevos de helmintos.
- Se establece que un proceso físico químico removerá en menos del 93% las partículas disueltas y coloidales (< 20 μm) mientras que por arriba de este tamaño, el sistema removerá en promedio el 99% del total.
- Con respecto a la relación de partículas mayores y menores a 20 μm con los contaminantes, se concluye que en el agua residual cruda las partículas > 20 μm son responsables de aportar más del 70% del contenido de SST y el 97% de los huevos de helmintos. Las partículas <20 μm aportan hasta el 98% del contenido de microorganismos (Coliformes fecales y *Salmonella* spp.) y entre 35 y 60% de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y DQOt. Por ello, el proceso físico químico, por su capacidad de remover las partículas > 20 μm , removerá casi totalmente a los huevos de helmintos, hasta un 90% los SST y parcialmente la DQOt y los nutrientes. En otras palabras, se puede separar a los patógenos y preservar una fracción importante de la materia orgánica y de los nutrientes en el agua, sin embargo, por la misma razón, las bacterias permanecerán casi en la misma concentración y deberán ser removidas por otro proceso.

7.1 Recomendaciones

Se requiere realizar un estudio que incluya un mayor intervalo ($10^2 - 10^9$ Unidades logarítmicas) del contenido de bacteriológicos (Coliformes fecales y *Salmonella* spp.) y partículas para determinar el grado de linealidad que presentan, ello con la finalidad evaluar la afectación que se tendrá en los procesos de desinfección.

7.3 Desarrollos futuros

Las condiciones de optimización del proceso físico químico se realizaron en prueba de jarras, por lo que faltaría implementar la técnica en una planta piloto para después escalar y aplicar en una planta a escala real y hacer un control efectivo y automatizado del proceso de tratamiento.

Los estudios de distribución de tamaño de partículas se efectuaron con un agua residual tipo doméstico, por lo que es importante analizar otro tipo de agua residual por ejemplo la industrial.

VII. Conclusiones y Recomendaciones

De la misma manera, en el estudio sólo fue aplicado para un tipo de proceso de tratamiento (físico químico) faltaría hacer estudios con otros procesos tanto en sistema lote para posteriormente hacerlo en planta piloto.

8. REFERENCIAS

- Adin, A. (1999) Particle Characteristics: A Key Factor in Effluent Treatment and Reuse. *Wat. Sci. Tech.* 40 (4-5), 67-74.
- Adin, A. and Asano, T. (1998) The Role of Physical-Chemical Treatment in Wastewater Reclamation and Reuse. *Wat. Sci. Tech.* 37 (10) 79-90.
- Allen, T. (1997) Particle Size Measurement. Vol 1. Fifth edition. ISBN 0 412 72950-4 Chapman & Hall 525 p.
- Al-Malack, Muhammad H.; Abuzaid, Nabil S.; El-Mubarak, Aarif H. (1999) Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory; *Water Research* Vol: 33, Issue: 2, February, pp. 521-529.
- Alon, and Adin, A. (1994) Mathematical Modeling of Particle Size Distribution in Secondary Effluent Filtration, *Water Environ. Res.* 66, 836-841.
- American Public Health Association, Water Works Association and Water Environment Federation (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th edn. Washington D.C.
- American Water Works Association, (1971) Waste Quality and Treatment". Mc Graw-Hill book Company 3a. ed. México. pp. 69, 72, 73,76, 79, 89-89
- Amirtharajah and Kirk M. Mills (1982) *Rapid -mix design for mechanisms of alum coagulation*. *Journal American Water Works Association*; April, pp 210-219.
- APHA, AWWA, WEF (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. 19th Edition. Edited by Andrew D. Eaton, Lenore S. Clescery and Arnold E. Greenberg.
- Arani R. & Callis C. (1963) Particle Size: Measurement, Interpretation and Application. Mosanto Chemical Company, St. Louis Missouri.. John Wiley & Sons Inc., N.Y London. 165p.
- Arar A. (1991) Wastewater Reuse For Irrigation In The Near East Region. *Wat. Sci. Tech.* 23 pp 2127-2134
- Armon R., Dosoretz C., Azov Y. and Shelef G. (1994) Residual Contamination of Crops Irrigated with Effluents of Different Qualities: A Field Study. *Wat. Sci. Tech.* 30:9, 239-248.
- Asaolu S., Holland C., Jegede J., Fraser N., Stoddard R. and Crompton, D. (1992) The prevalence and intensity of solid-transmitted helminthiases in rural communities in Southern Nigeria. *Ann. Trop. Med. Parasitol.* 86 (3), 279-287.
- ASCE and AWWA (1990). *Water Treatment Plant Design*. McGraw-Hill. 2nd edition. pp. 235-237.
- AWWA (1989) Coagulation Committee "Coagulation as an Integrated Water Treatment Process". *J. AWWA.* 81(10), 72-78.
- Ayres, R., Lee, D. and Mara, D. (1989) The Enumeration of Human Intestinal Nematode Ova in Raw and Treated Wastewater. ODA Research Scheme R. 4336. Final report. University of Leeds, Department of Civil Engineering. Leed, U.K. 639-646.
- Bache, D. (1999) On the Strength and Character of Alumino-Humic Floccs. *Wat. Sci. Tech.* 40 (9), 81-88.
- Bache, D. and Hossain, M. D. (1991) Optimum Coagulation Conditions for Colored Water in Term of Floc Properties. *J. Wat. SRT-aqua.* 40, 170-178.
- Bache, D., Johnson, J. F. McGilligan and Rasool, E. (1997) A Conceptual View of Floc Structure in the Sweep Floc Domain. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4), 49-56.

- Balmat, J. L. (1957). Biochemical Oxidation of Various Particulate Fractions of Sewage. *Sewage and Industrial Waste*. 29 (7) 757-761.
- Barth H. and Sun S. (1993). Particles Size Analysis. *Amer. Chem Soc. Anal. Chem.* 65, 55R-66R.
- Bartone C. (1991) International Perspective on Water Resources Management and Wastewater Reuse- Appropriate Technologies. *Wat. Sci. Tech.* 23, 2039.
- Beddow J. K. (1980) *Particulate Science and Technology*, Chemical Publishing, New York..
- Biagi, F., (1990) Enfermedades parasitarias. De la prensa Mexicana pp 376.
- Black A and Christman R (1963) Characteristics of Colored Surface Water. *J. AWWA*. 753-770.
- Blatchley R. E and Russell III I. (1991) Disinfection. *Res. Jour of the WPCF, Research Journal* 63:4, 416-424.
- Blumenthal, U., Mara, D., Ayres, R., Cifuentes, E., Peasey, A., Scott, R., Lee, D. and Ruiz-Palacios, G. (1996) Evaluation of the WHO Nematode Egg Guidelines For Restricted And Unrestricted Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 33 (10-11), 277-283.
- Blumenthal, U., Mara, D., Peaseu, A., Riuz-Palacios, G. and Stott, R. (2000) Guidelines for the microbiological Quality of Treated Wastewater Used in Agriculture: Recommendations for Revising WHO Guidelines. *Bulletin of the World Health Organization* 200. 78 (9), 1104-1116.
- Boller, M. (1993) Removal of Organic Matter by Physics-Chemical Mechanisms in Wastewater Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 27 (11), 167-184.
- Boller, M. and Blaser, S. (1998) Particles under stress. *Wat. Sci. Tech.* 37(10), 9-29.
- Botero L., Montiel M., Estrada P., Villalobos M. and Herrera L. (1997) Microorganism Removal in Wastewater Stabilisation Ponds in Maracaibo, Venezuela *Wat. Sci. Tech.* 35 (11-12) pp 205-209.
- Bouwer, H., Fox, P. and Westerhoff, P (1998) Irrigating with Treated Effluent. *Wat. Environ. Tech.* 5(3), 115-118.
- Brissaud F., Salgot M., Bancolé A., Campos C. and Folch M. (1998). Residence Time Distribution and Disinfection of Secondary Effluents by Infiltration Percolation 2° International Conference. Resources and Environmental: Priorities and Challenges. Milán, 14-16 septembre 1998. 371-378.
- British Geological Survey, Comisión Nacional del Agua, London School of Hygiene and Tropical Medicine and University of Birmingham (1998) Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico Final Report-November, BGS Technical Report wc/98/42, 155 p.
- Broadwell, M. (2001) A Practical Guide to Particle Counting for Drinking Water Treatment. Lewis Publishers, ISBN 1-56670-306-9. 222 p.
- Brock McEwen J. (1998); Treatment process selection for particle removal. Cooperative research report. AWWA Research Foundation; IWSA. ISBN 0-89867-887-0
- Cairns W. L (1993). Comparing Disinfection by Ultraviolet Light and Chlorination the Implications of Mechanism for Practice. Water Environmental Federation Specialty Conference. May 1993. Whippany, N. Y. pp 555-565.
- Campbell H and Crescuolo P., (1984) Assessment of Sludge Conditionability Using Rheological Properties: Methods of Characterizing Sewage Sludge. Editors D. Riedel Publishing, Dordrecht Holland
- Campbell H, Rush R and Tew R. (1978) Sludge Dewatering Design Manual. Canada Ontario Agreement Research Report No. 72. Canada.
- Centro de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (Consejo de Coordinación Empresarial), Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción

- (1998) Eficiencia y Uso Sustentable del Agua en México. Participación del Sector Privado. Primera edición, Jiménez Editores, S.A. de C.V, 132 p.
- Chack, J., Rubino, V., McFarland, S, Krasnoff, P. y Liubicih, J. (1994) Advanced primary Treatment Bridges the gap". *Wat. Environ. Tech.* enero pp 49-53
- Chang A., Page., Asano T. And Hespaholt L. (1996). Developing Human Health Related Chemical Guidelines for Reclaimed Wastewater Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 33, No. 10-11. Pp 463-472.
- Chang J., Tsai L. and Vigneswaran S. (1996) Experimental Investigation of the Effect of Particle Size Distribution of Suspended Particles on Microfiltration. *Wat. Sci. Tech.* 34(9), 133-140.
- Chaudhary R., Shao Y.J., Crosse J. y Soroushian F. (1991). "Evaluation of Chemical Addition". *Wat. Environ. Tech.* febrero pp 66-71.
- Chaudhary, R, Shao Y and Murcott S (1991). The Case for Using Chemically Enhanced Primary Treatment in a New Cleanup Plant for Boston Harbor, Boston Soc. Civil Engrs. Section/ASCE Vol 6 pp 69.
- Chaudhary, R., Shao Y.J., Crosse, J. and Soroushian, F (1991) Evaluation of Chemical Addition. *Wat Env Tech.*, 3, No.2, 66-71.
- Chávez, A. and Jiménez, B. (2000) Particle Size Distribution (PSD) Obtained in Effluent form and Advanced Primary Treatment Process Using Different Coagulant. CHEMICAL WATER AND WASTEWATER TREATMENT VI: Proceedings on the 9th International Gothenburg Symposium, Editorial Springer-Verlag, ISBN3-540-67574-4, pp 257-268. Berlin.
- Chávez, A. y Jiménez, B. (1996) Evaluación de las condiciones de mezclado. Punto de adición de coagulante y floculante en la eficiencia de un Tratamiento Primario Avanzado. XXV Congreso interamericano. Ingeniería Sanitaria y Ambiental "Consolidación para el Desarrollo" Memorias en disco, Sesión 01396E14. (noviembre, 1996):
- Chávez, A., Jiménez, B. and Gilberg, L. (2002) Particle and Microorganism Removal in Treated Sewage Using Several Types of Coagulants, Chemical Water and Wastewater Treatment VII; pp. 213 -221.
- Chebbo G. and Bachoc A. (1992) Characterization of Suspended Solids in Urban Wet Weather Discharges, *Wat. Sci. Tech.* 5 (8), 171-179.
- Cifuentes, E. and Siebe C. (1993) Environmental Impact of Wastewater Irrigation in Central Mexico; an Overview. *International Journal of Environmental Health Research*, 3(4) London, pp. 28.
- Cifuentes, E., Blumenthal, U. and Ruiz, G. (1999) Valle del Mezquital: Reúso de Agua Residual y Riesgos para la Salud. *Ing. cienc. ambient.* 11 (43) 23-27.
- Cikurel H.,Rebhun M., Appiah-Amirtharajah and Adin A. (1996) Wastewater Effluent Reuse By In-Line Flocculation Filtration Process. *Wat. Sci. Tech.* 33 (10-11) 203-211.
- CNA, 2000, Plan de acción para consolidar la transferencia y la modernización de los distritos de riego, Proyecto realizado entre la CNA y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 60 pp,.
- CNA, SEMARNAT, 2004. Estadísticas del Agua en México. Un producto del sistema Unificado de Información Básica del Agua (SUIBA) 142 pp. México.
- Collins, E., Davidson, J. and Daniels, Ch. (1975). Review of Common Methods of Particle Size Measurement. *J. Paint Tech.* 47 (604), 35-55.
- Comma, J.; Jabbouri, A.; Grasmick, A.; Elmaleh, S (1991). Intensive Primary Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 27, No. 7, p. 217-222.

- Comisión Nacional del Agua (1995) Feasibility study for the sanitation of the Valley of Mexic. Final Report . December, 1995.
- Cooper R. C. (1991) Public Health Concerns In Wastewater Reuse. *Wat. Sci. Tech.* 20, No. 9, pp55-65
- Darby, J., Lawler, D., Wilshusen, T., "Depth Filtration of Wastewater: Particle Size and Ripening", *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, V63, N3, 228-238, 1991.
- Darby, J., Snider, K., Tchobanoglous, G., "UV Disinfection of Wastewater: A Pilot-Scale Study of Performance", *ASCE Environmental Engineering Conf. Proc.*, Reno, NV, 42-47, July 8-10, 1991.
- De Cock W. (1999) The Feasibility of Flocculation in a Storage Sedimentation Basin *Wat. Sci. Tech.* 39(2) 75-83.
- De Zuam J, D. E (1990) Handboak of drinking water quality standard and control. Van Wostrand Reinhold New York.
- Degrémont, (1979). *Water Treatment Handbook*. A halsted press Book. Jonh Wiley & Sons, 4a. ed., New York, U.S.A. 135-138.
- Deletic A. (1999) Sediment Behavior in Grass Filter Strips *Wat. Sci. Tech.* 39 (9) 129-136.
- Dentel, S. K. and Gossett, J. M., (1988) "Mechanisms of Coagulation with Aluminum Salts," *Journal American Water Works Association*, 80, 187-198 (1988). Nominated for Harrison Prescott Eddy Medal by Chesapeake Water Pollution Control Association.
- Desbos, G.; Laplace, C.; and Rogalla, F. (1990) Extended Coagulation for Reagent and Space Savings with Wastewater Lamella Settling. *Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 4th Gothenburg Symposium*. Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag, p. 139-150.
- Dixo, N., Grambill, M., Catuda, P. and Haandall, C (1995) Removal of Pathogenic Organism from the Effluent of an Upflow Anaerobic Digester Using Waste Stabilization Ponds. *Wat. Sci. Tech.* 31(12), 275-284.
- Du Gon Lee ; James S. Bonner ; Laurie S. Garton ; Andrew N.S. Ernest and Robin L. Autenrieth (2000) *Modeling coagulation kinetics incorporating fractal theories: a fractal rectilinear approach*. *Water Science and Technology*; Vol. 34; No.7; pp. 1987-2000.
- Duker A. (1998) Properties of the Particulate Phase in Deep Saline Groundwater in Laxemar, Sweden. *Wat. Res.* 32 (1), 186-192.
- Eckenfelder Jr. W. Wesley (1991). "Principles of water quality management" Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, U.S.A. pp. 461-463
- Eckenfelder (1985) *Industrial water pollution control: Chapter 4. Coagulation and precipitation*. pp. 84 - 95.
- Ellis, K. V., Rodrigues P. C. C. and Gomez C. L. (1993) Parasite ova and cysts in waste stabilization ponds. *Water research*; 27, 1455-1460.
- Elmitwalli, T. (2001) Biodegradability and Change of Physical Characteristics of Particles During Anaerobic Digestion of Domestic Sewage. *Wat. Res.* 35 (5), 1311-1317.
- Elvers B. (1999) Particle Size Analysis and Characterization of a Classification Process, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH. 6a. edition. 1-62.
- Environmental Protection Agency (1992). *Guidelines for Water Reuse*. Report EPA/625/R-92/004. U.S. Agency for International Development. Washington, DC pp.186.

- Falkenmark M (1989) The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa –why isn't being addresses? *AMBI*, 18 (2), 112-118.
- Farmer R. and Beckman J. (1984). Particle Size Distribution analysis of Blended Solids by a Modified Andreasen Pipet Method. *Ing. Eng. Chem. Process Desv Dev.* Vol 23, pp 341-343.
- Fattal, B., Bercovier, H., Derai-Cochin, M. and Shuval, I. (1985) Wastewater Reuse and Exposure to Legionella Organisms. *Wat. Res.* 19 (6), 693-696.
- Fattal, B., Yekutieli, P., Wax, Y. and Shuval I. (1986) Prospective Epidemiological Study of Health Risks Associated with Wastewater Utilization in Agriculture, *Wat. Sci. Tech.* 18 (10), 199-209.
- Feacham G., Bradley J., Garelick H, and Mara D. (1983) Sanitation and Disease Health Aspects of Excreta and Wastewater Management; Chichester, John Wiley and Sons, New York; 235-297.
- Feigin, A., Vaisman, I. and Bielorai, H. (1984) Drip Irrigation of Cotton with Treated Municipal effluents: II. Nutrient Availability in Soil. *J. Envir. Qual.* 13(2), 231-234.
- Fetting, J. and Ratnaweera, H. (1993) Influence of Dissolved Organic Matter on Coagulation/Flocculation of Wastewater by Alum. *Wat. Sci. Tech.* 27 (11) 103-112.
- Fontaine T., Moore T. and Burgoa A. (2000) Distributions of Contaminant Concentration and Particle Size in Fluvial Sediment. *Wat. Res.* 34 (13) 3473-3477.
- Fujiwara M. (1986). Present State and Future Direction of Counter Measures for Pollution from Domestic Wastewater in Japan. *Wat. Sci. Tech.* 18, Tokyo. Pp 1-8.
- Fukushi K, Tsuchida T., Watanabe T., Tanaka H., takahashi Y. and Omura T (1998) Development And Evaluation of Risk Assessment Model for Pathogenic Microorganismos in Natural Water Environment, Advanced Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. 2^o International Conference. Resources and Environment: Priorities and Challanges. 363-370. Fiera Milano, 14-16 September.
- Gambrill, M.P.; Mara, D. D.; Oragui, J.I.; Silva, S. A. (1989). Wastewater Treatment for Effluent Reuse: Lime-induced Removal of Excreted Pathogens. *Wat. Sci. Tech.* 21, No. 3, p. 79-84.
- Gaspard, P. and Schwartzbrod, J. (1993) Determination of the Parasitic Contamination of Irrigated Vegetables, *Wat. Sci. Tech.* 27 (7-8), 295-302.
- GRAY KA, YAO C, and O'MELIA CR (1995) Polymeric inorganic coagulants. *J. Am. Water Works Assoc.* **87** 136-146.
- Gregory J. (1988). A Simple Particle Monitor for Low-Turbidity Waters. AWWA Water Quality Technology Conference, St. Louis, USA, November 13-17.
- Gregory J. (1999) Particle Monitoring Techniques for Water Treatment Applications *Journal of Environmental Sciences*, 11 (3) 328-333.
- Groves M. (1979) Particle Size Characterization in Dispersions, *Pharmaceutical Development*, 76 (7-9), 90-97.
- Guibelin E., Delsalle F. and Binot P. (1994). The Actiflo® process. A Highly Compact and Efficient Process to Prevent Water Pollution by Stormwater Flows. *Wat. Sci. Tech.* 30 (1), 87-96.
- Guillaume, P. and Xanthoulis, D. (1996) Irrigation of Vegetable Crops as a Means of Recycling Wastewater: Applied to Hesbaye Frost. *Wat. Sci. Tech.* 33 (10-11), 317-326.
- Gujer W. And Boller M (1978) Basis for the Design of Alternative Chemical Biological Wastewater Treatment Processes, *Prog. Water Technol.*, No. 10 Vol 6, 741 p.
- Hall, T. and Croll, B. (1997) Particle Counters as Tool for Managing Cryptosporidium Risk in Water Treatment, *Wat. Sci. Tech.* 36 (4), 143-149.

- Hamersveld E., Lans R., Caulet P. (1997) Modeling Brewers' Yeast Flocculation, *Biotechnology and Bioengineering*, 57(3), 330-341.
- Hansson B. y Langworthy A. (1994) "Upgrading Point Loma Treatment Plant in San Diego with Improved Advanced Primary Treatment". *Chemical water and wastewater treatment III*. pp 259-268.
- Hargesheimer E. E.; Lewis M. C. and Yentsch M. C. (1992) Evaluation of Particle Counting as a Measure of Treatment Plant Performance. AWWA Research Foundation and the American Water Works Association.
- Harha Ratnaweera; Egil Gjessing and Eivind Oug (1999) Influence of physical-chemical characteristics of natural organic matter (nom) on coagulation properties: an analysis of eight Norwegian water sources. *Water Science and Technology*; Vol. 40; No 4-5; pp 89-95.
- Harleman, D. and Murcott, S. (1999) The Role of Physical-Chemical Wastewater Treatment in the Mega-Cities of the Developing World. *Wat. Sci. Tech.* 40 (4-5), 75-80.
- Harleman, D. and Murcott, S. (2001). An Innovative approach to urban wastewater treatment in the developing world. *Water 21*. June, 45-59.
- Harleman, D., Altshul, J. and Morrissey, S. (1992). Preparatory Bench Scale Testing for Chemically Enhanced Primary Treatment. Massachusetts Institute of Technology, Final MIT/AUB Report, February 10, Cambridge, Massachusetts, USA.,
- Hatukai, S., Ben-Tzur, Y. and Rebhun, M. (1997) Particle Counts and Size Distribution in System Design for Removal of Turbidity by Granular Deep Bed Filtration. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4), 225-230.
- Heinke G., Tay A. And Qazy (1980) Effects of Chemical Addition on the Performance of Settling Tank. *Journal Water Pollution Control Federation*. Vol 52. Pp 2946.
- Heinzmann, B. (1994) Coagulation and Flocculation of Stormwater from a Separate Sewer System - A New Possibility for Enhanced Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 29 (12), 267-278.
- Helbert, D., Phipps P.J., Strange, R. E. (1971): Carbohydrate Analysis. *Methods in Microbiology* 5B, 265-281.
- Helmer, R., Hesperhol, I. and Saliba, J. (1991) Public Health Criteria for the Aquatic Environment: Recent WHO Guidelines and their Application, *Wat. Sci. Tech.* 24(2), 35-42.
- Henze M. (1992) Characterization of wastewater for modeling of activated sludge processes. *Wat. Sci. Tech.* 25 (6) pp 1-15.
- Herbert E. Hudson Jr. (Jul. 1965) Physical Aspects Of Flucculation. *Jour. AWWA*. pp 885-892.
- Heukelekian, H. and Balmat, J. (1959) Chemical Composition of the Particulate Fractions of Domestic Sewage. *Sew. Ind. Wastes*. 31(4) 413-423.
- Hillgardt D. and Hoffmann E. (1997) Particle Size Analysis and Sedimentation Properties of Activated Sludge Floccs. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4), 167-175.
- Horowitz, G., Cukieman, A. and Cassanello, M. (1997) Flow regime transition in trickle beds packed with particles of different wetting characteristics---check-up on new tools. *Chemical Engineering Science*. 52 (21-22), 3747-3755.
- Hrudey E., Hrudey E. J., Low N. J. (June 1992) Health Effects Associated With Waste Treatment, Disposal, And Reuse. *Water Environment Research*. Vol. 64, No.4, pp 593-599.
- Hudson H. E. and J. P. Wolfner (1967) Design of Mixing and Flocculation Basins; *Journal American Water Works Association*; Vol. 59; 1257.

- Hunter, J. and Heukelekian, H (1965) The Composition of Domestic Sewage Fractions. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed. (WPCF)* 37 (8) 1142-1163.
- INEGI, SSA/DGEI (1998) Mortalidad por Enfermedades Infecciosas Intestinales e Infecciones Respiratorias Agudas en Niños Menores de Cinco Años. Informe.
- Irani Riyad R. and Clayton F. Callis (1963) particle size: measurement, interpretation, and application; John Wiley & Sons.
- J. Gregory and V. Dupont (2001) *Properties of flocs produced by water treatment coagulants*. Water Science and Technology; Vol. 44(10); pp. 231-236.
- J. H. Pieterse and A. Cloot (1997) *Algal cells and coagulation, flocculation and sedimentation processes*. Water Science and Technology; Vol. 36; No.4, pp.111-118.
- James, C.R.; O'Melia C. R. (1982) Considering sludge production in the selection of coagulants. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 74, p.148-151.
- Jawetz, E., Melnick, J. & Adelberg, E. (1995) *Microbiología Médica. El Manual Moderno*. Mexico. 807 pp.
- Jiménez, B. and Chávez, A. (1997) "Treatment of Mexico City Wastewater for Irrigation Purpose ". *Environmental Technology*. 18, 721-736.
- Jiménez, B. y Chávez, A. (2000). El Reúso de Aguas Residuales en Riego Agrícola. *Water Mirror*, No 2, pp 6-8 (Dicember, 2000) The Magazine on Water Treatment from Kemwater, edición española.
- Jiménez, B., Chávez A. and Capella A. (1997) Advanced Primary Treatment of Wastewater from the Valley of Mexico Reused for Crop Irrigation. The 70th Annual Conference and Exposition. Vol, 7, Part 2, Session 32, pp 311-320, ISBN-1-57278-111-3. Chicago, Illinois, USA (octubre, 18-22 1997).
- Jiménez, B., Chávez, A, Maya, C. and Jardines, L. (2001). Removal of Microorganisms in Different Stages of Wastewater Treatment for Mexico City. *Wat. Sci. Tech.* 43. 155-162.
- Jiménez, B., Chávez, A. and Hernández, C. (1999) Alternative Treatment for Wastewater Destined for Agricultural Use. *Wat. Sci. Tech.* 40 (4-5), 355-362.
- Jiménez, B., Chávez, A., Leyva, A. and Tchobanoglous, G. (2000) Sand and Synthetic Medium Filtration of Advanced Primary Treatment Effluent from Mexico City". *Wat. Res.* 34, 2, pp. 473-480.
- Jiménez, B., Garduño, H. and Domínguez, R. (1998) "Water Availability in Mexico Considering Quantity, Quality and Uses", Vol 24, No. 1, pp 1-8 *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Johannes Haarhoff and Hannes Jourbert (1997) *The (relative) insignificance of G in Flocculation*. *Journal American Water Works Association*; October; pp. 79-91.
- Kaminski I., Vescan N. and Adin A. (1997) Particle Size Distribution and Wastewater Filter Performance, *Wat. Sci. Tech.* 36 (4) 217-224.
- Karanis, P., Schoenen, D. and Seitz, H. (1998) Distribution and Removal of Giardia and Cryptosporidium in Water Supplies in Germany *Wat. Sci. Tech.* 37 (2) 9-18.
- Kavanaugh, M. Teregas, G., Moon, Ch. and Pearson, E. (1978) Particulates and Trace Pollution Removal by Depth Filtration. *Prog. Wat. Tech.* 10 (5-6) 197-215.
- Kawamura S. (1976) *Consideration in improving flocculation*. *Journal American Water Works Association*; Vol. 68; pp. 328 - 336.
- Kawamura, S. (1973). Coagulation considerations. *J. AWWA.* 65, 417-423.
- Kobler D. and Boller M (1997) Particle Removal in Different Filtration Systems for Tertiary Wastewater Treatment -A Comparison *Wat. Sci. Tech.* 36 (4) 259-267.
- Krishnappan B. (1999) Seasonal Size Distribution of Suspended Solids in a Stormwater Management Pond. *Wat. Sci. Tech.* 39 (2), 127-134.

- Krofta M., Miskovic D., Burges D. and Fahey E. The Investigation Of The Advanced Treatment Of Municipal Wastewater By Modular Flotation-Filtration Systems And Reuse For Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 33 No. 10-11 pp 171-179.
- Lars G. (1994) Influence of the Basicity of Polyaluminium Chlorides when Cleaning Municipal Wastewater. *Chemical Water and Wastewater Treatment III*. R. Klute/H.H. Hahn (Eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Pp. 39-56.
- Lartiges, B., Deneux-Mustin, S., Villemain, G., Mustin, C., Barrés, O. Chamerois, M., Gerard, B. and Babut, M. (2001) Composition, Structure and Size Distribution of Suspended Particulates From the Rhine River. *Wat. Res.* 35 (3) 808-816.
- Latvala A (1990). Advanced Chemical Treatment with Flocculation in Pipes *Wat. Sci. Tech.* 22 (3-4) 195-202.
- Lawler W., G Williams, P Tarpey and NP Mallick (1980) IgM associated primary diffuse mesangial proliferative glomerulonephritis *Journal of Clinical Pathology* 1980;33:1029-1038
- Lawler, F. (1997) Particle Size Distribution in Treatment Processes: Theory and Practice, *Wat. Sci. Tech.* 36(4), 15-23.
- Lawler, F. and Willkes D.R. (1984). Flocculation Model Testing Particles Sizes in a Softening Plant. *Research & Technology J. AWWA.* 76 (7) 90-97
- Lawler, F., Chung Y., Hwang S. and Hull B. (1986) Anaerobic Digestion: Effects on Particle Size and Dewaterability, *Journal WPCF*, 418-421.
- Lawler, F., Izurieta E., and Kao C. (1983) Changes in Particle Size Distributions in Batch Flocculation, *J. AWWA.* Pp 1.-3.
- Lazarova V., Savoye P., Janex M. L., Blatchley III E. R. and Pommepay M. (1998). Advanced wastewater Disinfection Technologies: State of the Art and Perspectives. Recycling and Reuse. 2°. International Conference. Resources and Environmental: Priorities and Challenge. 14-16 September. Milan Italy, 354-362.
- Lee D. (2000) Modeling Coagulation Kinetics Incorporating Fractal Theories: A Fractal Rectilinear Approach. *Wat. Res.* 34 (7), 987-1000.
- Lee, D. (1991) Treatment, Reuse and Disposal of Drainage Waters. *Wat. Sci. Tech.* 24 (5), 183-188.
- Lee, S. Y.; Gregory J. (1990) The Effect of Charge Density and Molecula Mass of Cationic Polymers on Floculation Kinetics in Aqueous Solutions" en *Water Supply*, Vol 8. Jönköping, p. 11-17.
- Leigh, K. and Hyne, R. (1999) Inhibition of Particle Aggregation in Fluvial Suspended Sediment by Formaldehyde, *Wat. Res.* 33 (4) 1101-1107.
- Letterman, R and Pero R. (1988) Polyelectrolyte Coagulants in Water Treatment: An Assesment of Research Needs. AWWW Research Foundation, Denver.
- Levine A., Tchobanoglous G. and Asano T. (1991) Particle Contaminants in Wastewater: A Comparison of Measurement Techniques and Reported Particle Size Distributions, *American Filtration Society* 4 (2) 89-105.
- Levine, A., Tchobanoglous, G. and Asano, T. (1991a) Size Distribution of Particulate Contaminants in Wastewater and their Impact on Treatability, *Water Res.* 25 (8) 911-922.
- Levine, A., Tchobanoglous, G. and Asano, T. (1985) Characterization of the size distribution of Contaminants in Wastewater: Treatment and Reuse Implications. *Journal WPCF.* 57 (7) 805-815.
- Licskó I. (1997) Realistic Coagulation Mechanisms in the Use of Aluminum and Iron (III) Salts, *Wat. Sci. Tech.* 36 (4) 103-110.
- Lloyd P. (1974). Particle Characterization. *Chemical Engineering. Solid-Liquid Separation.* pp 120-123.

- Lorenz W. T., Liquid/Solid Separation: The Chemicals Used to Make it Better. *Wat. Eng. & Manag.*, 30-32, April, (1995).
- Lue-Hing C., Zenz D and Kuchenrither R (1992) *Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal*", Tech Publishing Company, USA.
- Lund, Herbert F., (1971). "Industrial Pollution Control Handbook"Mc Graw-hill book Company., México pp. 5.109-5.115.
- Mackie R. (1999) A Framework for Modelling Removal in the Filtration of Polydisperse Suspensions. *Wat. Res.* 33 (3) 794-806.
- Marquet, R. (1999) Characterization of Trickling Filter Effluent by Particle Size Distribution and High Performance Size Exclusion Chromatography. *Wat. Res.* 33 (6), 1415-1424.
- Matsui S, Yamamoto R, & Yamada H (1989) The *Bacillus subtilis*/ microsome rec-assay for the detection of DNA damaging substances which may occur in chlorinated and ozonated waters. *Brighton. Water Sci Technol*, 21: 875-887.
- Medena, G, Schets, F, Teunis, P. and Havelaard, H. (1998) Sedimentation of Free and Attached *Cryptosporidium* Oocysts and *Giardia* Cysts in Water. *Environ. microbiol.* 64 (11) 4460-4466.
- Melcher S. and Mota C. (2000) Contador de Partículas Como Instrumento de Avaliação da Densidade de Microorganismos Platonicos Presentes na Água. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental , REVISTA TOMADA DE INTERNET.
- Mels A. R.; Nieuwenhuijzen A. F.; Graag J. H. J. M.; Koning J.; Klapwijk A. And Rulkens W. H. (1999) Sustainability criteria as a tool in the development of new sewage treatment methods *Wat. Sci. Tech.* 123-128.
- Menezes F.M., Amal R. and Luketina D. (1996). Removal of particles using coagulation and flocculation in a dynamic separator. *Powder Technology.*, 88(1), 27-31.
- Metcalf & Eddy Inc. (1989). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*". Third Edition McGraw-Hill Book Company, USA. 1333 p.
- Metcalf & Eddy Inc. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*". McGraw-Hill Book Company, USA. 472-485.
- Metcalf & Eddy Inc. (1996) *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*". Fifth Edition McGraw-Hill Book Company, ISB 970-10-1005-1.
- Mhaisalkar, V. A.; Paramasivam, R.; Bhole, A. G. (1991) Optimizing Physical Parameters of Rapid Mix Desing for Coagulation- Flocculation of Turbid Waters. *Wat. Res.* 25, No. 1, p. 43-52.
- Milligan T. and Loring D. (1997) The Effect of Flocculation on the Size Distributions of Bottom Sediment in Coastal Inlets: Implications for Contaminant Transport, Water, Air and Soil Pollution, 99 (4), 33-42.
- Minton R. And Carlson D. (1976). Effects of lime addition on treatment plant operation. *Jour. Water Pollut. Control Fed.*, Vol 48, pp 1697.
- Montgomery D. (1991). Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial iberoamérica, U.S.A. PP 589.
- Mooyoung Han and Desmond F. Lawler (1992) *The (relative) insignificance of G in Flocculation*. *Journal American Water Works Association*; October; pp. 79-91.
- Moreno B., Goñi F., Fernández O and Martínez J. (1997) The Disinfection of Wastewater by Ultraviolet Light. *Wat. Sci. Tech.* 35. (11-12) pp 233-235.
- Morrissey S., Altshul J. and Harleman D. (1992) "Preparatory Bench Scale Testing for Chemically Enhanced Primary Treatment"- Final MIT/AUB Report.

- Morrow, J.J.; Rausch, E. G. (1974). Colloid Destabilization with Cationic Polyelectrolytes as affected by Velocity Gradients. *Journal of American Water Works Association* Vol. 66, p. 646-653.
- Mortmer D., (1991). Synthetic Polyelectrolytes-A Review. *Polymer International* Vol. 25, pp 29-41.
- Mühle, K., and Domasch, K. (1990) Floc Strength in Bridging Flocculation" In *Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 4th Gothenburg Symposium*. Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag, 105-115.
- Mujeriego M. (1990). Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. Primera edició, 1990. 481 p. Traducción autorizada del texto original *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater - A Guidance Manual*, editado por G Stuart Pettygrove y Takashi Asano.
- Mujeriego R. (1997) Técnicas de Recuperación, Distribución y Reutilización de las Aguas Depuradas. Artículo tomado de internet, <http://www.ictnet.es/conferencias/mujer.htm>.
- Mujeriego R., Sala L., Carbó M. And Turet J. (1996) Agronomic And Public Health Assessment Of Reclaimed Water Quality For Landscape Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 33 (10-11) 335-344.
- Munch, R., Hwang. C. and Lackie, T. (1980) Wastewater Fractions Add to Total Treatment Picture. *Water & Sewage Works*, 57 (7), 805-816.
- Murcott S, Dunn A. and Harleman D., (1996). Chemically Enhanced Wastewater Treatment for Agricultural Irrigation in Mexico. IAWQ 18th Biennial International Conference, Singapore, 23-28 June 1996. Publication of Posters.
- Myers, Drew., (1991). "Surfaces, Interface and Colloids, principles and applications " VCH, Argentina. pp. 156-168.
- N. Narkis; B. Ghattas; M. Rebhun and A.J. Rubin (1990) *The mechanism of flocculation with aluminium salts in combination with polymeric flocculants aids*. *Water Supply*; Vol.8; pp. 37-44.
- Narkis B., Katz A., Orshansky F., Kott Y. And Friedland Y. (1995). Disinfection of effluents by combinations of chlorine dioxide and chlorine. *Wat. Sci. Tech.* 31, (5-6) pp105-114.
- Narkis, N. and Rebhun, M. (1997) Flocculation in Presence of Organic Macromolecules of Natural Water and Secondary Effluents. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4) 85-91.
- National Research Council (1996) *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production* (ed.) National Academic Press. Washington, D. C., 178 pp.
- National Research Council (1998). *Issues in Potable Reuse. The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies With Reclaimed Water*. National Academy Press. Washington D.C. 263 pp.
- Neis, U. and Tiehm, A. (1997) Particle Size Analysis in Primary and Secondary Wastewater Effluents. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4), 151-158.
- Nieuwenhuijzen Van A. F. and Mels A. R. (2002). Characterization of particle Matter in Municipal Wastewater, *Chemical Water and Wastewater Treatment VII*; pp. 203 - 213.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL/1996. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación de Enero 6 de 1997. Official Mexican Standard. NOM-001-ECOL/1996. (Establishes the maximum permitted limits of pollutants in the wastewater discharges into water and onto national property) *The Official Federal Gazette*. January 6, 1997, 67-81.

- O'Melia, R., Hahn, M. and Cheng-Tyng, C. (1997) Some Effects of Particles Size in Separation Processes Involving Colloids. *Wat. Sci. Tech.* 36 (4) 119-127.
- O'Shaughnessy P., Barsotti M., Fay J. and Tighe S. (1989). Evaluating Particles Counters *J. AWWA.* 89 (12), 60-70.
- Odegaard, H. (1979) Chemical Floc Formation in Wastewater Treatment - An Introduction. *Prog. Wat. Tech.* 103-110.
- Odegaard, H. (1988) Coagulation as the First Step en Wastewater Treatment. Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 3rd Gothenburg Symposium. Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag, p. 249-261.
- Odegaard, H. (1992) Norwegian Experiences With Chemical Treatment of Raw Wastewater. *Wat. Sci. Tech.* 12, 255-264.
- Odegaard, H. (1998) Optimized Particle Separation in the Primary Step of Wastewater Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 37(10), 43-53.
- Odegaard, H. and Rusten B. (1990) Upgrading of Small Municipal Wastewater Treatment Plants with Heavy Dairy Loading by Introduction of Aerated Submerged Biological Filters, *Wat. Sci. Tech.* 3 (4) 81-87.
- Ongley E.D., Krishnappan B.G., Droppo I.G., Rao S.S. and Maguire R.J. (1992) Cohesive Sediment Transport: Emerging Issues for Toxic Chemical Management, *Hydrobiologia* **235-236**, 177-187.
- Organizatiien for Economic Cooperation and Development (1998) Analisis of Environmental Performance, Mexico. OECD Perspectives, France. 230 p.
- Oron O., De Malach Y., Hoffman Z. (1991). Wastewater Disposal by Sub-surface Trickle Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 23, Kyoto. Pp 2149-2158.
- Ouano, E. (1986) Domestic Wastewater Treatment and Disposal in the Philippines, *Wat. Sci. Tech.* 18, 23-32.
- Park S. H.; Kruis F. E.; Lee K. W. and Fissan H. (2000) *Session 6D. Particle formation and coagulation (Evolution of particle size distribution due to turbulent coagulation)* Journal Aerosol Science; Vol. 31; pp. S572-S573.
- Park, S., Joe, S., Eom, T. and Kim, H. (1999) Characteristics and Distribution of Metallic Elements in Landfill Leachates. *Environ. Tech.* 20, 443-448.
- Parker D (1975) Lime in Wastewater Treatment: Design and Cost Data. US. Environmental Protection Agency. EPA- 600/2-75-038.
- Parker D. S. and others (2001): Water21 Casebook: "Opinion: The CEPT Debate"
- Poder Ejecutivo Federal, Estados Unidos de México (1996) Programa Hidráulico 1995-200. SEMARNAP. ISBN 968-817-3517, Impreso y hecho en México. 53 p.
- R.J. Scriven; SK. Ouki; A.S. Daggart and M.J. Bauer (1999) *The impact of physico-Chemical water treatment on a novel flotation/filtration process.* Water Science and Technology; Vol. 39; No.10-11; pp. 211-215.
- Ran, Y., Fu, J., Sheng, G., Beckett, R. and Hart, B. (2000) Fractionation and composition of colloidal and suspended particulate materials in rivers. *Chemosphere* 41 (1-2), 33-44.
- Rebhun M., Galil N. (1990) Primary Chemical Treatment Minimizing Dependence On Bioprocess In Small Treatment Plants. *Wat. Sci. Tech.* 22 No. 3/4 pp 203-210
- Rebhun M., Narkis N. And Sheindorf Ch. (1977). Combination of physico-chemical and biological processes for wastewater treatment and reuse; biological treatment with nitrification of raw wastewater, *Prog. Water Technol.*, Vol, 10, pp 173.
- Rebhun N., Narkis N., and Offer R., (1975) Physico-chemical of raw wastewater distribution of organics treatment efficiency. *Progress in Water Technology*, Vol. 7 No. 4 / 3 . pp 401-408.

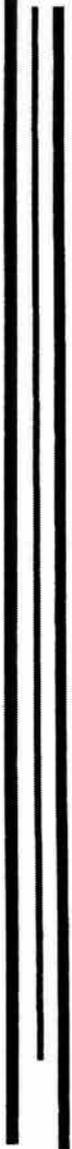
- Richert, D. and Hunter J. V. (1967). Rapid Fractionation and Materials Balance of Solids Fractions in Wastewater and Wastewater Effluent. *J. Wat. Pollut Control Fed.* 39, 1475-1486.
- Richert, D. and Hunter, J. (1971) General Nature of Soluble and Particulate Organic in Sewage and Secondary Effluent. *Wat. Res.* 5(7), 421-436.
- Romero J. A. (1999). Calidad del agua. Ed. Alfaomega. México.
- Rong-Jin Leu and Mriganka Ghosh, (1988) Polyelectrolyte Characteristics and Flocculation," *Journal of American Water Works Association*, 80:4: 159.
- Rossini M., Garcia J. and Galluzo M. (1999) Optimization of the coagulation-flocculation treatment: influent of rapid mix parameters. *Wat. Res.* 33(8), 1817-1826.
- Scarlett, B. (1980). The Measurements of Particle Size. European Symposium. Particle Technology. Comminution, Classification and Powder Mechanics. Amsterdam, NL. June 3-5, pp 1180-1199.
- Schwartzbrod, J., Stien, J., Bouhoum, K. and Baleux, B. (1989) Impact of Wastewater Treatment On Helminth Eggs. *Wat. Sci. Tech.* 21(3), 295-297.
- Shao, J., Liu, A., Wada, F., Crosse, J. and Jenkins, D. (1996) Advanced Primary Treatment: An Alternative to Biological Secondary Treatment. The City of Los Angeles Hyperion Treatment Plant Experience. *Wat. Sci. Tech.* 34(3-4), 223-233.
- Shao, Y., Jenkins, D., Wada, F. and Crosse, J (1993) Advanced Primary Treatment: An Alternative to Biological Secondary Treatment: The City of Los Angeles. Hyperion Treatment Plant Experience". 66th Annual Conference & Exposition, Anaheim, California" USA. October 3-7, Water Environment Federation, 181-191.
- Shao, Y., Liu, A., Wada, F., Crosse, J. and Jenkins, D. (1993) Advance Primary Treatment: An Alternative to Biological Secondary Treatment, The City of Los Angeles Hyperion Treatment plant experience" en Proceedings of the 66th Annual Conference and Exposition. Oct. 1993, Anaheim, California, USA, 181-191.
- Sheiks B., Cooper R., and Israel K. (1998). Hygienic Evaluation of Reclaimed Water Used to Irrigated Food Crops –A Case Study. AWT98-Advanced Wastewater, Recycling and Reuse, 675-681, Milano 14-16 September 1998.
- Shelef, G. (1991) Wastewater reclamation and water resources management. *Wastewater Reclamation and Reuse.* 24 (9), 251-265. (AIWPRC).
- Sholji I. (1998) Comment on "Kinetics of Pneumatic Flocculation. *Wat. Res.* 32 (9) 2870-2872.
- Shuval, H. (1989) Water Renovation and Reuse. Academic Press, Inc. New York, USA. 33-91.
- Shuval, H. (1991) Health Guidelines and Standards for Wastewater Reuse in Agriculture: Historical Perspectives. *Wat. Sci. Tech.* 23 (10-12), 2037-2080.
- Shuval, H. (1991a) The Development of Health Guidelines for Wastewater Reclamation, *Wat. Sci. Tech.* 24 (7), 149-155.
- Shuval, H. and Bartolone, C. (1986) Water Renovation and Reuse. Academic Press, Inc. New York, USA. 33-91.
- Shuval, H., Fattal, B. and Yekutieli, P. (1986) State of The Art Review: An Epidemiological Approach to the Health Effects of Wastewater Reuse. *Wat. Sci. Tech.* 18, 147-162.
- Shuval, H., Lampert, Y. and Fattal, B. (1997) Development of a Risk Assessment Approach for Evaluating Wastewater Reuse Standards for Agriculture. *Wat. Sci. Tech.* 35 (11-12), 15-20.

- Siebe C. and Cifuentes E. (1993) "Environmental Impact of Wastewater Irrigation in Central Mexico: an overview" en *International Journal of Environmental Health Research*, 5, 161-173.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1995). 19th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington D.C. USA, pp 2-60-2-67.
- Storhaug, R.; Rusten B. (1990) "Upgrading a Primary Treatment Plant for Nutrient Removal" en *Chemical Water and Wastewater Treatment Proceedings of the 4th Gothenburg Symposium*. Edición a cargo de H.H. Hahn y R. Klute. Berlin, Springer Verlag., 461-470.
- Stott, R., Jenkins, T., Shabana, M. and May, E. (1997) A Survey Of The Microbial Quality Of Wastewater In Ismailia, Egypt And The Implications For Wastewater Reuse. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 35 No. 11-12 pp 211-217.
- Stott, R., Jenkins, T., Williams, J., Bahgat, M., May, E., Ford, M. and Butler, J. (1996) *Research Monographs in Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries*. Overseas Development Administration (ODA). ISSN 1358-796X, ISBN 861370342, 66 p.
- Stover E., Haas Ch., Rakness K., Scheible O. (1995) *Design Manual. Municipal Wastewater Disinfection*. EPA/625/1-86/021. Cincinnati, OH 45268; 1986.
- Stran, B. Conrad p., (1989). "Practical Handbook of Environmental Control" C.R.S., Press Inc. Boca Raton. Florida, E.U.A. pp 192-194.
- Strauss, M. (1991) Human Waste Waste Use: Health Protection Practices and Scheme Monitoring. *Wat. Sci. Tech.* 24 (9), 67-79.
- Stumm W and O'Melia (1968) Stoichiometry of Coagulation. Suspended Particulate and Colloidal Matter in Natural Waters, *J. AWWA*. 12 (2) 130-139.
- Szal G. M., Nola P.M., Kennedy L.E., Barr C.P. and Bilger M.D (1991). The Toxicity of Chlorinated Wastewater; Instream and Laboratory Case Studies. *Res. J. WPCF*, 63, 6, 910-920.
- Tambo N. (1990) "Basic Concepts and innovative turn of coagulation/flocculation". *Water Supply*, 8., Jonkoping , pp 1-10.
- Tang, X., Hossain, F., Wongchotigul, K., and Spencer, M. G. (1998). Near band-edge transition in aluminium nitride thin films grown by metal organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 72(12):1501-1503.
- Tay, Z, Aguilera L. Quiróz G y Castrejón V (1991) *Parasitología Médica de Francisco Méndez Cervantes*. Pp 6-327. Editorial De la Prensa Mexicana, México, 99 6-327.
- Tchobanoglous, G. (1995) Particle-Size Characterization: The Next Frontier. *J. Environ. Eng.* 121 (10-12), 844-845.
- Thomas, D., Judd, S. and Fawcett, N. (1999) Flocculation Modeling: A Review. *Wat. Res.* 33 (7), 1579-1592.
- Tiehm, A., Herwing, V. and Neis, U. (1999) Particle Size Analysis for Improved Sedimentation and Filtration in Wastewater Treatment. *Wat. Sci. Tech.* 39 (8), 99-106.
- Tsukamoto, T.K., and G. Miller, undated. (2002) "Sustainable Bioreactors for Treatment of Acid Mine Drainage at the Leviathan Mine." Center for Environmental Sciences and Engineering, University of Nevada, Reno.
- Turner, S. and Lewis, G. (1995) Comparison of F-Specific Bacteriophage, enterococci and Faecal Coliform Densities Through a Wastewater Treatment Process employing Oxidation Ponds. *Wat. Sci. Tech.* 31 (5-6), 85-89.

- Ullmann's Encyclopaedic of Industrial Chemistry. (1999) Sixth Edition, Completely Revised Edition. Volume B2: Unit Operation I. Editor Wolfgang Gerhartz, pp 2-2 to 2-30.
- US Environmental Protection Agency (1986). Design Manual Municipal Wastewater Disinfection. EPA/651/1-86/021. Cincinnati OH 45268. October 1986.
- US Environmental Protection Agency (1992). Guidelines for water reuse. U.S. Agency for International Development. EPA/625/R-92/004. 248 pp.
- Valentin Nenov (1995) TSS/BOD removal efficiency and cost comparison of chemical and biological wastewater treatment; *Water Science and Technology* 32 No 7 pp 207-214.
- Vaz da Costa S, Mara D. And Vargas C. (1991). Residual Faecal Contamination on Effluent Irrigated Lettuces. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 24, No.9, pp 89-98.
- Vázquez O, Horan N. and Mara D. (1996) Management of Domestic Wastewater for Reuse in Irrigation. *Wat. Sci. Tech.* 10-11 pp 355-362.
- Von Sperling, M. (1998) Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 3(1), 111 - 132. (In Portuguese.).
- Wadell H. (1932). Volume, Shape and Roundness of Rock Particles, *J. Geol.* vol 40, pp 443-451.
- Wang, H (1984). Sewage Irrigation in China. *International Journal for Development Technology*, Vol. 2 No. 4, pp 291-301.
- Water Environmet Research Foundation (1993). Guidance Manual for Polymer Selection in Wastewater Treatment Plants. Projecto 91-ISP-5. United States of America.
- Water Pullution Contron Federation (1985) Clarifier Design. -Manual of Practice PD-8. Alexandria, Virginia.
- Weber W. (1972) Physicochemical System for Direct Wastewater Treatment, in *Application of New Concepts of Physical-Chemical Wastewater Treatment*, W.W. Eckenfelder and L.K. Cecil. Eds Pergamon Press, Inc.
- Weber W. J. Jr. (1979). *Control de la Calidad del Agua, Procesos Fisicoquímicos*. Editorial Reverté, S.A., 654 p. ISBN-84-291-7522-9. Edición en español, impreso en España.
- Weber, W. J. (1992) *Physicochemical System for Direct Wastewater Treatment in Application of New Concepts of Physical-Chemical Wastewater Treatment*, W.W. Eckenfelder and L.K. Cecil, eds, Pergamon Press, Inc.
- WEF (Water Environmental Federation) (1992) *Desing of Municipal Wastewater Treatment Plats*. WEF Manual of Practice No.8. ASCE Manual of Report on Engineering Practice No. 76. Volume I: Capters 1-12.
- WHO (2001) *Schistosomiasis and Soil-transmitted Helminth Infection*. Executive Board Resolution EB107/31. WHO, Geneva.
- WHO (World Health Organization) (1989) *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*. Technical Report Series No. 778. WHO, Geneva, 63 p.
- Wiedemann H. (1998) *Particle Accelerator Physics: nonlinear and higher order beam dynamics*; Springer Verlag, Berlin. ISBN 3540645047.
- Yates, R. (1998) *Disinfection By-Product Formation Resulting from Ozonation and Short-Term Chlorination of Biological Filter Effluent*. Metropolitan Water District of Southern California.

VIII. Referencias

- Yeoman, S., Sterritt, R. and Rudd, T. (1989) Particle Size Fractionation and Metal Distribution in Sewage Sludges, John Wiley & Sons, Water Air and Soil Pollution, 1-165.
- Yin Lee S. y Gregory J. (1990) "The effect of charge density and molecular mass of cationic polymers on flocculation kinetics in aqueous solution". Water Supply, Vol. 8, Jonkoping, pp 214-220.
- Zhongjie Z. (1986) Treatment and Reuse of Human Wastes, and the Present State of Water Resources, in China. *Wat. Sci. Tech.* 18 (9), 12-16



A
N
E
X
O
S

ANEXO A-1. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE COAGULANTES

Anexo 1A. Coagulante de basicidad baja (40%, Pax xl 60)

Remoción de partículas en volumen

La Figura A1-1 presenta la comparación del contenido de partículas del agua residual con las obtenidas al aplicar dosis de 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ del coagulante Pax xl 60 (basicidad baja). Con este coagulante se mejoró la remoción de partículas con respecto a la obtenida con el sulfato de aluminio.

Esto ocurrió únicamente cuando se utilizó la dosis de 100 $\mu\text{molAl/L}$ condición con la que se obtuvo un efluente de 168 mL/m^3 (79% de remoción); al aplicar 200 $\mu\text{molAl/L}$ se alcanzó 114 mL/m^3 (86%) y 88 mL/m^3 (89%) al utilizar 300 $\mu\text{molAl/L}$. Todos los efluentes presentan partículas con tamaños de 0.7 a 80 μm .

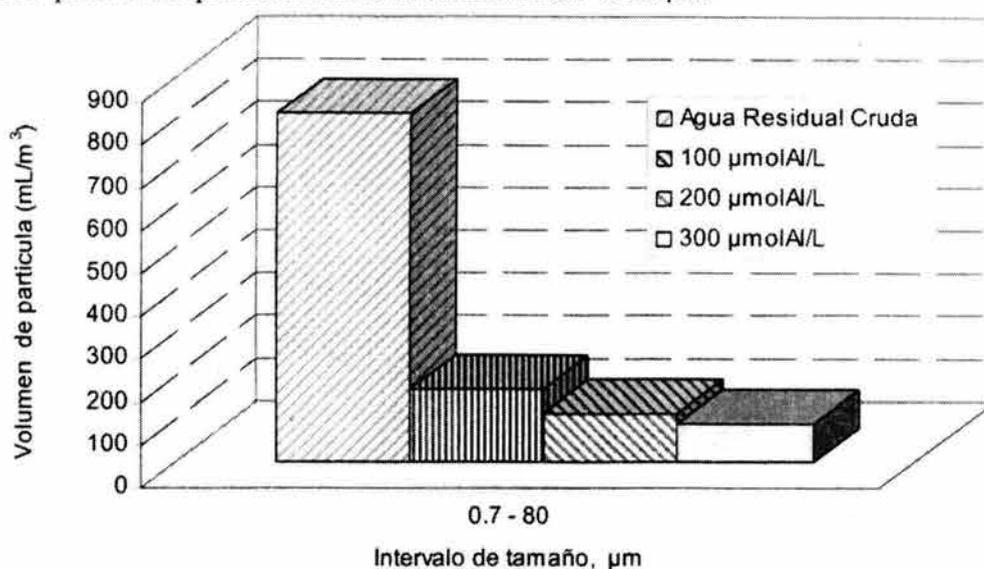


Figura A1-1. Volumen de partículas con base en la dosis de Pax xl 60 (basicidad baja)

Remoción de partículas en volumen por intervalo de tamaño

En la Figura A1-2 se presenta la remoción del volumen de partículas por tamaño al aplicar 100 $\mu\text{molAl/L}$ del coagulante de baja basicidad. Se observa una mejora en la remoción de partículas con respecto a la obtenida con el sulfato de aluminio pero sólo de aquellas con diámetros menores a 20 μm . En efecto, las partículas entre 0.7 y 1.5 μm (coliformes fecales) disminuyen de 11 mL/m^3 hasta 7 mL/m^3 (40%), las de 1.5 y 4 μm (*Salmonella spp*) se reducen de 117 mL/m^3 hasta 30 mL/m^3 (75%). Mientras que los tamaños de partículas entre 20 y 80 μm (huevos de helmintos), tuvieron una reducción de volumen de 123 mL/m^3 hasta 69 mL/m^3 (44%), valor que indica que este coagulante fue 11% menos eficiente para reducir las partículas más grandes y, por tanto, no fue tan eficiente para remover los huevos de helmintos.

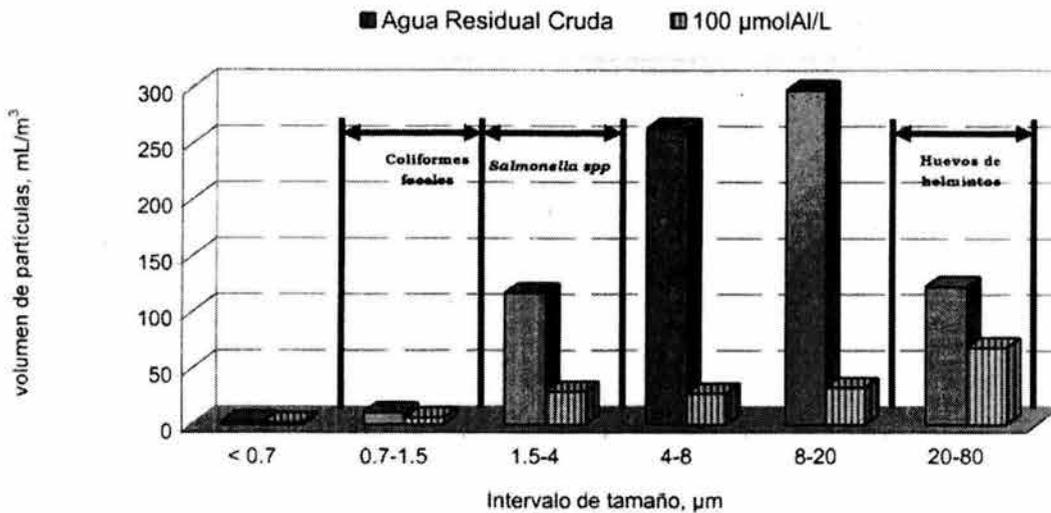


Figura A1-2 Contenido de partículas por intervalo de tamaño al aplicar 100 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 60 (basicidad baja).

Con un incremento en la dosis de este coagulante se redujo de manera importante el volumen de partículas, la reducción fue proporcional al incremento de la dosis. Los resultados para 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ se presentan en la Figura A1-3. En ella se observa que al aplicar 200 $\mu\text{molAl/L}$ las partículas entre 0.7 y 1.5 μm y entre 1.5 y 4 μm disminuyeron a 6 mL/m^3 (47%) y a 24 mL/m^3 (79%), respectivamente. Con una dosis de 300 $\mu\text{molAl/L}$ y para los mismos diámetros de partícula se obtuvo un efluente con 4 mL/m^3 (60%) y 15 mL/m^3 (87%). El volumen de partículas que permaneció en el sistema y aún con la aplicación de una dosis mayor de coagulante fue todavía muy alto, ya que autores como Gilberg (1990) establecen que para países europeos un efluente tratado con 450 $\mu\text{molAl/L}$ contiene en volumen de partículas 5, 13 y 27 mL/m^3 con tamaños entre 0.5 y 8 μm . Con base en estos resultados, estos efluentes fueron clasificados como de baja, mediana y alta concentración.

Finalmente, en agua tratada con 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ se obtuvo un contenido de partículas de 41 mL/m^3 (67%) y 39 mL/m^3 (68%) para los tamaños de partículas entre 20 y 80 μm . En este caso, el fenómeno de resuspensión no se observó, sin embargo, en ambos casos se aprecia una remoción similar para este último tamaño de partículas.

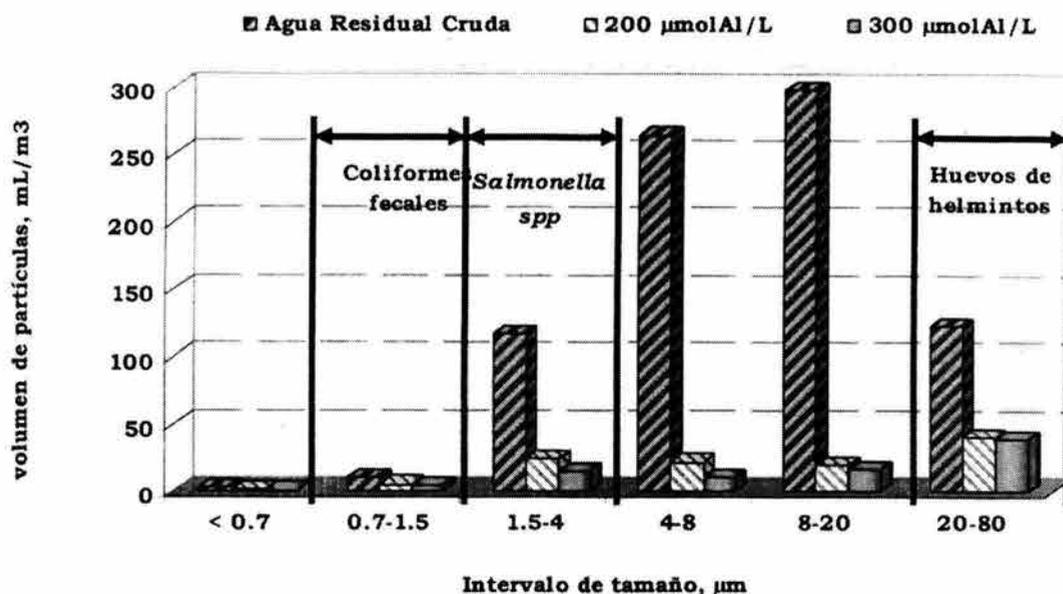


Figura A1-3 Contenido de partículas por intervalo de tamaño al aplicar 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 60 (basicidad baja).

La distribución de las partículas remanentes con las diversas dosis aplicadas de este coagulante queda representada en la Figura A1-4. Se observa un comportamiento similar en los 3 casos y se destaca que del volumen de partículas que aún permanecen en el sistema y, que varía entre 87 y 168 mL/m³, un 55% puede contener partículas < 20 μm , mientras que el resto son partículas mayores. Para el último intervalo de tamaño se observa que la menor cantidad de partículas se obtuvo con la dosis de 200 $\mu\text{molAl/L}$ mientras que con la de 300 $\mu\text{molAl/L}$ se cuantificó un mayor contenido debido a la resuspensión.

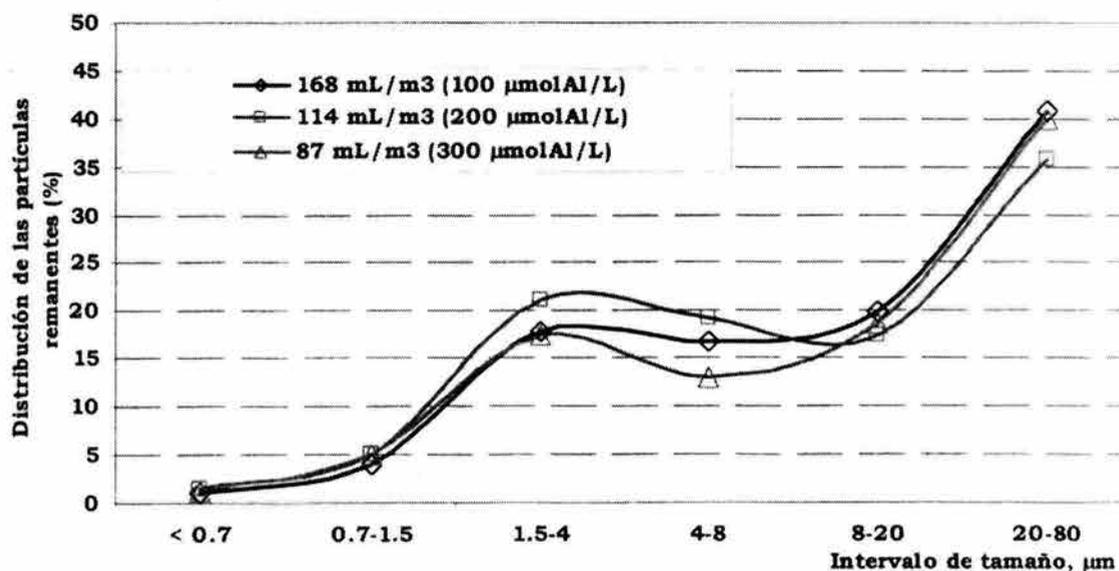


Figura A1.4. Distribución de las partículas remanentes con base en la dosis de Pax xl 60 (baja basicidad) aplicada

Comparación entre las dosis aplicadas

En la Figura A1-5 se presenta una comparación del volumen de partículas por intervalo de tamaño para las tres dosis de Pax xl 60 aplicadas. En ella se corrobora que aún cuando el incremento de la dosis de este coagulante promueve una disminución de las diversas clases de tamaño, no ocurre lo mismo con las partículas entre 20 y 80 μm cuando la dosis de coagulante se incrementa de 200 a 300 $\mu\text{molAl/L}$, por lo tanto, al igual que con el coagulante de sulfato de aluminio, se considera que la dosis de 200 $\mu\text{molAl/L}$ es suficiente para remover las partículas deseadas. Al comparar el contenido de partículas con tamaño entre 20 y 80 μm contenidas en el efluente tratado con sulfato de aluminio y con el Pax xl 60, se encontró que bajo estas condiciones el sulfato de aluminio fue más eficiente para remover estas partículas (82% vs 67%).

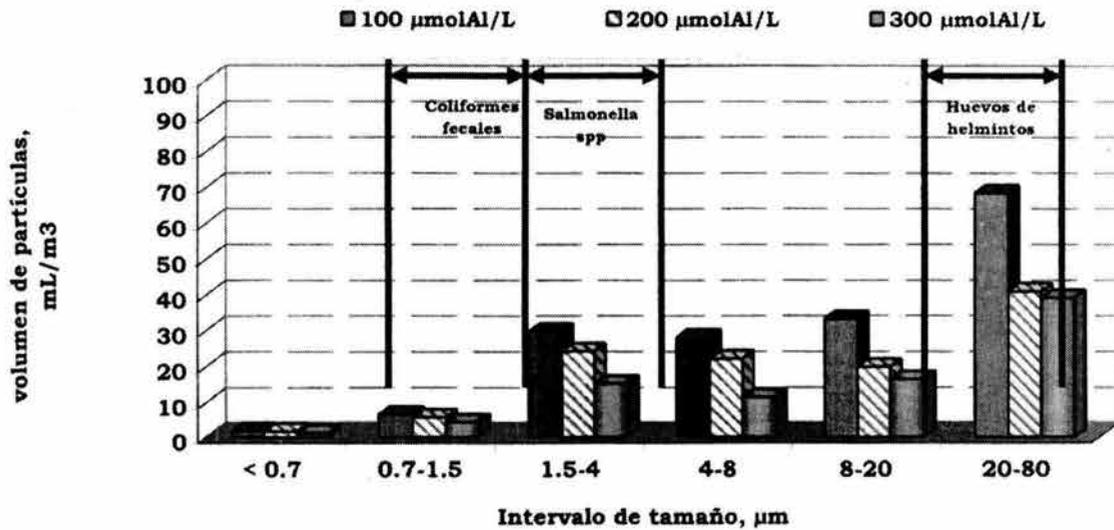


Figura A1-5. Comparación de la remoción de partículas con base en la dosis de coagulante Pax xl 60 aplicada

Remoción de partículas en número

En cuanto a la remoción de partículas en número, la Figura A1-6 presenta la reducción total de partículas de acuerdo a la dosis de Pax xl 60 usado. Con dosis de 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ hubo reducciones desde 13.2 hasta 12.7, 12.6 y 12.4 unidades logarítmicas/ m^3 , respectivamente, lo que significa que sólo con la dosis de 100 $\mu\text{molAl/L}$ se logró una remoción comparable con respecto a la presentada con el sulfato de aluminio (12.9). El incremento de la dosis de Pax xl 60 no mejoró de manera significativa la remoción. La remoción total alcanzada en este caso fue de 0.8 unidades logarítmicas.

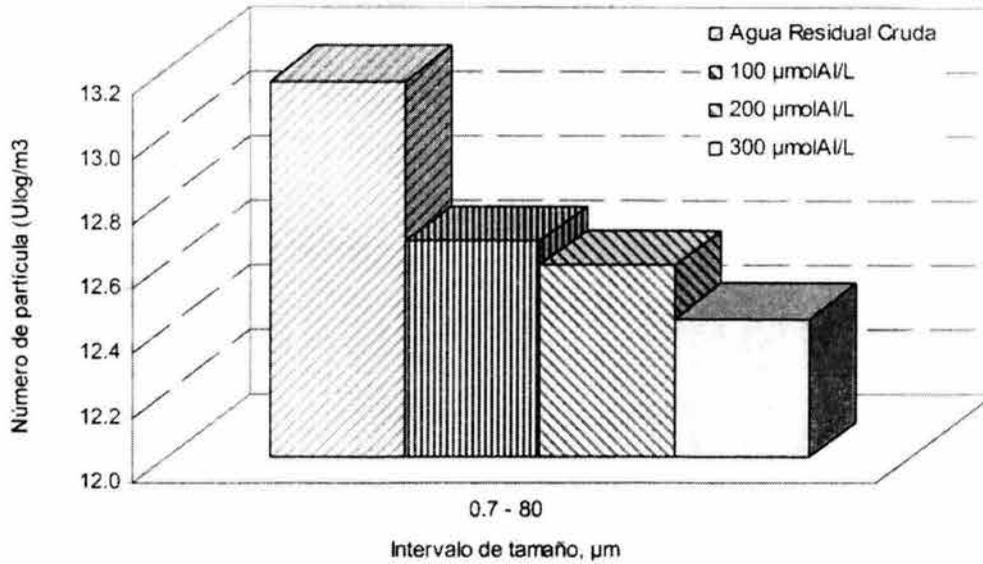


Figura A1-6 Contenido de partículas con base en la dosis de Pax xl 60 (baja basicidad)

Remoción del número de partículas por intervalo de tamaño

El contenido de partículas tanto del agua residual cruda como de la tratada con 100 μmolAl/L de Pax xl 60 para los diversos tamaños de partícula se muestran en la Figura A1-7. En ella se observa que las partículas más grandes se pudieron separar del sistema con mayor facilidad. En efecto, las partículas entre 0.7 y 1.5 μm se removieron en 0.2 unidades logarítmicas, las de 1.5 y 4 μm en 0.5 unidades logarítmicas y las partículas entre 20 y 80 μm en 0.6 unidades logarítmicas.

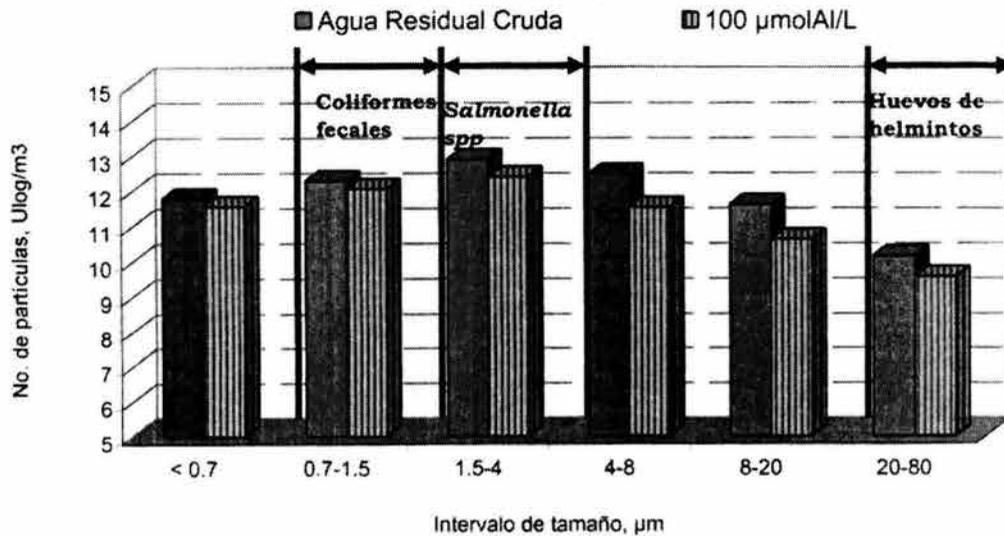


Figura A1-7. Distribución del número de partícula al aplicar 100 μmolAl/L de Pax xl 60 (basicidad baja).

Con el incremento de la dosis de 100 a 200 y 300 μmolAl/L, favoreció la remoción de partículas pequeñas, en especial, las de tamaño < 20 μm (Figura A1-8). De esta manera, las partículas comprendidas entre 0.7 y 1.5 μm se removieron en 0.3 y 0.4 unidades logarítmicas, las de 1.5 y 4 μm se removieron en 0.6 y 0.8 unidades

logarítmicas respectivamente, mientras que las de 20 y 80 μm se removi6 en 1 unidad logarítmica.

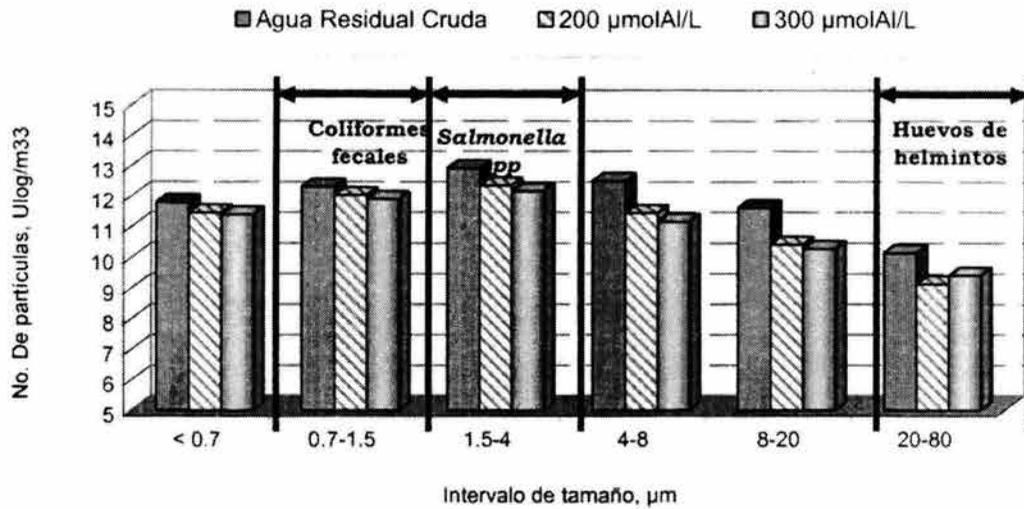


Figura A1-8. Distribución del número de partícula al aplicar 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$ de Pax xl 60 (basicidad baja).

Comparación de la remoción del número

En La Figura A1-9 se compara la calidad obtenida al aplicar 100, 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$. A pesar de que la dosis de coagulante se incrementó dos y tres veces más, no hay una disminución del número de partículas para cada intervalo de tamaño que se pueda considerar como significativo, de hecho, la remoción total fue menor a la unidad logarítmica.

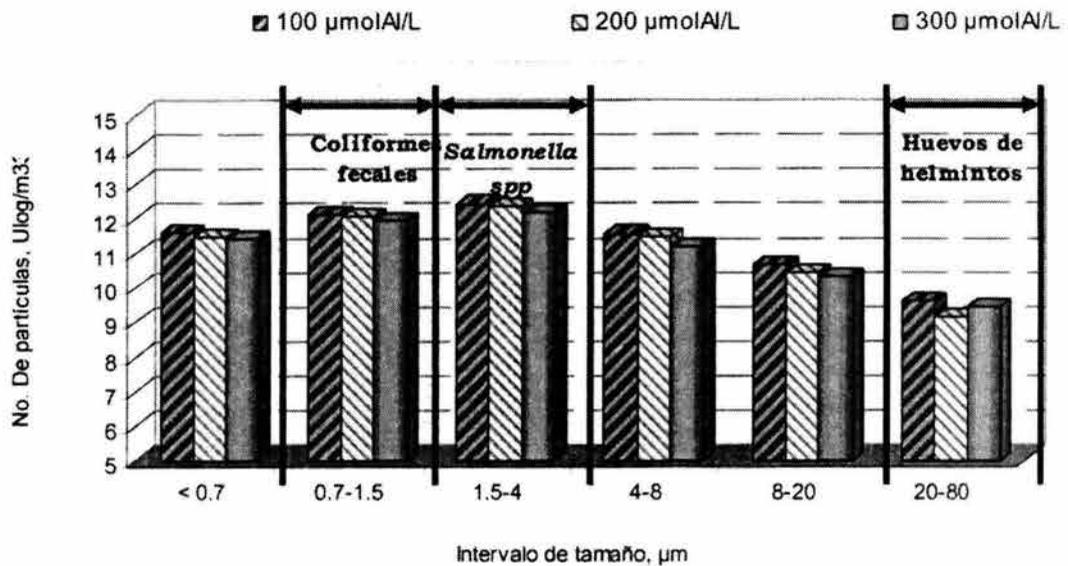


Figura A1-9. Contenido de partículas en intervalo de tamaño al aplicar diversas dosis de Pax xl 60 (baja basicidad)

La distribución de las partículas remanentes en porcentaje con base en la dosis de coagulante aplicada se presenta en la Figura A1-10. En este caso, los efluentes presentaron un número total de partículas entre 12.4 y 12.7 unidades

logarítmicas/m³, de estas y de forma acumulada, el 93% fue < 4 µm, 99% < 8 µm, el 99.9% es < 20 µm y sólo entre 0.04 y 0.1% fueron partículas entre 20 y 80 µm.

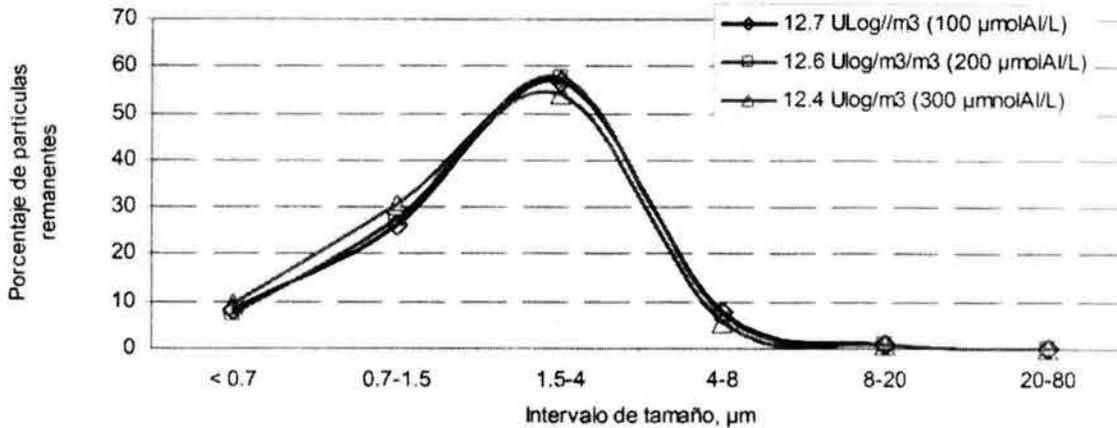


Figura A1-10. Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con Pax xl 60 (basicidad baja)

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se determina que con una dosis de 100 µmolAl/L del Pax xl 60 (basicidad baja) se obtiene una mejor remoción de partículas comparada con la presentada por el sulfato de aluminio con similar dosis. En efecto, con dicha dosis el volumen de partículas disminuyó de 816 mL/m³ a 168 mL/m³ (remoción del 79%) (Figura A1-11). En número, representa una reducción de 13.2 a 12.7 Unidades logarítmicas/m³. El incremento de la dosis con este coagulante impacta de manera importante la remoción de partículas, en especial, las de menor diámetro ya que con una dosis de 200 se obtuvo un efluente con 114 mL/m³ (remoción de 86%) y con 300 µmolAl/L uno de 88 mL/m³ (89%). Ante estos resultados, nuevamente se establece que con la dosis de 200 µmolAl/L hubo mejor remoción mejor y fue suficiente para obtener una considerable (67%) remoción de partículas entre 20 y 80 µm. Se confirma que en el sistema físico químico, el incremento de la dosis va a favorecer la remoción de partículas con tamaño < a 20 µm y por ende una reducción del contenido de microorganismos que se encuentren incluidos en estos tamaños (coliformes fecales y *Salmonella spp*).

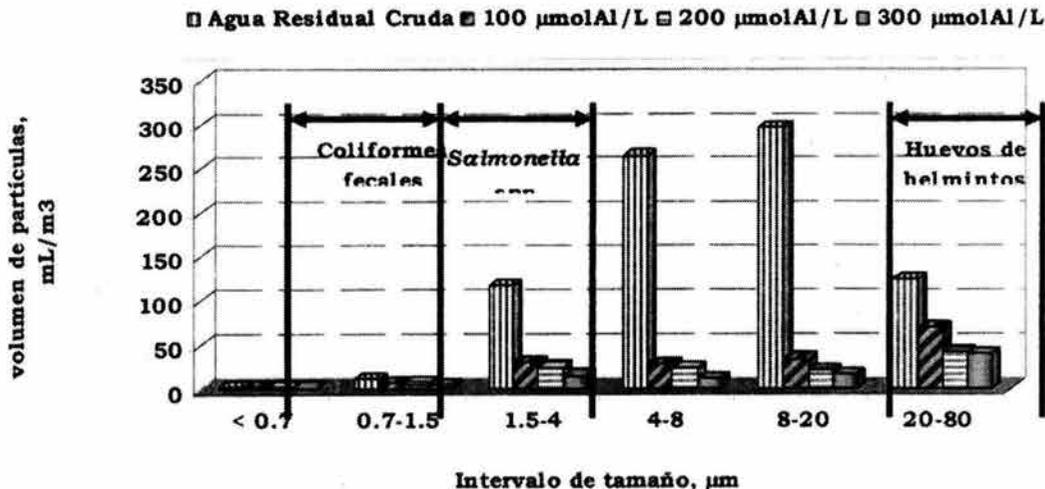


Figura A1-11. Contenido del volumen de partículas en el agua residual y tratada con diversas dosis de Pax xl 60 (basicidad baja)

Anexo 1B. Coagulante de basicidad alta (80%, Pax xl 19)

Distribución del tamaño de partículas en volumen

Finalmente, el último policloruro analizado se caracterizó por presentar una alta basicidad. La Figura A1-12 presenta la reducción del volumen de partículas de acuerdo con la dosis de Pax xl 19 (basicidad alta) aplicada. Con 100 $\mu\text{molAl/L}$ el coagulante produjo el menor volumen de partículas respecto al obtenido con los demás coagulantes, en efecto, el volumen disminuyó de 816 mL/m^3 a 128 mL/m^3 (84%); lo que representa un 12% más de remoción con respecto al logrado con el sulfato de aluminio en la misma dosis. Sin embargo, al incrementar la dosis hasta 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$, el volumen de partículas se redujo a 100 mL/m^3 (88%) y 65 mL/m^3 (95%) respectivamente, ante esto, este coagulante mostró ser menos eficiente para remover una mayor cantidad de partículas comparado con los coagulantes de nula, baja y mediana basicidad para las dosis de 200 y 300 $\mu\text{molAl/L}$.

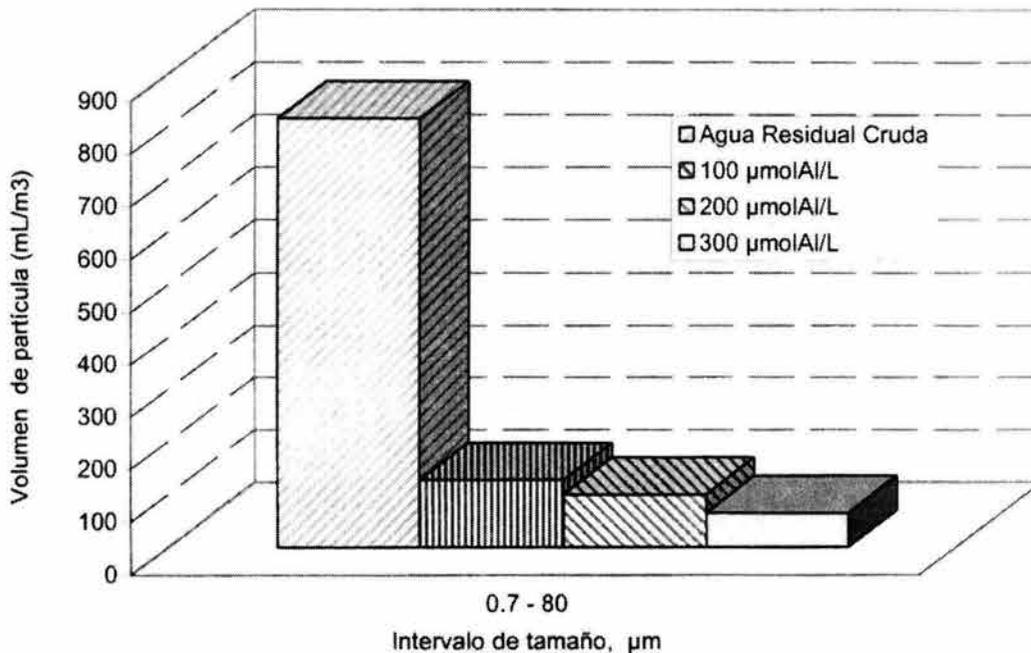


Figura A1-12. Distribución del volumen de partícula al aplicar diversas dosis del coagulante Pax xl 19 (basicidad alta).

Remoción del tamaño de partículas en volumen por intervalo de tamaño

La Figura A1-13 presenta la remoción de partículas alcanzada para los diversos tamaños al aplicar una dosis de 100 $\mu\text{molAl/L}$ del Pax xl 19. Las partículas más grandes se removieron mejor que las pequeñas. Las partículas con un diámetro de 0.7 a 1.5 μm disminuyeron de 11 mL/m^3 hasta 8 mL/m^3 (25%), las de 1.5 a 4 μm lo hicieron de 111 mL/m^3 hasta 40 mL/m^3 (66%), mientras que las de 20 y 80 μm se redujeron de 123 mL/m^3 hasta 22 mL/m^3 (82%).

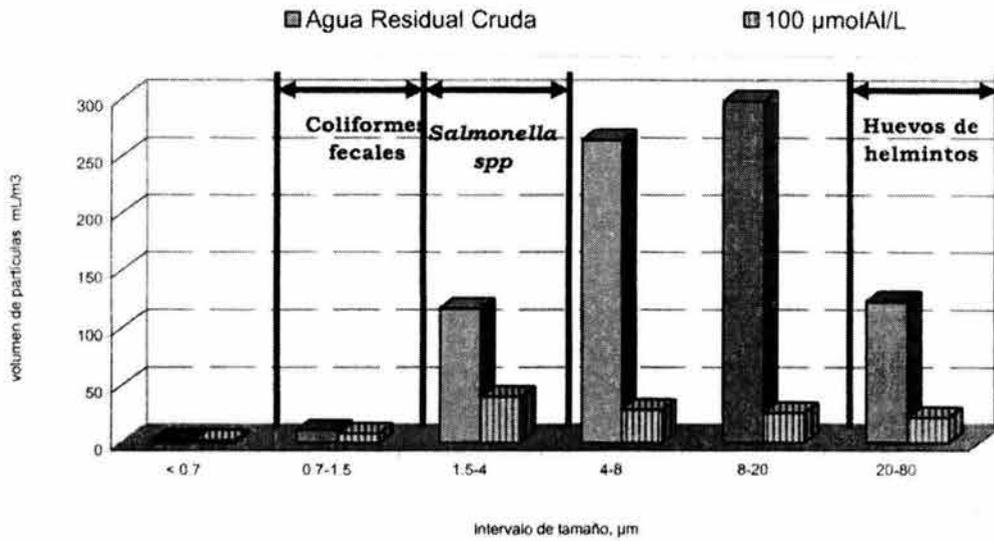


Figura A1-13. Contenido de partículas por intervalo de tamaño al aplicar 100 μmolAl/L de Pax xl 19(basicidad alta)

La remoción de partículas mejora gradualmente a medida que aumenta la dosis de coagulante, en especial, las incluidas en los tamaños < 4 μm. Esto es, con 200 y 300 μmolAl/L, las partículas entre 0.7 y 1.5 μm se removieron en un 41 y 61% mientras que las de 1.5 y 4 μm lo hicieron en 72% y 85%, respectivamente (Figura A1-14). En el caso de las partículas entre 20 y 80 μm, el incremento de la dosis dejó de tener importancia pues el porcentaje logrado fue de 90% (sólo el 8% mayor al determinado con la menor dosis) y se observa que la dosis de 300 μmolAl/L tendrá un efecto adverso en la remoción al resuspender las partículas.

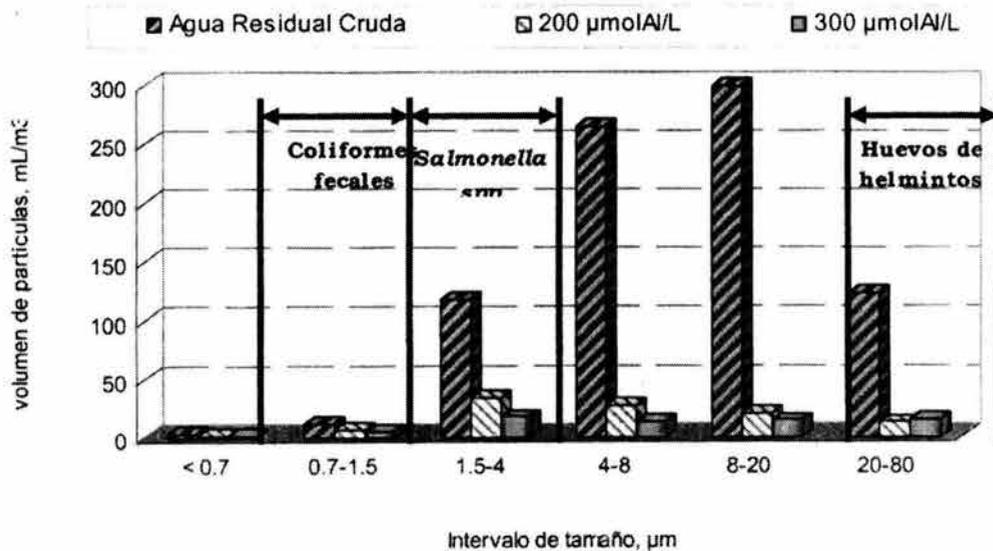


Figura A1-14. Contenido de partículas por intervalo de tamaño al aplicar 200 y 300 μmolAl/L de Pax xl 19(basicidad alta)

La concentración remanente de partículas por clase de tamaño para las tres dosis de Pax xl 19 se muestra en la Figura A1-15. La Figura corrobora lo descrito previamente, es decir, aunque altas dosis de coagulante producen un efluente con menor contenido

de partículas entre los tamaños de 0.7 a 20 μm , el volumen para los tamaños $>$ a 20 μm (tamaño de los huevos de helmintos) aumentar por una resuspensión situación que afecta de manera importante la remoción de los huevos de helmintos.

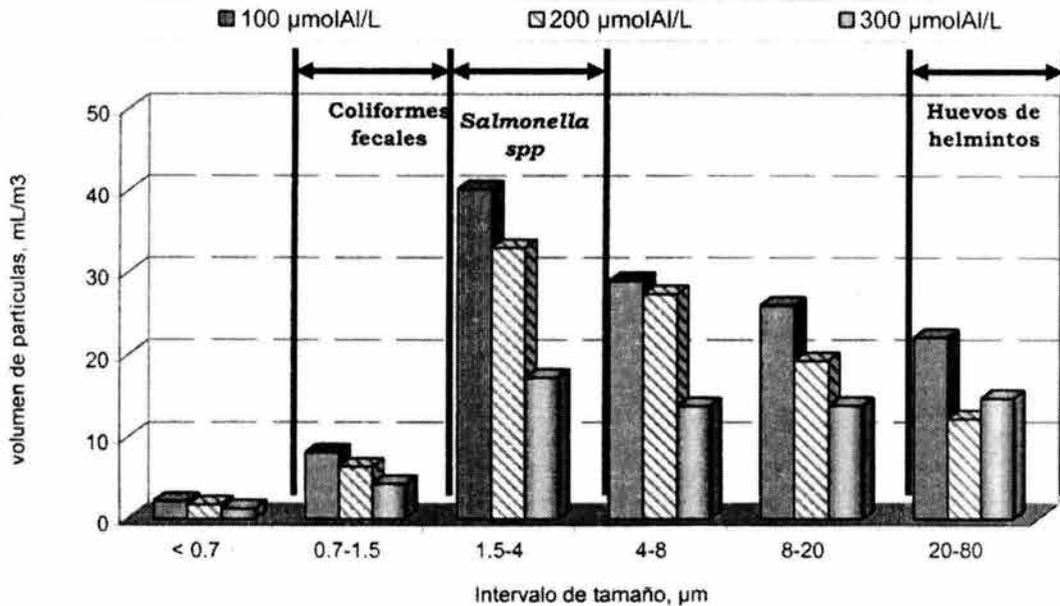


Figura A1-15. Distribución del volumen de partícula al aplicar diversas dosis del coagulante con basicidad alta

En la Figura A1-16 se presenta la distribución del volumen de partículas que permanecen en el sistema y que varió entre 65 y 127 mL/m^3 . La variabilidad en la distribución se presentó entre las partículas de 1.5 a 8 μm donde se observó una reducción del volumen de partículas como resultado del incremento gradual de la dosis de coagulante. Las partículas residuales entre 20 a 80 μm representaron entre 12 y 23% del volumen total y son función directa de la dosis aplicada. El porcentaje menor se presentó en el efluente donde se utilizaron 200 $\mu\text{molAl/L}$ y el porcentaje mayor en el efluente tratado con 300 $\mu\text{molAl/L}$, situación desfavorable al objetivo del estudio.

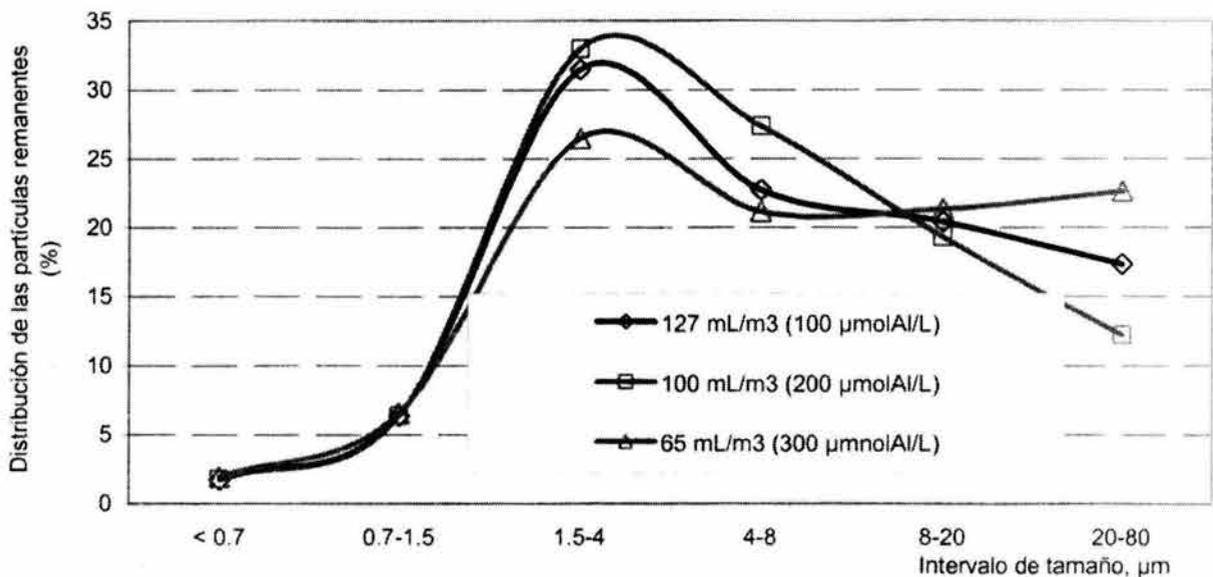


Figura A1-16. Distribución de partículas remanentes de los efluentes tratados con Pax xl 19 (basicidad alta)

Remoción de partículas en número

La Figura A1-17 muestra los cambios en la distribución del número de partícula con base en la dosis de Pax xl 19 aplicada. De manera general, el número de partículas se redujo de 13.2 unidades logarítmicas iniciales a 12.8, 12.7 y 12.5 partículas/m³ al aplicar dosis de 100, 200 y 300 µmolAl/L, respectivamente, por lo que la reducción total fue de 0.7 unidades logarítmicas, valor que representa la mínima reducción alcanzada durante todo el estudio. Como se mencionó previamente, el evaluar la eficiencia de los coagulantes con base en el número de partículas no necesariamente conlleva a la mejor decisión sobre la eficiencia de los coagulantes. En este caso, el resultado obtenido se debe a que el Pax xl 19 es más eficiente para remover las partículas > 8 µm (que por su diámetro son menos en número) y no a las partículas con menor diámetro (que representan un número mayor).

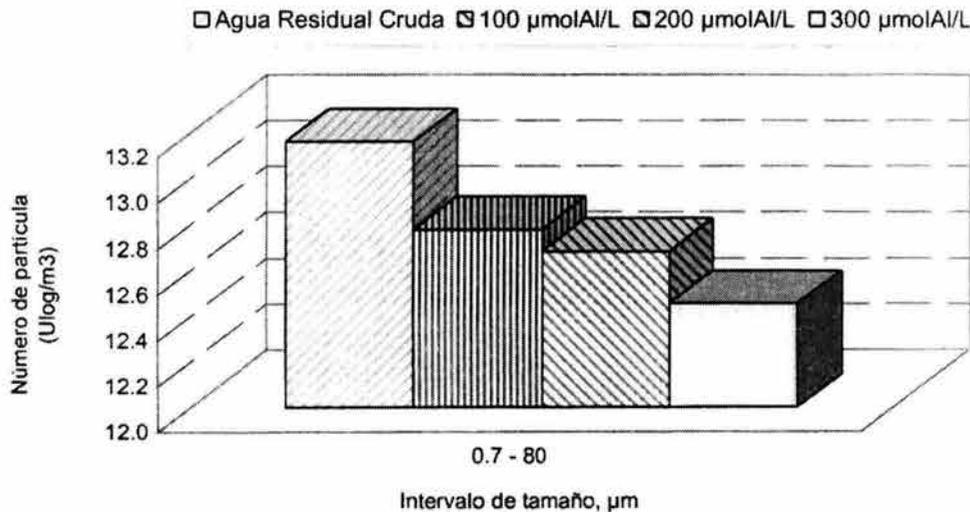


Figura A1-17 Contenido de partículas con base en la dosis de Pax xl 19 (basicidad alta)

Remoción de partículas por intervalo de tamaño

La Figura A1-18 presenta la remoción de partículas por intervalo de tamaño de interés de acuerdo a la dosis aplicada. El incremento de la dosis causó un aumento en la remoción de las partículas en todos los intervalos de tamaño, en especial, las de < 8 µm. Así, cuando se aplicó el Pax xl 13 en dosis de 100, 200 y 300 µmolAl/L, las partículas entre 0.7 y 1.5 µm se removieron en 0.1, 0.2 y 0.4 unidades logarítmicas y las partículas entre 1.5 y 4 µm lo hicieron en 0.4, 0.5 y 0.7 unidades logarítmicas, respectivamente. En el caso de las partículas entre 20 y 80 µm con la dosis menor se logró remover hasta 0.9 unidades logarítmicas mientras que al incrementar dos y tres veces la dosis la remoción fue de 1 unidad logarítmica en ambos casos.

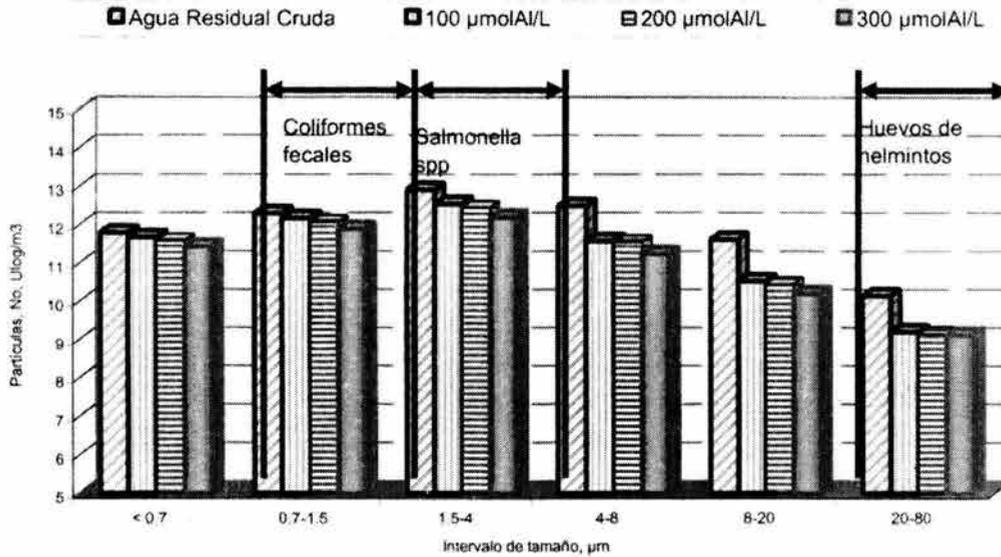


Figura A1-18. Distribución del número de partícula al aplicar diversas dosis del coagulante con basicidad alta.

Distribución del número de partículas

Prácticamente, las partículas remanentes de los tres efluentes se distribuyen en proporción similar (Figura A1-19). Así, los efluentes tratados con este coagulante se componen en 99.3% por partículas < a 8 μm ., 0.6% de partículas con diámetros de 8 a 20 μm y entre 0.03-0.05% por partículas entre 20 y 80 μm .

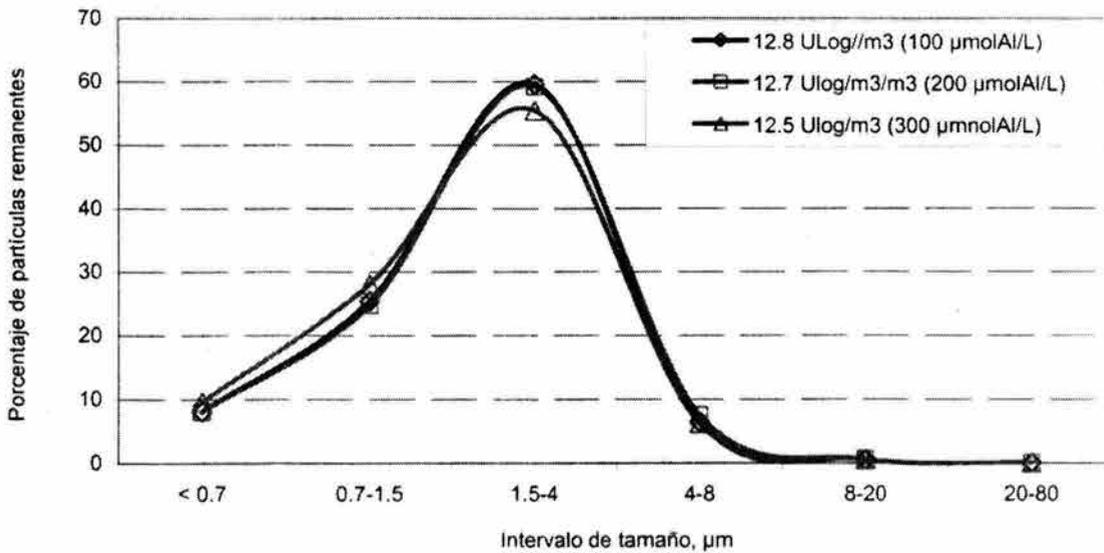


Figura A1-19 Distribución del número de partículas aplicando pax xl 19 (basicidad alta)

ANEXO A-2

ANEXO A-2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Anexo 2A. Estudio de evaluación de coagulantes

Tabla A2-1. Análisis de variancia para el número de partículas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F Calculada	F Tablas	Nivel de significancia
Basicidad	584	3	194	6.16	2.92	.0017
Dosis	1999	2	999	31.6	3.32	.0000
Interacción	517	6	83	2.73	2.42	.0273
Residual	1136	36	31			
Total	4236	47				

Tabla A2-2. Análisis de variancia para los SST

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F Calculada	F Tablas	Nivel de significancia
Basicidad	374	3	124	1.4	2.92	.2495
Dosis	1561	2	780	1.9	3.32	.0007
Interacción	188	6	31	362	2.42	.8983
Residual	3132	36	87			
Total	5256	47				

Tabla A2-3. Análisis de Variancia para la Turbiedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Basicidad	437	3	145	1.99	2.92	.1331
Dosis	2346	2	1173	16	3.32	.0000
Interacción	183	6	30	416	2.42	.8633
Residual	2639	36	73			
Total	5606	47				

Tabla A2-4. Análisis de intervalos múltiples para el tipo de coagulante - número de partículas con 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
Al2(SO4)3	12	71.9	X				
PAX XL 60	12	76.8		X			
PAX XL 19	12	80.1		X			
PAX XL 13	12	80.6		X			
Contraste							
Al2(SO4)3 - PAX XL 60						-4.89	4.65 *
Al2(SO4)3 - PAX XL 19						-8.71	4.65*
Al2(SO4)3 - PAX XL 13						-8.27	4.65*

ANEXO A-2

PAX XL 60 - PAX XL 19				-3.82	4.65
PAX XL 60 - PAX XL 13				-3.38	4.65
PAX XL 19 - PAX XL 13				0.44	4.65

* denotes a statistically significant difference.

Tabla A2-5. Análisis de intervalos múltiples del número, y respuesta dosis con 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
100	16	79	X				
200	16	78		X			
300	16	84			X		
Contraste							
100 - 200						-9.4	4.03*
100 - 300						-15.7	4.03*
200 - 300						-6.3	4.03*

* denotes a statistically significant difference.

Tabla A2-6. Análisis de intervalos múltiples de basicidad y respuesta, SST con 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
Al2(SO4)3	12	79.26		X			
PAX XL 60	12	83.12		XX			
PAX XL 19	12	83.14		XX			
PAX XL 13	12	87.16		X			
Contraste							
Al2(SO4)3-PAX XL 60						-3.85	7.72
Al2(SO4)3-PAX XL 19						-3.88	7.72
Al2(SO4)3-PAX XL 13						-7.89	7.72
PAX XL 60-PAX XL 19						-0.025	7.724
PAX XL 60-PAX XL 13						-4.037	7.724
PAX XL 19-PAX XL 13						-4.011	7.724

* denotes a statistically significant difference.

Tabla A2-7. Análisis de intervalos múltiples de número-SST con el 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
100	16	76	X				
200	16	83.7		X			
300	16	89.8		X			
Contraste							
100 - 200						-7.74	6.69*
100 - 300						-13.9	6.69*
200 - 300						-6.20	6.69

* denotes a statistically significant difference.

ANEXO A-2

Tabla A2-8. Análisis de intervalos múltiples de basicidad-turbiedad con el 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
Al2(SO4)3	12	77.19	X				
PAX XL 60	12	82.69	XX				
PAX XL 19	12	83.53	XX				
PAX XL 13	12	85.26	X				
Contraste							
Al2(SO4)3-PAX XL 60						-6.3	7.1
Al2(SO4)3-PAX XL 19						-5.5	7.1
Al2(SO4)3-PAX XL 13						-8.1	7.1*
PAX XL 60-PAX XL 19						0.8	7.1
PAX XL 60-PAX XL 13						-1.7	7.1
PAX XL 19-PAX XL 13						-2.5	7.1

* denotes a statistically significant difference.

Tabla A2-9. Análisis de intervalos múltiples de número-Turbiedad con el 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo			Diferencia +/-	Límites
100	16	72.88	X				
200	16	83.90	X				
300	16	89.73	X				
Contraste							
100 - 200						-11.04	6.14*
100 - 300						-16.86	6.14*
200 - 300						-5.82	6.14

* denotes a statistically significant difference.

ANEXO A-2

Figura Homocedasticidad, independencia y normalidad de los modelos presentes

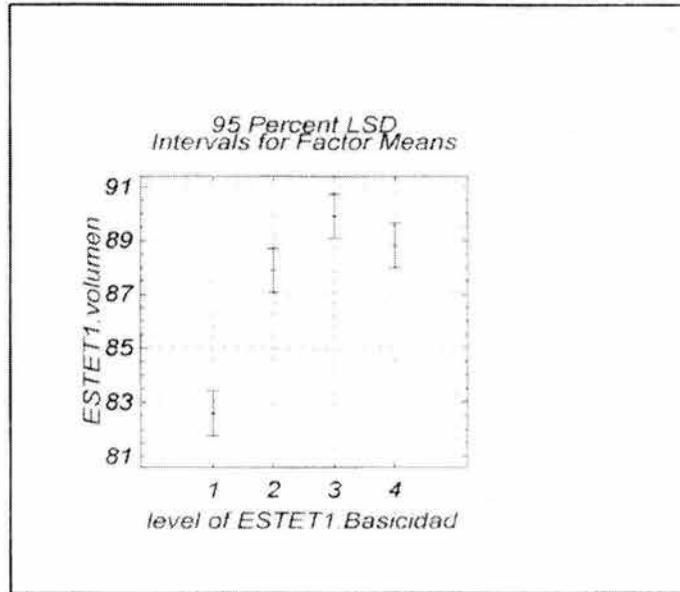
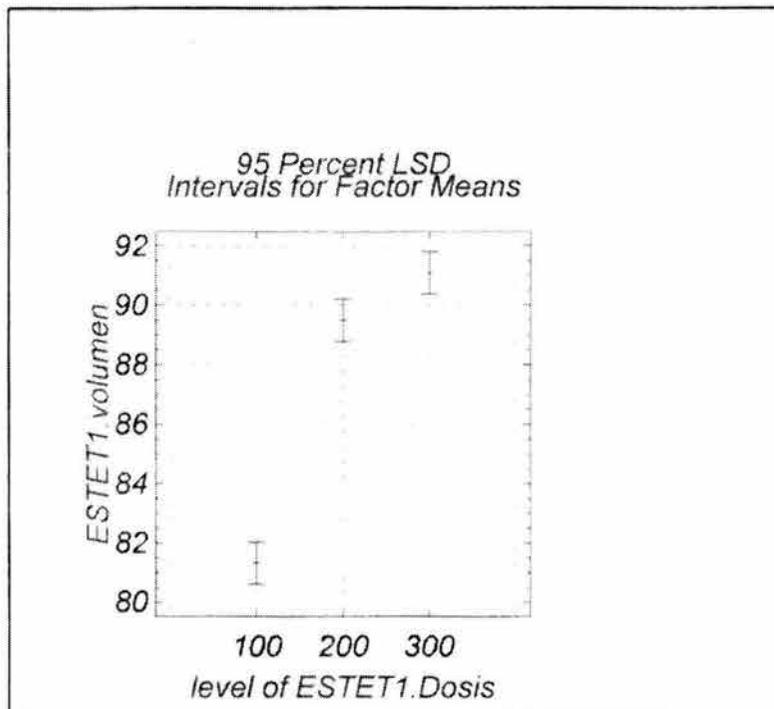
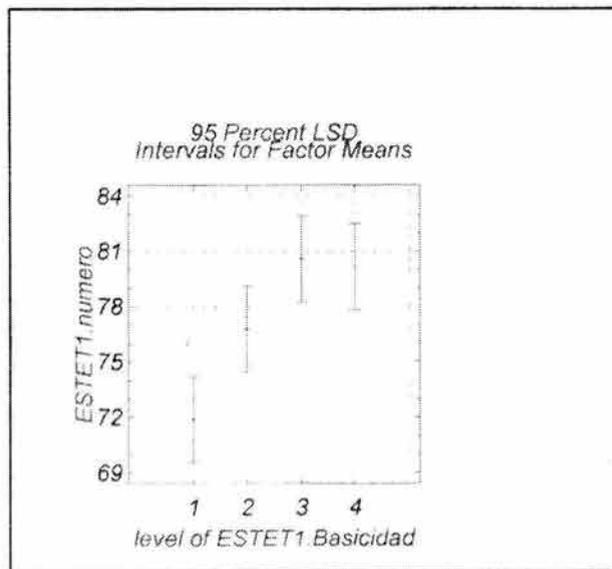
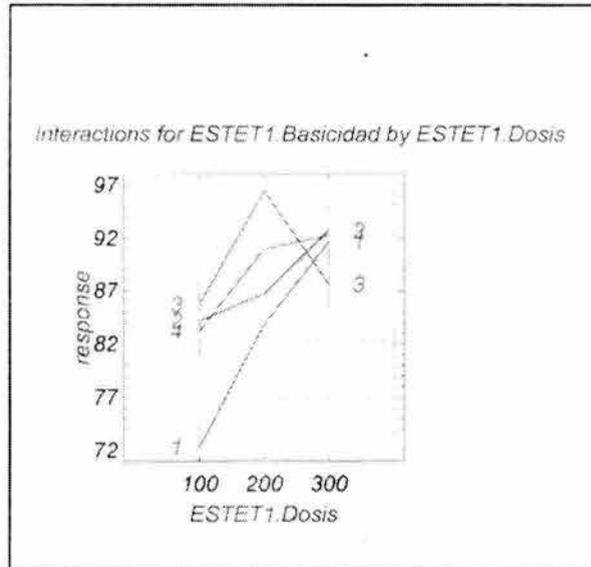


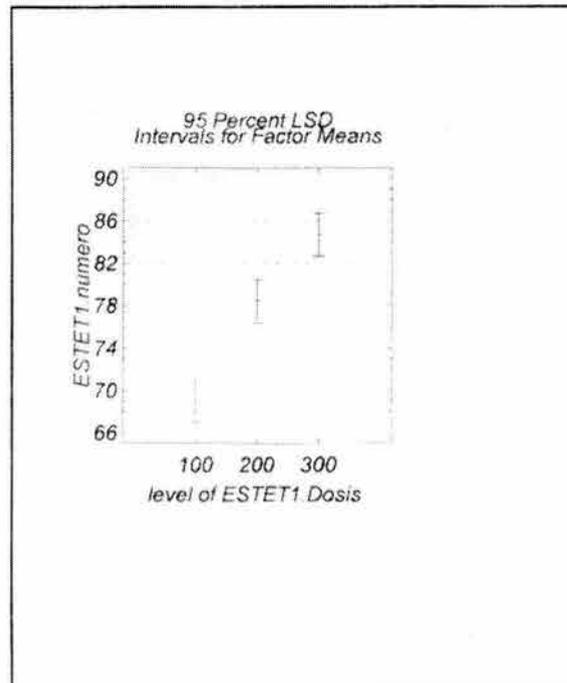
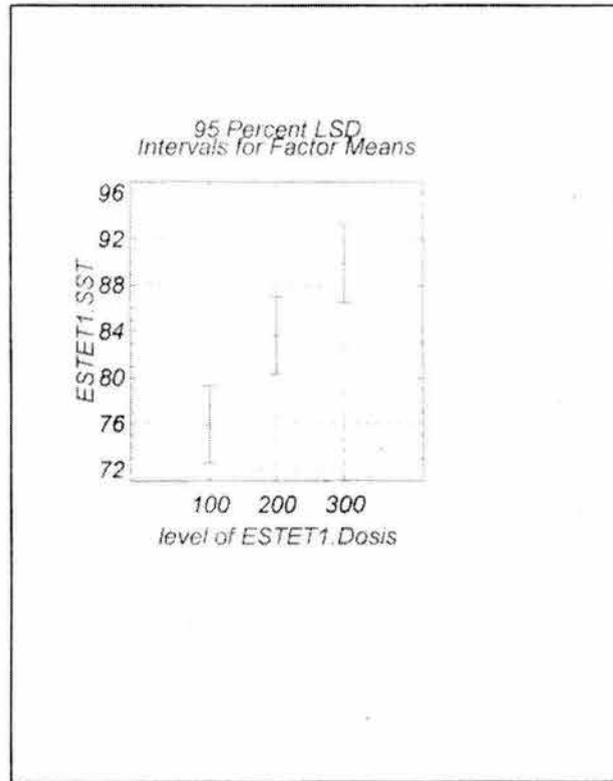
Figura Intervalo de volumen de partículas respecto a la basicidad aplicada



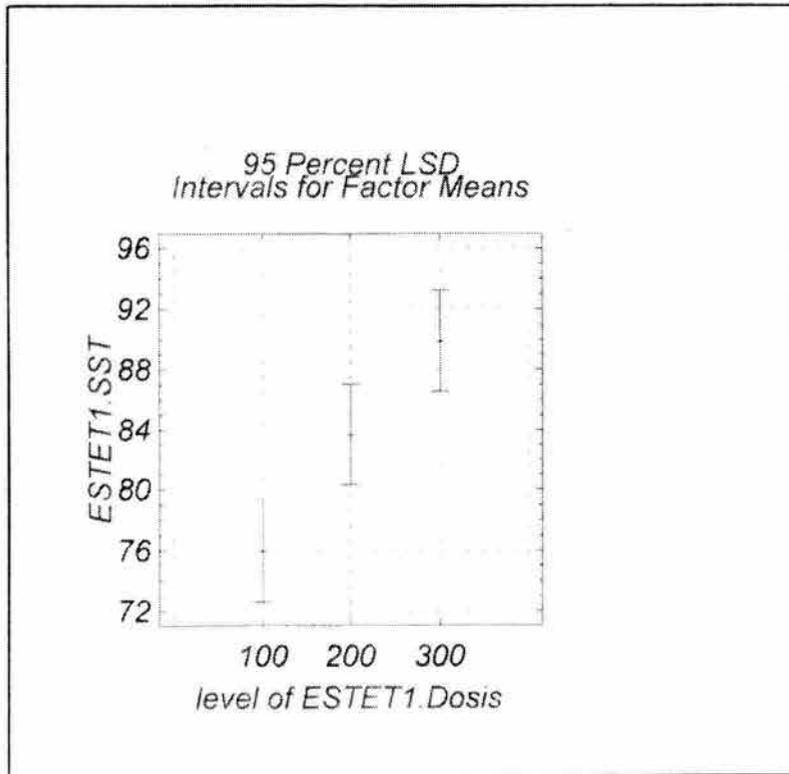
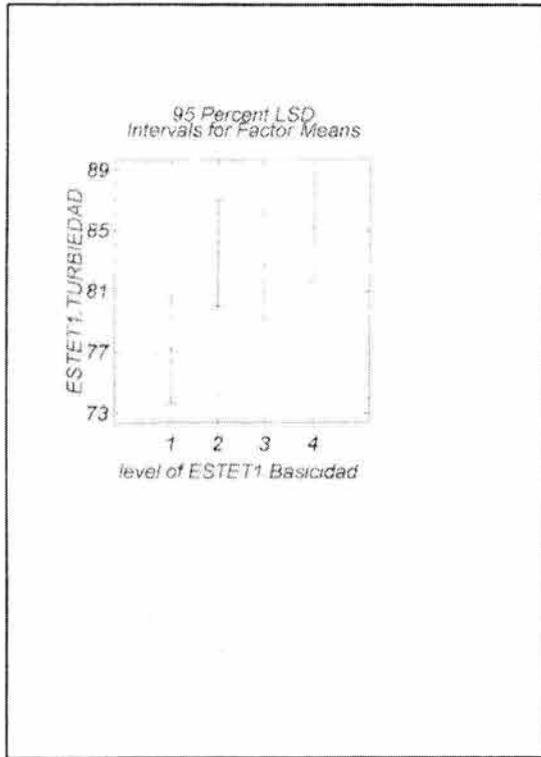
ANEXO A-2



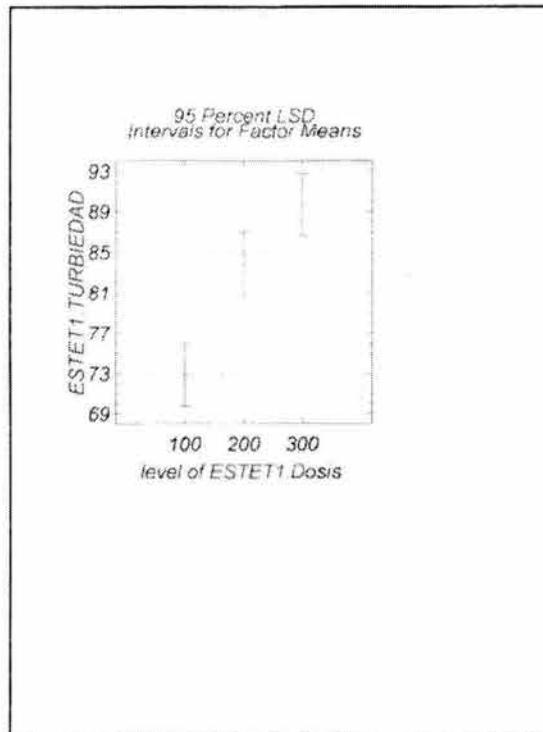
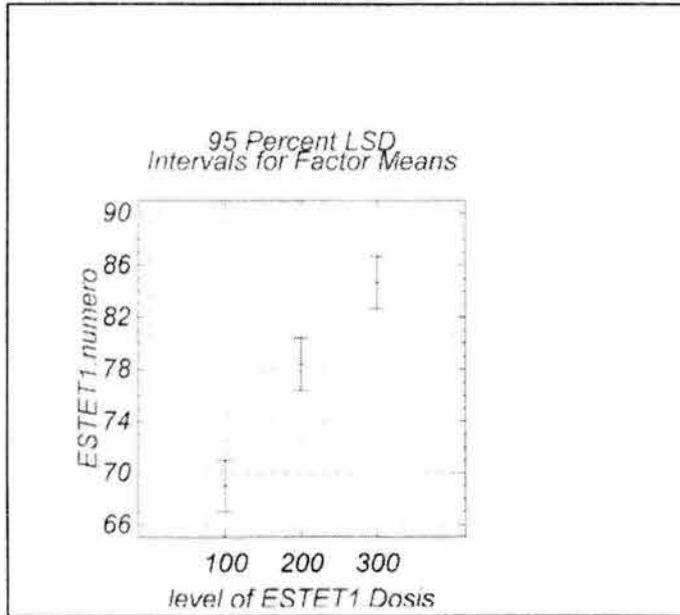
ANEXO A-2



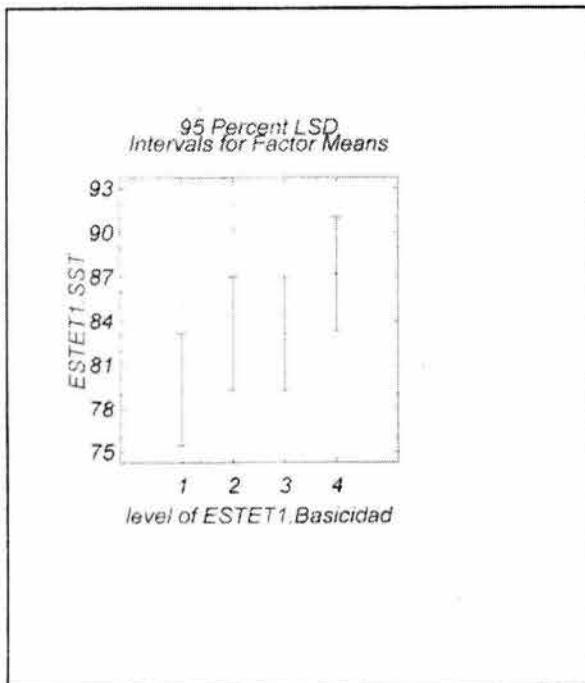
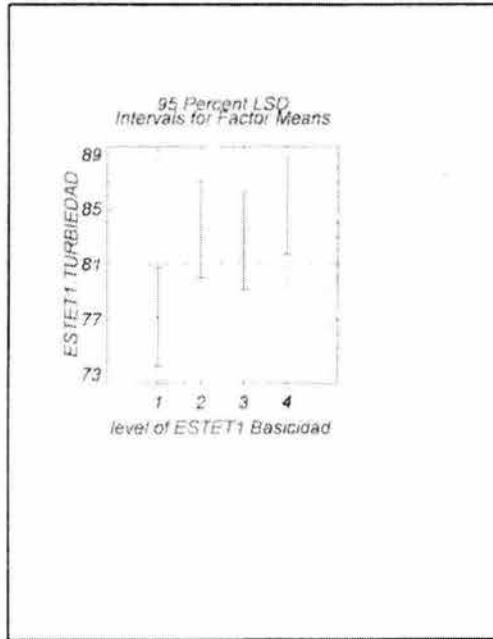
ANEXO A-2



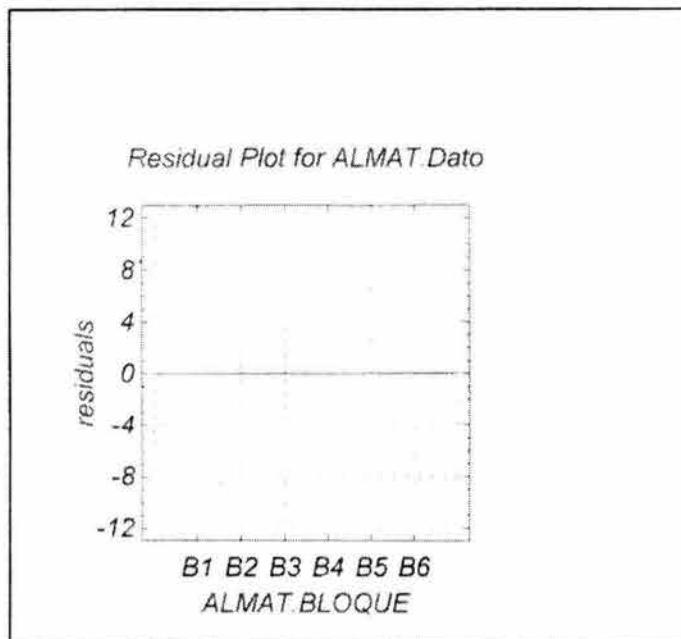
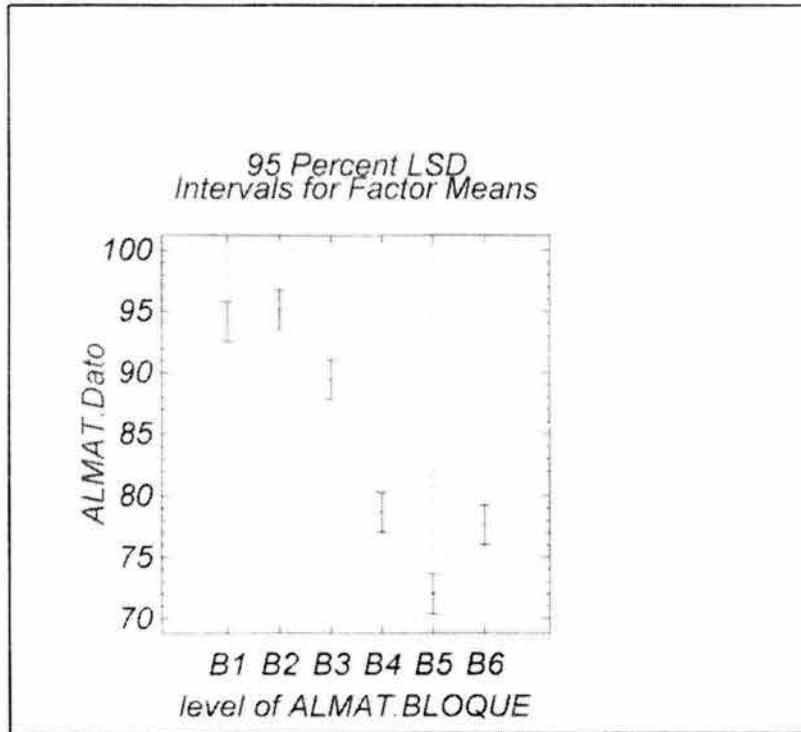
ANEXO A-2



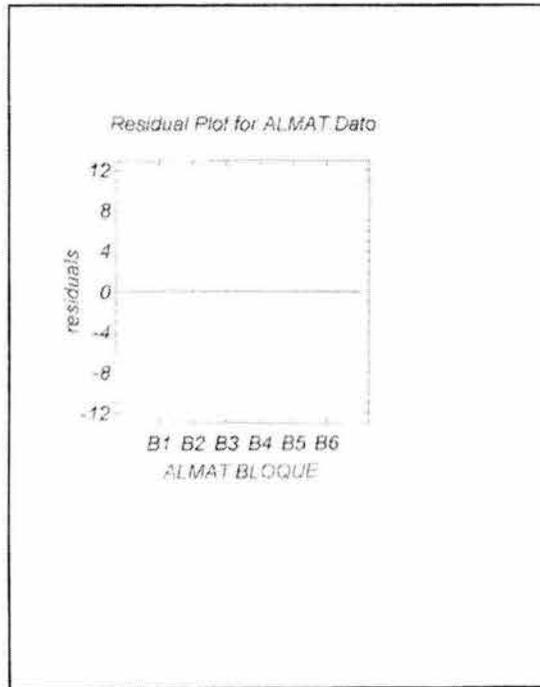
ANEXO A-2



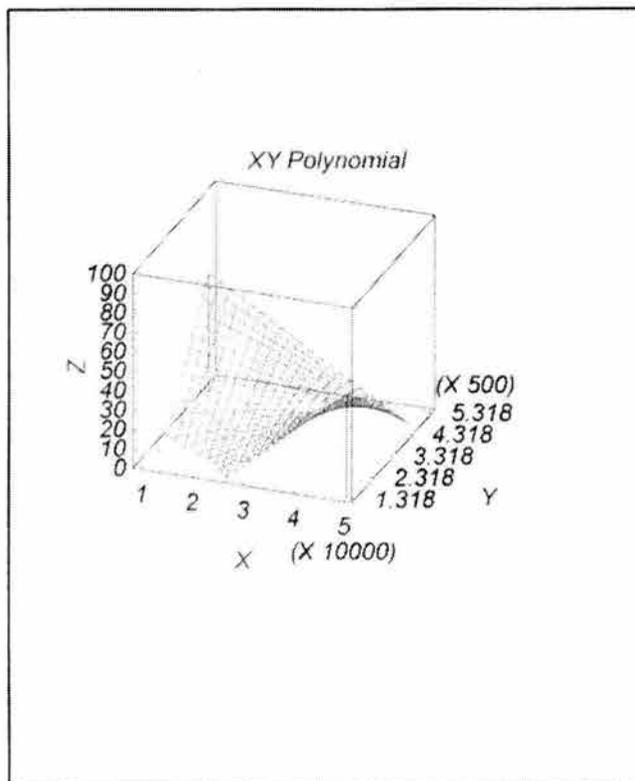
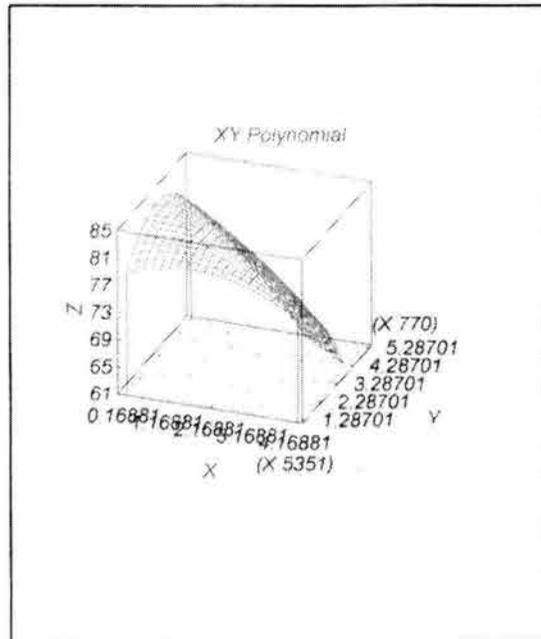
ANEXO A-2



ANEXO A-2



ANEXO A-2



ANEXO A - 2

Anexo 2B. Estudio de evaluación del gradiente y tiempo de contacto en la mezcla rápida

Tabla A2-10. Análisis de variancia para el Número

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	4.5	2	2.24	0.37	3.44	0.7
Tiempo	32.3	2	16.1	2.6	3.44	0.09
Residual	134.3	22	6.1			
Total	171.1	26				

Tabla 5.8 Análisis de variancia número

Tabla A2-11. Análisis de variancia para la Turbiedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	48.0	2	24.0	1.420	3.44	0.26
Tiempo	72.2	2	36.1	2.13	3.44	0.14
Residual	372.1	22	17			
Total	492.3	26				

Tabla A2-12. Análisis de variancia para los SST

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	36.1	2	18.07	0.650	3.44	0.53
Tiempo	15.6	2	7.78	0.280	3.44	0.75
Residual	611.6	22	27.8			
Total	663.3	26				

Tabla A2-13. Análisis de variancia para los CF

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	820.8	2	410.4	1.79	3.44	0.19
Tiempo	1160.8	2	580.4	2.53	3.44	0.10
Residual	5037.8	22	229			
Total	7019.5	26				

ANEXO A - 2

Tabla A2-14. Análisis de variancia para la Salmonella

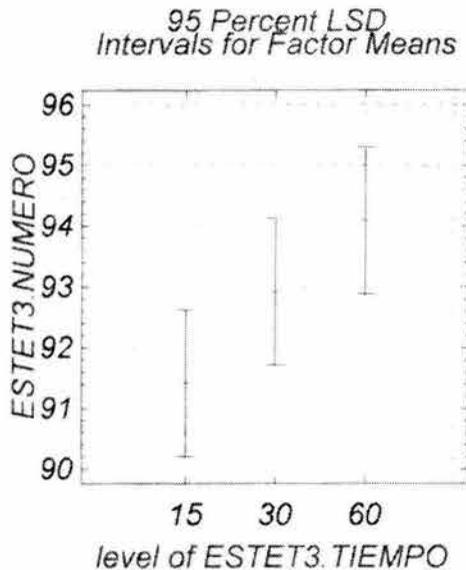
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	1364.2	2	682.1	2.65	3.44	0.0932
Tiempo	2210.2	2	1105.1	4.3	3.44	.0267
Residual	5665.8	22	257.5			
Total	9240	26				

Tabla A2-15. Análisis de intervalos múltiples para número - tiempo con un 95% de significancia

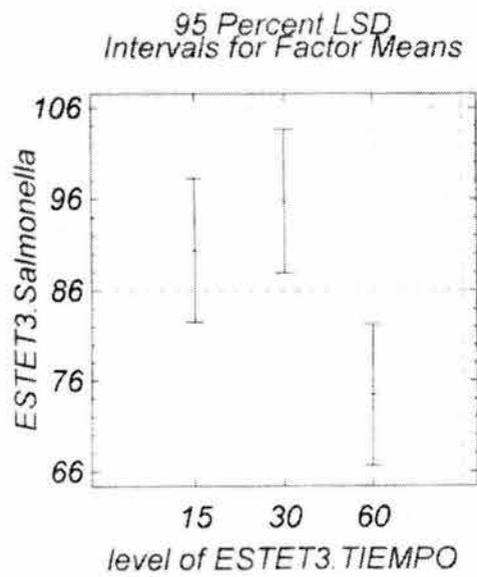
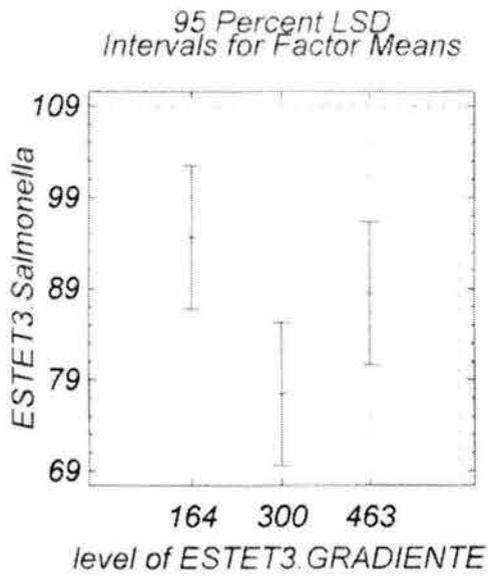
Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo	Diferencia +/-	Límites
60 s ⁻¹	9	91.4	X		
15 s ⁻¹	9	92.9	X X		
30 s ⁻¹	9	94.1	X		
Contraste					
15 s ⁻¹ - 30s ⁻¹				-1.5	2.4
15 s ⁻¹ - 60s ⁻¹				-2.7	2.4*
30 s ⁻¹ - 60s ⁻¹				-1.2	2.4

* denotes a statistically significant difference.

Figuras Homocedasticidad, independencia y normalidad de los modelos presentes



ANEXO A - 2



ANEXO A - 2

Anexo 2C. El estudio de evaluación del gradiente y tiempo de contacto en la mezcla lenta

Tabla A2-16. Análisis de variancia para el número de partículas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F Calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Tiempo	14.7	2	7.4	6.6	3.37	0.046
Gradiente	3.3	2	1.6	1.5	3.37	0.245
Interacción	2.1	4	0.53	0.5	2.74	0.75
Residual	30.1	27	1.1			
Total	50.3	35				

Tabla A2-16. Análisis de variancia para los SST

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	21.8	2	3.7	1.1	3.37	0.34
Tiempo	0.73	2	0.12	0.04	3.37	0.96
Interacción	13.8	4	0.12	0.4	2.74	0.99
Residual	166	27	3.3			
Total	202.3	35				

Anexo 3 E4-13. Análisis de variancia para la Salmonella

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	882.8	2	441.4	1.8	3.37	0.17
Tiempo	964.7	2	482.4	2.0	3.37	0.15
Interacción	1356.4	4	339.1	1.4	2.74	0.25
Residual	6464.1	27	239.4			
Total	9668.1	35				

Anexo 3 E4-13. Análisis de variancia para los CF

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculada	F Tablas	Nivel de significancias
Gradiente	678	2	339	1.3	3.37	0.27
Tiempo	746	2	373	1.5	3.37	0.24
Interacción	636	4	159	0.6	2.74	0.64
Residual	6813	27	252			
Total	657	35				

Tabla 5.16 Análisis de intervalos múltiples volumen - gradiente con el 95% de significancia

Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo	Diferencia +/-	Límites
20 s ⁻¹	12	93	X		
44 s ⁻¹	12	96	XX		

ANEXO A - 2

58 s ⁻¹	12	96	X			
Contraste						
20 s ⁻¹ - 44s ⁻¹					-3.3	3.4
20 s ⁻¹ - 58s ⁻¹					-3.6	3.4*
44 s ⁻¹ - 58s ⁻¹					-0.3	3.4

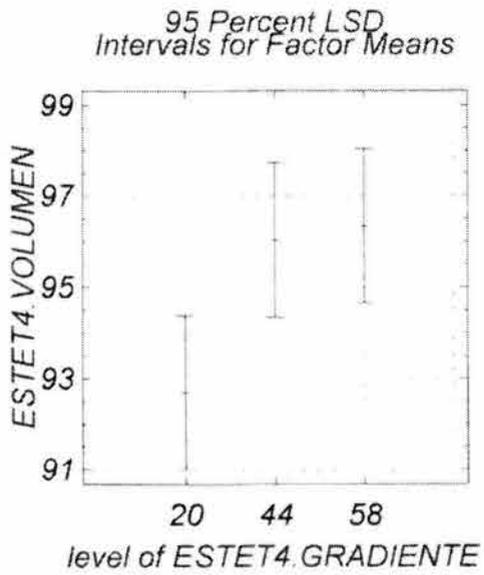
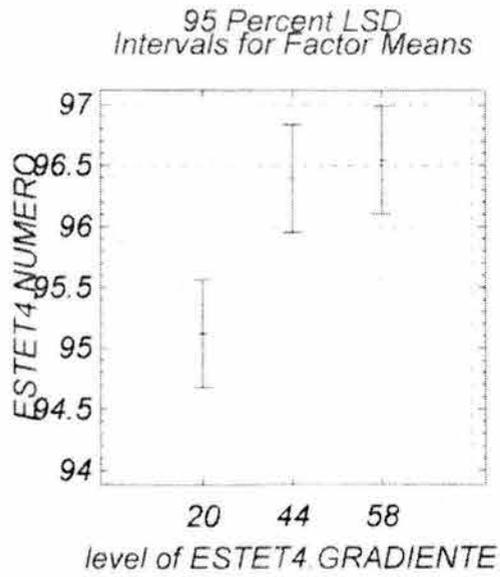
* denotes a statistically significant difference.

Tabla 5.16 Análisis de intervalos múltiples número - gradiente con el 95% de significancia

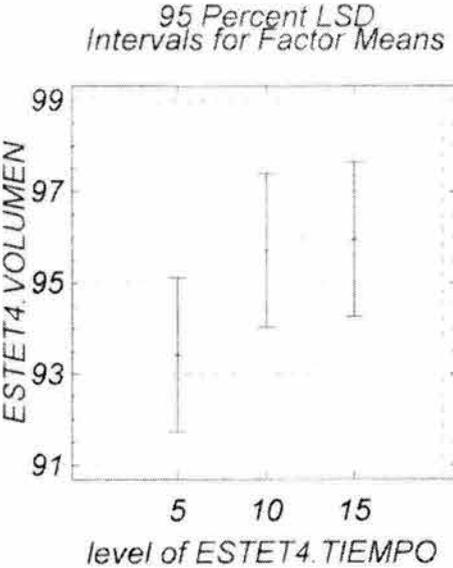
Nivel	Número	Mínima Diferencia Significativa (LSD)	Homogeneidad del grupo	Diferencia +/-	Límites
20 s ⁻¹	12	95.0	X		
44 s ⁻¹	12	96.4	X		
58 s ⁻¹	12	96.5	X		
Contraste					
20 s ⁻¹ - 44s ⁻¹				-1.2	0.88*
20 s ⁻¹ - 58s ⁻¹				-1.4	0.88*
44 s ⁻¹ - 58s ⁻¹				-0.1	0.88

* denotes a statistically significant difference.

ANEXO A - 2



ANEXO A - 2



ANEXO A-3

RESULTADOS DE LA DTP. Coagulantes. Sensor de Corriente Eléctrica

Particula	A125040		A125041		A125042		PAX XL-00		PAX XL-01		PAX XL-02		PAX XL-05		PAX XL-08		PAX XL-09		PAX XL-13		PAX XL-15		
	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	Diff	Volume	
Lower	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	Number	µm³	
41.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41.6	0.333	14873	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	14873	0	0
41.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41.9	0.667	34420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42.2	1	58109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42.5	0.333	19497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	18497	0	0	0	0	0	0	0	
42.5	0.667	40650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	44176	0	0
43.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.4	0.667	48008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.4	0.333	29086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.4	0.667	54387	0	0	0.667	54387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.333	28348	0	0	0.333	28348	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.333	30607	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.333	37115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.333	33479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.667	69802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.333	39639	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	37926	0	0
43.9	0.333	43216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43.9	0.667	85930	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

RESULTADOS DE LA DTP. Coagulantes, Sensor de Corriente Eléctrica

294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	8725	1793	0	0	0
299	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4548	920	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
303	0.667	9482	1893	0	0	0	0.333	4741	946	0	0	0	0	0	0	0.667	9482	1893	0	0	0
307	0	0	0	1	14827	2919	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4942	973	0.667	9885	1946
311	0.333	5152	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5152	1000	0	0	0	0	0	0
318	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5371	1029
320	0	0	0	0	0	0	0.333	5569	1057	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
324	0.333	5837	1087	0.333	5837	1087	0	0	0	0.333	5837	1087	0.333	5837	1087	0	0	0	0	0	0
328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	12189	2235	0	0	0	0.667	12189	2235	0	0	0
334	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
338	0	0	0	0	0	0	0.333	6612	1181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
348	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	7186	1249	0	0	0	0	0
353	0	0	0	0	0	0	0.333	7481	1284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
358	0	0	0	0	0	0	0.333	7809	1320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
363	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8141	1357	0	0	0
368	0.667	10973	2790	0	0	0	0	0	0	0.333	8487	1395	0	0	0	0	0	0	0	0	0
373	0	0	0	0.333	8847	1434	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	9223	1475
383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
389	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
394	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
399	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
411	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
416	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
422	0	0	0	0.333	12863	1841	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
428	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
434	0	0	0	0	0	0	0.333	13979	1946	0	0	0	0	0.333	13979	1946	0	0	0	0	0
440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
446	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	16191	2067	0	0	0	0	0	0	0	0	0
453	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
459	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
465	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
472	0	0	0	0.333	17941	2298	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
478	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
485	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
492	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
506	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
513	0.333	23026	2714	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
520	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
534	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
542	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
549	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
567	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
585	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
573	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
581	0	0	0	0	0	0	0.333	33479	3483	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
589	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
597	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
605	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
614	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
622	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
631	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO A-3

RESULTADOS DE LA DTP. Coagulantes, Sensor de Corriente Eléctrica

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4303	866
0	0	0	1	13644	2781	0.333	4548	920	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4741	946
0	0	0	0	0	0	0.333	4741	946	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4741	946
0	0	0	0.333	4942	973	0.333	4942	973	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	4942	973
0	0	0	1	15457	3001	0.333	5152	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5152	1000
0	0	0	0.667	10742	2057	0.333	5371	1028	0.333	5371	1028	0	0	0	0	0	0	0.333	5371	1028
0	0	0	0.333	5590	1057	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5590	1057
0.333	5837	1087	0	0	0	0.667	11674	2174	1	17510	3261	0.333	5837	1087	0	0	0	0.333	5837	1087
0	0	0	0.333	6085	1118	0.333	6085	1118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	6085	1118
0	0	0	0	0	0	0.333	6343	1149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	6343	1149
0	0	0	0	0	0	0.333	6612	1181	0.333	6612	1181	0	0	0	0	0	0	0.333	6612	1181
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	6612	1181
0	0	0	0.333	7186	1249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	7186	1249
0	0	0	0.333	7491	1284	0	0	0	0.333	7491	1284	0	0	0	0	0	0	0.333	7491	1284
0	0	0	0.333	7809	1320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	7809	1320
0	0	0	0	0	0	0.333	8141	1357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8141	1357
0.333	8487	1396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8487	1396
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8487	1396
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8487	1396
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	16229	3032	0	0	0	0	0	0.333	16229	3032
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	10023	1569	0.333	10023	1569	0	0	0	0.333	10023	1569
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	10023	1569
0	0	0	0	0	0	0.333	10892	1648	0.333	10892	1648	0	0	0	0	0	0	0.333	10892	1648
0	0	0	0.667	22709	3388	0	0	0	0.333	11364	1694	0	0	0	0	0	0	0.333	11364	1694
0	0	0	0.333	11837	1742	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	11837	1742
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	12339	1790	0	0	0	0	0	0	0.333	12339	1790
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	12339	1790
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	13410	1893	0	0	0	0	0	0	0.333	13410	1893
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	13979	1946	0	0	0	0	0	0	0.333	13979	1946
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	14573	2000	0	0	0	0	0	0	0.333	14573	2000
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	14573	2000
0	0	0	0	0	0	0.333	16509	2174	0	0	0	0.333	16509	2174	0	0	0	0.333	16509	2174
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	17210	2236	0	0	0	0	0	0	0.333	17210	2236
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	17941	2298	0	0	0	0	0	0	0.333	17941	2298
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	17941	2298
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	17941	2298
0	0	0	0.333	20325	2497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	20325	2497
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	42376	5135	0	0	0	0	0	0	0.667	42376	5135
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	42376	5135
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	23026	2714	0	0	0	0	0	0	0.333	23026	2714
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	48008	5580	0	0	0	0	0	0	0.667	48008	5580
0	0	0	1	75069	8606	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	75069	8606
0	0	0	0.333	26086	2949	0	0	0	0.333	26086	2949	0	0	0	0	0	0	0.333	26086	2949
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	54387	6064	0	0	0	0	0	0	0.667	54387	6064
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	54387	6064
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	29652	3205	0	0	0	0	0	0	0.333	29652	3205
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	29652	3205
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	29652	3205
0	0	0	0.333	34601	3581	0	0	0	0.333	34601	3581	0	0	0	0	0	0	0.333	34601	3581
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	36383	3682	0	0	0	0	0	0	0.333	36383	3682
0	0	0	0.667	75856	7570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	75856	7570
0	0	0	0.333	39239	3892	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39239	3892
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39239	3892
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39239	3892
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39239	3892

ANEXO 3
A3-B. RESULTADOS DE LA DTP
MEZCLA RAPIDA, Sensor de Corriente Eléctrica

Particula	100 a-1. 15 µ		160 a-1. 50 µ		190 a-1. 60 µ		300 a-1. 15 µ		300 a-1. 50 µ		500 a-1. 60 µ		480 a-1. 15 µ		480 a-1. 50 µ		460 a-1. 50 µ		
	Diff	Diff																	
Diámetro	Number	Volume																	
Lineal	µm ³																		
µm																			
45.0	0.333	46509	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.867	33018		
46.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	51630	
47.2	0	0	0	0	0.333	17941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.333	71764		
47.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	56109	
48.5	0.867	36904	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	19407		
49.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.667	101625	
49.8	0.333	21186	0	0	0	0	0	0.333	21186	0	0	0	0	0	0	0	0	190694	
50.5	0	0	0	0	0.333	22088	0	0	0.333	22088	0	0	0	0	0	0	1.667	110440	
51.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	22026	0	0	0	0	0	0	2.867	184206	
52.0	0	0	0	0	1	72511	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	24004	1	72011	
52.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.667	126115	
53.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	26588	0.867	32171	
54.2	0	0	0	0	0.333	27193	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.333	139714	
54.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	170290	
55.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	29562	0	0	0	0	0.333	29562	1.333	118208	
56.5	0.333	30907	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.333	123276		
57.3	0	0	0	0	0.333	32116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.333	126481		
58.1	0	0	0.333	33479	0.333	33479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.333	133917		
58.9	0.333	34901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	34901		
59.7	0.333	36383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	36383		
60.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.667	189640		
61.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	38626	0	0	0	0	0	0	1	118616	
62.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	129643	
63.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	42966	1.333	171872	

A3-B. RESULTADOS DE LA DTP: MEZCLA RÁPIDA.
Sensor de Corriente Eléctrica

Partícula [Diseño] [Línea] [µm]	160 µ-1.15 s		180 µ-1.30 s		180 µ-1.60 s		300 µ-1.15 s		300 µ-1.30 s		300 µ-1.60 s		480 µ-1.15 s		480 µ-1.30 s		480 µ-1.60 s	
	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff
	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume
	µm ³	µm ³																
44.6	0.333	15191	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45.1	0.333	15837	0.333	15837	0	0	0.333	15837	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45.9	0	0	0.333	16509	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47.2	0	0	0	0	0	0	1.333	71784	0.333	17941	0	0	0	0	0	0	0	0
47.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49.2	0.333	20325	0	0	0	0	0.333	20325	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50.0	0.667	44178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51.3	0	0	0	0	0.333	23028	0.667	46052	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52.0	0	0	0	0	0	0	0.333	24904	0.333	24904	0	0	0	0	0	0	0	0
52.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53.4	0	0	0	0	0	0	0.333	26086	0.333	26086	0	0	0	0	0	0	0	0
54.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	27193	0	0	0	0	0	0	0	0
54.8	0	0	0	0	0	0	0.333	28348	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	29512
56.5	0.333	30867	0	0	0.333	30867	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62.1	0	0	0	0	0	0	0.333	42968	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**ANEXO 3
A3- B. RESULTADOS DE DTP. MEZCLA RÁPIDA.**

Sensor de Corriente Eléctrica

Particle Diameter (Lower) μm	180 s-1, 16 s		180 s-1, 30 s		180 s-1, 60 s		300 s-1, 16 s		300 s-1, 30 s		300 s-1, 60 s		460 s-1, 15 s		460 s-1, 30 s	
	Diff Number	Diff Volume μm^3														
56.1	0	0	0	0	0	0	0.333	33476	0	0	0	0	0	0	0	0
56.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	34901	0	0	1	104703	0	0
59.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	36363	0	0	1	109149	0	0
60.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	37928	0	0
61.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39539	0	0
62.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	82436	0	0
63.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	42968	0	0
63.11																

A3-C. RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA LENTA.

Sensor de Corriente Eléctrica

Table with 15 columns representing different time intervals (20 s-1.5 min to 80 s-1.15 min) and 40 rows of numerical data. The table contains sensor readings for electrical current at various time intervals.

ANEXO 3

A3-C. RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA LENTA.

Sensor de Corriente Eléctrica

Particula (micras)	20 a-1. 5 min		20 a-1. 10 min		20 a-1. 15 min		40 a-1. 5 min		40 a-1. 10 min		40 a-1. 15 min		60 a-1. 5 min		60 a-1. 10 min		60 a-1. 15 min	
	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol	Diff	Vol
	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume
12.8	0	0	0	0	0	0	0.333	13410	0.333	13410	0.333	13410	0	0	0	0	0	0
14.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	13979	0	0	0	0	0
16.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.8	0	0	0.333	18509	0	0	0	0	0.333	16509	0	0	0	0	0	0	0	0
22.4	0	0	0.333	17210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24.0	0	0	0.333	17841	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	18703	0	0	0	0	0	0	0	0
27.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28.8	0	0	0	0	0	0	0.333	20276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333
33.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22080
35.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46.4	0.333	29552	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	33479	0	0	0	0	0	0	0	0
54.4	0	0	0	0	0	0	0.333	34901	0	0	0.333	34901	0	0	0	0	0	0
56.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
83.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
86.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A3 - B. RESULTADOS DE DTP. MEZCLA LENTA

Sensor de Corriente Eléctrica

Partícula	20 a-1, 5 min		20 a-1, 10 min		20 a-1, 15 min		40 a-1, 5 min		40 a-1, 10 min		40 a-1, 15 min		80 a-1, 5 min		80 a-1, 10 min		80 a-1, 15 min	
	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff	Diff
Dimension	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume
(Lower)		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³		µm ³
µm																		
28.5	0.333	3851	0.333	3851	0	0	1.333	15403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29.5	0.333	4014	0.333	4014	0	0	0.333	4014	0	0	0.333	4014	0.867	8029	0	0	0	0
29.0	0	0	0	0	1	12545	0.333	4185	0.333	4185	0.867	8370	0	0	0	0	0.333	4185
29.5	1.667	21813	0.667	8725	0	0	0	0	0	0	0.667	8725	0	0	0.333	4361	0	0
29.0	0.667	9086	0.333	4548	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30.5	0.333	4741	0.333	4741	0	0	0	0	0	0	0.333	4741	0.333	4741	0	0	0.333	4741
30.0	0.333	4942	0	0	0	0	0.333	4942	0	0	0	0	0.333	4942	0	0	0	0
31.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5152	0	0	0	0
31.0	0	0	0	0	0.333	5371	0.667	10742	0.333	8371	0	0	0	0	0	0	0	0
32.0	0.333	5589	0	0	0.333	5589	0	0	0.333	5589	0	0	0.333	5589	0	0	0	0
32.5	0.333	5837	0	0	0	0	0	0	0.333	5837	0	0	0	0	0	0	0.333	5837
33.0	0.667	12188	0	0	0	0	0.333	8085	0	0	0.333	8085	0.333	8085	0.333	8085	0.333	8085
33.5	0.667	12229	0	0	0	0	0.333	8243	0	0	0	0	0.333	8243	0	0	0	0
33.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8812	0	0	0.333	8812	0	0
34.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8893	0	0	0	0
34.0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	7188	0.333	7188	0.333	7188	0	0	0	0	0
35.5	1.667	37456	0.333	7491	0	0	0	0	0	0.333	7491	0.333	7491	0	0	0	0	0
35.0	0.333	7809	0	0	0	0	0.333	7809	0.333	7809	0	0	0.333	7809	0	0	0.667	15616
36.5	0.333	8141	0	0	0.333	8141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36.0	0	0	0.333	8487	0.333	8487	0	0	0	0	0	0	0.333	8487	0	0	0	0
37.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8847	0	0	0	0	0.333	8847
37.5	0.667	18449	0	0	0	0	0.333	9223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38.0	1	28643	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	9614	0	0
38.5	1.233	40090	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39.5	0.667	20886	0	0	0	0	0.333	10446	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39.8	1	32676	0	0	0.333	10892	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	10892	0	0
40.5	0.667	22709	0	0	0	0	0	0	0	0.333	11394	0	0	0.333	11394	0	0.333	11394
41.1	0.333	11837	0	0	0	0	0	0	0	0.333	11837	0	0	0	0	0	0	0
41.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	12339	0.333	12339	0	0	0	0	0	0
42.0	0.667	23727	0.333	12863	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42.5	0.667	26819	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43.5	0.667	27958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	13879	0.667	27958	0	0
44.0	0.667	28145	0	0	0	0	0.333	14873	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44.6	0.333	15181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45.0	1	47530	0	0	0	0	0	0	0	0.333	15837	0	0	0.333	15837	0	0	0
45.5	0.333	18909	0	0	0	0	0.333	16509	0	0	1	48527	0	0	0	0	0	0
46.5	0.667	24470	0	0	0	0	0	0	0.333	17216	0	0	0	0	0	0	0	0
47.0	0.667	25882	0.333	17941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	18793	0	0	0	0	0	0
48.5	0.333	19497	0	0	0	0	0	0.333	19497	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49.0	0.333	20325	0.333	20325	0	0	0	0	0	0	0.333	20325	0	0	0	0	0	0
49.5	0.667	42378	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	21188	0	0	0	0	0	0
50.8	0.333	22088	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	22088	0.333	22088
51.0	0.333	23028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	23028	0	0	0	0
52.0	0.667	48008	0	0	0	0	0.333	24094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	25023	0	0	0	0
53.0	1	78287	0	0	0	0	0.333	26089	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54.5	0.667	58697	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55.0	0.667	59104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	28952
56.5	1	82421	0	0	0	0	0	0	0.333	28807	0	0	0	0	0	0	0	0
57.0	0.667	84231	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.1	0.667	88958	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	32479	0	0	0	0	0
58.5	0.333	34901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59.0	1.333	143552	0	0	0	0	0	0.333	36383	0.667	72766	0	0	0	0	0	0	0
60.5	0.667	75856	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61.0	0.667	79077	0	0	0	0	0.333	39038	0	0	0	0	0	0	0	0.333	39038	0
62.0	1	128853	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63.1	1	128904	0	0	0	0	0	0	0	0.333	42988	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO 3

A3-C. RESULTADOS DE DTP. MEZCLA LENTA.

Corriente de Sensor Eléctrica

Partícula	20 a-1, 5 min		20 a-1, 10 min		20 a-1, 15 min		40 a-1, 5 min		40 a-1, 10 min		40 a-1, 15 min		60 a-1, 5 min		60 a-1, 10 min		80 a-1, 15 min	
	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³	Diff Number	Diff Volume µm³
42.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44.0	0.333	14673	0	0	0.333	14673	0	0	0	0	0.333	13979	0	0	0	0	0.333	13878
44.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47.8	0	0	0	0	0.333	14673	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48.3	0	0	0	0	0	0	0.333	14649	0.333	14467	0	0	0	0	0	0	0	0
48.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48.8	0.333	21164	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	24064	0	0	0	0	0	0
52.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53.4	0.333	26086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56.0	0.333	30907	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	36383	0	0	0
60.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	37928	0
61.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63.11																		

ANEXO 3

A3-C. RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA LENTA.

Sensor de Corriente Eléctrica

Particula	20 s-1: 5 min		20 s-1: 10 min		20 s-1: 15 min		40 s-1: 5 min		40 s-1: 10 min		40 s-1: 15 min		80 s-1: 5 min		80 s-1: 10 min		80 s-1: 15 min	
	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif
	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume	Number	Volume
(Lower)		µm³		µm³		µm³		µm³		µm³		µm³		µm³		µm³		µm³
µm																		
51.1	0.333	5152	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5152	0	0	0	0	0	0
51.6	0	0	0.333	21484	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52.0	0	0	0.333	3599	0	0	0	0	0.333	8599	0	0	0	0	0	0	0	0
52.4	0	0	0	0	0	0	0.333	5637	0	0	0	0	0.333	5637	0	0	0.333	5637
52.8	0.667	12189	0	0	0	0	0	0	0.667	12189	0	0	0	0	0	0	0.667	12189
53.4	0.333	6343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	6343
53.8	0.333	6612	0	0	0	0	0	0	0	0	0.667	13225	0.333	6612	0	0	0	0
54.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	6893	0.333	6893	0	0	0	0	0	0
54.8	0.333	7186	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	7186
55.3	0.333	7491	0.333	7491	0.333	7491	0	0	0.333	7491	0	0	0	0	0	0	0	0
55.8	0	0	0.333	7809	0	0	0.333	7809	0	0	0	0	0.333	7809	0.333	7809	0	0
56.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	5141	0	0	0	0
56.8	0	0	0.333	8487	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	8487
57.2	0.333	8847	0.667	17694	0	0	0	0	0	0	0.333	8847	0	0	0	0	0	0
57.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	9614	0	0	0	0	0	0	0	0
58.8	0.333	10023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59.4	0.333	10448	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	10448	0.333	10448
59.8	0	0	0	0	0.333	10862	0	0	0	0	0.333	10862	0	0	0	0	0	0
60.3	0.333	11354	0	0	0	0	0	0	0.333	11354	0	0	0	0	0	0	0	0
61.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	12863	0	0	0	0	0	0	0	0
62.8	0	0	0.333	13410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	13410	0	0
63.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	15191	0	0	0	0	0	0
65.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	15837
65.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66.5	0	0	0	0	0.333	17210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	19497
69.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	20225
69.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	23028
72.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	25023	0	0	0	0
73.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	26098
74.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76.4	0	0	0.333	30807	0	0	0	0	0.333	30807	0	0	0	0	0	0	0	0
77.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78.1	0.333	33479	0.333	33479	0.333	33479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	34901
79.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.333	41218
83.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO 4.

COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-1 Realización de prueba de jarras

Reactivos	Precio (USD)	Presentación	Costo total (USD)
Agua destilada	15.4	20 L	15.4
Al ₂ (SO ₄) ₃	----	----	
PAX XL 13	----	----	
PAX XL 60	----	----	
Floculante	----	----	
Material			
Floculador	1500	1	150.0
Vasos prueba de jarras	65	6	65.0
Balanza analítica	2500	1	164.0
Espátula	15	1	15.0
Matraz aforado de 100 mL	308	1	301.0
Micropiperta 5-100 µL	241	1	48.5
Micropiperta 10-100µL	305	1	61.0
Micropiperta 20-200µL	305	1	61.0
Micropiperta 100-1000 µL	305	1	61.0
Micropiperta 500-5000 µL	331	1	66.2
Puntas 5-100 µL	19.5	1000	85.4
Puntas 10-100µL	20.3	1000	88.9
Puntas 20-200µL	20.75	1000	90.9
Puntas 100-1000 µL	22.5	1000	98.6
Puntas 500-5000 µL	29.8	1000	130.5
Recipiente plástico de 100 mL	10	100	10.0
Jeringas de 5 mL	10	100	50.0
Piseta 1000 mL	16	1	16.0
Piseta 500 mL	21.25	1	21.3

ANEXO 4.

COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-2 Realización de SST

Reactivos	Precio \$	Presentación	Costo total (USD)
Agua destilada	15.4	20 L	1232.0
Silica gel	70	1 kg	700.0
Material			
Filtros (fibra de vidrio o policarbonato 1.2 µm)	80	100	4000.0
Charolas de aluminio	7.4	100	370.0
Pinzas millipore	25	1	25.0
Sistema de filtración	1984	1	1984.0
Kitasato 1000 mL	673	1	673.0
Manguera para vacío	42	1.4 m	42.0
Piseta 1000 mL	26	1	26.0
Probeta de 50 mL	24.75	1	24.8
Probeta de 100 mL	16.15	1	16.2
Estufa 180°C + 2°C	19000	1	1900.0
Balanza analítica	2500	1	250.0
Desecador	270	1	54.0
Bomba de vacío	418	1	83.6

ANEXO 4.
COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-3 Realización de DTP (Técnica Sensor Eléctrico)

Reactivos	Precio (USD)	Presentación	Tiempo de amortización (años)	Cantidad a emplear	Costo total (USD)
Isotón II	65	20 L	1	876	2847.0
Agua destilada	15.4	20 L	1	48	37.0
Instrumento					
Coulter Multisizer III	45,000	1	10	1	4500.0
Material					
Tubo de 100 µm	770	1	5	1	154.0
Tubo de 30 µm	771	1	5	1	154.2
80 µm de 25 mm de diámetro	135	1000	1	4380	591.3
Kit de filtración de 25 mm de diámetro	88	1	2	1	88.0
Detergente Coulter Clenz	86	1	1	1	86.0
Costo en dolares (USD)					8457.5
Costo en pesos (\$)					84574.6
Costo unitario (\$)					19.3

Tabla A4-4 Realización de DTP Técnica Láser

	Precio (USD)	Presentación	Tiempo de amortización (años)	Cantidad a usar	Costo total (USD)
Instrumento					
Modelo LS13 320 Marca Beckman Coulter.	74,693.00	1	10	1	7469.3
Material					
Accesorio de calibración					
Solución Control L-300 (12 x 4 ml).	178	1	2	1	89.0
Control G-35 (5 x 35 g).	178	1	1	1	178.0
Costo en dolares (USD)					7736.3
Costo en pesos (\$)					77363.0
Costo unitario (\$)					17.7

COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-4 Cuantificación de los Huevos de Helmintos
Equipo y material utilizado en la cuantificación de Huevos de Helmintos mediante la
técnica MNXAA-113/99

Equipo o material	Presentación	Cantidad	Precio (\$)	Marca
Balanza	1500 , 120 VAC	1	13500	Ohaus Adventurer
Centrifuga IEC programable	Vel. 4000 rpm	1	41800	Universal Centrifuges
Bomba de vacío		1	4180	
Autoclave	208/240 VAC, 60 Hz	1	85100	Sterilmatic
Incubadora		1	24800	UL
Dosificador	2 - 10 mL	1	3530	Chempette
Campana de flujo laminar	Mod. LVG-150-GK	1	58989	Flores Valles
Parrilla con agitación y calentam	120 VAC, 1650 W	1	4960	Cimarec
Vortex	120 VAC, 50/60 Hz	1	3320	Thermolyne
Refrigerador				
Micropipeta (A)	40 - 200 microL	1	2340	Finpipette
Micropipeta (B)	200 - 1000 microL	1	2880	Finpipette
Puntas para micropipeta	Paquete (960) A	1	365	Finpipette
Puntas para micropipeta	Paquete (1000) B	1	390	Finpipette
Espátula de metal	Normal	2	385	
Espátula de metal	Con mango	2	183	
Barras magnéticas	1 1/2"	5	273	
Propipeta	3 vías	2	140	Brand
Matraz Erlenmeyer	4 L	2		Pyrex
Probeta de vidrio	1 L	2		Pyrex
Probeta de plástico	1 L	2	246	Belart
Probeta de vidrio	100 mL	4		Pyrex
Probeta de vidrio	50 mL	4		Pyrex
Pipetas de vidrio	10 mL	3		Pyrex
Pipetas de vidrio	5 mL	3		Pyrex
Piseta de plástico	250 mL	2	74	Nalgene
Cajas Petri desechables	100 X 15 Caja (500)	1	825	
Guantes estériles	Medianos Caja (100)	1	118	
Alcohol 96%	1 L	2	40	Dalux
Toallas desechables	Paquete	1	9	Kleenex
Plumines indelebles	Punto extrafino	3	30	

ión de Huevos de Helmintos mediante la técnica MNXAA-113/99

Reactivo o Medio de cultivo	Presentación	Cantidad	Precio	Marca
Agua destilada	Garrafón 19 L	1	154	Hisel
Hidróxido de sodio	1 gal 1N	1	270	Sigma
Sulfato de zinc	2.5 kg	14	2042	Baker
Eter o Acetato de Etilo	1 gal	1	1700	Sigma
Ácido Sulfúrico	1 gal	7	500	Sigma

ANEXO 4.

COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-5 Realización de Coliformes fecales, Salmonella y Streptococcus fecalis. Método de filtración por membrana

Reactivos	Precio (USD)	Presentación
Medio agar MFC	110	500 g
Fosfato monopotásico	20.28	500 g
Cloruro de magnesio	70.74	1000 g
NaOH	27	1 galón 1N
Alcohol etílico	2	1L
Agua destilada	15.4	20
Medio Bismuto de sulfito	131	450 g
Medio KF Estreptococos	131.5	500 g
Salicin	80	1
Material		
Sistemas de filtración	19.3	1
Membranas de borosilicato 0.45 µm de 47 mm de diámetro	58.62	200
Pipeta de 10 mL	6	1
Micropipetas 20-100 µL	288	1
Puntas	39	1000
Kitasato 1L	273	1
Manguera para vacío	4.2	1.4 m
Bomba de vacío	418	1
Cajas petri millipore de 50 mm desechables	170	500
Tubos de rosca 15 mL	15	1
Pinzas millipore	16	1
Matraz Erlenmeyer 1L	54.5	6
Matraz Erlenmeyer 500 L	33	6
Matraz Erlenmeyer 250 mL	53	12
Agitadores magnéticos	4.20/7.5	1
Parrilla de agitación y calentamiento	177	1
Mecheros Fisher	40	1
Vaso de precipitado de 50 mL	53	12
Vaso de precipitado de 250 mL	44.5	12
Espátula	15	1
Balanza analítica	1840	1
Probeta de 1L	36.5 (plástico)/90.5(vidrio)	1
Probeta de 100 mL	16.5 (plástico)/33.5(vidrio)	1
Autoclave	793	1
Papel aluminio	2	1
Adaptador trifásico		
Algodón o papel	3	1
Recipiente para material de reuso y esterilización		
Bolsas plásticas estériles Nasco Whirl-Pak/tiosulfato de sodio	36.4	200
Incubadora (baño maría)	976	1
Barras magnéticas	21.8	(4)1/2"
Botellas lecheras	7	160 mL
Dosificador 2-10 mL	353	1
Espátula de metal	9.2	Con mango
Gradilla	1.65	1
Incubadora	2480	1

ANEXO 4.

COSTO POR TÉCNICA ANALÍTICA

Tabla A4-6 Realización de Nitrógeno amoniacal

Reactivos	Precio (USD)	Presentación
Kit de N-NH ₃ HACH	90	50
Micropipeta 100 µL-1000µL	305	1
Espectrofotómetro HACH	350	1
Puntas	29.8	1000
Piseta 1000 mL	26	1
Probeta de 100 mL	16.5	1

Tabla A4-7 Realización de Ortofosfato

Reactivos	Precio (USD)	Presentación
Celdas 25 mL HACH	120	2
Pipeta volumétrica 25 mL	10	1
Propipeta	305	1
Kit de molibdovanadato HACH	75	50
Micropipeta 100 µL-1000µL	305	1
Espectrofotómetro HACH	350	1
Filtros de nylon millipore 80 µm de 25 mm de diámetro	135	1000

Tabla A4-8 Realización de DQOt

Reactivos	Precio (USD)	Presentación
Agua destilada	15.4	20
Micropipeta de 5000 µmL	331	1
Puntas	29.8	1000
Digestor	480	1
Espectrofotometro	385	1
Kit para DQO	850	150

ANEXO 5.
A5-A. RESULTADOS DE LA DTP.

ESTUDIO CON COAGULANTES (Sulfato de Aluminio).

Dispersión de Luz láser

	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L
Channel	Diff.								
Diameter	Volume								
(Lower)	%	%	%	%	%	%	%	%	%
µm									
0.040	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.044	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.048	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.053	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.058	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.064	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.070	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.077	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.084	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.093	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.01	0.000	0.000	0.000
0.102	0.000	0.000	0.000	0.02	0.01	0.02	0.000	0.000	0.000
0.112	0.000	0.000	0.000	0.02	0.01	0.03	0.000	0.000	0.000
0.123	0.000	0.000	0.000	0.03	0.02	0.04	0.000	0.000	0.000
0.134	0.000	0.000	0.000	0.04	0.04	0.05	0.000	0.000	0.000
0.148	0.000	0.000	0.000	0.05	0.05	0.07	0.000	0.000	0.000
0.162	0.000	0.000	0.000	0.06	0.07	0.10	0.000	0.002	0.000
0.178	0.000	0.000	0.000	0.07	0.10	0.13	0.000	0.002	0.002
0.195	0.000	0.000	0.000	0.09	0.13	0.16	0.003	0.007	0.008
0.214	0.000	0.000	0.000	0.11	0.16	0.20	0.004	0.014	0.019
0.235	0.000	0.000	0.000	0.12	0.20	0.24	0.014	0.025	0.034
0.258	0.000	0.000	0.000	0.14	0.25	0.29	0.029	0.039	0.056
0.284	0.000	0.000	0.003	0.16	0.29	0.34	0.052	0.056	0.084
0.311	0.000	0.000	0.018	0.19	0.34	0.40	0.081	0.076	0.116
0.342	0.000	0.000	0.151	0.21	0.39	0.45	0.115	0.097	0.152
0.375	0.233	0.461	0.669	0.23	0.44	0.51	0.153	0.120	0.190
0.412	0.412	0.814	1.98	0.25	0.50	0.56	0.193	0.143	0.228
0.452	0.597	1.15	3.98	0.27	0.55	0.62	0.232	0.165	0.263
0.496	0.833	1.56	6.29	0.30	0.59	0.66	0.266	0.185	0.294
0.545	1.01	1.82	7.99	0.32	0.64	0.71	0.295	0.201	0.318
0.598	1.14	1.96	8.43	0.33	0.68	0.74	0.315	0.213	0.335
0.657	1.24	2	7.44	0.35	0.71	0.77	0.326	0.220	0.343
0.721	1.31	1.95	5.29	0.37	0.73	0.78	0.329	0.223	0.342
0.791	1.35	1.8	2.99	0.38	0.75	0.79	0.323	0.222	0.335
0.869	1.35	1.58	1.2	0.39	0.76	0.79	0.312	0.217	0.322
0.953	1.33	1.33	0.321	0.40	0.75	0.78	0.299	0.212	0.306
1.047	1.29	1.07	0.052	0.41	0.75	0.76	0.287	0.206	0.292
1.149	1.26	0.868	0.003	0.42	0.73	0.74	0.281	0.203	0.282
1.261	1.24	0.739	0.004	0.43	0.71	0.71	0.284	0.203	0.280
1.385	1.24	0.725	0.064	0.44	0.69	0.69	0.297	0.208	0.287
1.52	1.26	0.827	0.368	0.45	0.68	0.67	0.322	0.218	0.305
1.669	1.32	1.05	1.34	0.47	0.67	0.66	0.357	0.233	0.333
1.832	1.42	1.34	3.19	0.50	0.67	0.67	0.400	0.253	0.370
2.01	1.55	1.7	5.64	0.54	0.69	0.71	0.447	0.275	0.413
2.207	1.71	2.11	8.25	0.58	0.72	0.77	0.497	0.299	0.460
2.423	1.88	2.55	10.09	0.64	0.79	0.86	0.548	0.324	0.509
2.66	2.06	2.9	9.79	0.72	0.88	0.98	0.601	0.351	0.562
2.92	2.25	3.09	7.76	0.81	1.01	1.15	0.659	0.380	0.621
3.206	2.44	3.15	4.59	0.92	1.18	1.36	0.729	0.416	0.694
3.519	2.62	3.15	1.65	1.05	1.39	1.61	0.816	0.462	0.786
3.862	2.79	3.23	0.41	1.20	1.64	1.90	0.927	0.522	0.909
4.241	2.94	3.33	0.042	1.37	1.93	2.22	1.060	0.602	1.070
4.656	3.09	3.47	0	1.56	2.25	2.58	1.230	0.705	1.280
5.111	3.25	3.67	0	1.77	2.60	2.95	1.420	0.835	1.530
5.611	3.41	4.04	0	2.00	2.97	3.32	1.640	0.994	1.840
6.158	3.55	4.89	0	2.24	3.36	3.67	1.870	1.190	2.190
6.761	3.68	6.2	0	2.50	3.75	4.01	2.110	1.410	2.560
7.421	3.8	7.84	0	2.76	4.13	4.30	2.360	1.670	2.950
8.147	3.91	8.91	0	3.02	4.48	4.53	2.600	1.970	3.330

ANEXO 5.
A5-A. RESULTADOS DE LA DTP.

ESTUDIO CON COAGULANTES (Sulfato de Aluminio).

Dispersión de Luz láser

	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L
Channel	Diff.								
Diameter	Volume								
(Lower)	%	%	%	%	%	%	%	%	%
µm									
8.944	3.97	7.41	0	3.29	4.80	4.67	2.820	2.310	3.680
9.819	3.89	4.16	0	3.54	5.07	4.70	3.030	2.690	3.970
10.78	3.6	1.04	0	3.77	5.26	4.61	3.210	3.120	4.220
11.83	3.12	0.116	0	3.97	5.34	4.40	3.370	3.580	4.420
12.99	2.61	0	0	4.13	5.31	4.09	3.510	4.060	4.620
14.26	2.28	0	0	4.22	5.19	3.72	3.630	4.520	4.850
15.65	2.26	0	0	4.24	4.95	3.33	3.690	4.920	5.130
17.18	2.49	0	0	4.19	4.59	2.99	3.680	5.200	5.410
18.86	2.8	0	0	4.06	4.04	2.72	3.620	5.340	5.570
20.7	2.92	0	0	3.88	3.29	2.54	3.600	5.360	5.480
22.73	2.6	0	0	3.65	2.38	2.40	3.720	5.300	5.090
24.95	1.73	0	0	3.39	1.34	2.23	3.930	5.180	4.550
27.38	0.774	0	0	3.14	0.52	1.97	3.940	4.980	4.060
30.07	0.165	0	0	2.91	0.10	1.60	3.640	4.710	3.690
33	0.015	0	0	2.74	0.01	1.12	3.320	4.410	3.420
36.24	0	0	0	2.61	0.00	0.60	3.380	4.160	2.870
39.77	0	0	0	2.50	0.00	0.22	3.860	3.970	1.270
43.66	0	0	0	2.34	0.00	0.04	3.980	3.650	0.117
47.93	0	0	0	2.07	0.00	0.00	3.140	2.890	0.000
52.63	0	0	0	1.66	0.00	0.00	2.330	1.820	0.000
57.77	0	0	0	1.14	0.00	0.00	2.320	0.932	0.000
63.41	0	0	0	0.59	0.00	0.00	2.180	0.423	0.000
69.62	0	0	0	0.21	0.00	0.00	0.918	0.123	0.000
76.43	0	0	0	0.04	0.00	0.00	0.075	0.009	0.000
83.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
92.09	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
101.1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
111	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
121.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
133.7	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
146.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000

ANEXO 5.

A5-B RESULTADOS DE LA DTP. COAGULANTE PAX XL 19.
Dispersión de Luz Láser

	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L
Channel	Diff.								
Diameter	Volume								
(Lower)	%	%	%	%	%	%	%	%	%
µm									
0.040	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.044	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.048	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.053	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.058	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.064	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.070	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
0.077	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.00	0.000	0.002	0.003
0.084	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.00	0.000	0.001	0.001
0.093	0.000	0.000	0.000	0.01	0.00	0.00	0.000	0.003	0.004
0.102	0.000	0.000	0.000	0.02	0.00	0.00	0.000	0.007	0.007
0.112	0.000	0.000	0.000	0.03	0.01	0.00	0.000	0.013	0.011
0.123	0.000	0.000	0.000	0.04	0.01	0.00	0.000	0.020	0.016
0.134	0.000	0.000	0.000	0.05	0.02	0.00	0.000	0.030	0.023
0.148	0.000	0.000	0.000	0.06	0.04	0.00	0.000	0.043	0.032
0.162	0.000	0.000	0.000	0.08	0.06	0.00	0.000	0.058	0.043
0.178	0.000	0.000	0.000	0.09	0.08	0.00	0.003	0.076	0.055
0.195	0.000	0.000	0.000	0.11	0.10	0.00	0.003	0.098	0.070
0.214	0.000	0.000	0.000	0.14	0.13	0.00	0.011	0.123	0.087
0.235	0.000	0.000	0.000	0.16	0.17	0.02	0.021	0.151	0.105
0.258	0.000	0.000	0.007	0.19	0.21	0.06	0.036	0.183	0.126
0.284	0.000	0.000	0.093	0.22	0.26	0.12	0.056	0.217	0.148
0.311	0.000	0.000	0.495	0.25	0.30	0.19	0.080	0.254	0.171
0.342	0.000	0.000	1.720	0.28	0.36	0.27	0.106	0.292	0.196
0.375	0.315	3.9	3.91	0.31	0.41	0.35	0.135	0.332	0.222
0.412	0.557	6.73	6.8	0.34	0.46	0.44	0.164	0.373	0.247
0.452	0.808	9.74	9.49	0.37	0.52	0.53	0.192	0.414	0.273
0.496	1.13	10.72	10.94	0.40	0.57	0.60	0.216	0.454	0.299
0.545	1.36	9.92	10.69	0.42	0.63	0.66	0.236	0.491	0.323
0.598	1.53	7.65	8.43	0.45	0.68	0.70	0.251	0.528	0.345
0.657	1.66	4.72	5.34	0.47	0.72	0.72	0.260	0.561	0.366
0.721	1.75	1.67	2.5	0.50	0.76	0.72	0.263	0.590	0.384
0.791	1.78	0.138	0.753	0.52	0.80	0.69	0.261	0.615	0.398
0.869	1.75	0	0.148	0.53	0.82	0.66	0.256	0.635	0.410
0.953	1.68	0	0.011	0.55	0.84	0.62	0.249	0.651	0.417
1.047	1.59	0	0	0.56	0.85	0.58	0.245	0.662	0.420
1.149	1.49	0	0	0.58	0.86	0.55	0.244	0.667	0.420
1.261	1.39	0	0.005	0.60	0.85	0.53	0.250	0.667	0.416
1.385	1.31	0.013	0.101	0.62	0.84	0.55	0.264	0.665	0.410
1.52	1.26	0.504	0.629	0.64	0.83	0.59	0.287	0.661	0.402
1.669	1.25	3.2	2.27	0.67	0.82	0.65	0.317	0.655	0.395
1.832	1.3	7.41	5.27	0.71	0.80	0.73	0.355	0.647	0.388
2.01	1.39	10.05	8.38	0.76	0.79	0.82	0.397	0.640	0.385
2.207	1.52	10.23	9.2	0.83	0.79	0.91	0.441	0.636	0.387
2.423	1.7	7.91	7.25	0.90	0.81	0.99	0.488	0.636	0.398
2.66	1.92	4.25	3.94	0.99	0.84	1.05	0.535	0.638	0.420
2.92	2.17	1.17	1.3	1.10	0.88	1.09	0.587	0.645	0.455
3.206	2.44	0.077	0.279	1.22	0.95	1.12	0.645	0.660	0.508
3.519	2.72	0	0.024	1.37	1.05	1.14	0.715	0.687	0.582
3.862	2.99	0	0	1.53	1.18	1.18	0.801	0.726	0.681
4.241	3.26	0	0	1.70	1.34	1.26	0.909	0.773	0.807
4.656	3.51	0	0	1.90	1.53	1.38	1.040	0.833	0.962
5.111	3.72	0	0	2.11	1.74	1.55	1.200	0.908	1.150
5.611	3.84	0	0	2.33	1.99	1.78	1.380	1.010	1.370
6.158	3.89	0	0	2.55	2.27	2.07	1.590	1.120	1.620
6.761	3.88	0	0	2.78	2.57	2.42	1.830	1.250	1.910
7.421	3.8	0	0	3.01	2.88	2.82	2.070	1.400	2.220
8.147	3.63	0	0	3.23	3.22	3.22	2.330	1.580	2.570
8.944	3.35	0	0	3.44	3.58	3.61	2.590	1.800	2.950
9.819	3.01	0	0	3.62	3.97	3.97	2.840	2.080	3.350

ANEXO 5.

A5-B RESULTADOS DE LA DTP. COAGULANTE PAX XL 19.
Dispersión de Luz Láser

	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L	100 µmAl/L	200 µmAl/L	300 µmAl/L
Channel	Diff.								
Diameter	Volume								
(Lower)	%	%	%	%	%	%	%	%	%
µm									
10.78	2.71	0	0	3.77	4.37	4.33	3.070	2.390	3.750
11.83	2.59	0	0	3.88	4.77	4.71	3.280	2.750	4.130
12.99	2.73	0	0	3.94	5.14	5.10	3.460	3.170	4.470
14.26	3.09	0	0	3.93	5.50	5.40	3.620	3.680	4.720
15.65	3.52	0	0	3.86	5.81	5.45	3.750	4.260	4.850
17.18	3.73	0	0	3.73	6.01	5.12	3.840	4.780	4.810
18.86	2.96	0	0	3.58	5.95	4.40	3.870	5.120	4.560
20.7	1.6	0	0	3.45	5.47	3.43	3.850	5.240	4.160
22.73	0.387	0	0	3.37	4.52	2.48	3.780	5.200	3.710
24.95	0.04	0	0	3.29	3.10	1.79	3.690	5.150	3.370
27.38	0	0	0	3.15	1.58	1.45	3.560	5.230	3.270
30.07	0	0	0	2.91	0.51	1.44	3.380	5.400	3.420
33	0	0	0	2.54	0.08	1.66	3.160	5.570	3.750
36.24	0	0	0	2.10	0.00	1.94	2.970	5.410	4.060
39.77	0	0	0	1.69	0.00	2.11	2.900	4.080	4.100
43.66	0	0	0	1.36	0.00	2.02	2.950	2.150	3.670
47.93	0	0	0	1.14	0.00	1.67	2.930	0.517	2.730
52.63	0	0	0	0.95	0.00	1.05	2.530	0.055	1.500
57.77	0	0	0	0.66	0.00	0.45	1.890	0.000	0.524
63.41	0	0	0	0.33	0.00	0.10	1.490	0.000	0.090
69.62	0	0	0	0.08	0.00	0.01	1.490	0.000	0.005
76.43	0	0	0	0.01	0.00	0.00	1.640	0.000	0.000
83.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	1.680	0.000	0.000
92.09	0	0	0	0.00	0.00	0.00	1.730	0.000	0.000
101.1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	1.570	0.000	0.000
111	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.688	0.000	0.000
121.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.060	0.000	0.000
133.7	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
146.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
161.2	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
176.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
194.2	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
213.2	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
234.1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
256.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
282.1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
309.6	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
339.8	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
373.1	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
409.6	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
449.7	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
493.6	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
541.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
594.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
653	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
716.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
786.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
863.9	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
948.2	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,041	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,143	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,255	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,377	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,512	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,660	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
1,822	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2,000	100.007	100.002	99.975	100.03	100.01	100.00	99.977	100.013	100.007

ANEXO 5.

A5-C. RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA RÁPIDA.

Dispersión de Luz Láser

Channel	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60s	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60s
Diameter	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	%	Diff.
(Lower)	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume		Volume
µm	%	%	%	%	%	%	%	0.000	%
0.040	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.044	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.048	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.053	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.058	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.064	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.070	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.077	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
0.084	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	1.43	0.000	0.00
0.093	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.97	0.000	0.00
0.102	0.000	0.000	0.01	0.000	0.01	0.00	0.54	0.000	0.00
0.112	0.000	0.000	0.01	0.000	0.01	0.00	0.24	0.000	0.00
0.123	0.000	0.000	0.02	0.000	0.02	0.00	0.07	0.000	0.00
0.134	0.000	0.000	0.04	0.000	0.04	0.00	0.01	0.000	0.00
0.148	0.000	0.000	0.05	0.000	0.05	0.00	0.00	0.000	0.00
0.162	0.000	0.000	0.07	0.000	0.07	0.00	0.00	0.000	0.00
0.178	0.000	0.000	0.10	0.000	0.10	0.00	0.00	0.000	0.00
0.195	0.000	0.000	0.13	0.000	0.13	0.01	0.00	0.000	0.00
0.214	0.000	0.000	0.16	0.000	0.16	0.04	0.00	0.000	0.00
0.235	0.000	0.000	0.20	0.000	0.20	0.07	0.00	0.000	0.01
0.258	0.000	0.000	0.25	0.000	0.25	0.11	0.00	0.000	0.03
0.284	0.000	0.003	0.29	0.000	0.29	0.15	0.00	0.000	0.07
0.311	0.000	0.018	0.34	0.000	0.34	0.21	0.00	0.1	0.13
0.342	0.000	0.151	0.39	0.000	0.39	0.27	0.01	0.178	0.18
0.375	3.47	0.669	0.44	3.16	0.44	0.33	0.14	0.26	0.24
0.412	6.14	1.98	0.50	5.52	0.50	0.40	0.72	0.366	0.30
0.452	8.76	3.98	0.55	8.07	0.55	0.46	2.39	0.449	0.36
0.496	9.61	6.29	0.59	9.05	0.59	0.52	5.10	0.515	0.41
0.545	8.71	7.99	0.64	8.58	0.64	0.58	8.15	0.569	0.44
0.598	6.57	8.43	0.68	6.87	0.68	0.62	10.42	0.616	0.45
0.657	3.77	7.44	0.71	4.53	0.71	0.66	10.80	0.647	0.45
0.721	1.05	5.29	0.73	1.94	0.73	0.68	9.53	0.662	0.44
0.791	0.063	2.99	0.75	0.309	0.75	0.70	6.89	0.664	0.40
0.869	0	1.2	0.76	0.007	0.76	0.70	4.01	0.659	0.36
0.953	0	0.321	0.75	0	0.75	0.70	1.78	0.652	0.31
1.047	0	0.052	0.75	0	0.75	0.69	0.51	0.643	0.28
1.149	0	0.003	0.73	0	0.73	0.67	0.14	0.637	0.26
1.261	0	0.004	0.71	0	0.71	0.67	0.11	0.639	0.26
1.385	0	0.064	0.69	0.04	0.69	0.66	0.35	0.654	0.29
1.520	0.026	0.368	0.68	0.783	0.68	0.66	1.23	0.686	0.34
1.669	0.564	1.34	0.67	3.22	0.67	0.67	2.77	0.734	0.43
1.832	2.77	3.19	0.67	5.96	0.67	0.69	4.50	0.8	0.54
2.010	6.24	5.64	0.69	7.77	0.69	0.71	5.45	0.886	0.67
2.207	8.95	8.25	0.72	8.52	0.72	0.74	4.85	0.99	0.80
2.423	9.86	10.09	0.79	8	0.79	0.77	3.22	1.11	0.92
2.660	9.8	9.79	0.88	7.34	0.88	0.80	1.52	1.25	1.02
2.920	8.93	7.76	1.01	6.71	1.01	0.84	0.46	1.41	1.12
3.206	4.3	4.59	1.18	3.28	1.18	0.89	0.09	1.57	1.20
3.519	0.417	1.65	1.39	0.318	1.39	0.95	0.01	1.74	1.28
3.862	0	0.41	1.64	0	1.64	1.03	0.00	1.93	1.37
4.241	0	0.042	1.93	0	1.93	1.14	0.00	2.12	1.50
4.656	0	0	2.25	0	2.25	1.29	0.00	2.32	1.66
5.111	0	0	2.60	0	2.60	1.49	0.00	2.53	1.86
5.611	0	0	2.97	0	2.97	1.74	0.00	2.74	2.08
6.158	0	0	3.36	0	3.36	2.06	0.00	2.95	2.31
6.761	0	0	3.75	0	3.75	2.45	0.00	3.18	2.52
7.421	0	0	4.13	0	4.13	2.89	0.00	3.4	2.71
8.147	0	0	4.48	0	4.48	3.37	0.00	3.6	2.86
8.944	0	0	4.80	0	4.80	3.90	0.00	3.77	2.94
9.819	0	0	5.07	0	5.07	4.43	0.00	3.9	2.92
10.780	0	0	5.26	0	5.26	4.92	0.00	3.97	2.77
11.830	0	0	5.34	0	5.34	5.26	0.00	3.96	2.55
12.990	0	0	5.31	0	5.31	5.35	0.00	3.87	2.37
14.260	0	0	5.19	0	5.19	5.18	0.00	3.71	2.36

ANEXO 5.

A5-C. RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA RÁPIDA.

Dispersión de Luz Láser

Channel	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60s	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60	460 s-1 15 s	460 s-1 30 s	460 s-1 60s
Diameter	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	%	Diff.
(Lower)	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume		Volume
µm	%	%	%	%	%	%	%	0.000	%
15.650	0	0	4.95	0	4.95	4.78	0.00	3.56	2.58
17.180	0	0	4.59	0	4.59	4.32	0.00	3.49	3.02
18.860	0	0	4.04	0	4.04	3.93	0.00	3.55	3.52
20.700	0	0	3.29	0	3.29	3.65	0.00	3.72	3.86
22.730	0	0	2.38	0	2.38	3.43	0.00	3.92	3.88
24.950	0	0	1.34	0	1.34	3.15	0.00	3.96	3.58
27.380	0	0	0.52	0	0.52	2.70	0.00	3.71	3.17
30.070	0	0	0.10	0	0.10	2.10	0.00	3.08	2.89
33.000	0	0	0.01	0	0.01	1.47	0.00	1.96	2.89
36.240	0	0	0.00	0	0.00	0.99	0.00	0.849	3.23
39.770	0	0	0.00	0	0.00	0.76	0.00	0.177	3.74
43.660	0	0	0.00	0	0.00	0.77	0.00	0.015	4.11
47.930	0	0	0.00	0	0.00	0.96	0.00	0	4.05
52.630	0	0	0.00	0	0.00	1.15	0.00	0	3.40
57.770	0	0	0.00	0	0.00	1.00	0.00	0	2.16
63.410	0	0	0.00	0	0.00	0.57	0.00	0	0.94
69.620	0	0	0.00	0	0.00	0.14	0.00	0	0.20
76.430	0	0	0.00	0	0.00	0.02	0.00	0	0.02
83.900	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0	0.00

ANEXO 5.

A5-D RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA LENTA

Dispersión de Luz Láser

Channel	40s-1, 5 min	40s-1, 5 min	40s-1, 5 min	40 s-1, 10 m	40 s-1, 10 mir	40 s-1, 10 mir	40 s-1, 15 mir	40 s-1, 15 mir	40 s-1, 15 mir
Diameter	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.
[Lower]	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume
µm	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.044	0.000	0.004	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.048	0.000	0.008	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.053	0.000	0.016	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.058	0.000	0.031	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.064	0.000	0.048	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.070	0.000	0.065	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.077	0.000	0.082	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.084	0.000	0.101	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.093	0.000	0.125	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.102	0.000	0.152	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.112	0.000	0.182	0.000	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.123	0.000	0.216	0.000	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.134	0.000	0.255	0.000	0.02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.148	0.000	0.300	0.000	0.03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.162	0.000	0.349	0.000	0.05	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.178	0.000	0.401	0.000	0.07	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.195	0.000	0.459	0.000	0.09	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000
0.214	0.000	0.520	0.000	0.12	0.000	0.000	0.007	0.003	0.000
0.235	0.000	0.585	0.000	0.16	0.000	0.000	0.021	0.010	0.000
0.258	0.000	0.648	0.000	0.20	0.000	0.000	0.042	0.021	0.000
0.284	0.000	0.712	0.000	0.24	0.003	0.000	0.072	0.035	0.000
0.311	0.000	0.774	0.000	0.29	0.034	0.000	0.112	0.054	0.000
0.342	0.000	0.833	0.000	0.34	0.112	0.000	0.159	0.077	0.000
0.375	0.161	0.885	0.161	0.40	0.221	0.000	0.212	0.103	0.009
0.412	0.284	0.93	0.284	0.45	0.365	3.04	0.268	0.130	0.040
0.452	0.416	0.967	0.416	0.51	0.529	5.41	0.324	0.158	0.091
0.496	0.587	0.995	0.587	0.57	0.698	8.03	0.376	0.184	0.160
0.545	0.722	1.01	0.722	0.63	0.851	9.27	0.420	0.208	0.233
0.598	0.83	1.01	0.83	0.68	0.968	9.14	0.454	0.227	0.299
0.657	0.916	1.01	0.916	0.74	1.030	7.83	0.475	0.241	0.345
0.721	0.992	0.993	0.992	0.79	1.030	5.71	0.482	0.249	0.362
0.791	1.04	0.972	1.04	0.83	0.971	3.34	0.475	0.252	0.347
0.869	1.07	0.944	1.07	0.86	0.857	1.12	0.457	0.249	0.303
0.953	1.06	0.916	1.06	0.89	0.708	0.089	0.431	0.243	0.238
1.047	1.04	0.896	1.04	0.91	0.551	0	0.403	0.236	0.164
1.149	1.01	0.888	1.01	0.92	0.415	0	0.378	0.229	0.094
1.261	0.98	0.895	0.98	0.92	0.328	0	0.364	0.225	0.045
1.385	0.941	0.921	0.941	0.91	0.308	0	0.364	0.226	0.026
1.520	0.902	0.971	0.902	0.89	0.363	0.14	0.384	0.234	0.038
1.669	0.876	1.05	0.876	0.87	0.495	1.76	0.425	0.249	0.082
1.832	0.874	1.16	0.874	0.83	0.691	4.97	0.486	0.270	0.151
2.010	0.893	1.29	0.893	0.80	0.925	7.52	0.565	0.297	0.227
2.207	0.931	1.45	0.931	0.75	1.160	8.98	0.657	0.326	0.290
2.423	0.986	1.63	0.986	0.70	1.380	8.74	0.756	0.358	0.325
2.660	1.07	1.83	1.07	0.65	1.560	7	0.859	0.389	0.328
2.920	1.19	2.03	1.19	0.59	1.710	4.77	0.963	0.422	0.306
3.206	1.33	2.24	1.33	0.54	1.840	2.46	1.070	0.457	0.275
3.519	1.51	2.43	1.51	0.50	1.980	0.636	1.190	0.499	0.253
3.862	1.68	2.61	1.68	0.46	2.160	0.037	1.320	0.551	0.252
4.241	1.88	2.76	1.88	0.44	2.410	0	1.470	0.620	0.275
4.656	2.11	2.89	2.11	0.45	2.720	0	1.660	0.709	0.319
5.111	2.38	2.97	2.38	0.47	3.130	0	1.890	0.823	0.373
5.611	2.65	3	2.65	0.53	3.630	0	2.160	0.964	0.426
6.158	2.92	3	2.92	0.63	4.240	0	2.470	1.130	0.471
6.761	3.21	2.99	3.21	0.78	4.960	0	2.820	1.330	0.508
7.421	3.56	2.99	3.56	0.97	5.790	0	3.200	1.560	0.543
8.147	3.99	2.99	3.99	1.23	6.720	0	3.580	1.810	0.588
8.944	4.43	2.99	4.43	1.56	7.620	0	3.940	2.100	0.653
9.819	4.88	3.05	4.88	1.97	8.320	0	4.250	2.410	0.747
10.780	5.32	3.23	5.32	2.48	8.530	0	4.500	2.760	0.873
11.830	5.84	3.57	5.84	3.09	7.840	0	4.680	3.140	1.040

ANEXO 5.

A5-D RESULTADOS DE LA DTP. MEZCLA LENTA

Dispersión de Luz Láser

Channel	40s-1, 5 min	40s-1, 5 min	40s-1, 5 min	40 s-1, 10 m	40 s-1, 10 min	40 s-1, 10 min	40 s-1, 15 min	40 s-1, 15 min	40 s-1, 15 min
Diameter	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.
(Lower)	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume	Volume
µm	%	%	%	%	%	%	%	%	%
12.990	6.43	4.08	6.43	3.76	6.450	0	4.810	3.540	1.260
14.260	6.86	4.6	6.86	4.47	3.080	0	4.950	3.970	1.610
15.650	6.84	4.91	6.84	5.15	0.316	0	5.160	4.380	2.150
17.180	6.02	4.69	6.02	5.73	0.000	0	5.460	4.710	2.910
18.860	4.05	3.39	4.05	6.11	0.000	0	5.860	4.910	3.720
20.700	1.88	1.66	1.88	6.17	0.000	0	6.160	4.910	4.450
22.730	0.414	0.379	0.414	5.83	0.000	0	6.040	4.730	5.240
24.950	0.04	0.036	0.04	5.09	0.000	0	5.230	4.440	6.320
27.380	0	0	0	4.11	0.000	0	3.490	4.120	7.480
30.070	0	0	0	3.13	0.000	0	1.190	3.830	8.200
33.000	0	0	0	2.39	0.000	0	0.090	3.590	8.260
36.240	0	0	0	2.01	0.000	0	0.000	3.430	7.780
39.770	0	0	0	1.95	0.000	0	0.000	3.320	7.130
43.660	0	0	0	2.10	0.000	0	0.000	3.150	6.820
47.930	0	0	0	2.23	0.000	0	0.000	2.800	6.810
52.630	0	0	0	2.12	0.000	0	0.000	2.290	5.590
57.770	0	0	0	1.62	0.000	0	0.000	1.830	2.170
63.410	0	0	0	0.89	0.000	0	0.000	1.570	0.000
69.620	0	0	0	0.29	0.000	0	0.000	1.350	0.000
76.430	0	0	0	0.05	0.000	0	0.000	1.030	0.000
83.900	0	0	0	0.00	0.000	0	0.000	1.040	0.000
101.100	0	0	0	0.00	0.000	0	0.000	1.630	0.000

ANEXO A-6. TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN AGUAS RESIDUALES

La determinación del tamaño de partícula (TP) de los contaminantes presentes en el agua residual puede emplearse para evaluar la tratabilidad y eficiencia de los procesos de tratamiento. El tamaño de las partículas ha sido considerado como el factor más importante durante el transporte de la masa en medios acuáticos (O'Melia, *et al.*, 1997), de hecho, las eficiencias determinadas en las diversas operaciones unitarias (sedimentación, floculación y filtración) están estrechamente relacionadas con la concentración de los contaminantes y el tamaño de las partículas presentes. Por ejemplo, en un sistema biológico, la velocidad de transporte de la masa, la hidrólisis y su metabolismo dependen en gran medida del tamaño de partícula presente en el medio acuoso. Así mismo, las limitaciones cinéticas para la degradación de partículas orgánicas, son el resultado de velocidades lentas de transferencia de masa, poca solubilidad o un pobre proceso de hidrólisis. (Levine *et al.*, 1991 y O'Melia *et al.*, 1997). El desempeño de los procesos de tratamiento químico tales como la coagulación y la desinfección también dependen del tamaño de la partícula. En diversas investigaciones se ha encontrado que las partículas mayores de 8 μm pueden interferir en el proceso de desinfección (Berman *et al.*, 1988, Qualls *et al.*, 1983 en Levine *et al.*, 1991).

Aún cuando las características del agua residual han sido ampliamente investigadas, hasta ahora, no existe ningún proceso estandarizado para cuantificar la distribución del tamaño de partículas presentes en el agua residual (Levine *et al.*, 1991).

De acuerdo con Levine *et al.*, 1991, la **partícula** es una subunidad discreta de materia. Phelps en 1966, la definió como una esfera rígida, lisa, completamente dispersa en una concentración baja y moviéndose a una velocidad lenta a través del medio donde se encuentra suspendida. Por su parte Irani & Clayton, 1963, describieron a la **partícula** de una substancia como el estado de subdivisión de la materia que tiene cierta forma la cual depende de los procesos por los cuales ha sido formada y presenta fuerzas de unión intramolecular, por tanto, dicha partícula puede ser un simple cristal, una gota líquida o un material amorfo (Figura A6.1). Groves, 1979, describió a la **partícula** como una porción discreta de materia que puede ser pequeña en relación al espacio en el cual esta dispersa, pero no necesariamente pequeña en tamaño absoluto; bajo estas condiciones, la partícula es un punto de origen de materia en un espacio no limitado. Finalmente, Riyad and Clayton en 1963 la definen como el estado de subdivisión de la materia.

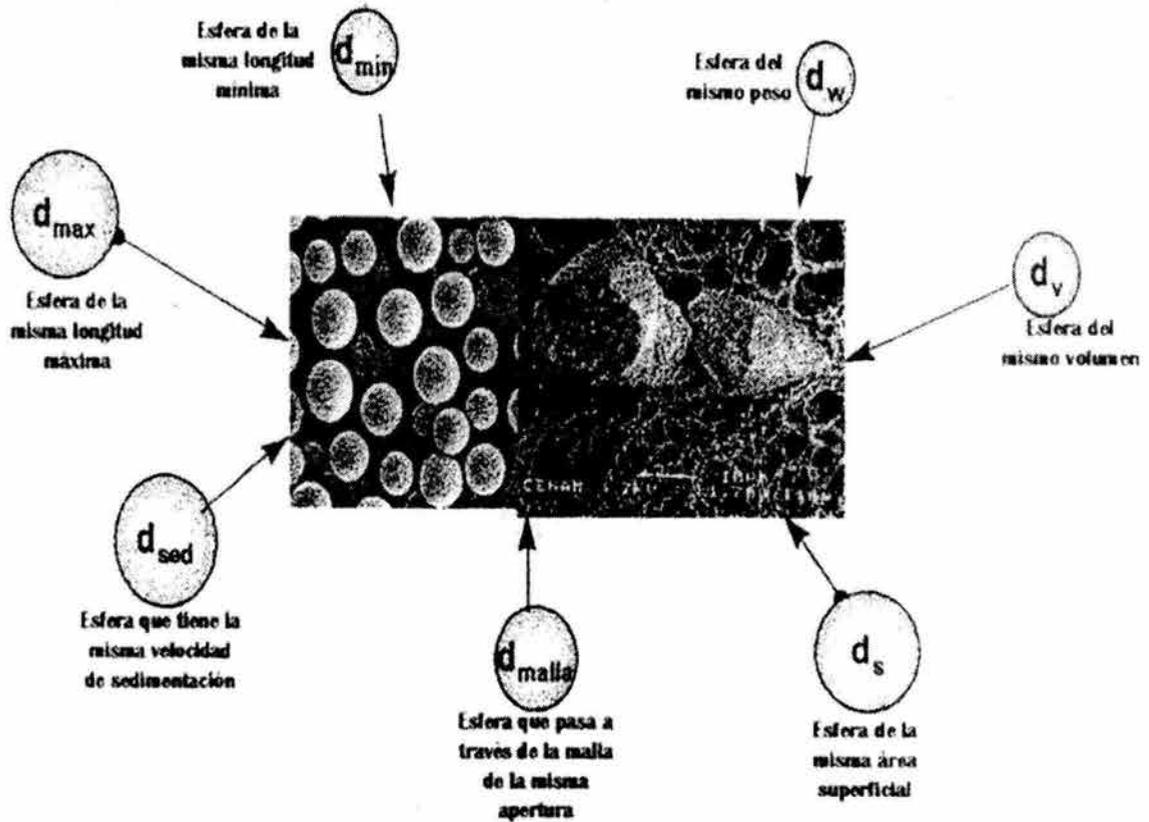


Figura A6.1. Diversas formas por las que se representa a una partícula, Allen, 1997

En un estudio de tamaño de partícula se deben tener en cuenta otros conceptos importantes como son el de **agregado** y **aglomerado**. El primero, es definido como una partícula o un conjunto de partículas sobrepuestas y unidas por fuerzas cohesivas inter o intramoleculares (Riyad and Clayton, 1963) y que pueden ser dispersas al aplicarles una velocidad de mezclado y/o ultrasonido, otra definición empleada es la de un conjunto de polvos o partículas que están definidas juntas o deformadas de tal manera que no hay un límite físico separando las partes de las partículas, mientras que el **aglomerado** está compuesto por dos o más partículas y/o agregados que tienen una relativa fuerza de cohesión (carga superficial electrostática), es decir que tiene límites físicos entre las partículas que forman dicho polvo.

El **tamaño de la partícula** es una representación numérica de la extensión física de la partícula. Solo en caso de una esfera perfecta el tamaño de la partícula puede representarse por una simple dimensión. El tamaño depende del método de promedio utilizado, por ejemplo para una partícula de forma irregular suele tomarse en cuenta el diámetro máximo (d_{max}) y el diámetro mínimo (d_s) medidos, el valor de la partícula se encuentra localizada entre este intervalo (Riyad and Clayton, 1963 y Collins *et al.*, 1975).

ANEXO A – 6

Diversas propiedades físicas son tomadas como referencia para caracterizar el tamaño de una partícula individual (sólo si la relación entre ellas presenta un comportamiento unimodal) las cuales pueden ser (UEICH, 1999):

- La dimensión linear
- El área superficial y/o proyectada
- El volumen
- La masa
- La velocidad de sedimentación y
- La respuesta de un campo eléctrico, óptico o acústico

Para cuantificar una partícula es necesario definir dos características presentes en ella: **la forma y la proporción**. La **forma** es referida como el grado con el cual una partícula se aproxima a un cubo, un tetraedro o una esfera y esta relacionada con el origen de la misma y los tipos de operaciones y procesos a los cuales ha sido expuesta, por ejemplo, la floculación, la precipitación o el crecimiento biológico, la amplia variación de la forma de las partículas se debe principalmente a la carencia de su rigidez (Allen, 1980, Riyad and Clayton, 1963).

La mayoría de veces, las partículas presentes en el agua residual tienden a ser de forma irregular (Levine *et al.*, 1985), por lo que la evaluación de su forma y la distribución del tamaño es muy difícil de cuantificar, por esa razón, el tamaño medido por alguna de las técnicas establecidas sólo puede ser aproximado, por lo que el concepto usado es llamado **diámetro o tamaño equivalente (o promedio)**, y se encuentra definido como el diámetro de una esfera que produce el mismo valor de cierta propiedad física cuando es analizada bajo las mismas condiciones teniendo una forma irregular y representada como (Levine, 1991 y UEICH, 1999):

$$X_{AS} > X_{AM} > X_S > X_A > X_V > X_W \quad (1)$$

- X_A Diámetro equivalente del área proyectada
- X_S Diámetro equivalente de un área superficial
- X_{AM} Diámetro equivalente del área proyectada para la posición promedio de la partícula
- X_{AS} Diámetro equivalente del área proyectada para la posición estable de la partícula
- X_V Diámetro equivalente del volumen
- X_W Diámetro equivalente de la velocidad de sedimentación

Las expresiones matemáticas de cada uno de estos diámetros se presentan en la Tabla A6.1. La forma de cálculo está estrechamente relacionado con el método de medición del diámetro, sin embargo, la media geométrica promedio (dg), es la medida más exacta para cuantificar el diámetro de una partícula presente en el agua residual, no obstante, el uso de los parámetros encontrados en la Tabla A6.1) variarán de acuerdo a las necesidades de medición, por ejemplo, para evaluar la eficiencia de un sistema de desinfección la expresión más recomendado es la medición diámetro promedio de la superficie mientras que el diámetro promedio de la masa deberá ser usado si en un sistema de tratamiento de aguas residuales la remoción de SST es el parámetro más importante. En general la

ANEXO A – 6

siguiente relación es verdadera para cuantificar el diámetro de las partículas presentes en el agua residual:

$$d_g \leq \bar{d}_{mg} \leq d_v \leq d_{sm} \leq d_{vm} \quad (2)$$

Tabla A6.1. Promedios alternativos de los diámetros de partícula^a

Parámetros	Expresión ^b
Diámetro promedio	$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{N}$
Promedio de la cuenta del diámetro	$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i}{\sum_{i=1}^n n_i}$
Diámetro promedio de la masa	$d_{mas} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i d_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$
Diámetro geométrico promedio	$d_g = \text{Exp} \left(\frac{\sum_{i=1}^n n_i / nd_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \right)$
Diámetro promedio de la relación geometría-masa	$d_{mg} = \text{exp} \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i / nd_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right)$
Diámetro promedio de la superficie	$d_{sm} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (n_i d_i)^2}{\sum_{i=1}^n n_i} \right)^{\frac{1}{2}}$
Diámetro promedio del volumen	$d_{sv} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (n_i d_i)^3}{\sum_{i=1}^n n_i} \right)^{\frac{1}{3}}$
Diámetro de la relación superficie-volumen	$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
Diámetro de Stoke	$d_s = \sqrt{\frac{18\mu v_s}{(\rho_p - \rho_f)g}}$
Diámetro de Sauter	$d_{saut} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2}$
Diámetro estadístico de Ferret (diámetro promedio perimétrico)	$\bar{d}_{perim} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i p_i}{\sum_{i=1}^n n_i}$

ANEXO A – 6

Parámetros	Expresión ^b
Promedio geométrico de los diámetros (M1)	$\left(\prod_{di=ds}^{dm} \right)^{1/n}$
Promedio Aritmético de los diámetros (M2) (métodos de sedimentación)	$\frac{1}{n} \sum_{di=di}^{dm} di$
Promedio Armónico de los diámetros (M3)	$\left(\frac{1}{n} \sum_{di=ds}^{dm} \frac{1}{di} \right)^{-1}$

^aFuente adaptada de Allen (1981), Beddow (1980), Hatch and Choate (1929), Leschonki (1984), Meloy (1984), Raabe (1971) and Silverman et al., (1971)

^bN = número de partículas medidas en n intervalo de tamaño y
*d*_m = punto medio del intervalo de partículas
*n*_i = número de partículas en un intervalo de tamaño representadas por *d*_i
 μ = viscosidad del fluido
*m*_i = masa de partículas de un intervalo de tamaño representado por *d*_i
*r*_p = densidad de la partícula
*r*_f = densidad del fluido
*p*_i = perímetro promedio de las partículas en un intervalo de tamaño
n = número de diámetros usados
dm = diámetro máximo utilizado
ds = diámetro mínimo

Si una partícula (esférica) sedimenta lentamente en un medio líquido, el tamaño puede ser calculado a través de la velocidad de sedimentación debido a que ésta puede relacionarse con el diámetro de una esfera (de acuerdo con la ley de Stoke). La mayoría de partículas normalmente no presentan un tamaño único, y el tamaño determinado depende del método que fue empleado para su medición, este tamaño normalmente se relaciona con el tamaño equivalente de una esfera con un diámetro de 1.24 unidades (diámetro del volumen) y la superficie de una esfera de diámetro de 1.38 unidades más un **factor** (de forma); este factor de la forma de la partícula normalmente se evalúa como una relación entre la superficie actual o el volumen de las partículas, valores que pueden ser medidos de manera experimental. (Riyad and Clayton, 1963), el valor del factor de forma siempre es requerido para determinar el promedio estadístico y es independiente del método de medición de las partículas (Lloyd, 1974).

Allen, 1997, sugiere que uno de los factores de forma que puede emplearse para calcular la esfericidad (Ψ) de la partícula esta definido por:

$$\Psi = \left(\frac{(d_{vm})}{(d_{sm})} \right)^2 \quad (3)$$

$$\dot{o} \quad d_{vm} = d_{sm} \Psi^{0.5} = d_s \Psi^{-0.25} \quad (4)$$

donde

*d*_{vm} Diámetro promedio del volumen

*d*_{sm} Diámetro promedio de la superficie

*d*_s Diámetro de Stokes

Para una esfera perfecta, el factor de esfericidad es igual a 6. Las ecuaciones 1 y 2, pueden ser usadas para comparar diferentes representaciones del tamaño de partículas cuando todas presentan la misma densidad. La Figura A6.2 muestra

ANEXO A - 6

los diversos valores del factor de forma que se utilizan en los diversas técnicas de medición de partículas, observándose que dicho factor varía hasta por encima de dos. Para las partículas más irregulares la variación puede ser mayor, pero para los rutinarios análisis de tamaño o distribución esta discrepancia no es importante debido a que el análisis es siempre realizado de la misma manera.

A6.1 Distribución de densidad y distribución acumulada del tamaño de la partícula.

Las partículas presentes en el agua residual por lo general se encuentran en sistemas polidispersos donde la probabilidad de incidencia de una partícula es aleatoria y puede ser medida. El tamaño de partícula reportado de algún material esta regularmente asociado con su frecuencia de ocurrencia (UEICH, 1999, Riyad and Clayton, 1963 Lloyd, 1974). Por lo tanto, la distribución se caracteriza como una cantidad (por ejemplo número, peso, masa de partículas presentes en diversos tamaños de la clase, UEICH, 1999) y dado que una gran variedad de medidas son empleadas para cuantificar el tamaño de partícula (ya que se basan en distintas propiedades que presenta una partícula), los datos obtenidos por las diferentes técnicas no pueden ser:

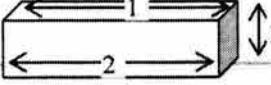
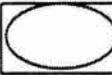
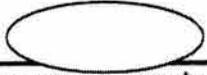
Método de medición	Tipo de diámetro medido	Esferas equivalentes	Valor del diámetro en X unidades
	Partícula verdadera		
Microscopio	Diámetro de área proyectada		$D_a = 1.58$
Microscopio	Diámetro máximo Feret		$d_F = 2.23$
Sedimentación	Diámetro de Stokes		$d_s = 1.43$
Contador Coulter	Volumen del diámetro		$d_v = 1.55$
Tamiz	Tamaño del diámetro de malla		$d = 1$
Contador Hiac	Área superficial		$d = 1.77$

Figura A6.2. Diámetros usados para caracterizar a una partícula

comparadas directamente y por lo tanto, la determinación de la distribución del tamaño de una partícula dependerá de los métodos de medición (UEICH, 1999 y Levine, 1991). Sin embargo, los datos de la distribución del tamaño de partícula suelen clasificarse dentro de dos tipos. El tipo I incluye aquellos datos donde las propiedades de las partículas fueron absolutamente medidos, mientras que en el tipo II los datos son relativamente medidos y son reportados como una distribución de la fracción de la masa, el volumen, o el área superficial de una muestra. Para el caso del agua residual los datos del tipo II son los más

ANEXO A – 6

apropiados. En ambos casos, la media (geométrica o cualquier otra) es la medida de tendencia central y el valor de la variancia representa la dispersión (Levine, 1991).

Si la distribución de tamaño de partícula (DTP) es normal, los datos pueden ser linealizados a través de papeles de probabilidad aritmética (código 3127 o equivalente) o planos de probabilidad logarítmica (código 3129 o equivalente) (estos se usan cuando las medidas resultantes representan un amplio intervalo de valores y la relación entre el valor más grande y el más pequeño es mayor de 10, Levine 1991). Estas estadísticas muestran si la distribución obtenida durante la medición es lo suficientemente estrecha (Collins *et al.*, 1975).

Las mejores distribuciones que pueden aplicarse para la determinación del TP son: la distribución Gaudin-Shuman, la función RRSB (Rison, Rammler, Sperling, Bennett) y la distribución Gaussiana (UEICH, 1999).

a) La Distribución Gaudin-Shumann tiene la siguiente ecuación:

$$Q_3(X) = (x/x_{\max})^m \quad (5)$$

donde:

Q_3 = Distribución acumulada de la masa o el volumen
 x_{\max} = Diámetro máximo
 x = Diámetro
 m = Pendiente de la recta obtenida o representada por la función $\log Q_3 - \log x$
 m = Masa

b) La función RRSB es:

$$1 - Q_3(x) = \exp\left(-\left(x/x'\right)^n\right) \quad (6)$$

donde

x' = Representa el parámetro que debe ser medido
la función $1 - Q_3(x') = e^{-1} = 0.368$
 n = Presenta la pendiente obtenida o representada por la función $\log - \log (1/R)$

b) La Distribución Gaussiana o normal tiene la siguiente ecuación:

$$q_*(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-z^2/2) \quad (7)$$

donde z es una variable dimensional que describe el tamaño de la partícula. La distribución acumulativa se obtiene a partir de:

ANEXO A - 6

$$Q_r^*(z) \int_{-\infty}^z q_r^*(\xi) d\xi \quad (8)$$

ξ = diámetro de una esfera equivalente, velocidad de sedimentación, densidad o forma de una partícula.

3.2 Técnicas de medición del tamaño de partículas

Las técnicas comúnmente empleadas para determinar el tamaño de partícula son las mostradas en la Tabla A6.2 y Figura A6.3. Los criterios de selección dependen en gran medida de las características fisicoquímicas del agua, tamaño de partícula que se requiere medir, la información que se desea obtener, la rapidez con la que se requiera conocer los resultados (Figura A6.4) y costo de los equipos requeridos.

Tabla A6.2. Método de análisis de tamaño de partícula en solución, Lloyd, 1974

Técnicas analíticas comunes	Intervalo aproximado del tamaño de la partícula, μm	Dimensiones
Campo de registro o de exploración (Scanning)		
Microscopio	De 1 hasta 100	Longitud, área
Microscopio electrónico	De 0.001 hasta 5	proyectada, diámetro
Microscopio electrónico con registro (scanning)	De 0.1 hasta 100	
Sedimentación		
Pipetas	De 3 hasta 60	Diámetro de Stoke
Balanzas	----	
Fotosedimentadores	----	
Centrífugas	5 hasta 10	
Corriente de exploración (Scanning)		
Counter coulter	De 1 hasta 100	Volumen, Área
Counter HIAC	De 2 hasta 150	proyectada
Luz dispersa	De 0.3 hasta 10	
Fotometría	----	
Clasificación		
Mallas	De 5 hasta 4000	Tamaño efectivo
Elutriación	---	Diámetro de Stoke
Medidores de Área-Superficie		
Adsorción en gas	} 100 m ² /g	
Adsorción en seco		
Permeabilidad		

ANEXO A - 6

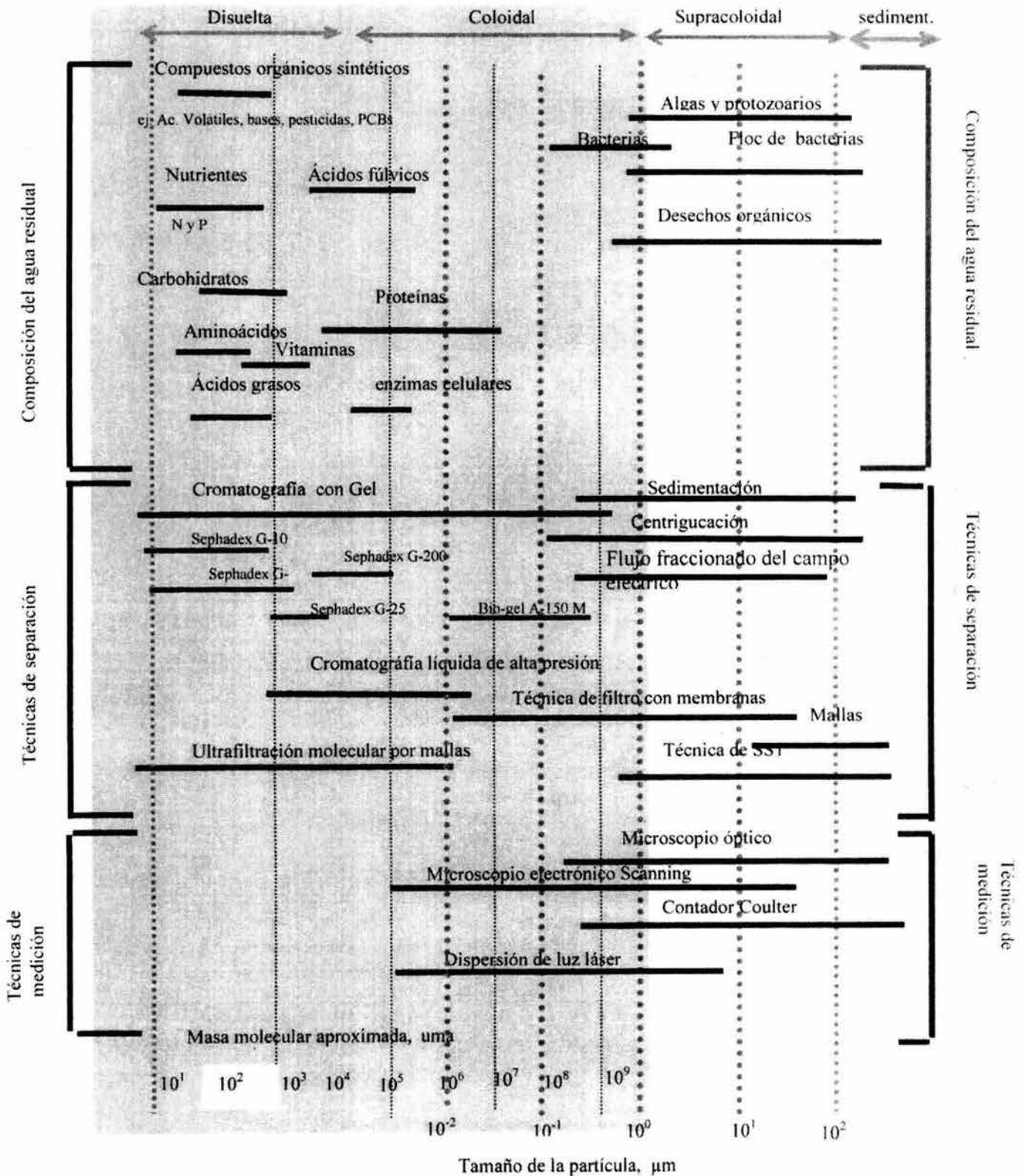


Figura A6.3. Métodos de medición de partícula con base a su tamaño, Levine 1991

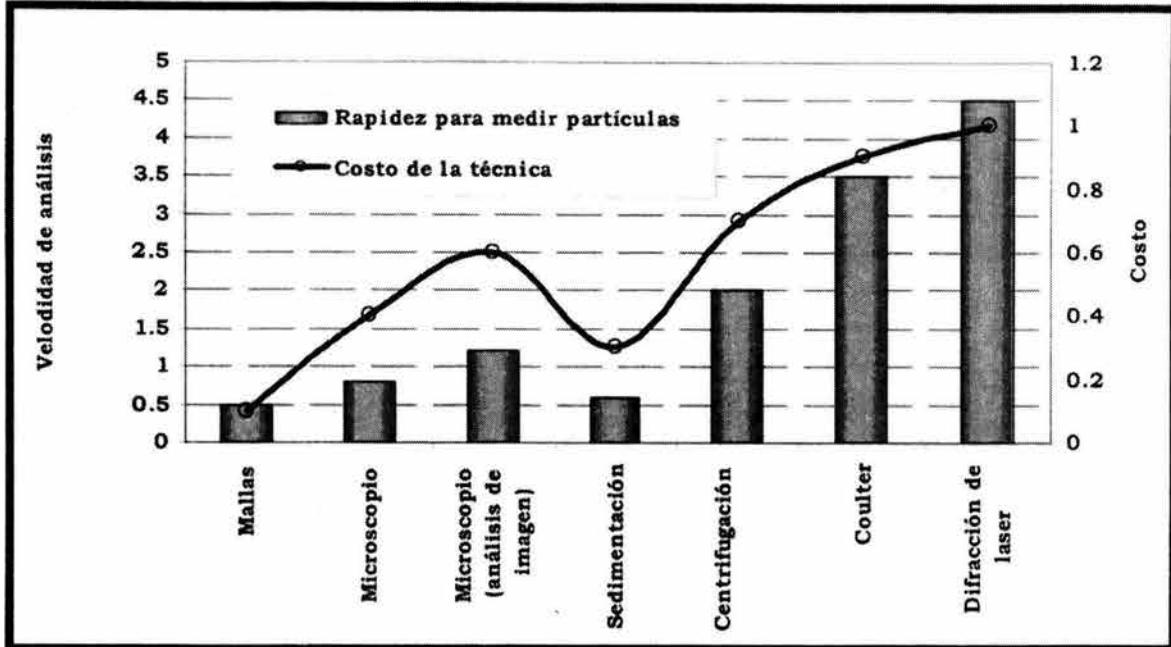


Figura A6-4. Velocidad y costo de análisis de acuerdo con las técnicas

A6.2.1 Técnica de medición de partícula a través de mallas (tamaño efectivo)

El uso de las mallas data de los egipcios, sin embargo, su estandarización fue introducida hasta 1907 y desde entonces ha sido la forma más antigua, simple y ampliamente usada para determinar el tamaño de la partícula (Riyad and Clayton, 1963, Allen, 1997, Collins, 1975). Las mallas son disponibles desde 3/16 pulgadas hasta 45 y 4000 μm , la medición de mallas es conveniente si se requiere medir tamaño de partículas arriba de 44, 75 o 100 μm de acuerdo con Lloyd, 1974, Collins, 1975 y Moergeli and Wiedemann, 1998, respectivamente.

El proceso de separación del material se lleva cabo con un sistema de mallas con aperturas de diversos tamaños que decrecen de arriba hacia abajo. Las mallas son sobrepuestas de tal manera que forman una columna; las partículas pasan a través de las aperturas y son retenidas de acuerdo a su tamaño dentro de las mallas, usualmente el tiempo requerido para esta operación es de 20 minutos. Finalizando este tiempo se pesa la proporción de la muestra retenida en cada malla (Allen, 1980, Riyad and Clayton, 1963, UEICH; 1999, Scarlett, 1980). La Figura A6.5 muestra el diagrama del equipo comúnmente utilizado para la separación de las partículas.

Las mallas usadas para la determinación de tamaño de partícula deben ser estandarizadas y calibradas de acuerdo con el American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards y deben estar certificadas y fabricadas de acuerdo con el ISO 9002.

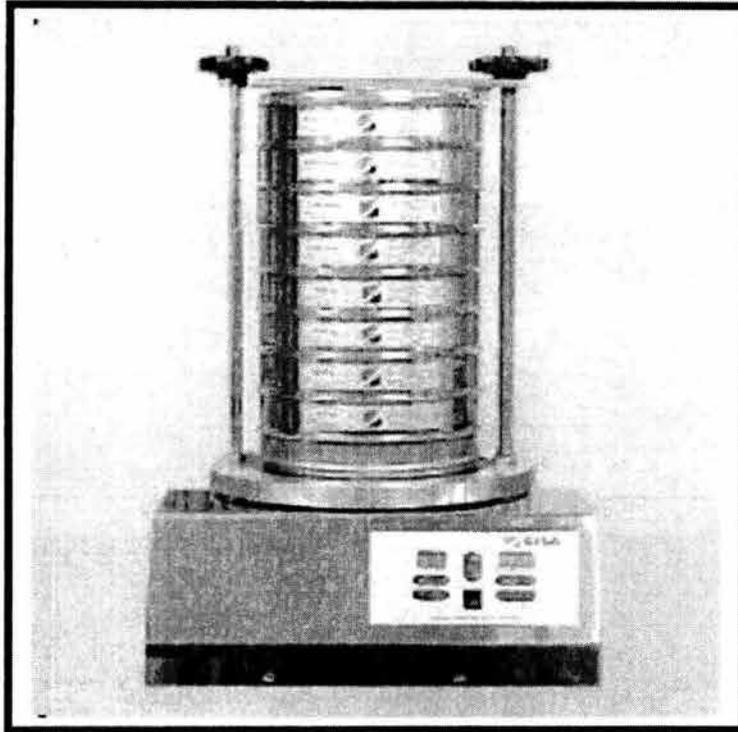


Figura A6.5. Equipo utilizado para determinar TP en mallas

Existe en el mercado un gran número de estas destacando: Tyler sieves Series, British Engineering Standards Association Series, the AFNOR (Association Francaise de Normalisation) de Francia, y la DIN (Deutsche Industrie-Normen) de Alemania, sin embargo, la Serie Tyler y las USA son las más empleadas (Clyde, 1959 y Allen, 1997). La denominación y dimensiones de estas series son mostradas en la Tabla A6.3.

ANEXO A - 6

Tabla A6.3. Serie de mallas estandarizadas (Tyler y Serie United Stated)

USA				Tyler			
Variación permisible , %							
No de malla	Apertura (mm)	Apertura prom (±)	Apertura Max (+)*	Diámetro de alambre	Número de malla	Apertura (mm)	Diámetro del alambre (mm)
3 ½	5.66	3	10	1.28-1.90	3 ½	5.613	1.65
4	4.76	3	10	1.14-1.68	4	4.699	1.65
5	4.0	3	10	1.00-1.47	5	3.962	1.12
6	3.36	3	10	0.87-1.32	6	3.327	0.914
7	2.83	3	10	0.80-1.20	7	2.794	0.833
8	2.38	3	10	0.74-1.10	8	2.362	0.813
10	2.0	3	10	0.68-1.00	9	1.981	0.838
12	1.68	3	10	0.62-0.90	10	1.651	0.889
14	1.41	3	10	0.56-0.80	12	1.397	0.711
16	1.19	3	10	0.50-0.70	14	1.168	0.635
18	1.0	5	15	0.43-0.62	16	0.991	0.597
20	0.840	5	15	0.38-0.55	20	0.833	0.437
25	0.710	5	15	0.33-0.48	24	0.701	0.358
30	0.590	5	15	0.29-0.42	28	0.589	0.318
35	0.500	5	15	0.26-0.37	32	0.495	0.300
40	0.420	5	25	0.23-0.33	35	0.417	0.310
45	0.350	5	25	0.20-0.29	42	0.351	0.254
50	0.297	5	25	0.170-0.053	48	0.295	0.234
60	0.250	5	25	0.149-0.0220	60	0.246	0.179
70	0.210	5	25	0.130-0.187	65	0.208	0.183
80	0.177	6	40	0.114-0.154	80	0.175	0.142
100	0.149	6	40	0.096-0.125	100	0.147	0.107
120	0.125	6	40	0.79-0.103	115	0.124	0.097
140	0.105	6	40	0.063-0.087	150	0.104	0.066
170	0.088	6	40	0.054-0.073	170	0.088	0.061
200	0.074	7	60	0.045-0.061	200	0.074	0.053
230	0.062	7	90	0.039-0.052	250	0.061	0.041
270	0.053	7	90	0.035-0.046	270	0.053	0.041
325	0.044	7	90	0.031-0.040	325	0.043	0.036
400	0.037	7	90	0.023-0.035	400	0.038	0.025

De la No. 18 a la No. 40 no más del 5% de las aperturas exceden la apertura nominal por más de la mitad de las variaciones permisibles en la apertura máxima.

Esta técnica siempre mide el peso de las partículas que fueron separadas en un tamaño de malla constante y con los resultados obtenidos se realiza una función de la distribución en relación con el peso de las partículas (Scarlett, 1980), reportando los resultados como tamaño efectivo. Los sistemas utilizados durante el análisis son dos: el sistema **R, CR y S**, donde R es el porcentaje retenido en la apertura de malla más grande, CR es el porcentaje acumulado retenido en las mallas subsecuentes y S es el porcentaje pasado a través de la malla con la apertura más pequeña. El segundo sistema es denominado **más y menos**, donde el más es el porcentaje retenido en una malla y menos es el porcentaje pasado por las mallas, la Tabla A6.4 muestra un ejemplo de estos dos métodos y la Figura A6.6 su representación gráfica.

ANEXO A – 6

Tabla A6.4 Tamaño efectivo de mallas reportado por dos notaciones comunes, Clayton and Riyad, 1963

R, CR Y S	(porcentaje)	Sistema más menos	(porcentaje)
R+ malla 20	3.0	+ malla 20	3.0
CR + 30	25.0	-20+30	22.0
CR + 40	55.0	-30+40	30.0
CR + 100	96.0	-40+100	41.0
S-100	4.0	-100	4.0

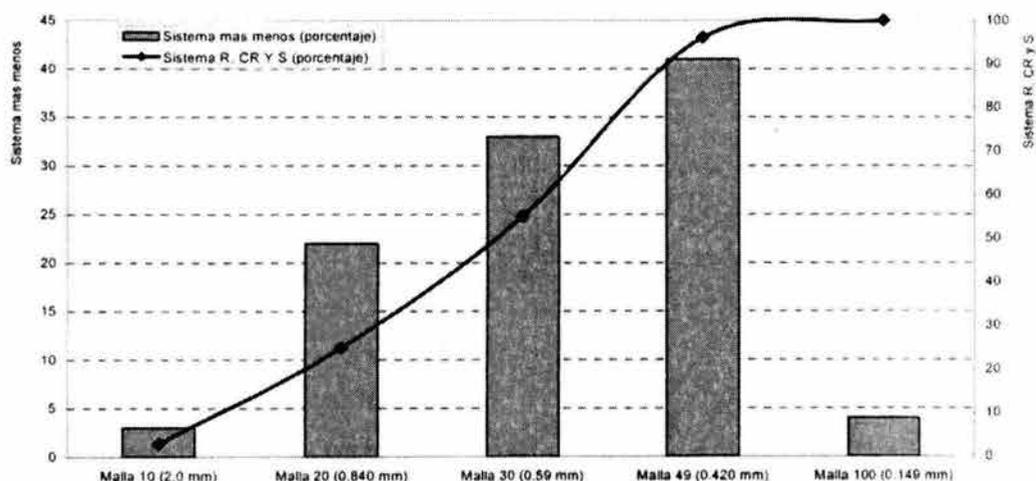


Figura A6.6 Representación gráfica empleando el sistema R, CR Y S y más menos

Las variables más importantes que afectan la medición del TP son (Allen, 1997):

- *Duración de la operación*
- *Variación de apertura de mallas*
- *Condiciones de las mallas (uso)*
- *Errores de observación y experimento*
- *Errores durante el manejo de la muestra*
- *Efectos por el uso de diferentes equipos y operación*
- *Diferentes mallas, diferentes métodos*
- *Diferentes mallas, mismo método*
- *Manejo de la muestra*

Ventajas

- Es un método muy rápido y fácil de aplicar
- El costo de capital y operación es muy bajo
- La distribución del tamaño de partícula puede ser calculado en un tiempo muy corto

Desventajas

- La poca reproducibilidad al usar diferentes marcas de malla y diferentes operadores

A6.2.2 Filtración con membranas (tamaño del poro)

Si la determinación del tamaño es hecha con este sistema la medida correcta a utilizar es tamaño de poro. En la práctica, una muestra de suspensión diluida (agua residual) se pasa a través de una sucesión de filtros, iniciando con el tamaño de poro mayor. Al inicio y final de la operación las membranas se pesan; las fracciones de las partículas mayores al tamaño del poro corresponden a la ganancia neta en el peso del filtro dividida por el peso del material pasado a través de éste (Collins *et al.*, 1975).

Los filtros utilizados en esta técnica deben estar hechos de celulosa con un tamaño de poro bien definido. De acuerdo con Levine *et al.*, 1991, el tamaño del poro de los filtros puede variar desde 0.015 hasta 20 μm , sin embargo, Collins *et al.*, 1975 especifica que es factible emplear filtros con los siguiente tamaños 0.2, 0.3, 0.45, 0.65, 0.8, 3, 5, 1.2, 10, 50 y 100 μm .

Ventajas

- Es simple de operar, económico y rápido
- Se requiere sólo de un equipo especial y un sistema de vacío
- La técnica es capaz de dar una primera aproximación de la distribución de partículas en el intervalo de 0.1 a 5.0 μm

Desventajas

- Puede ocurrir una obstrucción de los poros
- Se ha observado que 6.5 mg de partículas con un diámetro de 6.0 μm pueden obstruir un filtro de 5.0 μm y 0.5 mg de partículas con 5.0 μm pueden obstruir el filtro de diámetro de 0.45 μm
- Un pobre control de calidad en la manufactura de los filtros puede conducir a problemas de reproducibilidad

3.2.3 Método de sedimentación (diámetro equivalente esférico)

Los métodos de sedimentación para determinar el tamaño de partícula se basan en el comportamiento de una esfera simple bajo gravedad y en un fluido de extensión infinita, es decir, utiliza la dependencia de la velocidad de descenso de las partículas con base en su tamaño (Riyad and Clayton, 1963, UEICH, 1999, Allen, 1997).

De los experimentos realizados se ha podido determinar que la velocidad de sedimentación y el tamaño de partícula guardan una relación entre el coeficiente de arrastre de las partículas y el número de Reynolds, la cual es reducida a una simple ecuación, la ley de Stokes, que en los métodos de sedimentación es

ANEXO A – 6

aplicada en un bajo número de Reynolds (sistema que utiliza un flujo laminar, Allen, 1997).

El método de sedimentación es dividido en dos categorías, el método de incremento y el método acumulativo (Allen, 1997, UEICH, 1999, Clyde, 1959, Levine, 1991). En el primero, las partículas son medidas en un punto fijo abajo de la superficie del medio líquido durante varios intervalos de tiempo o en diferentes puntos en un solo tiempo después de iniciada la sedimentación. En el segundo método, las partículas acumuladas son medidas en un nivel fijo donde todas las partículas se han sedimentado. El empleo de cada uno de estos métodos depende del tamaño de la partícula que se necesite medir, de las densidades y del medio en que estén suspendidas. En términos generales, el sistema de incremento se emplea cuando la suspensión es muy concentrada y la velocidad de sedimentación es relativamente independiente de otras partículas (debido a su baja fricción entre los sólidos) mientras que para aguas muy diluidas es preferible utilizar los métodos acumulativos debido a que la velocidad de sedimentación es muy lenta y las partículas sedimentan en una masa uniforme. En ambos métodos, las partículas son medidas como cierta clase de tamaño o menor que cierto tamaño en un volumen determinado. La Tabla A6.5, presenta las diversas técnicas que han sido desarrolladas de acuerdo al principio aplicado, de todas ellas las más empleadas para caracterizar el tamaño de partícula en aguas residuales son la pipeta de Andreasen y la centrifuga Simcar.

Tabla A6.5. Técnicas utilizadas para determinar TP por medio de sedimentación

Sedimentación gravitacional (incremento)	Sedimentación gravitacional (acumulativa)
Pipeta de Andreasen	Balanzas de varios tipos
Pipeta de Leschonsk	Columnas de sedimentación ICI
Pipeta de una altura fija	Columnas de sedimentación BCURA
Pipeta con brazo permanente	Aparatos Dotts Fisher
Fotosedimentador wagner	Decantadores
Fotosedimentador EEL	
Fotosedimentador Bound Brook	
Fotomicromedidor de tamaño Seishing	
Fotosedimentador de ángulo disperso Ladal	
Medidores de sedimentación implementados con rayos X	
Hidrómetros	
Sedimentación centrífuga (incremento)	Sedimentación centrífuga (acumulativa)
Centrifugas Simcar	MSA analizador
Pipeta centrífuga Lada	Centrifugas
fotocentrifugas	Fotocentrifugas

A6.2.4 Técnica de la pipeta de Andreasen (método de incremento)

En 1930, Andreasen y sus colaboradores, describieron un método simple de medida de distribución de partículas. El método emplea un aparato relativamente sencillo. Dicho método es ampliamente usado y esta sujeto a diversas modificaciones dado que la operación es simple y el hardware es económico, esta

ANEXO A - 6

técnica es diseñada y operada en un bajo número bajo de Reynolds (Scarlett, 1980).

La técnica consiste en sacar una alicuota de un volumen determinado de la suspensión (muestra de agua o agua residual) después que se ha iniciado la sedimentación durante un tiempo estipulado y un nivel fijo. La concentración de la materia particulada (SS) es determinada analíticamente o por evaporación de la alicuota y pesando los sólidos resultantes. Cada muestra trazada tiene un tamaño que corresponde a la velocidad de descenso dado por la ley de Stokes, ya que todas las partículas de tamaño grande pueden caer en los niveles de la punta de la pipeta (Riyad and Clayton, 1963).

En la mayoría de casos, la técnica es muy larga y tediosa puesto que las muestras deben ser tomadas en 0, 1, 2, 4, 16 min usualmente hasta 8 horas. Si las mediciones son hechas con métodos automatizados, es posible analizar partículas menores a 2.0 μm .

Con los datos obtenidos se genera una distribución acumulada por el peso de partículas, dando como resultado un tamaño determinado por la ley de Stokes. El proceso básico consiste en conjunto con datos como una concentración relativa C/C_0 contra el tiempo, así, C es la concentración en el tiempo t después de que la sedimentación da inicio y C_0 es la concentración inicial cuando una suspensión homogénea es introducida en una cámara de sedimentación (pipeta de Andreasen, Figura A6.7).

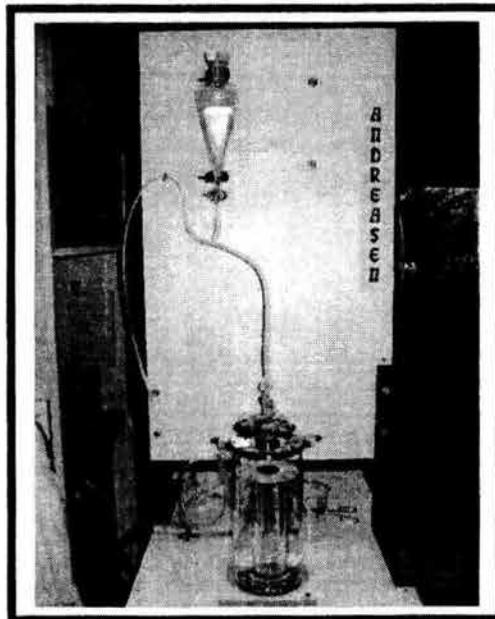


Figura A6.7 Detalles de la Pipeta de Andreasen Clyde, 1954).

Para el cálculo del tamaño de partícula se toman en cuenta las siguientes consideraciones: si las partículas son esféricas, y el número de Reynolds es menor que 0.2 entonces la velocidad final de una partícula estará determinada por:

ANEXO A – 6

$$v = \left[\frac{(\rho - \rho_o)g}{18\mu} \right] d^2 \quad (9)$$

donde

V= Velocidad lineal
P= Densidad de los sólidos
P_o = Densidad del líquido y
μ = Viscosidad
d = Diámetro

Para la técnica de sedimentación de la pipeta de Andreasen, el diámetro de la partícula más pequeña (d, μm) es calculado usando la ecuación modificada de la ley de Stoke como se muestra en la ecuación 10:

$$d = 10^4 \cdot \left[\frac{18\mu}{\rho - \rho_o g} \right] \frac{h}{t} \quad (10)$$

Ventajas

- El método es muy rápido
- El aparato utilizado es económico y de simple manejo

Desventajas

- La distribución del líquido puede ser alterado en el momento de sacar la muestra
- El volumen total es reducido durante los muestreos por lo que no se puede asumir tener el volumen total
- Una crítica frecuente sobre esta técnica es que sólo es válida para partículas esféricas bajo ciertas condiciones (número bajo de Reynolds).

A6.2.5 Centrifugación (método acumulativo o de incremento)

La separación de las partículas por centrifugación es similar a la de la sedimentación excepto porque la sedimentación ocurre en un campo centrífugo resultado de una fuerza centrífuga externa aplicada. El primero en utilizar este principio fue Marshall en 1930 (Allen, 1997), sin embargo, sólo hasta 1955 Whitby describió la metodología. El principio básico de la técnica es medir la materia particulada que sedimenta en una distancia específica abajo de la superficie de suspensión contra un tiempo (Riyad & Clayton, 1963). Esta técnica tiene la ventaja de permitir la separación de categorías de partículas muy finas que no son posibles de determinar con el campo gravitacional (Clyder and Dallau, 1959).

ANEXO A - 6

Las partículas suspendidas en un medio son sujetas a un campo centrifugo, estas se mueven en la dirección del campo impuesto. La velocidad de sedimentación en una centrifuga varía linealmente con el radio del rotor y como el cuadrado de una velocidad angular. En el campo de una centrifuga, la velocidad de sedimentación se determina por

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d^2}{18\mu} (\rho - \rho_o) R \omega^2 \quad (11)$$

donde

R = Posición radial de la partícula
T = Tiempo, s
 ω = Velocidad de rotación, rad/s

Esta ecuación es limitada en su aplicación (1 μm), sin embargo, existen centrifugas con una baja velocidad de centrifugación (ultracentrifugación), en las cuales el tamaño de partícula es determinado por modificación de la Ley de Stokes de la siguiente manera:

$$D = \frac{6}{\theta} \frac{\eta \ln X_1 / X_0}{2(\rho - \rho_o) t} \quad (12)$$

donde

D = Diámetro de la partícula
 θ = Velocidad angular = $2\pi N/60$
N = Velocidad de la centrifuga, rpm
 η = Viscosidad del medio
 X_0 = Distancia del centro de rotación hasta el abajo (interior de la) de la celda
 X_1 = Distancia del centro de rotación hasta el punto donde la muestra es tomada
 ρ = Densidad de las partículas
 ρ_o = Densidad del medio
t = Tiempo de centrifugación (s)

Ventajas

- Los discos de la centrifuga permiten el análisis de la partícula dependiendo de su densidad, en intervalos desde 0.01 hasta 30 μm
- Todas las partículas centrifugadas pueden ser analizadas

Desventajas

- Se requieren numerosas muestras para obtener la distribución
- Para sistemas muy amplios, se requieren otras técnicas para obtener una distribución arriba o abajo de 30 μm
- Requiere constante calibración para el análisis

ANEXO A – 6

- Dificultad de difusión y concentración, efecto de presión y relación entre velocidad de sedimentación y tamaño de partícula
- La determinación de la distribución es complicada

A6.2.6 Métodos de medición de partícula por corriente

Estos métodos se dividen en dos categorías: la interacción entre las partículas y una corriente de registro (stream scanning) y un campo de registro (fiel scanning). En la primera, las partículas son examinadas una a una y su interacción es tomada como una medida de su tamaño, mientras que en la otra, la interacción de un conjunto de partículas es interpretado en términos del tamaño de partícula conjunta.

La mayoría de las técnicas que utilizan una corriente de registro emplean el principio Coulter, donde el campo eléctrico y el tamaño de las partículas (en volumen) es proporcional a los cambios en la impedancia eléctrica cuando las partículas pasan a través del campo.

En la técnica de campo de registro, el área proyectada de una partícula puede ser medida por los límites de la cantidad de luz cuando una partícula pasa a través de un rayo de luz.

A6.2.6.1 Sensores de zona eléctrica

El principio Coulter fue patentado en 1949 y descrito como un método para contar y medir células hasta 1956, a partir de esa fecha su uso se ha extendido para el conteo de otros materiales como las partículas encontradas en un agua residual y los polvos (Allen, 1997).

El equipo funciona cuando las partículas suspendidas o la muestra a ser analizada es dispersa en una solución electrolítica que pasa a través de un orificio (de diversos tamaños de acuerdo al diámetro que se desea medir). Una corriente constante o potencial es aplicada entre los electrodos de platino situados en ambos lados del tubo, cuando las partículas atraviesan el orificio se genera una resistencia entre los electrodos produciendo un voltaje de corta duración. El voltaje producido (escalado eléctricamente y contado) es proporcional al tamaño o volumen de las partículas.

El principio Coulter Counter es capaz de medir tanto el tamaño de partículas como su distribución en un intervalo comprendido entre 0.2 y 1200 μm . Para alcanzar esta medición se requiere un número de diferentes sensores (apertura de tubo). El intervalo de apertura de cada sensor se encuentra alrededor del 2 al 60% del diámetro del orificio, por ejemplo de 2 hasta 60 μm para un tubo con una apertura de 100 μm (Tabla A6.6).

El conteo de partículas se inicia cuando la llave de paso del sistema se abre, con lo cual se produce un vacío que provoca que las partículas pasen a través del orificio del tubo, en ese momento se produce un desequilibrio en una columna

ANEXO A - 6

que contiene mercurio y este avanza hasta un tiempo limitado (dependiendo del volumen empleado para la determinación), acción que activa el sistema de conteo y de esta manera las partículas que atraviesan el tubo son contadas. Una vez que la columna de mercurio llega a su nivel, se activa el paro del sistema y se interrumpe el conteo de partículas en la zona eléctrica.

El voltaje producido por cada una de las partículas es amplificado y alimentado por un circuito. Los límites son indicados en una pantalla osciloscópica por un destello de los segmentos pulsados arriba de los límites, facilitando de esta manera la selección de los niveles de conteo apropiado (Figura A6.8).

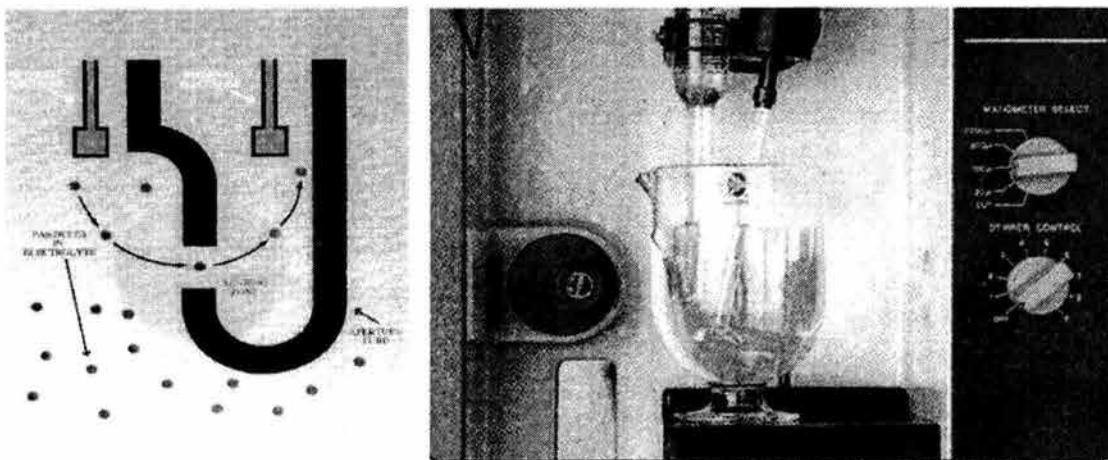
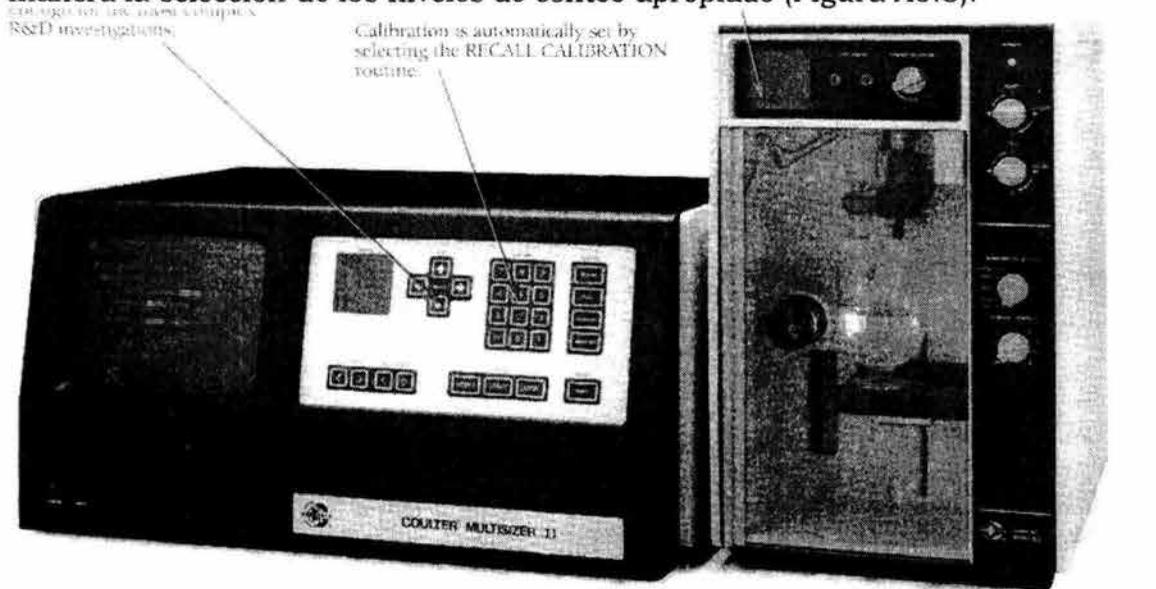


Figura A6.8. Principio Coulter Counter

ANEXO A – 6

Para tomar una serie de conteos de los límites seleccionados, los datos se obtienen directamente por un plano de frecuencia acumulada (mayor que el tamaño establecido) versus el tamaño de la partícula. La integración de todos los datos provee una medida del conteo de las partículas en la suspensión. Antes de realizar el histograma o la curva normalizada, los pulsos eléctricos son clasificados por tamaño y contados en cada una de las clases del campo de distribución de las partículas. Los conteos son primeramente corregidos (dobletes, tripletes etc), estas correcciones son totalmente precisas y se mantienen niveles moderados inferiores al 5% (Lawler, 1987).

El principio no permite distinguir significativamente la forma de la partícula y la expresión resultante es un equivalente esférico. En este caso el factor de forma tomado en cuenta para la determinación del tamaño es de 0.95 (que es la relación entre 1.18/1.24 unidades de esfera perfecta, Allen, 1980).

Para medir el tamaño de la partícula deseado, se deben emplear diversos tubos, de tal manera que pueda ajustarse a las necesidades en cada caso específico. En la Tabla A6.6 se presentan el intervalo del diámetro nominal de cada uno de los tubos existentes en el equipo multisizer II, sin embargo en el multisizer III (tecnología del 2000) solo se usa un total de tres tubos para medir el tamaño de la partícula entre los intervalos de 0.4 hasta 1200 μm)

Tabla A6.6. Datos de los orificios estandarizados del tubo para un intervalo de diámetro de la partícula

Diámetro nominal de la partícula Intervalo en μm	Apertura nominal (μm)	Apertura nominal de la Resistencia (ohms)	Adecuada calibración, (μm)
0.4 a 9.0	15	75,000	1.0 a 2.0
0.5 a 12	20	60,000	1.0 a 3.0
0.6 a 18	30	36,000	1.0 a 6.0
1.0 a 30	50	28,000	2.5 a 10
1.4 a 42	70	17,000	3.5 a 20
2.0 a 60	100	13,000	5 a 20
2.8 a 84	140	10,000	7 a 30
4.0 a 120	200	8,000	10 a 40
5.6 a 168	280	6,000	16 a 60
8.0 a 240	400	4,300	22 a 80
11.0 a 336	560	3,250	32 a 100
200 a 600	1000*	-----	50 a 200
40 a 1200	2000*	-----	100 a 400

*Los tamaños obtenidos con los tubos con aperturas de 1000 y 2000 μm son dependientes de la densidad del material que se requiera analizar y una practica de los límites superiores del el Coulter Multisizer es del orden de 800 micras con densidades de las partículas de aproximadamente 1 g/mL.

Cálculo de Tamaño de partícula en el Counter

Para el cálculo del tamaño de partícula determinado por medio del Coulter Counter se toman las siguientes consideraciones:

ANEXO A – 6

- El paso de las partículas individuales ocurre al azar y son éstas eventualmente distribuidas a través de la sección transversal.
- El volumen de la partícula que pasa sobre la apertura puede ser expresado como un cilindro teniendo la misma resistividad como la partícula.

Principio:

Si se considera que en un cilindro “a y b” representa lo largo y “b y d” el diámetro (Figura A6.9)

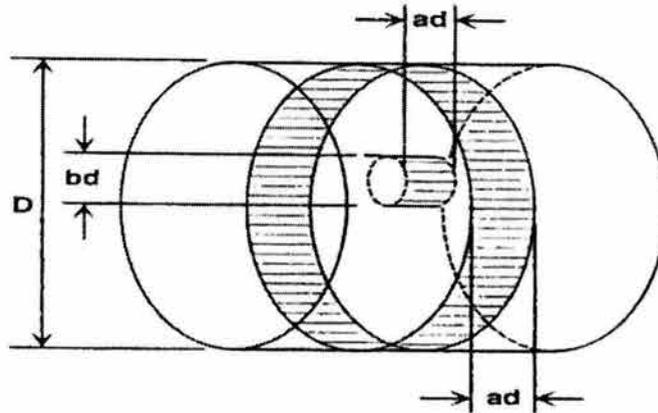


Figura A6.9 Orificio del tubo empleado en el Counter Coulter

La resistencia del líquido (agua pura) puede calcularse a través de:

$$R_o = \frac{\rho_o ad}{(\pi/4)D^2} \quad (13)$$

donde

d= diámetro de la esfera teniendo el mismo volumen que un cilindro, equivalente a que

representará la dimensión de la partícula medida eléctricamente.

ρ_o = resistencia del líquido

La resistencia total de sustancias se calcula a través de:

$$R = \frac{1}{\left[\frac{(\pi/4)(D^2 b^2 d^2)}{\rho_o ad} \right]^{-1} + \left[\frac{(\pi/4)b^2 d \rho_o}{\rho a \rho_o} \right]^{-1}} \quad (14)$$

Por lo que el cambio de resistencia causado por las partículas se representa de la siguiente manera:

ANEXO A - 6

$$\Delta R = R - R_o = \frac{1}{\frac{(\pi/4)(D^2 - b^2d^2)}{\rho_o ad} + \frac{(\pi/4)b^2d\rho_o}{\rho a\rho_o}} - \frac{\rho_o ad}{(\pi/4)D^2} \quad (15)$$

Simplificando:

$$\Delta R = \frac{\rho_o a}{(\pi/4)D^4} * \frac{d^3(1 - \rho_o/\rho)}{b^2 - \frac{d^2}{D^2}(1 - (\rho_o/\rho))} \quad (16)$$

Para una esfera equivalente y con un volumen igual, la siguiente ecuación debe ser aplicada:

$$(\pi/4)d^3 = a.d((\pi/4)b^2d^2) \quad \text{y} \quad (1/b^2) = 1.5a \quad (17)$$

Por lo tanto

$$\Delta R = \frac{4\rho_o}{\pi D^4} * \frac{d^3}{1.5 - \frac{d^2}{aD^2}} \quad (18)$$

En la Tabla A6.7 se presenta un ejemplo del análisis del cálculo de tamaño de la partícula instalado en el software de los equipos de contador de partícula y la manera como éste realiza el cálculo, mientras que la Figura A6.10 se presenta los datos ya procesados en forma numérica del tamaño y volumen de partículas presentes en un agua residual tratada con un proceso fisicoquímico.

Tabla A6.7 Ejemplo de cálculo para el Tamaño de la partícula

No de canal	Limite inferior d _p	Limite superior d _p	Diam. medio d _p	Δd _p	log d _p in	Δ log d _p	Correc. de conteo	Num. Conc. Δ N _i	Vol. Conc. Δ V _i	ΔN _i /Δd _p No./mL-μm	ΔN _i /Δd _p μm ³ /mL-μm	ΔN _i /Δ log d _p No./mL	ΔN _i /Δ log d _p μm ³ /mL	Log ΔN _i /Δ d _p ΔN _i /Δ d _p in
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)	(L)	(M)	(N)	(O)
6	2.95	3.39	3.16	0.44	0.50	0.06	5125	102500	1.7E+6	2.3E+5	3.8E+6	1.7E+6	2.8E+7	5.37
7	3.39	3.89	3.63	0.50	0.56	0.06	4568	91360	2.3E+6	1.8E+5	4.6E+6	1.5E+6	2.8E+7	5.26
8	3.89	4.47	4.17	0.58	0.62	0.06	3888	77760	2.9E+6	1.3E+5	5.1E+6	1.3E+6	4.9E+7	5.13
9	4.47	5.13	4.79	0.66	0.68	0.06	3088	61760	3.5E+6	9.3E+4	5.4E+6	1.0E+6	5.9E+7	4.97
10	5.13	5.89	5.50	0.76	0.74	0.06	2289	45780	4.0E+6	6.0E+4	5.2E+6	7.6E+5	6.6E+7	4.78
11	5.89	6.76	6.31	0.87	0.80	0.06	1584	31680	4.1E+6	3.6E+4	4.8E+6	5.2E+5	6.9E+7	4.56
12	6.76	7.76	7.24	1.00	0.86	0.06	1023	20460	4.1E+6	2.0E+4	4.0E+6	3.4E+5	6.8E+7	4.31
13	7.76	8.91	8.32	1.15	0.92	0.06	631	12620	3.8E+6	1.1E+4	3.3E+6	2.1E+5	6.3E+7	4.04
14	8.91	10.23	9.55	1.32	0.98	0.06	363	7260	3.3E+6	5.5E+3	2.5E+6	1.2E+5	5.5E+7	3.74
15	10.23	11.75	10.96	1.52	1.04	0.06	199	3980	2.7E+6	2.6E+3	1.8E+6	6.6E+4	4.6E+7	3.42

ANEXO A - 6

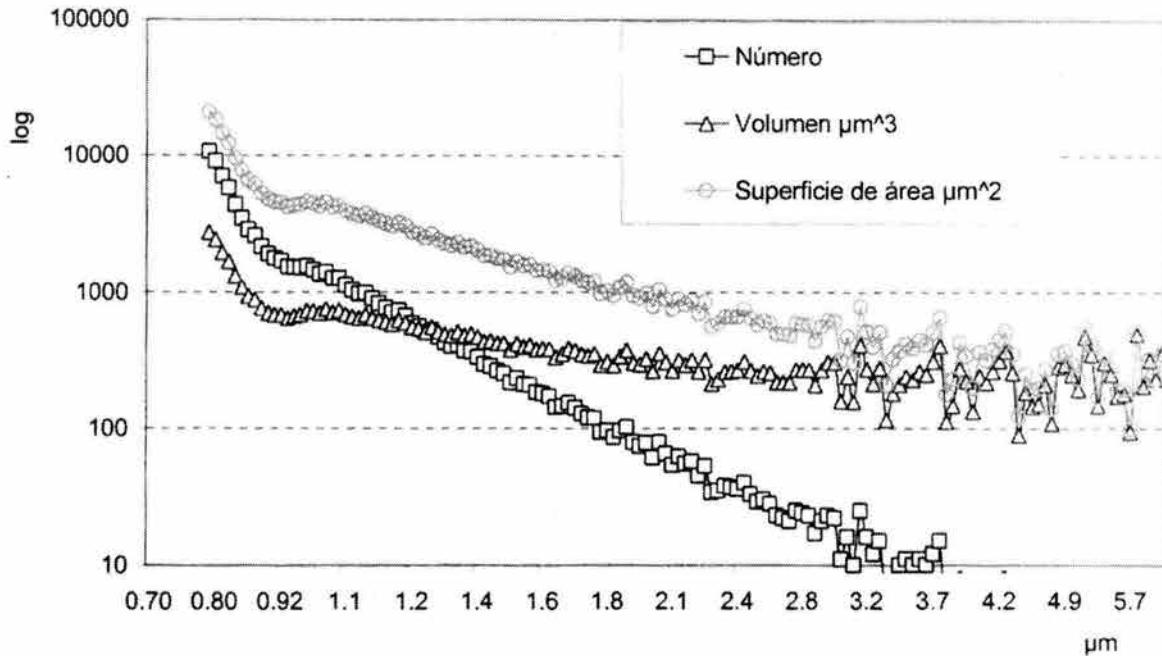


Figura A6.10 DTP en número, volumen y superficie de área de un agua residual tratada

Ventajas

- Requiere una muestra pequeña de líquido (mL)
- Un intervalo grande de partículas puede ser contado eléctricamente asegurando una alta ocurrencia y representatividad de la muestra
- Se requiere menos de 30 minutos para el conteo y el cálculo
- Se puede calcular el número y el volumen promedio

Desventajas

- El intervalo de conteo va desde 0.5 hasta 1200 μm, aunque el límite inferior es de 0.2 μm.
- Para cubrir un intervalo de diámetros, requiere el uso de diversas aperturas (varios tubos) y por tanto diversos cambios de tubo para las diferentes corridas
- Cada orificio necesita ser calibrado con un sistema monodisperso conocido de un tamaño propio
- La muestra puede ser insoluble y dispersa en el medio suspendido
- Puede ser un problema la localización de un medio de dispersión adecuado y un electrolito soluble en este
- Es necesario acondicionar un espacio especial, sobre todo cuando se miden diámetros de tamaños muy pequeños

ANEXO A – 6

- Signos aislados y microscópicos (ruido de fondo) pueden ser detectados en el circuito de los electrodos causando errores durante el conteo (conteo excesivo)
- La concentración de partículas puede ser suficientemente baja lo que permite el paso de dos partículas al mismo tiempo contando esta como una sola de gran tamaño
- Puede ser sujeto a diversas interferencias
- Requiere de soluciones electrolíticas

3.5.2 *Dispersión o absorción de luz*

En la dispersión de la luz, el movimiento Browniano causa un volumen esférico, de esta manera el tiempo promedio de la esfera es la base del diámetro que toma una partícula (Collins *et al.*, 1975).

Cuando un rayo de luz pasa a través de una dispersión de partículas, parte de la energía es absorbida, alguna es dispersada y otra permanece en el sistema.

El comportamiento de la dispersión de la luz es determinada principalmente por dos parámetros:

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda m} \quad (19)$$

$$m = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (20)$$

donde:

D = diámetro de la partícula

λ_m = longitud de onda de luz en el medio

μ = índice de refracción de las partículas

μ_0 = índice de refracción del medio

En la práctica, las partículas en suspensión son iluminadas por un rayo de luz monocromático (usualmente de un arco de mercurio o láser). La incidencia de la luz puede ser polar o no polar. La intensidad de la luz es medida por medio de un detector del ángulo (θ) como lo muestra la Figura A6.11 (Collins *et al.*, 1975). El tamaño de las partículas de la solución y el índice de refracción producido gobiernan la intensidad observada. Las formas más comunes de medir el tamaño de la partícula son:

- Fijar el ángulo (θ) a 180° y medir la incidencia (I)
- Medir la incidencia en algún otro ángulo (generalmente a 90°)
- Medir la incidencia como una función del ángulo

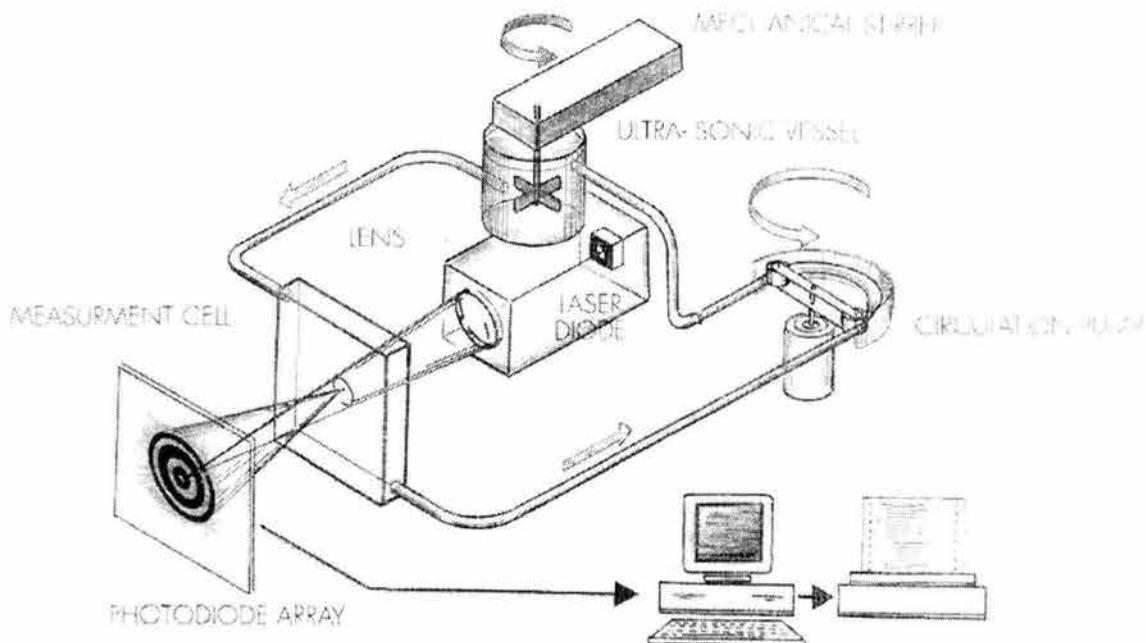


Figura A6.11. Equipo de dispersión de la luz para determinar la DTP

De los equipos más utilizados para medir el tamaño de partícula de un agua residual y que trabaja con este principio es el denominado Coulter LS 230 (Figura A6.12), la técnica permite medir un intervalo de partículas de 0.04 a 2000 μm . El equipo utiliza un sistema denominado P.I.D.S. (Dispersión de la Polarización Diferencial Intensa). El sistema de PIDS usa tres longitudes de ondas de luz filtradas por la polarización en planos verticales y horizontales. Seis detectores (más los 126 usados para medir la dispersión de la luz) que son colocados aproximadamente a 90 grados de la dirección de la luz para medir la intensidad diferencial entre la dispersión de la luz de la polarización vertical y horizontal. El sistema se realiza un total de 36 mediciones en seis ángulos de dispersión y en tres ondas de longitud en cada dos polarizaciones.

La combinación de ondas de longitud múltiples y los dos polarizaciones nos dan la información de las diferencias entre los tamaños de las partículas supracoloidales y además nos muestra el crecimiento dramático de la resolución. Aunque los PIDS son usados como una fuente de luz secundaria este divide en "categorías", la dispersión de estos rayos de luz por partículas es descrito de la misma manera que en la teoría de MIE como una dispersión del láser, así que toda la información de dispersión de la luz se convierte en el tamaño de las partículas usando el mismo algoritmo en una sola operación.

En la Figura A6.13 se presenta la Distribución del Tamaño de Partículas determinadas bajo esta técnica

La resolución y la precisión del PIDS a sido probado con materiales producidos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) (Coulter Beckman, 2000).

ANEXO A - 6

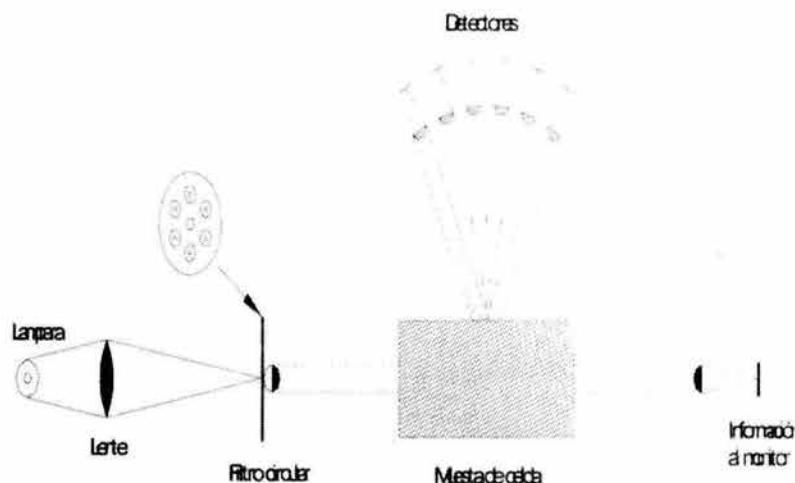


Figura A6.12. (a) Analizador del tamaño de las partículas; (b) sistema de PIDS.

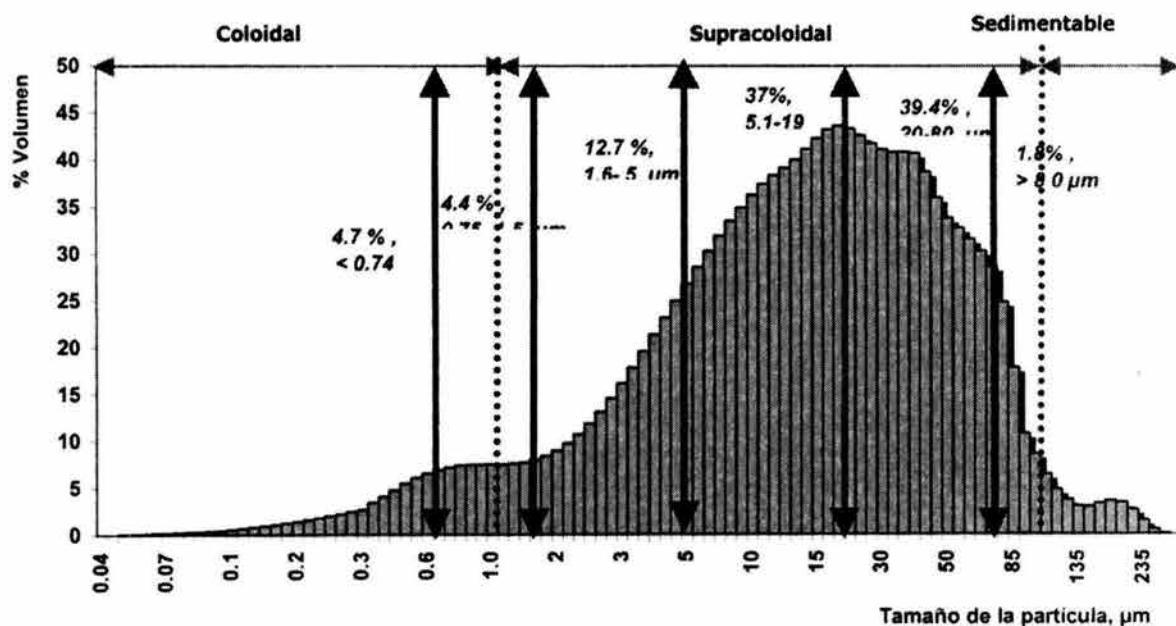


Figura A6- 13. DTP determinada en el Coulter Beckman, 2000

Ventajas

- El método es rápido, simple, y utiliza un instrumento de medición (computadora)
- Los valores obtenidos son con frecuencia de significancia relativa, pero son usados en control de calidad
- Se requiere de pequeñas muestras

Desventajas

- La dependencia de la respuesta de los instrumentos de el índice de refracción de las partículas
- Dificultad de medir la intensidad de la luz en uno o varios de ángulos pequeños (Groves, 1979)

A6.2.7 Microscopia

A6.2.7.1 Microscopia óptica

Es el único método absoluto de análisis de partículas en el cual las partículas son observadas y medidas en forma individual estimando su tamaño y grado de dispersión (Allen, 1980). Es el método más directo para medir la distribución del tamaño de las partículas. (Riyad and Clayton, 1963) y se usa para medir partículas de 0.8 hasta 150 μm .

Si las partículas son: esféricas, cercanamente monodispersas y están arriba de 3000 Å, el método de microscopia óptica es el más rápido e indicado para medir el tamaño de partículas.).

Existen tres pasos fundamentales para la medición de partículas a través de la microscopia:

- 1) Preparación del portaobjeto
- 2) Observación de las partículas y
- 3) Conteo y medición del tamaño de las partículas en forma individual

En la Tabla A6.8 se muestra las regiones del tamaño de partículas en donde son aplicables diversas técnicas de microscopia.

ANEXO A – 6

Tabla A6.8. Regiones de aplicabilidad de las técnicas de Microscopia, Riyad and Clayton, 1963

Método	Intervalo de tamaño de partícula medible μm	Requerimiento de equipo
Luz visible	0.4-100	Microscopio ordinario, luz visible,
Luz ultravioleta	0.1-100	Microscopio equipado con cuarzos ópticos, fuente de luz monocromática
Ultramicroscopia	0.001-0.2	Microscopio equipado para iluminación de campo oscuro,
Microscopia electrónica	0.001-5	Philips, RCA, Hitachi, Zeiss, Metropolitan-Vickers o Siemens.

Ventajas

- Se requiere menos de 30 minutos para el conteo y el cálculo.
- Se puede calcular el número y el volumen promedio.
- Sólo es requerida una pequeña muestra.
- Medida directa, rápida y relativamente económica (Groves, 1979).

Desventajas:

- El método es aplicable sólo para partículas monodispersas y con un tamaño de alrededor de 3000 Å.
- Método muy tedioso.

A6.3 Referencias

- Allen T. (1980). **Choice and limitations in particle size analysis.** *Laboratory Equipment Digest*. February 1980, pp 81-87
- Arani R. & Callis C. (1963). **Particle Size: Measurement, Interpretation and Application.** Mosanto Chemical Company, St. Louis Missouri.. John Wiley & Sons Inc., N.Y London. 165p.
- Barth H. and Sun S-T. (1993). **Particle Size Analysis.** *Anal Chem.* Vol 65, pp 55R-66R.
- Barth H. and Sun S. (1993). **Particles Size Analysis.** *Amer. Chem Soc. Anal. Chem.* Vol 65, 55R-66R.
- Collins E., Davidson J. and Daniels Ch. (1975). **Review of Common Methods of Particle Size Measurement.** *Journal of Paint Technology.* Vol 47, No. 604. pp 35-55.
- Groves M. (1979). **Particles Size Characterization in Dispersions.** *Review Article.* pp 97-124.
- Lawler D. (1997). Particle Size Distribution in Treatment Processes: Theory and Practice. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 36, No. 4, pp 15-23.
- Levine A., Tchobanoglous G., and Asano T. (1991). **Particulate Contaminants in Wastewater: A Comparison of Measurement Techniques and Reported Particle Size Distribution.** *Fluid Particles Separation Journal.* Vol 4, Number 2, pp 89-105.
- Levine A., Tchobanoglous G., and Asano T. (1991). **Size Distribution of Particulate Contaminants in Wastewater and Their Impact on Treatability:** *Wat Res.*, Vol. 25, Number 8, pp 911-922.
- Levine, Tchobanoglous G., and Asano T. (1985). **Characterization of the size distribution of Contaminants in Wastewater: Treatment and Reuse Implications.** *Journal WPCF*, Vol. 57, Number 7 pp 805-815.
- Lloyd P. (1974). **Particle Characterization.** *Chemical Engineering.* Solid-Liquid Separation. pp 120-123.
- O'Melia Ch., Hahn M. and Chen Ch. (1997). **Some Effects of Particle Size in Separation Processes Involving Colloids.** *Wat Sci Tech.* Vol. 36, No. 4, pp 119-126.
- O'Shaughnessy P., Barsotti M., Fay J. and Tighe S. (1989). **Evaluating Particles Counters** *Journal AWWA.* Vol 89, Issue 12, pp 60-70.
- Scarlett B. (1980). **The Measurement of Particle Size.** *European Symposium. Particle Technology. Comminution, Classification and Powder Mechanics.* Amsterdam, NL. June 3-5, pp 1180-1199.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** (1999). Sixth Edition, Completery Revised Edition. Volume B2: Unit Operataion I. Editor Wolfgang Gerhartz, pp 2-2 to 2-30.
- Farmer R. and Beckman J. (1984). **Particle Size Distribution analysis of Blended Solids by a Modified Andreasen Pipet Method.** *Ing. Eng. Chem. Process Desv Dev.* Vol 23, pp 341-343.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* (1995). 19th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington D.C. USA, pp 2-60-2-67.
- Wadell H. (1932). **Volume, Shape and Roundness of Rock Particles,** *J. Geol.* vol 40, pp 443-451.
- Lawler D. (1987). **Particles Size Distribution: Measurements in Flocculation.** AWWA. ISBN 0-89867-407-4, pp 19-25.
- Levine A.D., G. Tchobanoglous and T. Asano. (1985). **Characterization of the Size Distribution of Contaminants in Wastewater. Treatment and Reuse Implications,** *Journal WPCF*, Vol 57, pp 805.