



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

SELECCIÓN Y DETERMINACIÓN DE DOSIS DE REACTIVOS
QUÍMICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE UN
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

LORENA CERECEDO SILES

ASESOR:

M. EN I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE



MEXICO, D.F.

2013



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/ 010/13

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): Cerecedo Siles Lorena

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. RAUL RAMÓN MORA HERNÁNDEZ
VOCAL	M. en I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE
SECRETARIO	Q.F.B. CONSUELO BAUTISTA ARAGÓN
SUPLENTE	I.Q. ARTURO ENRIQUE MÉNDEZ GUTIERREZ
SUPLENTE	I. Q. JOSÉ MARIANO RAMOS OLMOS

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D.F. a 10 de enero de 2013

JEFE DE CARRERA

DR. ROBERTO MENDOZA SIENA
INGENIERÍA QUÍMICA
JEFE DE CARRERA





Mis dedicatorias

A mi casa de estudios

Quien me abrió las puertas de su casa como si fuera una madre que abraza a sus hijos dándole la mejor de las armas para la vida. Quien soporto las frustraciones y triunfos de mi formación, y quien vio mi vuelo como si fuera un ave que parte del nido donde nació.

A quienes me regalaron la vida

Aquellos que me muestran que en la vida, el trabajo duro es lo que nos da las satisfacciones más grandes, que con el tiempo se aprende que es diferente conocer el camino que andar en él; que la dignidad se forja y que el honor se obtiene con el más humilde de los oficios.

A mi ejemplo

Mi ejemplo a seguir desde la infancia, la que me abrió el camino en la vida y me enseñó las virtudes y desventuras de lo que es vivir. Aquella persona que con los años aun me sigue mostrando lecciones y dando ánimos para seguir andando.

A los pequeños que me rodean

Esos niños que me enseñan día a día que la felicidad está en los detalles más simples, en juegos y risas; y que cuando menos te lo imaginas, los deseos y sueños de niño se convierten en triunfos y dones de grande.

A quien más quiero

Esa persona que esta a mi lado para quererme, apoyarme y enseñarme. Quien me corrige cuando es necesario, me orienta para no perderme y sobre todo; me acepta por ser yo. Aquella que con el paso del tiempo nunca olvida de donde viene, pero sobre todo me enseña a no olvidar lo que soy.

A mis amigos

Para todos aquellos buenos amigos que son como las estrellas, a veces no las vemos; y sin embargo siempre están ahí.



Lo más hermoso de la vida es lo insoldable, lo que está lleno de misterio. Es éste el sentimiento básico que se halla junto a la cuna del arte verdadero y de la auténtica ciencia. Quien no lo experimenta, el que no está en condiciones de admirar o asombrarse, está muerto...

Albert Einstein

Mis sinceros agradecimientos

I.Q. Raul Ramón Mora Hernández

La calidad nunca es un accidente, siempre es el resultado del esfuerzo de trabajo y dedicación.

M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle

El éxito no se logra solo con cualidades especiales, es sobre todo; un trabajo de constancia, de método y de organización.

M. en C. Consuelo Bautista Aragón

La estructura y el orden siempre muestran un mejor trazo del camino al éxito, partiendo siempre de cada uno de nuestros esfuerzos.

I.Q. Arturo Enrique Méndez Gutiérrez

Los conocimientos, humor e inteligencia muestran que la enseñanza no se aprende solo de libros, sino también de la experiencia y del compromiso.

I.Q. José Mariano Ramos Olmos

La experiencia y la clara visión localizan las cosas que los demás no vemos, mejorando continuamente; convirtiendo las debilidades en fortalezas.



Contenido

Justificación del tema	11
Planteamiento del problema	12
Introducción	13
Capítulo 1. Desarrollo sustentable y problemática del agua	14
1.1. Desarrollo sustentable.....	14
1.2. Problemática del agua.....	16
1.2.1. Contaminación del agua.....	18
1.2.2. Escasez de agua en el ámbito internacional.....	19
1.3. Contexto geográfico de México.....	21
1.4. Distribución de los recursos hídricos en México.....	22
1.4.1. Disponibilidad natural media de agua per cápita.....	25
1.4.2. Distribución de la precipitación pluvial.....	27
1.5. Población.....	28
1.6. Problemas de calidad de agua en México.....	29
Capítulo 2. Agua e industria	32
2.1. Usos del agua.....	32
2.2. Descarga de agua residual en México.....	34
2.2.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.....	34
2.2.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales.....	35
2.3. Tipos de industria.....	37
2.4. Consumo del agua en la industria.....	37
2.4.1. Descargas de contaminantes por sector.....	40
2.4.2. Características de los desechos industriales.....	41
2.5. La industria textil en México.....	42
2.6. Importancia económica de la industria textil.....	44
2.6.1. La industria textil, del vestido y del cuero mexicana.....	44
2.6.2. La crisis y el impacto en el sector textil y del vestido.....	46
Capítulo 3. Características del tratamiento de las aguas residuales	48
3.1. Características de las aguas residuales.....	48
3.1.1. Características físicas.....	50
3.1.2. Características químicas.....	52
3.1.3. Características biológicas.....	56
3.2. Esquema general del tratamiento de aguas residuales.....	58
3.3. Tratamiento Primario.....	60
3.3.1. Igualación u Homogeneización.....	60
3.3.2. Neutralización.....	61
3.3.3. Coagulación.....	61
3.3.3.1. Coagulación-Floculación de las impurezas del agua.....	61
3.3.3.2. Potenciales del coloide.....	62
3.3.3.3. Potencial Zeta (z).....	63
3.3.3.4. Coagulación por neutralización de carga.....	64
3.3.3.5. Coagulación por compresión de la doble capa.....	65
3.3.3.6. Coagulación por puente químico.....	65
3.3.3.7. Coagulación por incorporación (o de barrido).....	67
3.3.3.8. Diagramas de Coagulación-Turbiedad.....	68
3.3.3.9. Remoción del color.....	71
3.3.3.10. Mecanismos de remoción de color.....	73
3.3.3.11. Factores que alteran el proceso de coagulación.....	75
3.3.3.12. Coagulantes.....	76
3.3.3.13. Coagulantes y Floculantes poliméricos (Poliectrolitos).....	76
3.3.3.14. Coagulantes Metálicos.....	78
3.3.4. Sedimentación.....	80
3.4. Tratamiento secundario.....	82
3.4.1. Lodos activados.....	82



3.4.2. Lagunas de aireación	82
3.5. Tratamiento terciario	83
3.6. Reúso del agua residual	83
3.7. Normatividad aplicable	84
3.7.1. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	85
3.7.2. Ley de Aguas Nacionales	85
3.8. Normas Oficiales Mexicanas	86
3.9. Normatividad para las descargas de aguas residuales	86
Capítulo 4.- Metodología aplicada.....	88
4.1. Acopio de información.....	88
4.2. Objetivos	91
4.2.1. Objetivo general.....	91
4.2.2. Objetivos particulares	91
4.3. Hipótesis	91
4.4. Selección de los parámetros de control	91
4.4.1. Selección de los parámetros óptimos de los procesos	92
4.4.1.1. Coagulación simultanea de color y turbiedad	92
4.5. Equipos utilizados.....	93
4.5.1. Sistema de dosificación.....	93
4.5.2. Sistema de agitación	94
4.5.3. Descripción de las jarras	95
4.5.4. Sistema de toma de muestras	95
4.6. Consideraciones generales para la ejecución de prueba de jarras	95
4.7. Antecedentes de la descarga	96
4.8. Soluciones químicas empleadas	97
4.8.1. Ventajas y desventajas de los coagulantes empleados	98
4.9. Técnica.....	100
4.10. Lista de materiales y equipos	104
4.11. Resultados	105
4.11.1. Pruebas experimentales	107
4.11.2. Resultados de laboratorio	127
4.11.2.1. Análisis de laboratorio en relación a metales	127
4.12. Economía	131
5.- Conclusiones y recomendaciones	133
Bibliografía.....	136
Anexo A	140
Anexo B	142
Anexo C	145



Índice de tablas

Tabla 1.- Distribución de las reservas de agua dulce sobre el globo terrestre	20
Tabla 2.- Indicadores de la problemática del agua que justifican la cualidad del agua como estratégica a partir del nuevo siglo	21
Tabla 3.- Ubicación y extensión territorial en México	22
Tabla 4.- Evolución de la población en México, de 1950 a 2010 (millones de habitantes)	29
Tabla 5.- Las cinco zonas metropolitanas del país con mayor población, 2010.	29
Tabla 6.- Usos consuntivos agrupados según origen del tipo de fuente de extracción, 2009.	33
Tabla 7.- Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2009.	34
Tabla 8.- Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación por RHA, 2009.	35
Tabla 9.- Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación por entidad federativa, 2009.	36
Tabla 10.- Tratamiento de aguas industriales, 2009	37
Tabla 11.- Número de industrias por entidad federativa	37
Tabla 12.- Porcentaje de agua empleada en cada actividad.	38
Tabla 13.- Consumo de agua en los principales giros industriales	39
Tabla 14.- Valores característicos de descargas industriales	42
Tabla 15.- Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias	49
Tabla 16.- Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual	50
Tabla 17.- Clases de coagulación.	66
Tabla 18.- Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes.	77
Tabla 19.- Aplicaciones de los procesos unitarios en el tratamiento de las aguas residuales	83
Tabla 20.- Normas Nacionales Mexicanas para la determinación de parámetros de control	87
Tabla 21.- Descripción de las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales.	89
Tabla 22.- Descripción de las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales (Continuación).	90
Tabla 23.- Parámetros de control requeridos en el sistema de descarga de la PTAR.	92
Tabla 24.- Parámetros de fuente de entrada al proceso de coagulación-floculación.	96
Tabla 25.- Parámetros de descarga con la aplicación de los polímeros anteriormente citados.	97
Tabla 26.- Parámetros requeridos comparados con los obtenidos utilizando los insumos anteriores.	97
Tabla 27.- Mezclas de coagulantes utilizados y polímeros de floculación	103
Tabla 28.- Condiciones del agua cruda muestreada.	105
Tabla 29.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA.	107
Tabla 30.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB.	107
Tabla 31.- Combinación de coagulantes FL4540 y CFe.	107
Tabla 32.- Resultados obtenidos de la comparación de diferentes mezclas de coagulantes (Día 1).	108
Tabla 33.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+SA.	109
Tabla 34.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+PHB.	110
Tabla 35.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA.	111
Tabla 36.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB.	111
Tabla 37.- Combinación de coagulantes FL4635/FL4540 y PHB comparado con FL4540 y SA.	111
Tabla 38.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+PHB.	111
Tabla 39.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+SA.	112
Tabla 40.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA variando la cantidad de coagulante agregado.	113
Tabla 41.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB variando la cantidad de coagulante agregado.	114
Tabla 42.- Comparación de mezcla FL4540+SA y FL4540+PHB.	114
Tabla 43.- Comparación de floculantes en mezcla 10%FL4540+90%PHB.	114
Tabla 44.- Comparación de floculantes en mezcla 10%FL4540+90%SA.	114
Tabla 45.- Comparación de mezclas de coagulantes seleccionados con los utilizados en la planta de tratamiento.	117
Tabla 46.- Comparación de mezclas de FL4540 + SA, SICO + SOSO y polímeros utilizados en planta de tratamiento.	118
Tabla 47.- Pruebas con mezcla SICO + SOSO y SA.	118
Tabla 48.- Pruebas con mezcla SICO + SOSO y PHB.	118
Tabla 49.- Mezclas de FL4540+SA adicionando cantidades variables de floculante, comparando con insumos de línea.	120
Tabla 50.- Comparación de FL4540 + SA, FL4540 + PHB y SICO + SOSO.	120
Tabla 51.- Comparación de datos obtenidos de una mezcla de FL4540+SA y P-106+O-138+S-4500.	120
Tabla 52.- Mezclas correspondientes a FL4540+SA+FO4800 variando la cantidad de coagulante y floculante.	122
Tabla 53.- Mezclas correspondientes a FL4540+PHB+FO4650 variando las cantidades de coagulante y floculante.	122



Tabla 54.- Mezclas correspondientes a SICO+SOSO+FO4650 variando las cantidades de coagulante y floculante.	122
Tabla 55.- Comparación de parámetros resultantes a partir de datos obtenidos en pruebas de jarras.	123
Tabla 56.- Comparación de resultados de mezclas de FL4540+SA+FO4800 y SICO+SOSO+FO4650.	124
Tabla 57.- Datos obtenidos en mezclas de jarras aplicando cantidades de Hidróxido de Calcio a diferentes concentraciones.	124
Tabla 58.- Pruebas con mezcla de FL4540+SA+FO4800 a diferentes dosificaciones.	125
Tabla 59.- Pruebas de mezcla SICO+SOSO+FO4650 a diferentes combinaciones.	126
Tabla 60.- Pruebas de mezcla SICO+SOSO+FO4650 a diferentes combinaciones (continuación).	126
Tabla 61.- Pruebas de mezcla FL4540+PHB+FO4650 a diferentes combinaciones.	126
Tabla 62.- Listado de propuestas para análisis de laboratorio.	127
Tabla 63.- Combinaciones para análisis de laboratorio.	128
Tabla 64.- Resultados de análisis de laboratorio certificado.	128
Tabla 65.- Listado de muestras para análisis con pH modificado.	130
Tabla 66.- Resultados de laboratorio certificado.	130
Tabla 67.- Costos de productos.	131

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.- Distribución del agua en el mundo.	20
Ilustración 2.- Ríos principales con sus cuencas hidrográficas.	24
Ilustración 3.- Volumen entregado del río Colorado (hm ³).	24
Ilustración 4.- Principales lagos de México por cuenca propia.	25
Ilustración 5.- Disponibilidad natural media per cápita.	26
Ilustración 6.- Precipitación pluvial anual 2010.	27
Ilustración 7.- Núcleos de población de mas de 500 mil habitantes, proyección 2009.	28
Ilustración 8.- Diagrama de bloques del proceso productivo textil.	43
Ilustración 9.- Clasificación de los sólidos presentes en aguas residuales de concentración media.	53
Ilustración 10.- Tipos de tratamiento para aguas residuales.	59
Ilustración 11.- Potenciales de un coloide.	63
Ilustración 12.- Adsorción de contraiones en la partícula coloidal.	64
Ilustración 13.- Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita.	66
Ilustración 14.- Zonas de coagulación de turbiedad según los estudios de Amirtharajh y Mills para distintas dosis de sulfato de aluminio a distinto pH.	69
Ilustración 15.- Diagrama de coagulación obtenidas experimentalmente para aguas de 200 UNT de turbiedad, 5 u.c. de color verdadero y 30 mg/L de alcalinidad con pH de 7.5 (Según Campos y Di Bernardo).	70
Ilustración 16.- Porcentaje de turbiedad residual para distintas dosis de coagulantes aplicadas a distintos pH del agua mezclada.	71
Ilustración 17.- Dosis de Al (III) necesaria para remover el 50% de color y la turbiedad del agua. Concentraciones iniciales: 25 mg/L de ácido fúlvico y 50 mg/L de caolín (Según Hall y Pckhman).	72
Ilustración 18.- Efecto del sulfato férrico en coagulación de aguas B y C a pH constante.	73
Ilustración 19.- Mínima dosis de sulfato férrico en función del color del agua cruda.	74
Ilustración 20.- Adsorción de color producida por los productos poliméricos de la hidrólisis de los coagulantes.	74
Ilustración 21.- Dominios de la remoción de color ácido húmico inicial, 4 mg/L (100 c.u.); turbiedad, 27-30 UNT).	75
Ilustración 22.- Ejemplos de polielectrolitos.	78
Ilustración 23.- Tanque rectangular alargado con rastra para lodo.	80
Ilustración 24.- Tanque sedimentador primario de tipo circular, con alimentación por el borde.	81
Ilustración 25.- Sedimentador circular, alimentación central con rastras para recolección de lodos.	81
Ilustración 26.- Reúso del agua residual en México, 2009.	84
Ilustración 27.- Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.	89
Ilustración 28.- Equipo de prueba de jarras.	93
Ilustración 29.- Estatores o deflectores.	94
Ilustración 30.- Características de los vasos de prueba de jarras y sifón para tima de muestras.	95
Ilustración 31.- Diagrama de bloques del procedimiento experimental realizado.	104



Índice de gráficos

Gráfico 1.- Tensión hídrica y escasez del agua.	17
Gráfico 2.- Variación de agua renovable media per cápita de 1950 a 2010 (m3/hab-año)	26
Gráfico 3.- Precipitación pluvial media mensual histórica en México en el periodo de 1971 al 2000 (milímetros).	27
Gráfico 4.- Evolución del volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2009	33
Gráfico 5.- Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos, 2009	33
Gráfico 6.- Caudal de aguas municipales tratadas.	34
Gráfico 7.- Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2009	35
Gráfico 8.- Caudal de aguas residuales industriales	36
Gráfico 9.- Extracción para uso industrial por regiones administrativas	39
Gráfico 10.- Consumo de agua de los principales giros industriales	39
Gráfico 11.- Aguas residuales descargadas por sector.	40
Gráfico 12.- Porcentaje en volumen de descargas de aguas residuales	41
Gráfico 13.- Personal empleado en el sector textil, vestido y cuero en estados clave.....	45
Gráfico 14.- Contribución por estado al PIB nacional total para el sector textil, vestido y cuero (%) – Dic 08 ...	45
Gráfico 15.- Importaciones EE.UU de textil y vestido - hasta Julio 2009 (en millones de US\$).	46
Gráfico 16.- % cambio en el total de importaciones EE.UU de textil y vestido (valor \$) para el 2009, comparado al 2008 (hasta julio).	47
Gráfico 17.- Comparación grafica de parámetros obtenidos de las muestras de agua cruda.	105
Gráfico 18.- Comparación entre SST y turbidez de acuerdo con los datos obtenidos del agua cruda.	106
Gráfico 19.- Comparación de SST y Turbidez.	108
Gráfico 20.- Color residual obtenido al final de la prueba de jarras resultado de la selección de mezclas.	108
Gráfico 21.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+SA.	109
Gráfico 22.- Comparación del color residual obtenido de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+SA.	109
Gráfico 23.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+PHB.	110
Gráfico 24.- Comparación del color residual obtenido de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+PHB.	110
Gráfico 25.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez en mezcla FL4540+PHB.	112
Gráfico 26.- Comparación de color en mezcla FL4540+PHB.	112
Gráfico 27.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez en mezcla FL4540+SA.	113
Gráfico 28.- Comparación de color en mezcla FL4540+SA.	113
Gráfico 29.- Cantidades de SST y Turbidez residual obtenida de la comparación de floculantes en mezcla FL4540+PHB.	115
Gráfico 30.- Comparación de color residual obtenido de la mezcla FL4540+PHB comparando diferentes floculantes.	115
Gráfico 31.- Cantidades de SST y Turbidez residual obtenida de la comparación de floculantes en mezcla FL4540+SA.	116
Gráfico 32.- Comparación de color residual obtenido de la mezcla FL4540+SA comparando diferentes floculantes.	116
Gráfico 33.- Resultados obtenidos de SST y Turbidez de las mezclas seleccionadas.	117
Gráfico 34.- Resultados obtenidos con respecto al color residual obtenido en las mezclas seleccionadas.	117
Gráfico 35.- Comparación de SST y turbidez residual de las mezclas utilizadas.	119
Gráfico 36.- Color residual resultante de la mezclas utilizadas.	119
Gráfico 37.- Representación grafica de los valores obtenidos de SST y Turbidez de acuerdo con los datos de la tabla 51.	121
Gráfico 38.- Representación grafica del color residual de acuerdo con los valores de la tabla 51.	121
Gráfico 39.- Representación grafica de la cantidad de SST y Turbidez resultantes de acuerdo con la tabla 55.	123
Gráfico 40.- Comparación de color resultante de las diferentes mezclas utilizadas en la tabla 55.	123
Gráfico 41.- Representación grafica de los valores presentados de SST y turbidez en la tabla 56.	124
Gráfico 42.- Representación grafica de los valores presentados de color en la tabla 56.	125
Gráfico 43.- Comparación de parámetros SST y turbidez de las pruebas de jarras.	126
Gráfico 44.- Cantidad de color residual obtenido de las muestras utilizadas en prueba de jarras.	127
Gráfico 45.- Aluminio residual de las mezclas analizadas.	129
Gráfico 46.- Color residual de las mezclas analizadas.	129
Gráfico 47.- Comparación de muestras con relación al aluminio residual.	130



Índice de fotografías

Fotografía 1.- Recipiente de muestreo de agua.	100
Fotografía 2.- Toma de parámetros de campo.	100
Fotografía 3.- Preparación de polímeros ayudantes de floculación a una concentración de 0.1%.	101
Fotografía 4.- Preparación de coagulantes.	101
Fotografía 5.- Llenado de jarras para pruebas de laboratorio.	101
Fotografía 6.- Prueba de coagulación.	102
Fotografía 7.- Prueba de floculación.	102
Fotografía 8.- Periodo de sedimentación.	102
Fotografía 9.- Extracción de muestra.	103
Fotografía 10.- Análisis de resultados.	103



Justificación del tema

Desde el punto de vista de las diferentes fuentes de generación, las aguas residuales pueden definirse como una combinación de líquido o aguas portadoras de residuos procedentes de residencias, instituciones públicas, así como de centros comerciales e industrias, a las que, eventualmente, pueden agregarse aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Estas aguas, deberían ser conducidas finalmente a cuerpos receptores o a la misma tierra, sin embargo; la compleja pregunta sobre qué contaminantes deben ser eliminados para proteger el entorno precisa de una contestación específica en cada caso concreto. Para ello se requiere de un análisis acerca de las condiciones y necesidades locales, junto con la aplicación del conocimiento científico, de la experiencia previa de la ingeniería y de las normas reguladoras de la calidad de las aguas existentes.

Actualmente, la mayoría de los procesos unitarios utilizados en el tratamiento de aguas residuales experimentan una investigación intensa y continua desde el punto de vista de la ejecución y aplicación. Como resultado, se han desarrollado y ejecutado muchas modificaciones a las distintas operaciones y procesos, muchos de ellos por la necesidad de adecuarse a los crecientes y rigurosos requerimientos para la mejora ambiental del agua.

Los sistemas de tratamiento son las herramientas utilizadas para controlar y eliminar la contaminación del agua. A través de éstas, se mejora la calidad de la misma, propiciando la posibilidad de reúso y tratando de proteger la salud pública. Como resultado, las industrias deben cumplir con ciertos requerimientos de descarga de acuerdo a la localización y leyes gubernamentales en las que se encuentre. Para cumplir con este requisito indispensable, se requiere de un efectivo sistema de tratamiento que cumpla con las especificaciones brindando un mejor beneficio económico-empresarial.

Enfocándonos a las plantas de tratamiento de la industria textil, las condiciones de operación pueden variar de acuerdo a las características de los efluentes; ya que los componentes utilizados en la producción textil son variables dependiendo del proceso que se utilice en planta (no es lo mismo teñido de algodón, que el de mezclilla) y estos a su vez modifican las descargas de agua residual de acuerdo a la naturaleza química de sus componentes, por lo que las plantas de tratamiento de agua suelen tener una combinación de tratamientos biológicos y fisicoquímicos.

Para diseñar, operar u optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales de cualquier tipo, es necesario analizar las propiedades del agua residual, debido a que éstas varían en función del uso que ha tenido. Es por ello que para el diagnóstico y evaluación de los sistemas de tratamiento se llevan a cabo muestreos de las descargas y análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos.



Planteamiento del problema

Actualmente, las industrias se ven obligadas a cumplir con ciertos requerimientos ambientales que hasta hace unos años no se consideraban prioritarios. En relación a la contaminación de las aguas, hoy en día las sociedades gubernamentales manifiestan mayor interés en conservar los bienes nacionales; no sólo para evitar desequilibrios ecológicos, sino también para promover el uso de agua tratada en variados sectores sociales, como consecuencia, se ven en la necesidad de monitorear las descargas industriales para corroborar que se encuentren de acuerdo a las condiciones establecidas dentro de las normas de cada lugar.

La mayoría de las industrias pretenden cumplir con los requisitos manifestados dentro de las normas establecidas, pero este proceso requiere de una inversión económica significativa anualmente. Con relación a la industria textil; esta requiere principalmente de plantas de tratamiento de aguas residuales con tratamientos biológicos y fisicoquímicos, estos últimos funcionan con la implementación de insumos químicos para su operación.

Sin embargo, la mayoría de los casos; los insumos utilizados son de alto costo, que generalmente pueden ser sustituidos por otros con condiciones de operación similares; brindando así un mejor sistema de operación a menor costo.

Con la finalidad de cumplir con este requisito para obtener características de descarga específicas en relación a la cantidad de color desechado; se realizará una serie de actividades y pruebas de laboratorio para seleccionar insumos alternativos que puedan ser usados en el proceso de tratamiento; tratando de obtener una mejor calidad de en la descarga y disminuyendo los costos de operación.



Introducción

En México, el aumento poblacional ha generado la implementación de servicios más eficientes, tales como drenaje, energía eléctrica, medios de comunicación y sobre todo el suministro de agua. En la industria, la importancia del líquido radica principalmente en los diferentes procesos a los que esta sometido; los cuales contribuyen por otro lado a descargas que, en muchas ocasiones, son difíciles de tratar dependiendo del proceso al que ha sido sometida.

Con respecto a las descargas originadas de la industria textilera, el presente trabajo tiene como finalidad principal disminuir la cantidad de color residual por medio de la utilización de diferentes polímeros dentro del tratamiento fisicoquímico; tratando de igual manera de disminuir los costos de operación; esto con ayuda de una serie de pruebas de laboratorio para su selección.

En primera instancia, se hace referencia a aspectos generales de la problemática del agua y su impacto directo en el desarrollo social, político y ecológico. La relación que existe en el consumo del líquido en la industria y las características de los desechos producidos por la misma.

Por otra parte, también se presenta las observaciones más importantes y relevantes que influyen directamente para un mejor tratamiento del agua; tomando en cuenta los principales parámetros de contaminación, las características de las aguas y sobre todo los principales esquemas de tratamiento aplicables al proyecto.

Teniendo como referencia que la descarga de agua proviene de una fábrica textil, el tipo de experimentación propuesta se basa en una planta con características específicas y definidas; las cuales corresponden a un tratamiento biológico y fisicoquímico; en donde en este último se desea realizar la sustitución de insumos químicos por otros de igual naturaleza; de tal manera que las condiciones de descarga sean lo mas optimas técnicamente y económicamente, logrando una descarga aceptable a un valor razonable.

De acuerdo a esto; se presenta por último una serie de actividades realizadas a nivel laboratorio para determinar cuáles son los insumos más prometedores para su sustitución; tomando en cuenta que las cantidades que se presenten pueden variar a las aplicadas en plantas; debido a las diferencias de volumen y flujo.

Un aspecto interesante en la planta de tratamiento es la combinación de tratamiento biológico con fisicoquímico; en donde el orden utilizado genera una estabilización del sistema. Es importante el tratamiento de las aguas residuales, y sobre todo el orden del proceso; debido a que si una de las etapas no está estabilizada adecuadamente, se convierte en un problema para las demás y, como resultado, un desequilibrio en la calidad del producto final.



Capítulo 1. Desarrollo sustentable y problemática del agua

La aparente abundancia del agua en el mundo ha dado la impresión, en el pasado, de que se trataba de un bien inagotable. Era también el más barato. En la mayor parte de regiones el agua era gratuita. Todo ello ha conducido al hombre a derrocharla.

A lo largo del desarrollo de este primer capítulo, se presentan los aspectos más relevantes en relación con el desarrollo sustentable en materia de agua y la problemática surgida por su escasez debido a los factores contaminantes producidos principalmente por la sobrepoblación y las actividades realizadas en la vida cotidiana del ser humano, además de los problemas sociales y económicos que implica el uso irracional del recurso. Se ha constatado que la explotación irracional de un recurso de superficie o subterráneo provoca déficit de agua y este tiende a aparecer en nuevos lugares varias veces por año. Es probable que los problemas sean causados por la contaminación; en todos los casos, comprometen el desarrollo urbano y económico.

1.1. Desarrollo sustentable

Un enfoque optimista publicado en el informe denominado "Nuestro Futuro Común" [53], se plantea la posibilidad de obtener un crecimiento económico basado en políticas de sustentabilidad y expansión de la base de recursos ambientales. Su esperanza de un futuro mejor, es sin embargo, condicional. Depende de acciones políticas decididas que permitan desde ya el adecuado manejo de los recursos ambientales para garantizar el progreso humano sostenible y la supervivencia del hombre en el planeta.

A finales de la década de los 80's, la sustentabilidad se convirtió en una exigencia emergente en la agenda de los movimientos y organizaciones sociales, del sector privado y de las políticas y acciones de algunos gobiernos. Para los 90's, la sustentabilidad pasó de ser exigencia emergente a un tema obligado tanto en el debate político como en cualquier programa de gobierno.

Como ejemplo, se menciona el uso difundido de la metáfora de la «tragedia de los comunes»¹ que provocó en determinado momento una confusión que tiende a igualar lo comunal con lo común aunque resulta claro que no son sinónimos.

El ejemplo que Hardin ofrece, se puede resumir así:

Imagínese un pastizal cuyo uso es compartido entre un número cualquiera de individuos. Cada uno de esos pastores tiene un número dado de animales en ese pastizal. Los pastores observan que a pesar de ese uso, queda suficiente pasto no consumido como para pensar que se podría alimentar aún a más animales. Consecuentemente, uno tras otro lo hacen. Pero en algún punto de ese proceso de expansión de la explotación del pastizal, la capacidad de éste para proveer suficiente

¹La tragedia de los comunes es un dilema descrito por Garrett Hardin en 1968, el cual describe una situación en la que los individuos, motivados por el interés personal actuando independiente pero racionalmente, terminan por destruir un recurso compartido limitado, aunque a ninguno de ellos les convenga que tal destrucción suceda.



alimento para los animales es sobrepasada, consecuentemente, todos los animales perecen debido al agotamiento o sobreexplotación del recurso. [11]

A pesar de que, el principal problema que motivó al autor fue la sobrepoblación, esto implicaba un uso inconsciente del término de sustentabilidad, aunque no referido directamente al cuidado ambiental. De acuerdo al ejemplo presentado por Hardin, el aspecto por el que dirige su atención, se refiere a que no importa cual sea el recurso que interese, el crecimiento de la población finalmente fuerza primero a imponer controles sobre su uso.

Partiendo de esto; el concepto oficial de desarrollo sustentable, nace a partir de la década de los 80's. Este término acuñado en el año de 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo llamada Comisión Brundtland, es fuertemente impulsado por las políticas liberalizadoras impuestas por los organismos financieros internacionales como resultado de la crisis de deuda, sufrida por los países en desarrollo en esa década. Dicho concepto se define como aquel que "Satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". [45]

A partir de lo anterior, al decir que el desarrollo sustentable implica la satisfacción de las necesidades de las sociedades presentes, pero sin poner en riesgo la de las generaciones futuras, lo que en verdad se indica es que ya no sólo tenemos que preocuparnos por asignar racional y eficientemente los escasos recursos hacia fines alternos de utilización, sino que también lo tenemos que hacer sin degradar la base biofísica sobre la cual se erige todo el circuito económico. Aludimos, de esta forma a la eficiencia y a la equidad, y no solamente entre los agentes sociales presentes, los cuales sabemos tienen capacidad de presión, y diferentes formas de representación y decisión, sino también entre los individuos y agentes sociales futuros.

Por otra parte, como siguiente evento internacional relacionado a los problemas presentados; se presenta la reunión de la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), conocida como la Cumbre de Río de Janeiro, incorpora al derecho sobre el desarrollo en junio de 1992, derecho que tienen las futuras generaciones en el principio #3 estableciendo: "El derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras"; y en el principio #4 que postula el derecho al desarrollo sostenible como un fin a obtener, manifestándose de la siguiente forma: "A fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente deberá constituir parte integrante del proceso de desarrollo y no podrá considerarse en forma aislada". [8]

Ante el creciente reclamo de la sociedad civil por crisis ambientales en zonas metropolitanas internacionales, en 1983 se crea la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). No obstante, este avance institucional expresa la respuesta tardía del país ante la gravedad de la contaminación ambiental urbana y de la degradación ecológica acumulada en el país.

Más tarde en 1988, se publica la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que da como inicio en México un nuevo periodo, en el cual se añadieron a las prioridades de estado existentes: combate a la inflación, ajuste macroeconómico recesivo, apertura comercial y privatización económica. Dentro de esta Ley, se reunieron un conjunto de herramientas jurídicas que han hecho posible los



avances en torno a la gestión ambiental, ya que no sólo regulan la contaminación ambiental, sino que también incorpora el tema del uso sustentable de los recursos naturales. Además, existen otros ordenamientos que regulan conductas que inciden en la protección de medio ambiente como son la Ley de Vida Silvestre, la Ley Forestal, la Ley de Pesca, la Ley de Bienes Nacionales que ordena la Zona Federal Marítimo Terrestre, la Ley de Aguas Nacionales, entre otros.

Esta lenta y tardía evolución institucional del país en materia ambiental se demuestra con la creación Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) hasta 1992 y que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) cediera el paso a la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), para que más tarde, también en diciembre de 1994, se conformara la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), la cual fue creada con el compromiso de formular y vigilar el cumplimiento de las leyes y normas en materia ambiental, así como estimular el aprovechamiento racional de los recursos naturales renovables, no sólo para su preservación sino para asegurar el aumento de capital natural del desarrollo económico nacional y contribuir a mejorar el nivel de vida de la población, garantizando su sustentabilidad presente y futura.

De alguna u otra forma, en México se ha buscado instaurar un régimen jurídico normativo, que coordine las problemáticas ambientales y la utilización sustentable del aumento de capital natural, previendo que el grado de capacidad de dichas normas y su aplicabilidad hagan de ellas mecanismos efectivos de preservación del ambiente y de los recursos naturales.

En este mismo sentido, la Carta Magna establece en su articulado diversas disposiciones de carácter ambiental que son la base del sistema jurídico actual. Es importante mencionar que a partir del artículo 27, referido principalmente a la conservación de los recursos naturales, se ha dado suma importancia al medio ambiente. El desarrollo sustentable lo encontramos implícito en el texto del artículo constitucional donde se vislumbra el concepto de conservación de los recursos naturales señalando que:

*“Artículo 27.- La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con el objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana...”.
“Conservación mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico...” [6]*

1.2. Problemática del agua

Llevando el concepto de desarrollo sustentable en términos ambientales, la contaminación ambiental es uno de los grandes problemas de nuestro tiempo nacional e internacionalmente. El desarrollo tecnológico, la necesidad de expansión de las industrias, el crecimiento desbordado de las zonas urbanas, así como la arrogancia y simplicidad del hombre son el principal problema. Este asunto que se presenta en la actualidad es un tema que ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de muchos de los habitantes del planeta.



Con relación a la problemática del agua y desarrollo sustentable, se tiene que analizar el problema de manera global y local. Problemas como población, deforestación, contaminación de suelo y aire, desertificación, clima, basura, salinización de suelos y destrucción de la capa de ozono; son los principales causantes del desequilibrio hídrico, ya que la distribución de las aguas, tanto continentales como subterráneas, están estrechamente relacionadas con estos factores.

Los niveles de contaminación son tan altos cada día, que provocan la desaparición de vida de los ríos y sus aguas se vuelven poco útiles para las actividades económicas, o en el peor de los casos, peligrosas para el consumo humano. Aún más, la contaminación del agua continental daña la fertilidad de los suelos y contamina también a plantas y animales.

A medida que crece la población aumenta el número de países que confrontan condiciones de escasez de agua. Un país experimenta tensión hídrica² cuando el suministro anual de agua desciende a menos de 1,700 m³ por persona. Cuando desciende a niveles de 1,700 m³ a 1,000 m³, pueden preverse situaciones limitadas de agua y cuando los suministros anuales de agua bajan a menos de 1,000 m³, el país enfrenta escasez de agua; situación que amenaza la producción de alimentos, obstaculiza el desarrollo económico y daña a los ecosistemas. Actualmente el 70% del total de agua fresca en el mundo se usa para producir alimentos y fibras. Es un fenómeno reciente, en 1950 no más de diez países tenían este problema, en 1995, 31 países con una población conjunta de más de 458 millones de habitantes, enfrentaron tensión hídrica o escasez de agua. [54]

La proyección indica que para el 2050, 66 países que comprenden dos tercios de la población mundial se enfrentarán a este problema. Las consecuencias de este fenómeno son de tipo social, económico, político y ecológico (gráfico 1).

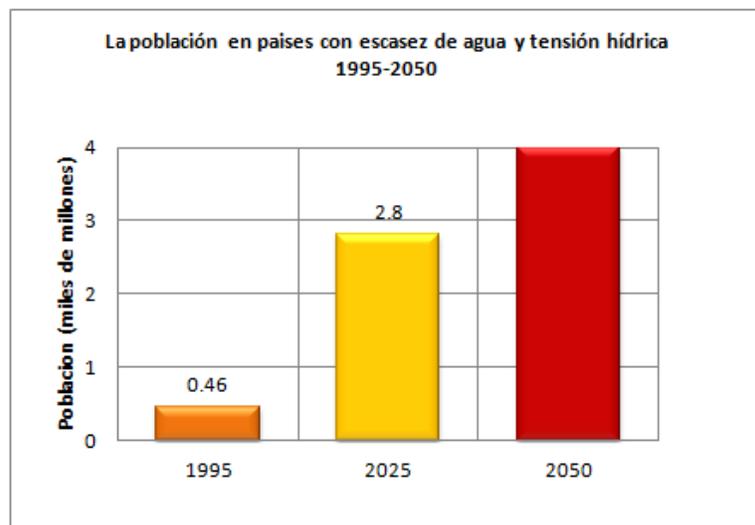


Gráfico 1.- Tensión hídrica y escasez del agua.

² Categoría convencional que utilizan los hidrólogos, utilizada para indicar que un país tiene un suministro anual de agua dulce renovable entre los 1000 m³ y 1700 m³ por persona. Estos países probablemente experimenten condiciones temporales o limitadas de escasez de agua.



En pocas palabras, el crecimiento constante en la demanda de agua se debe principalmente a crecimiento poblacional y a la elevación en el nivel de vida. Los principales problemas de abastecimientos se deben al agotamiento de las fuentes locales, la contaminación de dichas fuentes, a los costos elevados de captación y conducción del agua; y a los conflictos políticos y sociales generados por los intereses de diferentes usuarios sobre las fuentes. Ante esta situación, se presentan problemas como falta de cultura en el reúso del agua, desperdicio de la misma; además de presentar altas cuotas de consumo del vital líquido.

Si no se toman acciones, según datos de diferentes organizaciones internacionales, en las próximas décadas el problema será irremediable. Con respecto a dichos problemas, la ONU a través de un programa mundial de evaluación de recursos hídricos, menciona:

En los años transcurridos desde el lanzamiento del primer informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo en 2003, este ha sido testigo de considerables cambios. Se han observado numerosos e importantes desastres relacionados con el agua: el tsunami en el Océano Índico, los huracanes del Caribe, el Pacífico Oeste y Estados Unidos en 2004 y 2005; grandes sequías en Nigeria, Mali, España y Portugal. Todos ellos son un recordatorio constante del poder destructivo del agua y de la miseria que supone su carencia en tantas regiones del mundo. [55]

Con relación a esta cita, entre 1960 y 2006, se produjo un aumento significativo de eventos extremos relacionados con el agua, como inundaciones, vendavales, desprendimientos de tierra y sequías. Entre 1990 y 2004 la distribución de desastres relacionados con el agua por región fue: Asia 38%, América 25%, África 21%, Europa 11% y Oceanía 5%. Las inundaciones representaron más del 65% de las personas afectadas por desastres naturales, mientras que el hambre afectó casi al 20%. Se calcula que entre 1992 y 2001 las pérdidas por desastres relacionados con el agua se elevaron a 446 millones de USD a nivel mundial, lo que representa un 65% de las pérdidas económicas causadas por la totalidad de los desastres naturales. [54]

Actualmente, diferentes eventos similares han ocurrido; como el terremoto-tsunami presentado en Japón en el 2011; denominado oficialmente por la Agencia Meteorológica de Japón como el terremoto de la costa del Pacífico en la región de Tōhoku, además de lluvias, granizadas y nevadas presentadas en lugares y temporadas no habituales, como es el caso de México, Roma, EU, Chile, Indonesia; entre otros durante los años 2010, 2011 y 2012.

La sustentabilidad del manejo del agua implica que el consumo actual debe hacerse a una tasa que permita un volumen y calidad suficiente del recurso para las generaciones futuras. Tal patrón de consumo es posible sólo mediante un cambio sustancial en la forma en que se regula la demanda, pero las medidas necesarias para reformar la actual política de manejo enfrentan barreras institucionales y políticas. Los obstáculos podrán ser superados, entre otros medios, con análisis detallados de la situación en sus dimensiones más relevantes, entre las que se incluyen las esferas económica, institucional y política.

1.2.1. Contaminación del agua

De acuerdo con la OMS, existen tres tipos de agua: potable, sucia y contaminada [14]. El agua potable se caracteriza porque es clara, incolora, inodora, no adquiere olor cuando se calienta, tiene sabor agradable, está exenta de amoníaco, nitritos, nitrógeno sulfurado y materias viscosas, no contiene metales pesados con excepción de indicios de hierro, si se



evapora 1L de ésta el residuo total no debe de exceder el medio gramo y debe contener menos de 20 colonias de *E. coli* por mL.

El agua sucia tiene modificaciones, ya sea en su sabor, color u olor, como por ejemplo, aguas tratadas con fines industriales.

Respecto al agua contaminada, la OMS³ dice:

“Debe considerarse que un agua esta contaminada cuando su composición o estado están alterados de tal modo que ya no reúnen las condiciones a una u otro o al conjunto de utilizaciones a las que se les hubiera destinado en su estado normal”.

Los contaminantes del agua pueden ser físicos, químicos y biológicos.

1. Los contaminantes físicos pueden ser sustancias radioactivas que eliminan las industrias o las investigaciones médicas y científicas.
2. Los contaminantes químicos pueden provenir de sustancias orgánicas e inorgánicas, por ejemplo; proteínas que se eliminan a través del drenaje de las casas, fábricas de alimentos, empacadoras, rastros o curtidurías, las grasas que provienen de las casas, fábricas de jabón o lavanderías, los carbohidratos de las fábricas de carbón, el petróleo, los aceites, los alquitranes, los detergentes sintéticos, el ácido sulfúrico, insecticidas, fertilizantes (nitratos), etc.
3. La contaminación biológica esta producida por bacterias, virus, parásitos, toxinas de los microorganismos y puede provenir de granjas, establos, curtidurías, o del drenaje de las casas, favoreciendo la transmisión de enfermedades como el cólera, la tifoidea, amibiasis, hepatitis, gastroenteritis, etc.

Mucho se habla de las plantas tratadoras para reutilización del agua en ciertas actividades donde no se requiere la calidad de potable (claro, dado el acondicionamiento de las aguas degradadas). Pero hemos olvidado que también hay desperdicios que no están a la vista y por ello no se les pone atención.

1.2.2. Escasez de agua en el ámbito internacional

El principal problema en torno al agua se debe a que estamos frente a un recurso que antes era considerado infinito y/o renovable en el caso de ser necesario y hoy esas consideraciones han cambiado. El agua es un recurso que se encuentra en el planeta en gran cantidad, pero lo cierto es que en su mayor parte no es apta para el consumo humano. La mayor parte es agua salada y el agua dulce presenta una situación crítica. [48]

El agua es un recurso que existe en el planeta en una cantidad fija cuyas proporciones estimadas son: 1400 millones de km³ que no puede aumentar ni disminuir. La mayor parte de ella, el 97,2% es agua salada, de muy escasa utilidad para la población; un 2,15% más se encuentra en los glaciares y los casquetes de hielo. El resto es agua dulce superficial y subterránea, pero la primera solamente representa unos 136.000 km³, menos del 0,7%. [48]

³ OMS: Organización Mundial de la Salud, organismo de las naciones unidas especializado en los aspectos relacionados con la salud y fundado en julio de 1946.

La tierra será el planeta de agua, pero el 97% se encuentra en los océanos. La mayoría está atrapada en los casquetes de hielo de la Antártida o bajo tierra, lo cual deja menos del 1% disponible para uso humano en lagos y ríos de agua dulce de fácil acceso. A diferencia del petróleo o del carbón, el agua es un recurso infinitamente renovable [48]. La reserva promedio de agua en los lechos de los ríos es baja (0,006%), mientras que las aguas de todos los lagos y pantanos representan solamente el 0,29% del total (tabla 1).

Tipo de reserva	% de la reserva en agua dulce	Detalle	% de la reserva en agua dulce
Hielo y nieve	69.6	Antártico	61.70
		Groenlandia	6.68
		Ártico	0.24
		Otros	0.98
		(montañas, "permafrost")	
Aguas subterráneas	30.15	Acuíferos	30.10
		Agua contenida en el suelo	0.05
Lagos y pantanos	0.29		
Agua contenida en la atmósfera	0.04		
Ríos	0.006		

Tabla 1.- Distribución de las reservas de agua dulce sobre el globo terrestre [54]

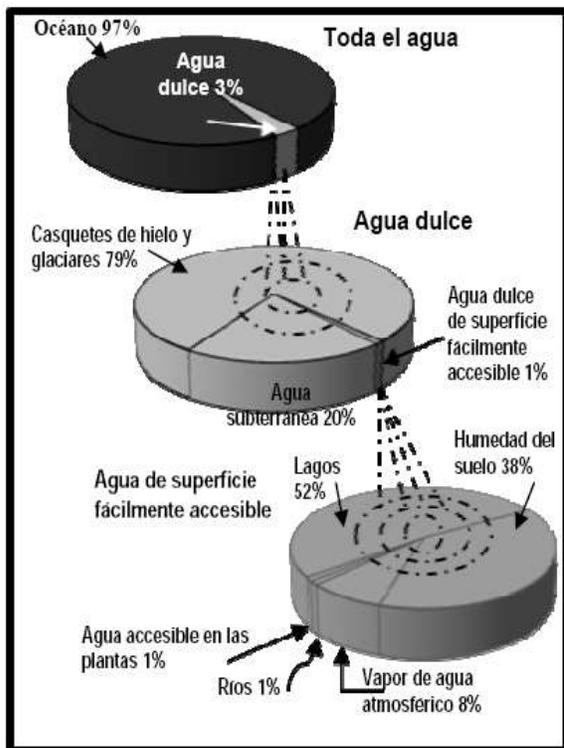


Ilustración 1.- Distribución del agua en el mundo [54]

Lo anterior indica, que a pesar de las enormes cantidades de agua en el mundo, ésta no se encuentra disponible uniformemente en todas las regiones. Sólo una cantidad de agua se renueva habitualmente con la precipitación pluvial y las nevadas, es por tanto, un recurso sostenible⁴ (ilustración 1). En total sólo un centésimo del 1% del suministro de agua del mundo se considera fácilmente accesible para uso humano.

La distribución del agua renovable es muy diferente en cada una de las regiones del planeta. Por ejemplo, el continente americano concentra la mayor disponibilidad de agua a nivel mundial. Con algo más del 31,3% de la superficie terrestre y 13,7% de la población global, la región cuenta con casi 47% de la disponibilidad mundial total de los recursos hídricos renovables.

En América latina y el Caribe es donde se concentra el mayor volumen de recursos hídricos, particularmente en Sudamérica, debido a sus importantes formaciones lacustres y ríos. Aunque el promedio regional de precipitación anual indica una gran abundancia del

⁴ Puede manifestarse en ese término porque el agua puede purificarse de manera natural, sin embargo; el tiempo requerido para su tratamiento es demasiado largo, por lo que la velocidad de regeneración es menor a la de consumo real.



recurso hídrico en el continente americano con respecto a otras regiones, su distribución irregular tanto en el espacio como tiempo, genera situaciones de disponibilidad restringida.

Las diferencias de distribución de los recursos hídricos no sólo ocurren entre regiones, sino también dentro de los propios países. La distribución de los biomas está estrechamente ligada a la variación climática, determinada por la altitud y latitud geográfica. Las causas más significativas que convierten al agua en fuente de rivalidad estratégica internacional son:

- El grado de su escasez.
- El grado en que su abastecimiento se comparte entre más de un estado.
- El poder relativo de los estados en la cuenca.
- La facilidad de acceso a determinada cuenca.

Sin importar la fuente o el motivo, el agua es claramente un recurso escaso en algunas regiones. Ya existen tensiones sobre el uso, la propiedad y los derechos sobre el agua, y es probable que aumenten en el futuro.

La cantidad y calidad de agua para consumo humano son factores indispensables para el desarrollo sustentable de la humanidad, el agua debe ser proporcionada a cada habitante del planeta como un derecho humano.

El agua se agota y no tiene sustitutos para mantener y generar vida en este planeta.	Los datos estadísticos anticipan que para 2025, 40 países en diferentes regiones experimentarán o estrés por falta de agua.
A partir del siglo XXI aparece una cuestión de corte conflictiva en torno al agua.	Se deteriora la calidad del agua a causa de la agricultura. La agricultura consume el 70% del agua mundial; el 20% la industrial y el 10% es para uso doméstico.
Cada veinte años se multiplica por dos la demanda de agua de la población del planeta.	El agua, a diferencia del petróleo, es un recurso que no cuenta con sustitutos, quién lo controle, controlará la economía universal y la vida del planeta.
1.400 millones de personas no tienen acceso al agua. (Un 24% de la población mundial).	En la cumbre de Johannesburgo 189 países presentes reconocieron al agua no como un derecho humano, sino como una necesidad vital.
Actualmente, más de treinta estados padecen problemas de escasez de agua, un bien de acceso difícil para más de mil millones de personas.	Existen 240 de las principales cuencas del mundo divididas entre dos o más países y se multiplican los conflictos.
En Europa, de sus 55 ríos, sólo 5 no están contaminados. La falta de agua potable es crítica en España, en el sur de Italia, en Grecia y los Balcanes, en parte de Holanda, Alemania, Países Bajos e Inglaterra.	En Asia menor, Medio Oriente, la Península Arábiga, Irán, Afganistán, Pakistán, India, Asia Central, parte de China, Japón y Corea, el estado es crítico. Y las situaciones no son distintas en Australia y África.

Tabla 2.- Indicadores de la problemática del agua que justifican la cualidad del agua como estratégica a partir del nuevo siglo [48]

1.3. Contexto geográfico de México

México se encuentra ubicado entre los meridianos 118°22' y 86°42' de longitud oeste y entre las latitudes 14°32' y 32°43' norte. La extensión territorial de los Estados Unidos Mexicanos comprende 1.964 millones de km² (tabla 3).



Extensión territorial		Fronteras		Coordenadas geográficas extremas:
Área total	1 964 375 km ²	Con Estados Unidos de América	3 152 km	Norte: 32° 43' 06" latitud norte, marcado en el Monumento 206, en la frontera con los Estados Unidos de América.
Área continental	1 959 248 km ²	Con Guatemala	956 km	
Área insular	5 127 km ²	Con Belice	193 km	
Zonas económicas exclusiva				Sur: 14° 32' 27" latitud Norte. Desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala.
De mar territorial	3 149 920 km ²	Longitud de línea de costa		Este: 86° 42' 36" longitud Oeste. Extremo suroeste de la Isla Mujeres en el Caribe mexicano.
Superficie total	5 114 295 km ²	Océano Pacífico	11 122 km	
		Golfo de México y Mar Caribe	7 828 km 3 294 km	
				Oeste: 118° 22'00" longitud oeste. Punta Roca Elefante de la Isla de Guadalupe, en el Océano Pacífico

Tabla 3.- Ubicación y extensión territorial en México [47]

Existen factores que determinan el clima de nuestro país. Por ubicación geográfica, la porción sur de México se encuentra en zona intertropical del globo terráqueo, en tanto que la porción norte se localiza en la zona templada. En México existe una gran variedad de climas. La ubicación geográfica y el relieve indican directamente sobre la disponibilidad del recurso hídrico.

Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500mm, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2,000mm por año.

En 2010 el 53,2% de la población del país habitaba en cotas superiores a los 1,500 m sobre el nivel del mar. México está conformado por 31 estados y un Distrito Federal, constituidos por 2,440 municipios y 16 delegaciones respectivamente⁵.

El estudio sobre la cuestión social depende necesariamente del análisis de la población y del territorio en que se asienta. Así, comprender la dinámica demográfica de México es indispensable para una adecuada interpretación de los distintos retos que enfrentamos en materia de empleo, vivienda, seguridad social, desarrollo y asistencia social, entre otros ámbitos.

A partir de mediados del siglo XX, la población muestra una marcada tendencia a abandonar las pequeñas localidades rurales y concentrarse en las zonas urbanas. Del 1950 al 2005, la población del país se cuadruplicó, y pasó de ser mayoritariamente rural⁶ (57,3%) a predominantemente urbana (76,5%).

1.4. Distribución de los recursos hídricos en México

Los recursos hídricos en México están constituidos por ríos, arroyos, lagos y lagunas, así como almacenamientos subterráneos y grandes masas de agua oceánica. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Nacional de Ecología (INE), se han identificado 1,471

⁵ INEGI, *catálogo de claves y entidades federativas, municipios y localidades 2009*.

⁶ La localidad rural se define como aquella con menos de 2 500 habitantes, en tanto que la localidad urbana cuenta con una población mayor a 2 500 habitantes.



cuencas hidrográficas en el país, las cuales, para fines de publicación de la disponibilidad⁷ de aguas superficiales, se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas. Al 31 de diciembre del 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, en tanto que para el 31 de diciembre de 2010 se habían añadido otras 9 cuencas.

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos, conforme a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001, de acuerdo con las coordenadas de las poligonales simplificadas del DOF del 13 de agosto del 2007, 3 de enero del 2008 y 28 de agosto del 2009.

A partir de la década de los 70's, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados. En el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985, y 100 acuíferos sobreexplotados al 31 de diciembre del 2009. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 53,6% del agua subterránea para todos los usos. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga.

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, en la que destacan 50 ríos principales (*ilustración 2*), por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental.

Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma, Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. Dos tercios del escurrimiento superficial pertenece a siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá, a la vez que sus cuencas representan el 22% de la superficie.

Por otro lado, México comparte ocho cuencas con los países vecinos: tres con los Estados Unidos de América (Bravo, Colorado y Tijuana), cuatro con Guatemala (Grijalva-Usumacinta, Suchiate, Coatlán y Candelaria) y una con Belice y Guatemala (Río Hondo).

Las aguas de los ríos Bravo, Colorado y Tijuana se comparten conforme a lo indicado en el "Tratado de Aguas", firmado en Washington, D.C. el 3 de febrero de 1944. En el caso del Río Colorado, el Tratado especifica que los Estados Unidos de América deberán entregar anualmente a México 1,850.2 millones de metros cúbicos (1.5 millones de acres pies por año) (*ilustración 3*).

Para el Río Tijuana, el tratado establece solamente que ambos países a través de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), emitirán recomendaciones para la distribución equitativa de sus aguas, elaborarán proyectos para obras de almacenamiento y control de avenidas, estimarán los costos y construirán las obras que se acuerden, repartiendo equitativamente los costos de construcción y operación.

⁷ Valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo.

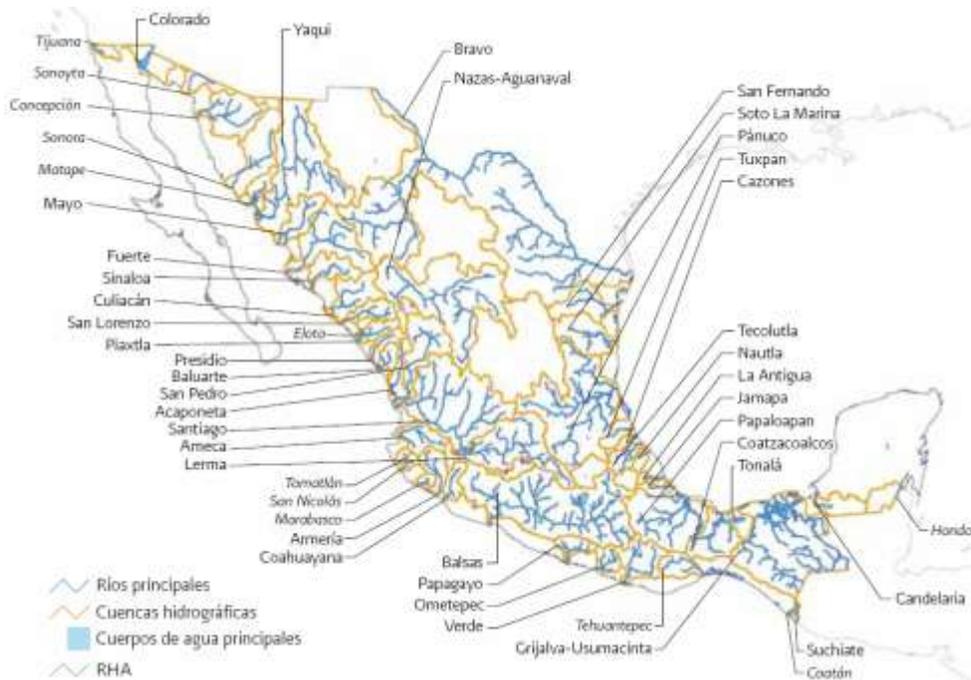


Ilustración 2.- Ríos principales con sus cuencas hidrográficas. [46]

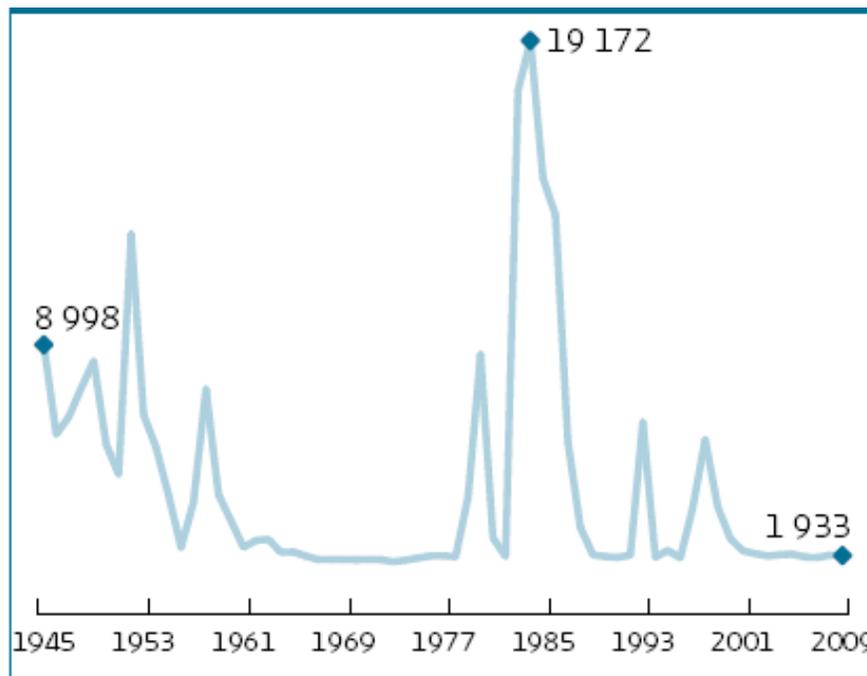


Ilustración 3.- Volumen entregado del río Colorado (hm³). [46]

Por lo que respecta al río bravo, en el tratado se establecen tres consideraciones sobre los seis cauces mexicanos antes referidos, que es necesario señalar:

1. El volumen que México debe proporcionar a los Estados Unidos de América por concepto del tercio de los seis cauces mexicanos mencionados previamente, no será menor, en conjunto, en promedio y en ciclos de 5 años consecutivos a 431,72

- millones de m^3 (350,000 acres pies) anuales, lo que equivale a suministrar un volumen mínimo de 2,158.6 millones de m^3 (1, 750,000 acres pies) en cada ciclo.
2. En casos de extraordinaria sequía o de serio accidente en los sistemas hidráulicos de los afluentes mexicanos que hagan difícil para México dejar escurrir los 431,72 millones de m^3 , los faltantes que existieran al final del ciclo de 5 años, se repondrán en el ciclo siguiente con agua procedente de los mismos tributarios.
 3. En caso de que se cubra la capacidad asignada que tienen los Estados Unidos de América en las presas internacionales que comparten ambos países (La Amistad y Falcón), con aguas pertenecientes a los Estados Unidos, se considerará terminado un ciclo de 5 años y todos los volúmenes pendientes de entrega totalmente cubiertos, iniciándose a partir de ese momento un nuevo ciclo.

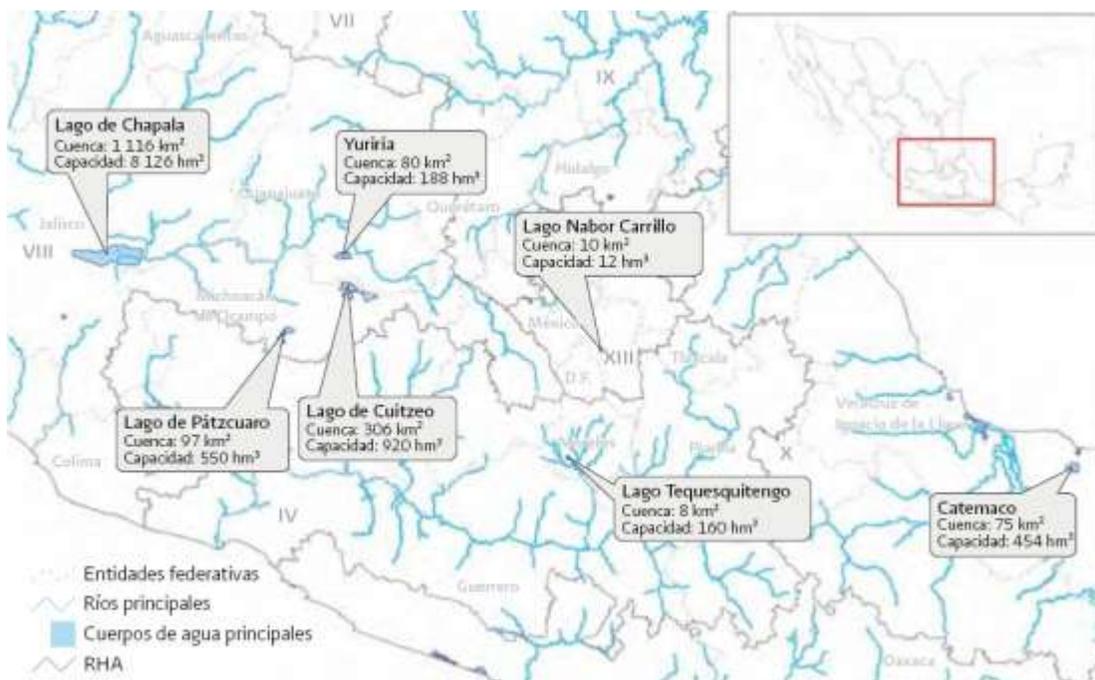


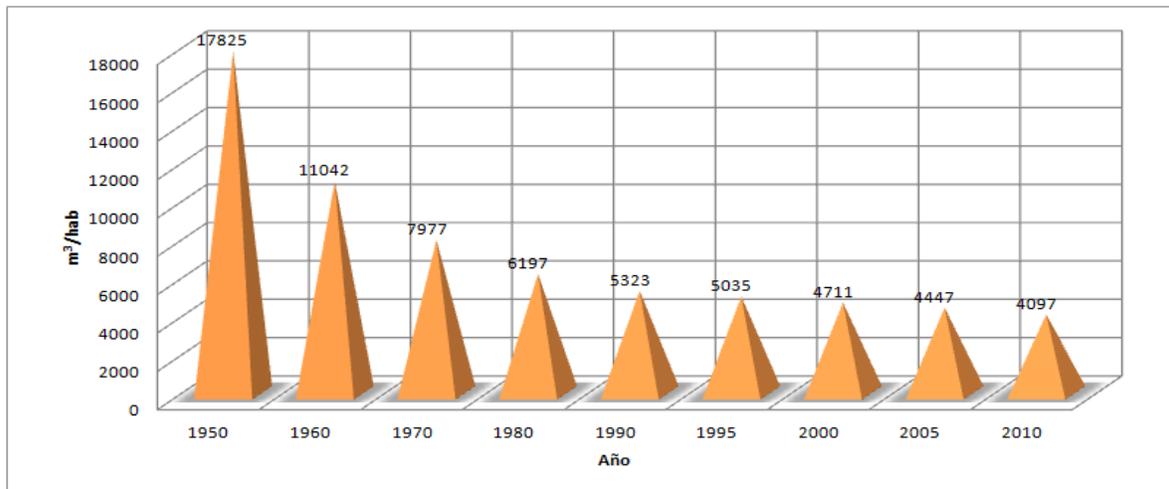
Ilustración 4.- Principales lagos de México por cuenca propia⁸.

En la ilustración 4 se presentan los principales lagos de México por la superficie de su cuenca propia. El lago de Chápala es el más grande de los lagos interiores de México y cuenta con una profundidad que oscila entre los 4 y 6 metros.

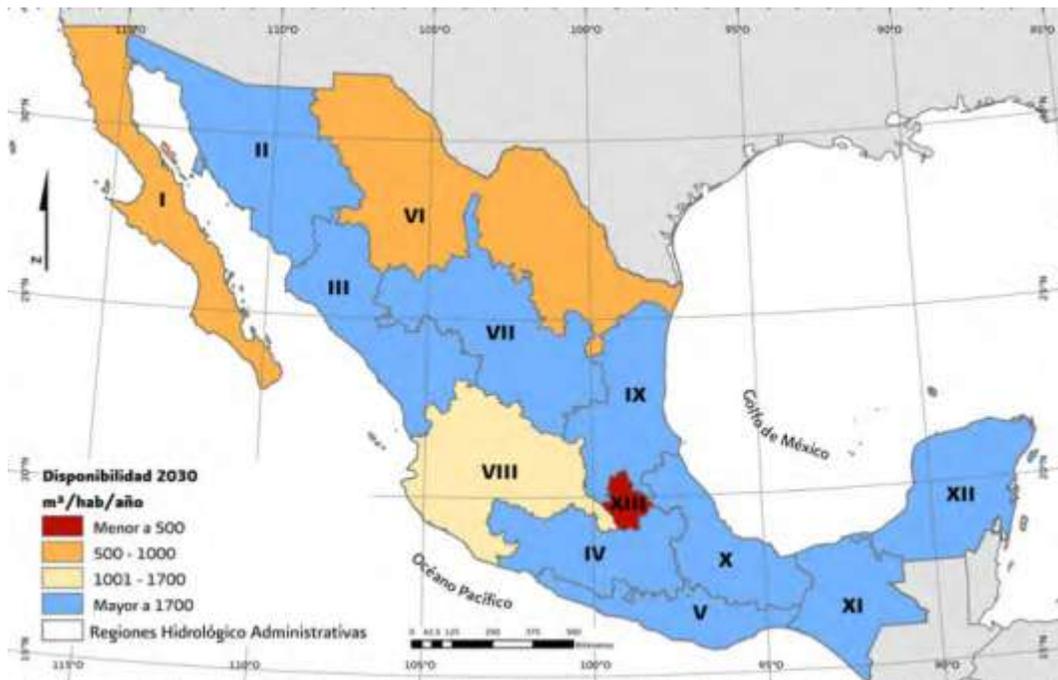
1.4.1. Disponibilidad natural media de agua *per cápita*

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de m^3 de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73,1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22,1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4,8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 460 mil millones de m^3 de agua dulce renovable, a lo que se denomina disponibilidad natural media.

⁸ Nota: Se refiere al volumen medio almacenado, al no disponerse de estudios actualizados de su capacidad de almacenamiento. La superficie señalada es la correspondiente a la cuenca propia.



El incremento de la población hará que la disponibilidad natural media per cápita de agua por habitante a nivel nacional disminuya de 4,230 m³/hab/año en el año 2010 a 3,800 en el 2030. Al año 2030 en algunas de las regiones hidrológico-administrativas, el agua renovable per cápita alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1,000 m³/hab/año, lo que se califica como una condición de escasez grave. [42]



Las Regiones Hidrológico-Administrativas I Península de Baja California, VI Río Bravo y XIII Aguas del Valle de México presentarán en 2030 niveles extremadamente bajos de agua renovable per cápita. Se deberá tener especial cuidado con el agua subterránea, ya que su sobreexplotación ocasiona el abatimiento de los niveles freáticos, el hundimiento del terreno y provoca que se tengan que perforar pozos cada vez más profundos para extraer el agua. Cabe aclarar que la mayor parte de la población rural, especialmente en zonas áridas, depende de manera significativa del agua subterránea.



1.4.2. Distribución de la precipitación pluvial

La precipitación normal del país en el periodo de 1971-2000 fue de 760 milímetros. Los valores normales, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) corresponden a los promedios calculados para un periodo uniforme y relativamente largo, el cual debe tener como mínimo 30 años de recabar información, lo cual se considera como un periodo climatológico mínimo representativo (gráfico 3). [42]

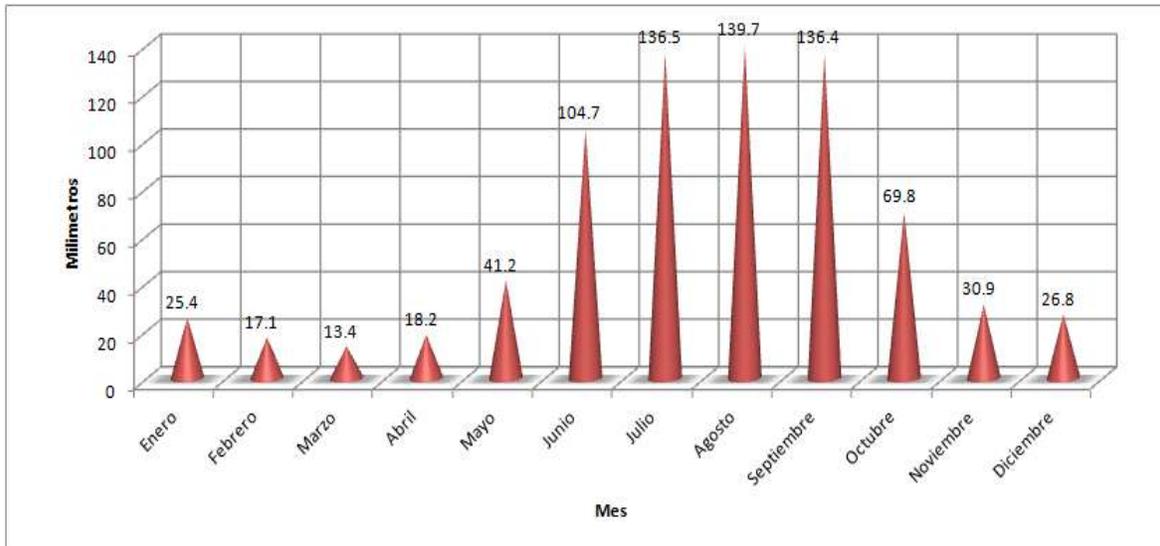


Gráfico 3.- Precipitación pluvial media mensual histórica en México en el periodo de 1971 al 2000 (milímetros). [42]

Además dicho periodo deberá iniciar el 1° de enero de un año que termine en uno y finalice el 31 de diciembre de un año que termine en cero. Es importante señalar que la distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre. La precipitación acumulada ocurrida en la República Mexicana del 1° de enero al 31 de diciembre del año 2010 alcanzó una lámina de 938 mm, lo cual fue 23.4% superior a la normal del periodo de 1971 a 2000 (760 mm) (ilustración 6).

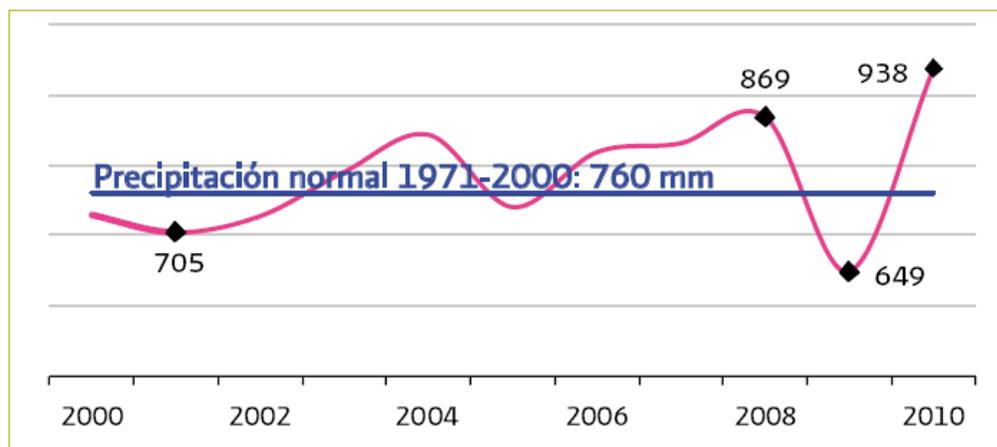


Ilustración 6.- Precipitación pluvial anual 2010. [42]

1.5. Población

Sin duda, uno de los problemas más grandes actualmente es el crecimiento de la población, por ello; en 1974 se instituyó como el año mundial de la población con objeto de estudiar y buscar un arreglo ante la alarmante desproporción del crecimiento y los recursos producidos tanto en los países industrializados como en los de Tercer Mundo. [14]

México, es uno de los países más poblados del planeta. En el 2006 ocupaba la 11ª posición con casi 104 millones de habitantes; y tan sólo 10 naciones nos superaban en lo que a población se refiere: China con más de 1,300 millones; India con 1,080 millones; Estados Unidos con 300 millones; Indonesia con 241 millones; Brasil con 186 millones; Pakistán con 162 millones; Bangladesh con 144 millones; Rusia con 143 millones; mientras que Nigeria y Japón con 128 millones. [39]

A lo anterior debe sumarse que en México, en ese mismo año, había más de 38 millones de niñas, niños y adolescentes menores de 18 años, lo que implica que la población en edad reproductiva que comenzará a tener hijos, o que de hecho ya los tiene, crecerá aceleradamente, mientras que en Japón el número de niñas, niños y adolescentes menores de 18 años ascendía a poco más de 20 millones.

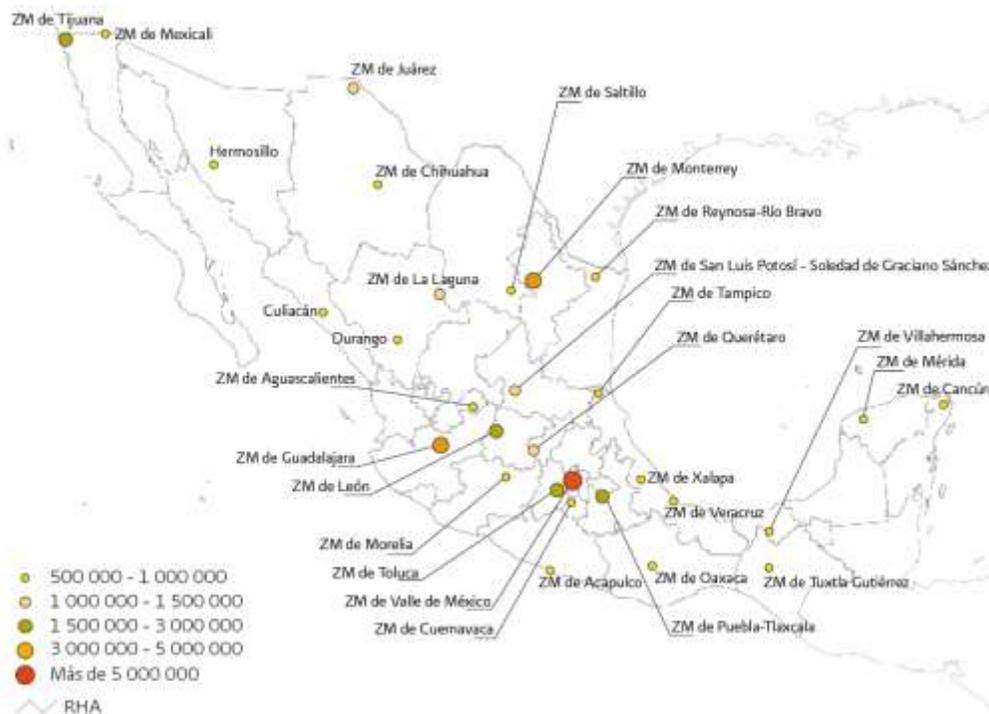


Ilustración 7.- Núcleos de población de más de 500 mil habitantes, proyección 2009. [46]

Es importante realizar el comparativo con otros países, pues las tendencias poblacionales son sumamente distintas, lo que implica enfrentar problemas sociales, culturales, económicos y ambientales diferentes. Así, las proyecciones indican que para el año 2050 la población total de Japón ascenderá a cerca de 90 millones, con un porcentaje de 41% con 65 años y más, en México, las proyecciones de CONAPO (Consejo Nacional de



Población) indican que tendremos 121, 855,703 personas, de las cuales, al menos el 21% tendrá 65 años o más.

En el 2009 existían 30 núcleos de población en el país con más de 500 mil habitantes, de los cuales 27 se referían a alguna Zona Metropolitana (ZM)⁹ y los demás a municipios no conurbados (*ilustración 7, tabla 4*). El proceso de concentración de la población en las localidades urbanas ha dado como resultado su acelerado crecimiento, lo que ha implicado fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones, derivadas de la demanda incrementada de servicios.

Año	Rural	Urbana	Total
1950	14.80	11.02	25.82
1955	17.23	17.76	34.99
1960	18.58	23.10	41.68
1965	19.93	28.43	48.36
1970	21.24	36.45	57.69
1975	22.55	44.47	67.022
1980	22.93	51.34	74.27
1985	23.30	58.21	81.51
1990	23.73	62.73	86.446
1995	24.16	67.25	91.411
2000	24.71	72.28	97.69
2005	24.28	79.20	103.48
2010	26.05	86.29	112.34

Tabla 4.- Evolución de la población en México, de 1950 a 2010 (millones de habitantes).

Se estimó que al 2009, en las once zonas metropolitanas con una población mayor a un millón de habitantes, se concentraba el 38% de la población del país, es decir 41 millones de habitantes (*tabla 5*).

No.	Zona Metropolitana	Entidades federativas	Población en 2010 (millones de habitantes)	No. De municipios y/o delegaciones del D.F.	Superficie en Km²
1	Valle de México	DF-Hidalgo-México	20.35	76	7864
2	Guadalajara	Jalisco	4.52	8	2734
3	Monterrey	Nuevo León	4.12	12	6704
4	Puebla-Tlaxcala	Puebla-Tlaxcala	2.74	38	2217
5	Tijuana	Baja California	1.93	3	4422
	Total		33.66	137	23941

Tabla 5.- Las cinco zonas metropolitanas del país con mayor población, 2010.

1.6. Problemas de calidad de agua en México

En México, el problema de escasez de agua se ha ido agravando en las décadas recientes, a tal grado que las demandas por el recurso surgen a tasas crecientes y, en algunos casos, se comienzan a manifestar de manera violenta. Los recursos hídricos en México y el mundo presentan problemas de escasez y mala calidad, los cuales son cada

⁹ Una Zona Metropolitana se define como el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica; en esta definición se incluye además a aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbanas.



vez mas graves por el cambio climático global, afectando a la salud humana y los ecosistemas naturales.

Por ello urgen políticas públicas y proyectos específicos para un manejo sostenible, donde es relevante la formación ambiental de la población y la participación de múltiples actores de los gobiernos, la sociedad civil, los usuarios y la academia. [36]

Esta problemática asociada a la calidad del agua la vemos también en términos de disponibilidad. Junto con los datos de una media mundial de 1700 m³/hab/año, observamos que en México se presenta una variabilidad del orden de 5000 m³. Aparentemente México está muy bien pertrechado por la parte de agua, sin embargo cuando se ve la influencia sobre estas cuestiones de la disponibilidad encontramos que en la zona del noroeste tenemos disponibilidades de 100 m³/hab/año y en la zona del sureste tenemos 17,000 m³/hab/año. En otras palabras, en el promedio de 5000 m³/hab no se toma en cuenta todas estas variabilidades de la problemática asociada.

En términos de los usos del agua en el país, anualmente se utilizan 72 mil millones de m³. De éstos el 72% lo usa la agricultura, el uso público urbano, pecuario y la industria consumen el otro 28%. Del total del agua disponible, las aguas subterráneas abastecen casi un tercio o un poco más. El 70% de la población se abastece de aguas subterráneas, un tercio de la superficie total regada está hecha con ellas y la mitad de la demanda de la industria se abastece con las mismas, por esta razón se consideran estratégicas y son tan cuidadas en nuestro país.

De acuerdo con la problemática asociada a las aguas residuales, se tiene una baja capacidad de tratamiento, si bien hay esfuerzos enormes por incrementar estos niveles de tratamiento (24% en los usos municipales, 13% en los no municipales, básicamente la industria), el marco legal y normativo tiene ciertas limitaciones y la información que se dispone en muchos de estos casos es escasa. Esto incide directamente en la degradación sobre la calidad, pérdida del uso consuntivo y el impacto ambiental que se tiene por este concepto.

A pesar o quizás por esta influencia estratégica del agua subterránea tenemos una gran cantidad de acuíferos sobre-explotados que obviamente inciden en otras problemáticas:

Hay un cierto agotamiento de los manantiales y humedales, afectación a lagos, reducción de los caudales de los ríos; hay variaciones en la afectación de la vegetación nativa, afectación a los ecosistemas, en las zonas costeras se provoca la intrusión salina, migración de agua fósil más mineralizada y contaminación difusa de las zonas urbanas y agrícolas, todo esto como reflejo de parte de esa sobreexplotación de los acuíferos.

En este sentido tenemos dos tipos de problemas asociados a la calidad del agua de las aguas subterráneas:

- 1 *Por un lado están algunas cuestiones de contaminación natural como por ejemplo la disolución de sales arsenicales en la zona de la Comarca Lagunera.*
- 2 *La presencia de otro tipo de sales en algunas zonas del país donde hay presencia de flúor, nitratos o de sólidos disueltos totales.*



En cuanto las cuestiones costeras, muchas de estas aguas residuales son descargadas al mar, y aquí la variabilidad va desde zonas de descargas, zonas urbanas o algunos giros industriales que descargan en dichas zonas.

Por otra parte, los servicios públicos generan aguas residuales que nos afectan cuando son aguas sin tratar y aparecen organismos que pueden parasitar y crear otro tipo de problemas asociados a la salud pública.

En lo que se refiere a la producción agrícola se tienen varios tipos de problemas: en primer término las aguas para irrigar que reciben los cultivos, en algunos casos son aguas residuales crudas o aguas residuales tratadas pero que requieren entonces un manejo adecuado y aquí se habla de una serie de restricciones en la calidad del agua usada en los cultivos. Esto con lleva a elaborar guías de calidad del agua que tienen que estar orientadas a que con un buen nivel de tratamiento se logre proteger la salud de los cultivos y por ende la de los consumidores

Como se ve la problemática de la calidad del agua en México está asociada a muchas cosas, a usos urbanos, a la cuestión agrícola, a la industrial y esto es lo que nos hace ver que en todos aspectos tiene que contar con la participación de todos los sectores que inciden en la solución de dicha problemática.



Capítulo 2. Agua e industria

El agua es un recurso fundamental para la actividad industrial, su utilización ha variado a lo largo del tiempo, disminuyendo su aprovechamiento local o puntual como fuente de energía primaria, pero continúa siendo imprescindible para el desarrollo industrial usada como medio de reacción y disolvente o como regulador térmico en calderas y torres de refrigeración.

En este capítulo se analizan los aspectos relevantes al uso del líquido, el consumo en los diferentes giros industriales y que beneficios obtienen estas instituciones, así como la importancia que representa en el ámbito textil; ya que es de gran importancia puesto que sin ella no se puede desarrollar algún tipo de negocio debido a que para todo se necesita el agua.

2.1. Usos del agua

El agua es empleada de diversas formas y prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios. En el registro público de derechos de agua (*REPD*), se registran los volúmenes concesionados¹⁰ a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se presentan en 5 grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, a saber, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad, y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por no ser un uso consuntivo¹¹.

Durante el periodo 2001 al 2009 en México, el 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de fuentes subterráneas (acuíferos) (*gráfico 4*). En el periodo reportado, el agua superficial concesionada creció 15%, en tanto que la subterránea se incrementó en 21%.

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde al uso agrupado agrícola, como se observa en la tabla 6 y el gráfico 5. En este caso se considera sólo principalmente el agua empleada.

En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas, que representan un uso no consuntivo del recurso, se utilizaron en el país 136.1 miles millones de m³ de agua (km³) en el 2009. Debe aclararse que para este uso la misma agua se turna y se contabiliza varias veces, en todas las centrales del país.

¹⁰ Concesionados o asignados en el caso de volúmenes destinados al público urbano o doméstico.

¹¹ Definición establecida para el agua eliminada de los suministros disponibles sin retorno a los sistemas de recursos de dicha agua; agua usada en fabricación, agricultura, preparación de alimentos, etc.

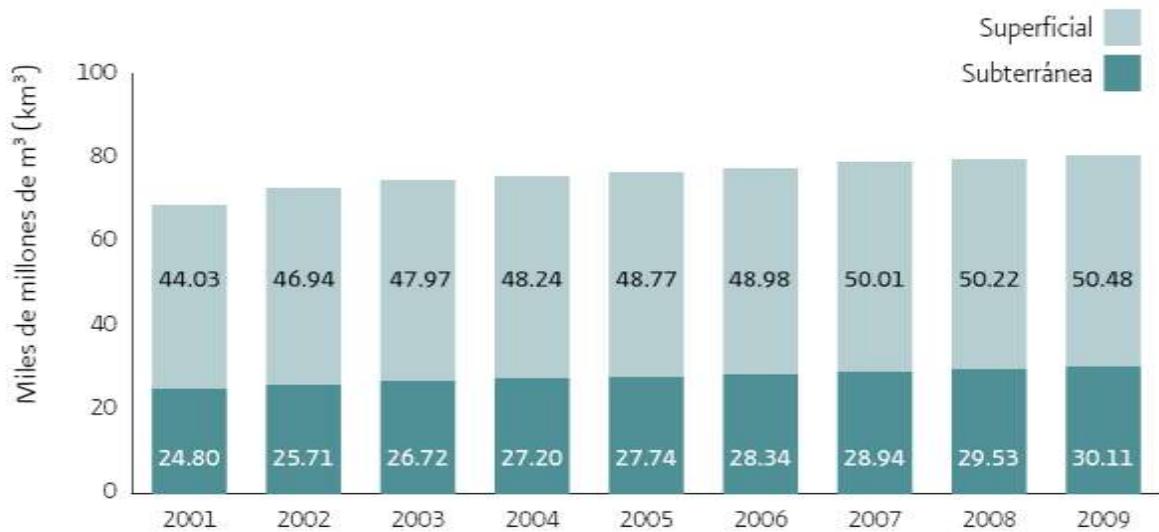


Gráfico 4.- Evolución del volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2009. [46]

Uso	Origen		Volumen total (km ³)	% de extracción
	Superficial (km ³)	Subterránea (km ³)		
Agrícola	40.9	20.9	61.8	76.7
Abastecimiento público	4.3	7.1	11.4	14.1
Industria autoabastecida	1.6	1.7	3.3	4.1
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.6	0.4	4.1	5.1
Total	50.5	30.1	80.6	100

Tabla 6.- Usos consuntivos agrupados según origen del tipo de fuente de extracción, 2009.¹²

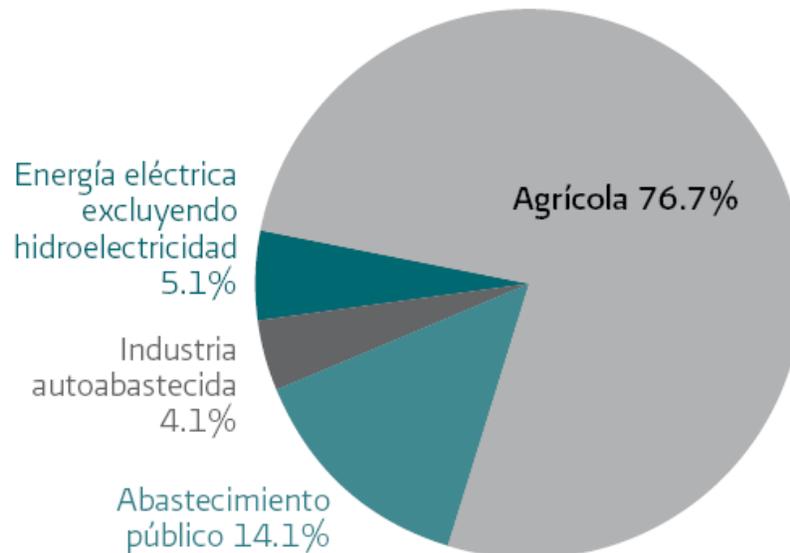


Gráfico 5.- Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos, 2009. [46]

¹² Nota: 1 km³ = 1 000 hm³ = mil millones de m³. Las sumas pueden no coincidir por el redondeo de cifras.



2.2. Descarga de agua residual en México

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. La secuencia de generación, recolección y tratamiento se muestra en la tabla 7.

Centros urbanos (descargas municipales)		
Aguas residuales	7.49	Km ³ /año (237.5 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.59	Km ³ /año (209.1 m ³ /s)
Se tratan	2.78	Km ³ /año (88.1 m ³ /s)
Se generan	2.02	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.78	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.61	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Usos no municipales, incluyendo la industria		
Aguas residuales	6.01	Km ³ /año (190.4 m ³ /s)
Se tratan	1.16	Km ³ /año (36.7 m ³ /s)
Se generan	6.95	Millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.33	Millones de toneladas de DBO ₅ al año

Tabla 7.- Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2009¹³. [46]

- ✓ Al 2009, se trató el 37.1% de las aguas residuales municipales que se generaron.
- ✓ Al 2009, se trató el 19.3% de las aguas residuales no municipales, incluyendo a la industria, que se generaron. [46]

2.2.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

En el año 2009, las 2,029 plantas en operación en el país trataron 88.1 m³/s, es decir el 42% de los 209.1 m³/s recolectados en los sistemas de alcantarillado. La evolución del caudal tratado anualmente se muestra en el gráfico 6.

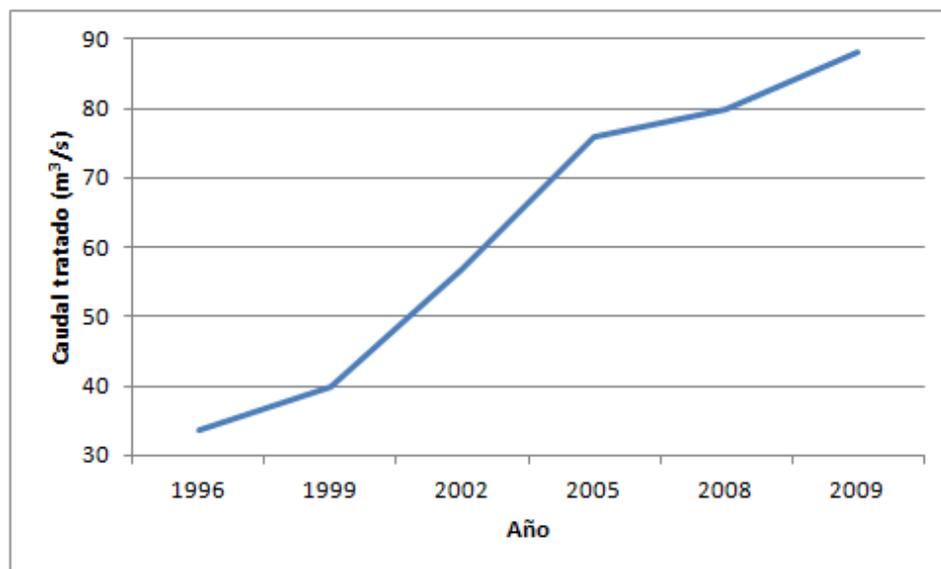


Gráfico 6.- Caudal de aguas municipales tratadas.

¹³ DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días. 1 km³ = 1 000 hm³ = mil millones de m³.



En la tabla 8 y el gráfico 7 se indican las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación por RHA¹⁴ y los principales procesos de tratamiento utilizados.

RHA		Numero de plantas en operación	Capacidad instalada (m ³ /s)	Caudal tratado (m ³ /s)
I	Península de Baja California	54	8.68	6.68
II	Noroeste	100	4.8	2.92
III	Pacífico Norte	282	9.01	7.04
IV	Balsas	162	8.22	6.1
V	Pacífico Sur	86	4.56	3.39
VI	Río Bravo	205	28.84	21.68
VII	Cuencas Centrales del Norte	124	5.79	4.5
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	513	23.97	18.58
IX	Golfo Norte	104	3.39	2.54
X	Golfo Centro	140	6.72	4.06
XI	Frontera Sur	102	3.35	2.37
XII	Península de Yucatán	72	2.65	1.9
XIII	Aguas del Valle de México	85	10.89	6.35
Total		2029	120.87	88.11

Tabla 8.- Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación por RHA, 2009.

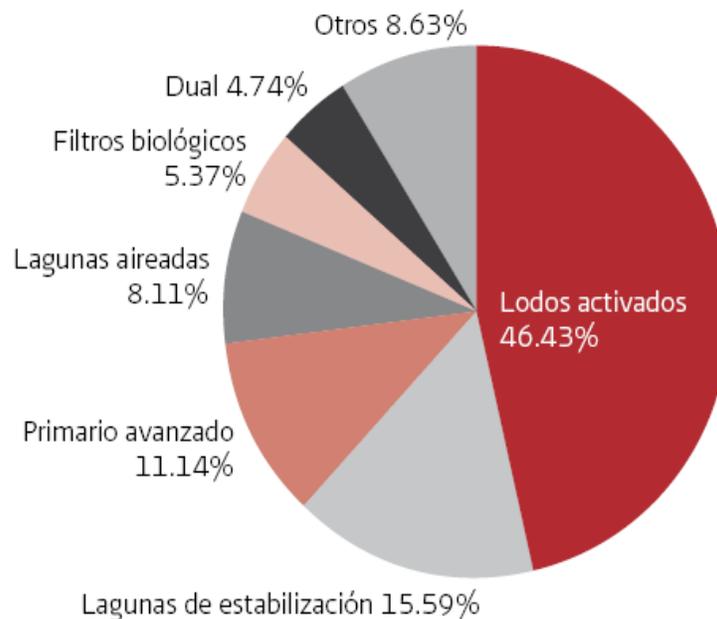


Gráfico 7.- Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2009. [46]

2.2.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales

En el año 2009, la industria trató 36,7 m³/s de aguas residuales, en 2,186 plantas en operación a nivel nacional. La evolución 1999-2009 se muestra en el gráfico 8, la distribución por entidades federativas en la tabla 9, en tanto que la tabla 10 ilustra los principales procesos en que se desglosa el tratamiento industrial.

¹⁴ RHA: Región hidrológico-administrativas.

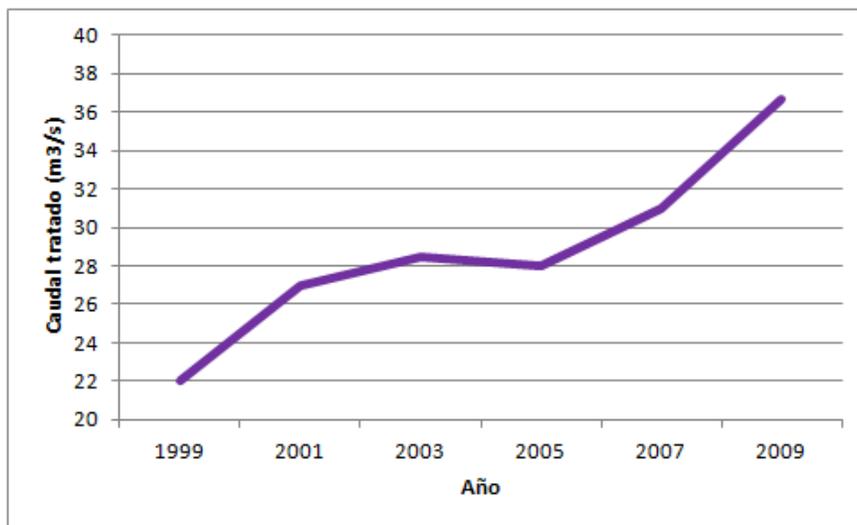


Gráfico 8.- Caudal de aguas residuales industriales. [42]

Entidad federativa	# Plantas en operación	Capacidad instalada (m³/s)	Caudal tratado (m³/s)
Aguascalientes	53	0.25	0.12
Baja California	61	0.48	0
Baja California Sur	7	0.01	0.01
Campeche	49	0.5	0.16
Coahuila	67	0.88	0.61
Colima	8	0.47	0.31
Chiapas	47	6.18	3.04
Chihuahua	20	0.66	0.29
Distrito Federal	200	0.8	0.34
Durango	42	0.83	0.47
Guanajuato	45	0.4	0.18
Guerrero	7	15.33	0.03
Hidalgo	41	3.49	3
Jalisco	36	1.51	1.51
México	315	4.84	3.27
Michoacán	76	2.83	0.63
Morelos	81	1.22	0.76
Nayarit	4	0.16	0.16
Nuevo León	84	4.13	3
Oaxaca	15	1.22	0.9
Puebla	116	2.99	2.72
Querétaro	120	1.19	0.51
Quintana roo	2	0.01	0.01
San Luis Potosí	81	1.33	1.18
Sinaloa	89	3.21	0.8
Sonora	25	0.42	0.22
Tabasco	124	1.05	0.64
Tamaulipas	52	3.94	2.84
Tlaxcala	108	0.23	0.2
Veracruz	166	11.62	8.69
Yucatán	36	0.11	0.07
Zacatecas	9	0.16	0.04
Total	2186	72.45	36.71

Tabla 9.- Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación por entidad federativa, 2009. [42]



Tipos de tratamiento	Propósito	# plantas	Gasto de operación (m ³ /s)	Porcentaje
Primario	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm	731	14.64	33.44
Secundario	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos	1193	18.39	54.57
Terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus	88	1.26	4.03
No especificado		174	2.41	7.96
Total		2186	36.7	100

Tabla 10.- Tratamiento de aguas industriales, 2009. [42]

2.3. Tipos de industria

En la tabla 11, se presentan los tipos y números de industrias presentes en los diferentes estados de la república, destacando el Distrito Federal en las industrias de alimentos, papel, electricidad y textil; mientras que Nuevo León se encuentra presente en la industria de la minería y metalúrgica.

Estado	Minería y Petróleo	Alimentos	Papel	Metalúrgica	Electricidad	Textil
Nuevo León	84	2394	1267	43	1	1064
San Luis Potosí	60	2425	372	20	1	494
Sonora	81	2285	444	7	1	409
Distrito Federal	11	9472	4797	30	2	3605
Tamaulipas	32	2515	624	ND	1	562
Sinaloa	55	2146	341	ND	1	311

Tabla 11.- Número de industrias por entidad federativa. [8,50]

2.4. Consumo del agua en la industria

En el sector industrial el consumo de agua se refiere al agua empleada por las industrias que se abastecen directamente de los cuerpos de agua y descargan a cuerpos receptores. Para este uso no incluyen termoeléctricas, ni industrias que se abastecen de redes de agua potable.

En muchas cuencas fluviales, existe una competencia creciente por el agua entre los diversos sectores. Si se compara el consumo industrial de agua con el uso de diferentes sectores, como el agrícola o el doméstico; es evidente que la industria sólo utiliza una pequeña fracción en comparación con la agricultura. Sin embargo, en Asia Oriental y el Pacífico, el uso industrial del agua ha aumentado en una proporción significativa con respecto al uso total.

La industria tiene en general un gran impacto en el agua de los continentes. En promedio, la agricultura usa el 65%, la industria y servicios un 25% y las personas (uso doméstico)



un 10% del agua en el mundo. En la industria, un alto porcentaje del agua tiene un uso consuntivo porque se evapora en sistemas de enfriamiento; pero una quinta parte se puede ahorrar usando sistemas de reciclamiento. [38,50]

El uso del agua que la industria demanda puede clasificarse en cuatro principales actividades que se llevan a cabo en la mayoría de las industrias:

- a) *Agua para enfriamiento:* Se demandan diferentes volúmenes de agua para procesos como el enfriamiento de condensadores de plantas generadoras de energía, refinamiento de petróleo, plantas químicas, destilerías y otras; también para enfriamiento en máquinas de combustión interna, plantas de bombeo, y enfriamiento así como en plantas de fundición.
- b) *Para calderas:* El agua que se utiliza para calderas permite la generación de vapor o energía. En general, la calidad del agua debe ser tal que no deposite sustancias incrustantes no corra el metal de las calderas o de las líneas de conducción y no ocasione espumas.
- c) *Para procesos:* es el agua que se incorpora en la manufactura del producto, o que pasa a formar parte del producto terminado, o también el agua empleada como medio de transporte de productos.
- d) *Para servicios generales:* en este uso del agua se incluye la limpieza de las instalaciones, servicios sanitarios, usos personales y en ocasiones riego de áreas verdes.

Del total de agua que la industria consume se estima que el 58% corresponde a agua empleada para enfriamiento, 32% a proceso, el 6% se utiliza en calderas y en 3.5% para servicios generales [7,45]. En la tabla 12 se muestran cinco de los principales sectores industriales consumidores de agua con una estimación de los porcentajes empleados en cada actividad.

Sector industrial	Enfriamiento	Proceso	Calderas	Otros
Industria Alimenticia¹⁵	51.1	40.4	4.0	4.5
Química	76.5	17.5	2.3	3.7
Hierro y Acero	85.2	7.1	1.0	6.7
Celulosa y Papel	34.3	62.9	1.8	1.0
Petróleo	90.2	3.7	4.8	1.3

Tabla 12.- Porcentaje de agua empleada en cada actividad.

La extracción total para uso industrial es de 4,1 km³/anuales, que representa el 5,1% de la extracción total a escala nacional y de acuerdo su origen el 60% son aguas subterráneas y el 40% superficial (*gráfico 9*).

En porcentaje el uso industrial comparado con el uso agrícola y doméstico no se presenta como gran consumidor. Sin embargo es importante considerar que la industria se localiza cerca de centros urbanos medios y grandes, por lo que junto con la extracción para el uso doméstico hace que se incremente la demanda del líquido. Los consumos para este sector son heterogéneos, teniendo en cuenta que existe una amplia diversificación de ramas industriales. Casi el 80% del consumo del agua de este sector los realizan solamente las siguientes ramas industriales: azucarera, química, petróleo, celulosa y papel, textil y bebidas (*gráfico 10 y tabla 13*).

¹⁵ Incluye la industria azucarera.

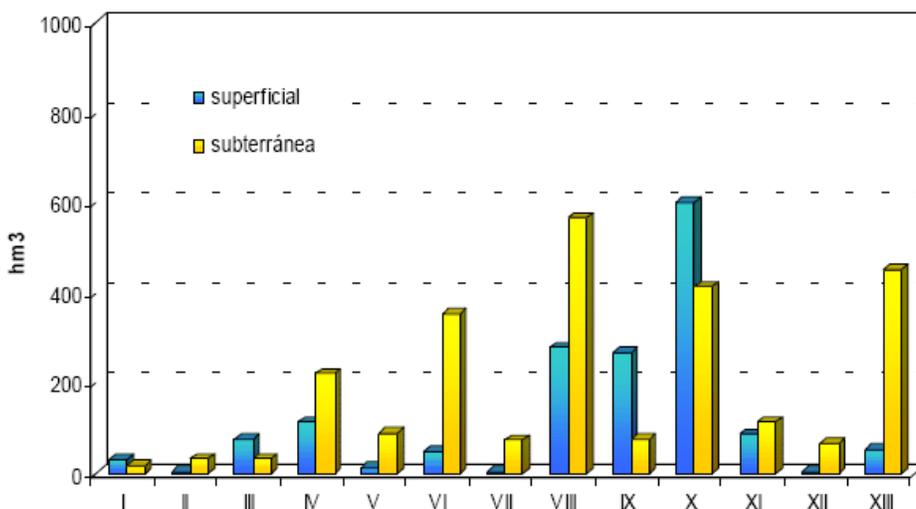


Gráfico 9.- Extracción para uso industrial por regiones administrativas.^{16 17} [15]

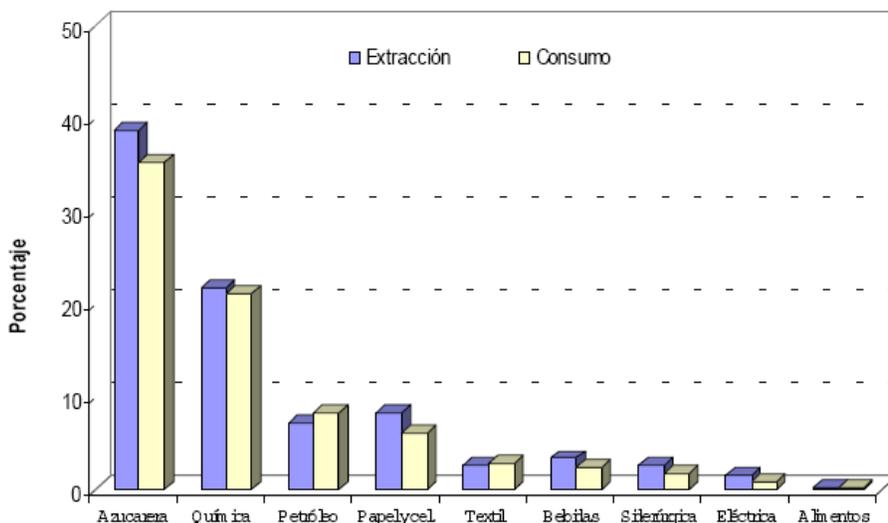


Gráfico 10.- Consumo de agua de los principales giros industriales. [15]

Sector Industrial	Extracción %	Consumo %
Azucarera	38.8	36.2
Química	21.7	21.0
Petróleo	7.2	8.2
Papel y celulosa	8.2	6.0
Textil	2.6	2.9
Bebidas	3.3	2.4
Siderúrgica	2.5	1.7
Eléctrica	1.5	0.7
Alimentos	0.2	0.2

Tabla 13.- Consumo de agua en los principales giros industriales. [15]

¹⁶ Las regiones II, III, VI y VIII, correspondientes a las zonas Noroeste, Pacífico Norte, Río Bravo y Lerma-Santiago-Pacífico y las regiones VIII, XIII, VI y X corresponden a Lerma-Santiago-Pacífico; Valle de México; Río Bravo y Golfo Centro.

¹⁷ 1 hm³= Un hectómetro cúbico equivale a un millón de metros cúbicos



La relación de los volúmenes de extracción no es directa con la distribución de las actividades industriales, tomando en cuenta que en los últimos años las políticas de crecimiento industrial han favorecido el desarrollo de parques industriales en algunas zonas del norte del país donde a veces las condiciones naturales hacen que el agua sea escasa, sin embargo; sólo se extrae el 18% de agua ya que en su mayoría se trata de industria seca.

Aunque la mayoría de la industria que se ha desarrollado en esa zona es maquiladora y no demanda una gran cantidad de agua, esta ha contribuido a que exista una alta migración de población lo que ha originado que exista una fuerte demanda por los servicios de abastecimiento de agua potable y drenaje; esto considerando que en muchas ciudades no tenían planeado ese crecimiento.

2.4.1. Descargas de contaminantes por sector

En el ámbito nacional se producen 34,10 km³/año de aguas residuales de los cuales el 21,20 km³/año corresponden al sector agrícola, 7,54 km³/año son municipales y 5,36 km³/año industriales

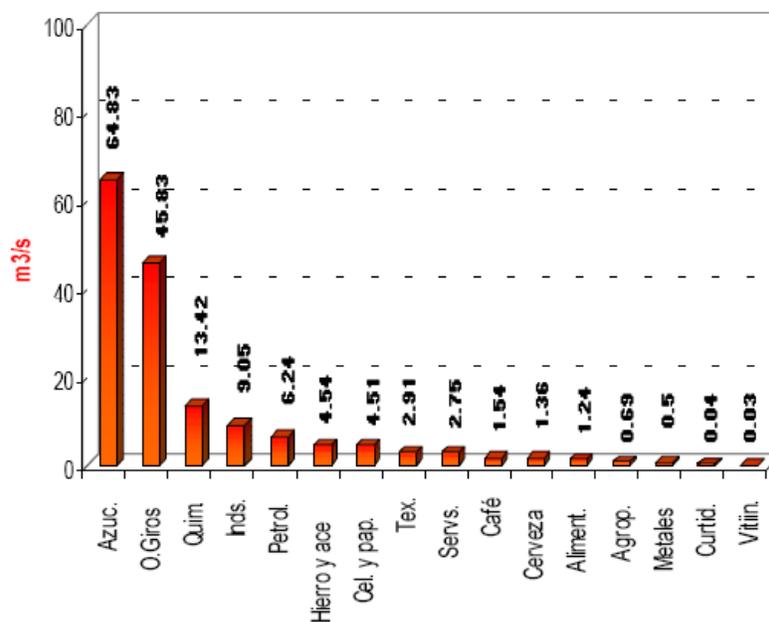


Gráfico 11.- Aguas residuales descargadas por sector.

Una de las consecuencias de las descargas de aguas residuales es la infestación de malezas acuáticas favorecida por los nutrientes (nitrógeno y fósforo) proveniente de aguas residuales de tipo doméstico, industrial y de retorno agrícola a los cuerpos receptores.

Existe en el orden de 68 mil hectáreas en 268 cuerpos de agua, 10 mil km de canales y 14 mil km de drenes. Es de esperarse que con el aumento de la población y de las actividades económicas los volúmenes de aguas residuales descargadas se incrementen, lo que representa un gran reto en materia de planeación urbana.

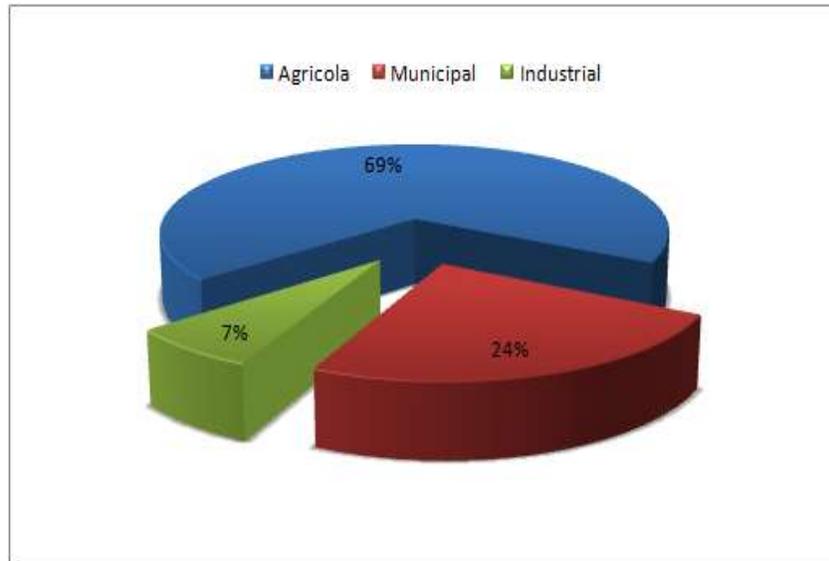


Gráfico 12.- Porcentaje en volumen de descargas de aguas residuales. [15]

2.4.2. Características de los desechos industriales

Las diferentes industrias generan contaminantes en función de los procesos productivos que utilizan en la elaboración de sus productos. Por tanto para definir estos contaminantes que se generan es necesario considerar cada industria en particular y en ocasiones cada planta de la rama industrial. Algunos factores que influyen en la diversidad de las aguas residuales para plantas de un mismo giro son: la tecnología del proceso, el uso eficiente o no del agua, las materias primas empleadas y el manejo de las descargas de aguas residuales.

En las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara se generan 46, 8.5 y 8.2 m³/s de aguas residuales, respectivamente. En conjunto equivalen al 34% del total a nivel nacional estimado en 184 m³/s; de los cuales 105 corresponden a descargas municipales y 79 a industriales. Los principales contaminantes que modifican la calidad natural de las corrientes de agua son: materia orgánica, nutrientes, grasas y aceites, organismos patógenos, metales pesados, detergentes y plaguicidas.

Para fines prácticos, en la tabla 14 se presentan algunos valores característicos de contaminantes que se pueden esperar en las aguas residuales de 5 industrias, en ellos se puede observar la complejidad para evaluar el grado de contaminación de las aguas residuales en las diferentes industrias, giro y necesidad de establecer índices para estimar el consumo de agua y de generación de aguas residuales por unidad de producto terminado, o bien por unidad de materia prima transformada. [24]

A escala nacional se genera una carga contaminante de materia orgánica total, medida en términos de demanda bioquímica de oxígeno (*DBO*), de 2,4 millones de toneladas por año; que corresponden 36% al ámbito municipal y 64% al industrial. El sector industrial, de acuerdo a los índices de extracción, consumo y contaminación de agua, se ha configurado en 39 grupos, de los cuales 15 son los que producen la mayor cantidad de aguas residuales: azúcar, química, papel y celulosa, petróleo, bebidas, textiles, siderurgia, electricidad y alimentos; entre otras. Estos 15 grupos en conjunto arrojan el 68,56% del



total de aguas residuales de origen industrial, destacando la industria azucarera y la química, con el 49,24% del total.

Parámetros	Industrias					
	Alimenticia	Textil	Curtido		Química	Acabado de metales
			(cromo)	(titanios)		
pH	4-7	1-12	5-8	11	3.6-7.9	5-10
Temp. °C	17	30-32	22	22	2.8-31.5	
ST	1000	40	65		1028-21249	
SST		111-670	1034	833		
S. Sed	1009	0.9-1.9		118	6.3-12.9	
G y A	1000	03.5-79.3	39	200	17-167	56
DBO	3000	500-2300	1452	3573	207-562	
DQO	5000	715-13905	1558	4167	192-1615	
SAAM		4-42				
NT		6-73	29	53	11-134	
PO ₄ T					16-436	
CN						300
Cu		1.3-5.0				56
Fe		5.6				
Cr ⁺³		0.3				
Cr ⁺⁶		26				
Ni						200
Zn						22
Taninos						557
Flujo de agua Residual m ³ /d	525	679-997	150	150		

Tabla 14.-Valores característicos de descargas industriales.¹⁸ [24]

2.5. La industria textil en México

Dado que en nuestro país la industria textil representa uno de los sectores de mayor importancia económica, sin duda debe también considerarse como una de las fuentes contaminantes importantes y alarmantes. Este sector ha estado en constante evolución y crecimiento para dar respuesta a la enorme demanda de las sociedades tanto nacionales como internacionales.

De manera general se puede decir que los productos textiles implican las siguientes fases: la fabricación de fibras para los hilos, la elaboración de telas (naturales y sintéticas) mediante tejidos, coloración y estampados y la confección del producto final. Todas las etapas anteriores son de vital importancia para la elaboración de productos textiles. Por medio de estudios bibliográficos y las diferentes funciones observadas en campo, se indica que las operaciones de preparación, blanqueo, estampado y secado son las operaciones unitarias que demandan la mayor cantidad de recurso de agua.

Debido a la gran cantidad de productos y aplicaciones de los productos textiles, así como de las diversas sustancias químicas utilizadas en el proceso de estampado, se hace necesario tener un control de los productos a lo largo de todo el proceso y principalmente en la etapa de tratamiento de las aguas residuales resultantes. Los efluentes poseen una enorme complejidad y por ende los tratamientos requeridos pueden ser sencillos o complicados; y como consecuencia pueden ser económicos o costosos.

¹⁸ Se manejan unidades de mg/L.

La industria textil y de confección es la cuarta industria dentro de las manufacturas del país. Es una fuente muy importante de generación de empleos y un motor exportador de la economía mexicana. De manera general la ilustración 8 muestra los diferentes sectores que involucra la industria textil, iniciando con el procesamiento de fibras hasta la confección de prendas de vestir.

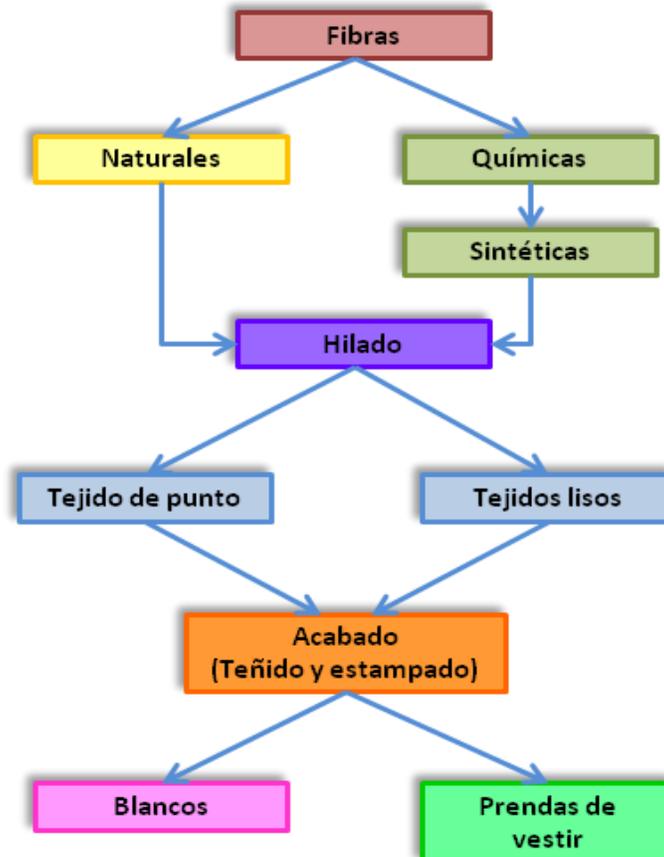


Ilustración 8.- Diagrama de bloques del proceso productivo textil. [7]

A continuación se proporciona el panorama de cada una de las etapas.

Sector de Fibra: Las fibras utilizadas en el proceso textil son naturales y químicas. Las primeras son de algodón, lana, seda y lino; las segundas pueden ser sintéticas como poliéster, nylon y acrílico; mientras que el rayón y el acetato corresponden a las principales fibras artificiales. En México, las más importantes en producción y consumo corresponden al algodón, acrílico, poliéster y nylon. La industria de las fibras en México opera a gran escala de producción, la mayoría cuenta con gran participación de capital extranjero o alianzas con empresas líderes en el ramo a nivel internacional. Las principales compañías son: Akra, Celulosa y derivados (CYDSA), Fibras sintéticas (FISISA), Industrias polifil, Kaltex, Kimex, Filamentos elastoméricos de México S.A. de C.V., Nylon de México y Fibras químicas.

Sector textil: La industria textil está compuesta por el proceso de hilado, tejido incluyendo blancos y acabado a través del proceso algodónero y lanero. La rama genera básicamente 3 grupos de productos, los destinados a la industria de la confección de ropa, los de la industria de textiles de uso doméstico y los utilizados en la industria



automotriz y muebles. La producción textil principalmente se genera en el Distrito Federal, Estado de México, Nuevo León, Hidalgo, Aguascalientes, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Baja California y Chihuahua.

Hilados: El proceso de lana y algodón constituyen las dos formas principales de confección en la industria textil, en las cuales se utilizan fibras naturales, fibras químicas o en su caso la combinación de ambas. La estructura de las empresas de hilado mexicano se compone de empresas grandes y medianas.

Telas y tejidos: Los principales tejidos producidos en México corresponden a los planos y de punto, que son utilizados en la confección de ropa, artículos para el hogar y la industria automotriz y muebles. Muchas de las industrias de telas, en lo que corresponde al proceso algodónero producen su propio hilo; lo que les permite generar un mayor valor agregado al producto. Dentro de las principales compañías de telas y tejidos se encuentran: Albatros textil, Grupo chentex, Grupo covadonga, Empresa el valor, Sagazaltex, Grupo riventex, Textil lanera, Lanera moderna, etc.

Acabado: El proceso de acabado comprende en su mayoría el teñido, estampado, secado final y la mercerización. El teñido es un proceso aplicado al hilo y a la tela, el cual utiliza químicos (tintes y colorantes) y agua, además de que exigen un exhaustivo control del proceso. En el estampado, por otro lado; también se utilizan tintes y colorantes requiriendo de una tecnología adecuada para su optimización. La tecnología del teñido actual ofrece la ventaja de reducir el uso de químicos y agua en el proceso y permitir más eficiencia cuando se requieren grandes corridas de producción.

2.6. Importancia económica de la industria textil

La información presentada es un análisis de la importancia económica que representa este ramo industrial en el país, remarcando como ha venido decayendo gracias a las diferentes políticas de apertura económica y a la aceptación de empresas maquiladoras que constituyen una fuente de empleo mal remunerado, haciendo un mal aporte al Producto Interno Bruto (*PIB*), donde la producción es de exportación y los productos defectuosos se destinan al mercado nacional.

El modelo económico del que México ha dependido para competir en el mercado internacional por décadas, ha logrado pocos beneficios y actualmente está agotado. La crisis actual es una oportunidad para reconocer esta realidad y comenzar a construir un nuevo modelo, basado en una competitividad responsable y trabajo decente. [42]

Después de un periodo de 5 años de crecimiento continuo, la industria textil en México enfrentó en el 2001 una crítica situación que se caracterizó principalmente por la marcada disminución en los niveles de producción, ventas de exportación y niveles de empleo. En el 2001, los niveles de producción se redujeron en -10,1%, registrando el mayor descenso dentro del sector, superando la registrada en 1995, cuando se registro una disminución de -6,3%.

2.6.1. La industria textil, del vestido y del cuero mexicana

La industria textil, del vestido y el cuero representan el 4,8% del total del PIB de la manufactura mexicana; y un 2,6% del total de exportaciones de dicha manufactura. Este sector genera en los últimos años un aproximado de 300 000 empleos directos en México,

representando el 2% del empleo nacional y el 8% del total de empleos en el ramo manufacturero.

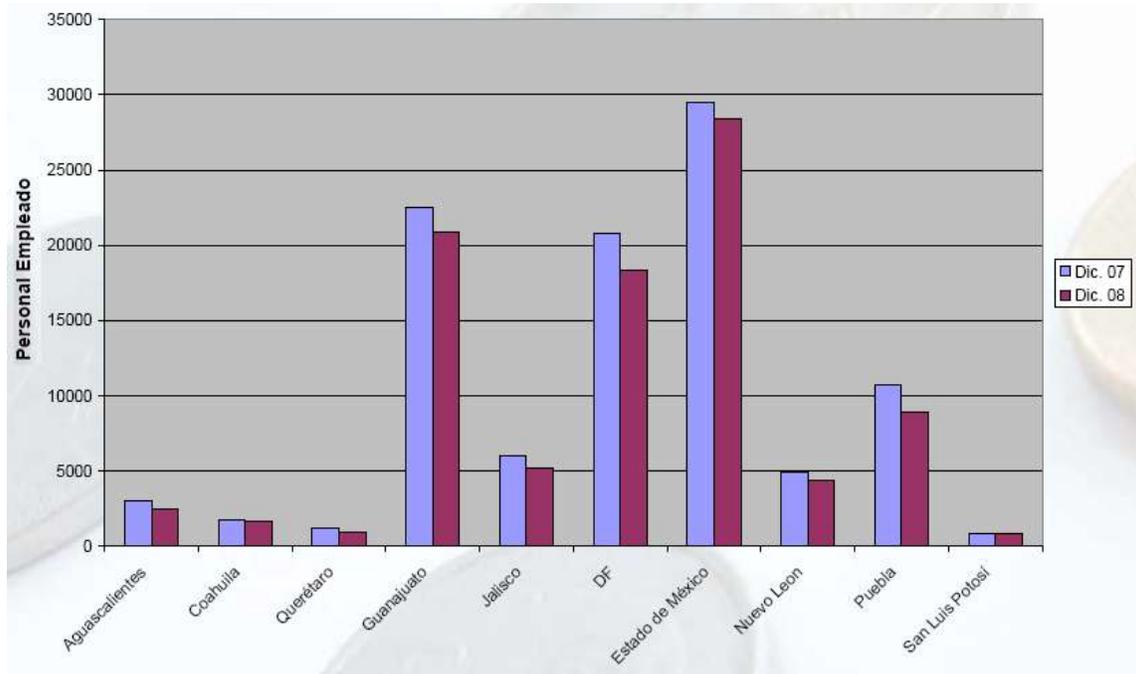


Gráfico 13.- Personal empleado en el sector textil, vestido y cuero en estados clave [43].

De todos los empleos de manufactura, la industria textil, del vestido y cuero en México, es la principal empleadora de mujeres representando alrededor del 70%. Los estados clave de producción textil y de confecciones son el Estado de México, Distrito Federal, Puebla y Guanajuato; tanto en términos de contribución al PIB como al empleo (gráfico 13 y 14).

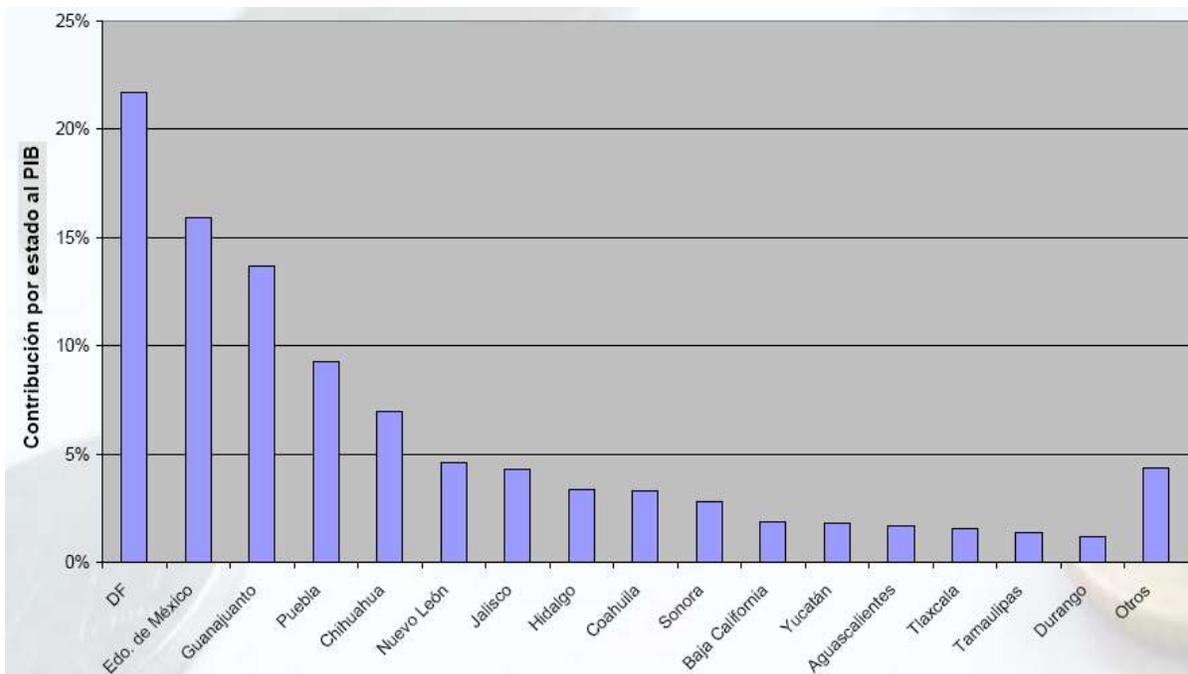


Gráfico 14.- Contribución por estado al PIB nacional total para el sector textil, vestido y cuero (%) – Dic 08 [43].

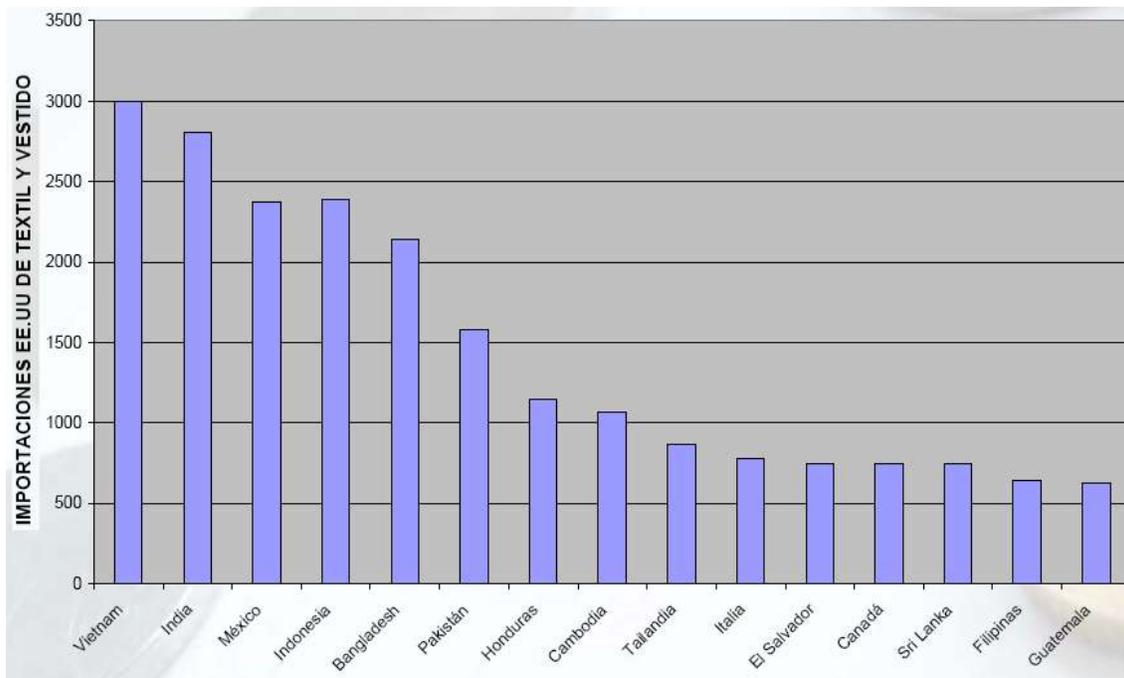


Gráfico 15.- Importaciones EE.UU de textil y vestido - hasta Julio 2009 (en millones de US\$).¹⁹

A pesar de la relativamente pequeña parte de las exportaciones totales, el sector textil, del vestido y del cuero de México sigue teniendo un rol importante internacionalmente. En América Latina México es el mayor exportador de confecciones al mercado de los Estados Unidos y es considerado el cuarto mayor exportador de confecciones y textiles, por valor, al mercado de los Estados Unidos, representando alrededor del 5% de las importaciones estadounidenses para 2009 (hasta julio) (gráfico 15).

2.6.2. La crisis y el impacto en el sector textil y del vestido

Las exportaciones mundiales de textiles y confecciones a EEUU cayeron un 14% en julio de 2009, comparado con 2008. México experimentó una de las caídas más acentuadas en las exportaciones textiles y de confecciones a los EEUU, cayendo un 20% en ese año (gráfico 16). En abril, se perdieron 68,000 empleos y 666 fábricas cerraron en el sector de textiles, vestido y cuero.

Grupos locales de derechos laborales informan que desde que la crisis golpeó a México los trabajadores están experimentando:

- Un aumento en la producción para el mercado nacional, junto con una disminución de pedidos de marcas internacionales;
- Un aumento en condiciones de empleo precario, paros técnicos, y la retención de salarios;
- Horas de trabajo extendidas para compensar la menor cantidad de personal después de los despidos; y

¹⁹ Nota: La mayor fuente de importaciones estadounidenses es China, con un valor de US\$ 16.564 millones de importaciones en julio de 2009, sin embargo, China fue excluida del gráfico para no dislocarlo.



- Una mayor dependencia en el sector informal, sea como fuente de trabajo para los desempleados, o como forma de complementar el ingreso para los trabajadores/as que han visto sus salarios disminuidos por el uso de paros técnicos.

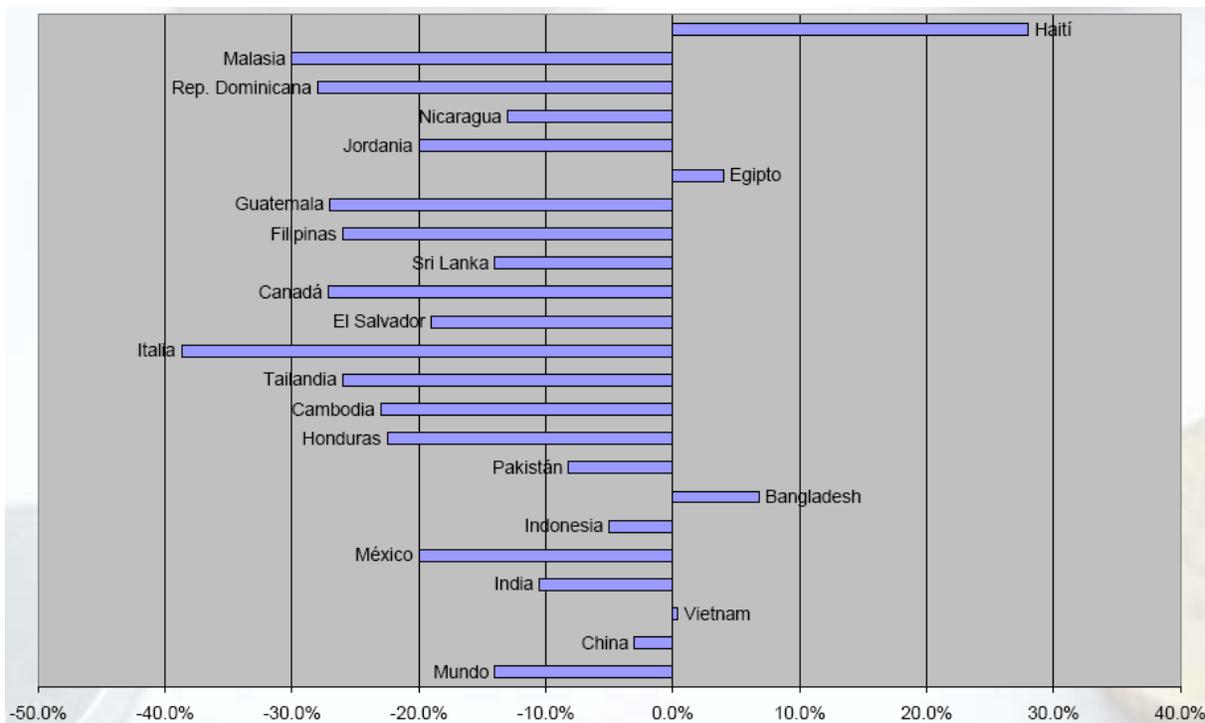


Gráfico 16.- % cambio en el total de importaciones EE.UU. de textil y vestido (valor \$) para el 2009, comparado al 2008 (hasta julio).



Capítulo 3. Características y tratamiento de las aguas residuales

Las aguas residuales recogidas en los pueblos y ciudades deben ser conducidas finalmente, a cuerpos de agua receptores o a la misma tierra. La compleja pregunta acerca de que contaminantes de las aguas residuales deben ser eliminados para proteger el entorno, precisa de una contestación específica en cada caso concreto. Ello requiere el análisis de las condiciones y necesidades locales, junto de la aplicación del conocimiento científico, de la experiencia previa de ingeniería y de las normas reguladoras de la calidad de agua existente.

Para comprender la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es imprescindible profundizar en las mismas, y poder ampliar una metodología de la remoción de contaminantes en las aguas residuales.

3.1. Características de las aguas residuales

Los principales parámetros que se emplean para caracterizar el agua residual se citan en la tabla 15. Algunos de estos parámetros están relacionados entre si, por ejemplo; la temperatura es un parámetro físico que afecta tanto a la actividad biológica del agua residual como a la cantidad de gases disueltos en ella, considerando a estos gases como parámetros químicos.

En cuanto a la composición de las aguas residuales, esta se refiere a los constituyentes físicos, químicos y biológicos que se encuentran presentes en ellas. Los contaminantes de interés en el tratamiento de agua residual, se describen en la tabla 16.

Las normas de calidad de los tratamientos secundarios de las aguas residuales están relacionadas con la eliminación de la materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión y organismos patógenos. Gran parte de las normativas más exigentes incluyen la eliminación de nutrientes y una reducción más compleja de compuestos orgánicos. En aquellos casos en que se pretenda reutilizar el agua residual, las normas de calidad incluyen, normalmente, la obligación de eliminar los compuestos orgánicos de carácter refractario, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos.



Características	Procedencia
Propiedades físicas	
Color	Aguas residuales domesticas e industriales, desintegración natural de materiales orgánicos.
Olor	Agua residual de descomposición, vertidos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domesticas e industriales, erosión de suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domesticas e industriales.
Constituyentes químicos	
Orgánicos:	
Carbohidratos	Aguas residuales comerciales e industriales.
Grasas animales, aceites y grasas	Aguas residuales domesticas, comerciales e industriales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos industriales.
Proteínas	Aguas residuales domesticas y comerciales.
Agentes termoactivos	Aguas residuales domesticas e industriales.
Otros	Desintegración natural de materiales orgánicos.
Inorgánicos:	
Alcalinidad	Aguas residuales domesticas, agua de suministro, infiltración del agua subterránea.
Cloruros	Agua de suministro, aguas residuales domesticas, infiltración del agua subterránea, ablandadores de agua.
Metales pesados	Vertidos industriales
Nitrógeno	Aguas residuales domesticas y residuos agrícolas.
pH	Vertidos industriales.
Fosforo	Aguas residuales domesticas e industriales, escorrentía residual.
Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domesticas e industriales.
Componentes tóxicos	Vertidos industriales e infiltración de aguas subterráneas.
Gases:	
Sulfuro de hidrogeno	Descomposición de las aguas residuales domesticas.
Metano	Descomposición de las aguas residuales domesticas.
Oxigeno	Agua de suministro, infiltración del agua superficial.
Constituyentes biológicos:	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Protistas	Aguas residuales domesticas y plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domesticas.

Tabla 15.- Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias. [20]



Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Pueden conducir el desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar el entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas carbohidratos. Grasas animales. La materia orgánica se mide, la mayoría de las veces, en términos de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas patógenas presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden llevar el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden conducir a la contaminación del agua subterránea.
Materia orgánica refractaria	Tiende a revestir los métodos convencionales de tratamiento. Los ejemplos típicos son los agentes termoactivos, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Son añadidos frecuentemente al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales y puede que deban ser eliminados si se va a reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyen inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como resultado del uso del agua y puede que deban eliminarse si se va a reutilizar el agua residual.

Tabla 16.- Contaminantes de importancia en el tratamiento de agua residual. [19]

3.1.1. Características físicas

Las características físicas y organolépticas se refieren, en general, a mediciones indirectas de componentes químicos presentes en el agua que pueden ser o no tóxicos. La característica física más importante dentro del agua residual es su contenido de sólidos totales, el cual está compuesto de materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Otras características físicas son la temperatura, color y olor.

Sólidos: A partir de un análisis químico, los sólidos están divididos en varias fracciones diferentes. La determinación de varias formas de sólidos y sus concentraciones generan datos útiles para la caracterización del agua residual.

Los sólidos totales o residuos de la evaporación, pueden clasificarse como *sólidos suspendidos* y *sólidos disueltos*, cada uno de esos grupos puede ser dividido posteriormente en sus fracciones volátiles y fijas. Los sólidos totales representan la masa de material remanente después de que el agua se ha evaporado a una temperatura de 103 °C.

Los sólidos suspendidos, también referidos como residuo no filtrante, representan el peso de los sólidos remanentes en un filtro seguido de un secado a 103 °C. Los sólidos



suspendidos volátiles representan la porción de los sólidos suspendidos que se volatilizan cuando el filtro secado se calienta a 550 °C. Los sólidos fijos permanecen en el filtro.

Los sólidos disueltos, también llamados residuos filtrables, y los sólidos volátiles disueltos pueden ser determinados, ya sea tomando la diferencia entre los análisis de los sólidos totales y suspendidos de la misma muestra o mediante la evaporación del filtrado a partir del análisis de los sólidos suspendidos.

Los sólidos coloidales y flotables están incluidos en un grupo conocido como sólidos no sedimentables y contienen a menudo, una alta proporción de grasa y aceites, están relacionados generalmente con grandes niveles de contaminación. Los sólidos sedimentables son aquellos que sedimentan en un líquido bajo condiciones de quietud.

Olor: El olor de las aguas residuales es causado por compuestos derivados de la actividad microbiana, normalmente; son debidos a los gases producidos por la descomposición de materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica. El más común en aguas de suministro se debe al sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaerobios que reducen los sulfatos o sulfitos y generalmente se elimina por aireación.

Conductividad: La conductividad es la expresión numérica de la capacidad o habilidad de una solución acuosa de conducir una corriente eléctrica. La conductividad o conductancia específica se define como la relación de la distancia (d) que existe entre dos electrodos de área conocida, entre el producto de la resistencia (R) que ofrece el conductor al paso de la corriente; y el área (A) de los dos electrodos en la disolución electrolítica. Mediante esta determinación se permite conocer rápidamente las variaciones de las concentraciones de los minerales disueltos en las aguas residuales.

Temperatura: Es la medida relativa que indica la cantidad energía térmica contenida en el agua residual. Las dos escalas de temperatura, Fahrenheit ($^{\circ}F$) o Celsius ($^{\circ}C$), están interrelacionadas por las ecuaciones siguientes:

$$^{\circ}F = \frac{9}{5} ^{\circ}C + 32$$

$$^{\circ}C = \frac{5}{9} (^{\circ}F - 32)$$

La temperatura del agua es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas y velocidades de reacción, y en la aplicabilidad de agua de usos útiles. Un incremento significativo en la temperatura, por un periodo corto de tiempo indicara la presencia de descargas industriales, en tanto que un descenso en la temperatura a menudo se debe por agua de lluvia.

Color: El color del agua residual depende de la cantidad y tipos de materia disuelta, suspendida y coloidal presente. El agua residual típica es gris, si es oscura se tiene un agua residual anaerobia, este color oscuro indica la necesidad de una aireación posterior; otros colores usualmente indican la presencia de descargas industriales. El color es importante, ya que da una indicación rápida de la calidad del agua. Hay dos tipos de color: el verdadero, producido por sustancias disueltas y que es el parámetro considerado en la norma; y el aparente, provocado por el color verdadero mas el efecto



de los sólidos en suspensión. Para eliminar el color aparente se aplica la coagulación-floculación seguida por sedimentación. La calidad de coagulante depende de la concentración inicial del color y del pH óptimo (generalmente ácido). En el caso verdadero, se recurre a sistemas más complejos como la absorción en carbón activado, oxidación y filtración en zeolitas, según sea el origen del color.

Turbiedad: La turbiedad indica, generalmente, la cantidad de material suspendido en el agua; particularmente a bajas concentraciones de sólidos. La turbiedad no está correlacionada directamente con la concentración de sólidos suspendidos, porque el color puede interferir en la medición de la turbiedad. Lo que se mide como turbiedad es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas, y por ello depende no solo de su concentración sino también de su tamaño y forma.

3.1.2. Características químicas

El análisis químico del agua residual provee una amplia variedad de información concerniente a las características de mencionada agua, generando información sobre las concentraciones de sustancias específicas. Los constituyentes químicos pueden ser separados en numerosas categorías.

En algunos casos, las porciones soluble e insoluble de un parámetro deben ser diferenciadas. Tal información puede ayudar a determinar el funcionamiento de un proceso para un nuevo diseño.

La distribución entre los componentes solubles e insolubles requiere de una primera medición para obtener un valor total del parámetro de interés y luego se repite el análisis de la muestra después de que haya sido filtrada a través de una membrana para determinar la concentración soluble. La parte insoluble representa la concentración total menos la parte soluble.

Esta sección se divide en cuatro categorías generales que tratan de:

- a. La materia orgánica
- b. La medida del contenido orgánico
- c. La materia inorgánica
- d. Los gases que se encuentran en el agua residual

Materia orgánica: En un agua residual de concentración media, un 75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica, tal y como se muestra en la ilustración 9. Proceden de los reinos animal y vegetal y de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos.

Los compuestos orgánicos están formados generalmente por combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, junto con nitrógeno en algunos casos. Otros elementos tales como el azufre, fósforo y hierro pueden hallarse también presentes. Los principales grupos de sustancias orgánicas hallados en el agua residual son las proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 a 50%) y grasas y aceites (10%). Junto con las proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, y la urea, el agua residual contiene pequeñas cantidades de un gran número de diferentes moléculas orgánicas sintéticas cuya estructura puede variar desde muy simple hasta sumamente compleja.

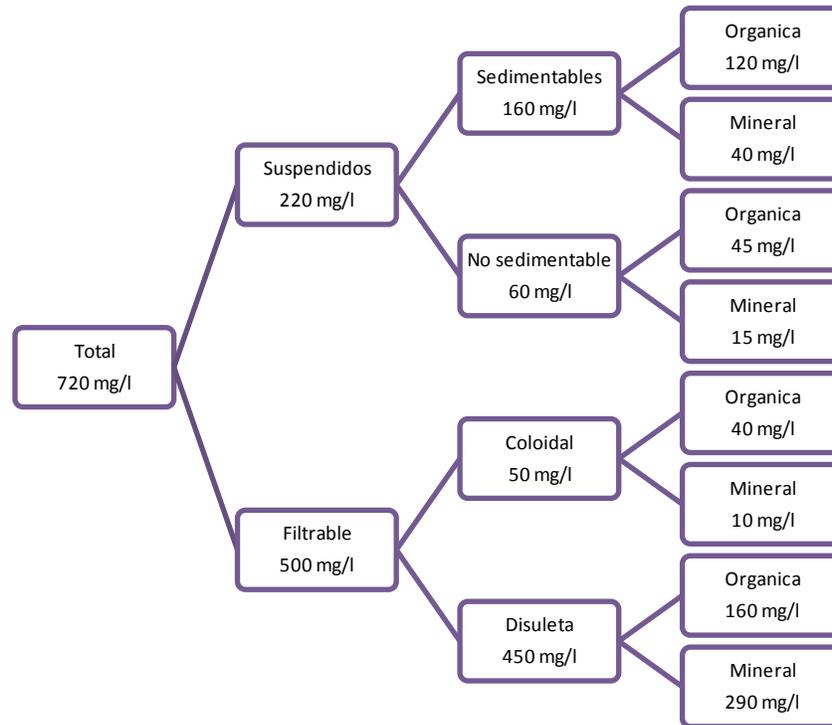


Ilustración 9.- Clasificación de los sólidos presentes en aguas residuales de concentración media [7].

Proteínas: Son los principales componentes del organismo animal, estas son de estructura química compleja e inestable, estando sometidas a muchas formas de descomposición, algunas son solubles y muchas no. La urea y las proteínas son las principales fuentes de nitrógeno en el agua residual; y cuando se hallen presentes en grandes cantidades, es posible que se produzcan olores desagradables debido a su descomposición.

Carbohidratos: Los carbohidratos incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, todos ellos se encuentran en aguas residuales. Los carbohidratos comunes contienen seis o un múltiplo de seis átomos de carbono en cada molécula, e hidrógeno y oxígeno en las proporciones en que los elementos se encuentran en el agua. La celulosa es el carbohidrato más importante que se encuentra en el agua residual.

Grasas animales y aceites: Las grasas de animales y aceites son compuestos (ésteres) de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Dichas grasas y aceites acceden al agua residual como mantequilla, manteca de cerdo, margarina, grasas y aceites vegetales. Son uno de los compuestos más estables y no se descomponen fácilmente por bacterias, sin embargo; los ácidos minerales las atacan dando como resultado la formación de glicerina y ácido graso. Los límites de 15 a 20 mg/L de contenido de grasa y la ausencia de capas de aceite iridiscentes son dos ejemplos de normas establecidas por los organismos competentes en lo que se refiere al vertido de aguas residuales en aguas naturales.

Agentes tensoactivos (sustancias activas al azul de metileno (SAAM)): Son grandes moléculas orgánicas, ligeramente solubles en agua que causan espumas en las plantas de tratamiento, así como en las aguas a las que se vierte efluentes residuales. Estos tienden a acumularse en la interfase aire-agua, puesto que los agentes tensoactivos



procedían principalmente de detergentes sintéticos, se decidió disminuir la formación de espuma en los procesos a gran medida.

Fenoles: Los fenoles y otros compuestos orgánicos, son importantes constituyentes del agua. Los fenoles causan problemas de sabor en el agua, especialmente cuando está clorada. Se producen principalmente por operaciones industriales y aparecen en las aguas residuales que contienen desechos industriales. Pueden ser biológicamente oxidados en concentraciones de hasta 500 mg/L.

Pesticidas y productos químicos agrícolas: Estos son tóxicos para gran número de formas de vida, y por tanto pueden llegar a ser peligrosos contaminantes de las aguas superficiales. Suelen incorporarse fundamentalmente por la escorrentía de parques, campos agrícolas y tierras abandonadas.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): El parámetro de contaminación orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales y superficiales es la DBO₅ (Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días). Su determinación implica medir la variación de oxígeno disuelto en agua a través del tiempo debido a las reacciones bioquímicas involucradas en el metabolismo microbiano de la materia orgánica. La DBO del agua residual da una idea de la biodegradabilidad de la materia orgánica, además sirve para calcular la cantidad de oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica mediante un tratamiento biológico, los datos de DBO₅ es un índice importante de la calidad de los cuerpos de agua.

Demanda química de oxígeno (DQO): Es otro parámetro que permite medir indirectamente el contenido de materia orgánica. El procedimiento se fundamenta en la oxidación de la materia orgánica mediante un oxidante químico fuerte tal como el dicromato de potasio en medio ácido, alta temperatura y presencia de sulfato de plata como catalizador; la reacción que se efectúa es:



El método de dicromato de potasio se basa en el hecho de que la mayoría de los compuestos se oxidan en medio ácido. El exceso de dicromato de potasio se titula con una solución de sulfato ferroso amoniacal. La cantidad de materia orgánica oxidable es proporcional al dicromato de potasio consumido. La DQO es usualmente mayor a la DBO puesto que mayor cantidad de sustancias son oxidadas químicamente que bioquímicamente.

Carbono orgánico total (COT): El contenido de carbono total es también una medida indirecta del contenido de materia orgánica. Su determinación se realiza mediante la combustión catalítica de muestras en un horno a alta temperatura y se mide el bióxido de carbono producido que es proporcional a la cantidad de carbono presente en la muestra. El bióxido de carbono se determina por espectrofotometría de infrarrojo.

Demanda total de oxígeno (DTO): En este ensayo las sustancias orgánicas y en menor escala, las inorgánicas se transforman en productos finales estables dentro de una cámara, mediante combustión canalizada de platino. La DTO se determina observando el contenido de oxígeno presente en el gas que transporta el nitrógeno.



Materia inorgánica: Puesto que las concentraciones de los distintos constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, conviene examinar la naturaleza de algunos, especialmente a los añadidos al agua superficial por el ciclo de su utilización.

pH (Potencial de hidrógeno): Es la medida de acidez o basicidad del agua. Los valores de pH mayores de 7.5 y menores de 6.5 afectan a los organismos involucrados en el tratamiento biológico de las aguas residuales. El pH es una variable importante en el manejo de la calidad del agua pues influye en los procesos químicos y biológicos. Mide el balance de acidez de una solución y se define como el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de ion H_3O^+ .

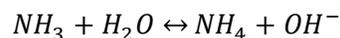
Cloruros: Los cloruros que se encuentran en el agua natural, proceden del agua de las regiones costeras, de la intrusión del agua salada. La fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales en las aguas superficiales. En lugares donde la dureza del agua sea elevada, los ablandadores de agua aportarán grandes cantidades de cloruros.

Dureza: La dureza representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua. Es causada principalmente por las sales de Ca y Mg y en menor grado al Al, Fe, Mn, Sr y Zn. Por la variedad de compuestos que intervienen, la dureza se expresa como una cantidad equivalente de $CaCO_3$. La dureza se clasifica en carbonatada (temporal) y no carbonatada (permanente). La primera es sensible al calor, precipita a altas temperaturas y equivale a la alcalinidad. Cuando el agua es dura significa que contiene sales incrustantes, dificulta la cocción de legumbres e impide la formación de espuma en el jabón. En general, la gente tolera hasta 500 mg/L, que sea el valor guía establecido por la OMS con fines estéticos y que sea igual a la NOM.

Alcalinidad: La alcalinidad de las aguas residuales se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. El agua residual es generalmente alcalina, recibiendo su alcalinidad del agua de suministro, del agua subterránea, y de las materias añadidos durante el uso doméstico.

Nitrógeno: Puesto que el nitrógeno es absolutamente básico para la síntesis de proteínas, se necesitara conocer datos del mismo para valorar la tratabilidad de las aguas residuales domésticas e industriales mediante procesos biológicos. En un ambiente aerobio, las bacterias pueden oxidar al nitrógeno del amoníaco en nitratos y nitritos. El predominio del nitrógeno del nitrato indica que el agua residual se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

El nitrógeno amoniacal existe en una solución acuosa bien como ion amonio y como amoníaco, dependiendo ello del pH de la solución según la siguiente ecuación de equilibrio:



El nitrógeno orgánico se determina por medio del método Kjeldahl. La muestra acuosa se hierve primero para eliminar el amoníaco y a continuación se digiere. Durante la digestión, el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl (o total) es por lo tanto la suma del nitrógeno orgánico y amoniacal.

El nitrógeno del nitrito tiene relativamente poca importancia en los estudios sobre aguas residuales o contaminación de aguas, ya que es inestable y se oxida fácilmente a la forma



de nitrato. El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales.

Fosforo: Son nutrientes biológicos que intervienen en el metabolismo bacteriano. Debido a los nocivos crecimientos incontrolables de algas que tienen lugar en las aguas superficiales, existe actualmente mucho interés en controlar la cantidad de compuestos de fósforo que entran a las aguas superficiales a través de vertidos de las aguas residuales industriales y domésticas y de las escorrentías naturales.

Azufre: El azufre es requerido en la síntesis de proteínas y es liberado en su degradación. Los sulfatos son reducidos químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno por bacterias en condiciones anaerobias. El gas de sulfuro de hidrógeno que se desprende y se mezcla con el gas de las alcantarillas, es corrosivo para las conducciones de gas y si se quema en motores de gas, los productos de la combustión pueden dañar el motor y corroer gravemente el equipo de recuperación térmica de los gases de escape, especialmente si se les permitiera enfriarse por debajo del punto de condensación.

Metales pesados: Algunos de los metales son necesarios para el desarrollo de la vida biológica y la ausencia en cantidades suficientes podría limitar el crecimiento de algas por ejemplo. La presencia de metales excesivos interfiere también en muchos usos provechosos del agua dada su toxicidad; por tanto, conviene mucho medir las concentraciones de dichos metales.

Gases: Los gases más frecuentemente encontrados en el agua residual sin tratar son el nitrógeno, oxígeno, anhídrido carbónico, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano. Los tres primeros son gases comunes de la atmósfera y se encuentran en todas las aguas que están expuestas al aire. Los tres últimos proceden de descomposición de materia orgánica presente en el agua residual.

Oxígeno disuelto: Es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. No obstante, el oxígeno es solo ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno (también de otros gases) que puede estar presente en la solución viene regida por: la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmósfera, la temperatura y la pureza del agua.

Sulfuro de hidrógeno: Se forma por la descomposición de la materia orgánica que se convierte en azufre o por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Se trata de un gas incoloro inflamable, que tiene un olor característico de huevos podridos.

Metano: Es el principal elemento formado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica del agua residual. Es un hidrocarburo incoloro e inodoro de gran valor como combustible. Normalmente no se encuentra en grandes cantidades en el agua residual, porque incluso grandes cantidades de oxígeno tienden a ser tóxicas para los organismos responsables de la producción de metano.

3.1.3. Características biológicas

Las pruebas bacteriológicas determinan la presencia de organismos patógenos o de bacterias en el agua residual. Una prueba para todos los posibles patógenos es imposible, el procedimiento aceptado incluye las pruebas para lo que se conoce como indicador de bacterias. Su presencia se señala como presencia de patógenos.



Los aspectos biológicos con los que se debe estar familiarizado incluyen el conocimiento de:

- a. Los grupos principales de microorganismos que se encuentran en las aguas superficiales y residuales
- b. El de los organismos patógenos presentes en el agua residual
- c. El de los organismos utilizados como indicadores de contaminación y su importancia
- d. De los métodos utilizados para valorar la toxicidad de las aguas residuales tratadas

Microorganismos: Los grupos principales que se encuentran en las aguas superficiales y residuales se clasifican en protistas, vegetales y animales. La categoría de protistas incluyen las bacterias, hongos, protozoos y algas. Los vegetales se clasifican en plantas de semilla, helechos, musgos y hepáticas. Como animales se clasifican los vertebrados e invertebrados. Los virus también se encuentran en el agua residual, se clasifican según el objeto infectado.

Protistas: Son en su clase, el grupo mas importante de los organismos. Dado su amplio papel jugado en la descomposición y estabilización de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales, se debe conocer bien el metabolismo, características, función y síntesis. Las bacterias coliformes se utilizan como un indicador de contaminación y es producida por vertidos de origen humano. Los protozoos importantes son las amebas, los flagelados, y los ciliados libres y fijos. Estos se alimentan de las bacterias y de otros protistas microscópicos y son básicos en el funcionamiento de los procesos biológicos del tratamiento, así como de la purificación de los ríos porque mantienen un equilibrio natural entre los distintos grupos de microorganismos.

Virus: Los virus excretados por los humanos pueden ser un peligro importante para la salud pública. Se sabe con certeza que algunos virus viven hasta 41 días en agua o agua residual a 20°C y durante 6 días en un río normal.

Plantas y animales: El conocimiento de estos organismos es importante al valorar el estado de las corrientes y lagos, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y al observar la efectividad de la vida biológica en los procesos secundarios de tratamiento utilizados para destruir los residuos orgánicos.

Organismos patógenos: Pueden proceder de desechos humanos que estén infectados, o que sean portadores de una enfermedad determinada. Los organismos patógenos bacterianos usuales, que pueden ser excretados por el hombre, causan enfermedades del aparato gastrointestinal, tales como fiebres tifoideas o paratifoideas, disentería, diarrea y cólera. Dado que los organismos son altamente infecciosos, son responsables de muchas miles de muertes cada año en zonas de escasa sanidad, especialmente en los trópicos.

Organismos coliformes: Incluye a todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram negativas, no esporuladas, en forma de bacilo corto, que fermentan la lactosa con producción de gas en un periodo de 35 a 48 hrs. De este grupo heterogéneo no solo esta presente en las heces humanas, sino que se encuentra en otros ambientes como las aguas negras, aguas dulces superficiales, suelo y vegetación. Las características que hacen de los coliformes buenos indicadores de contaminación son las siguientes:



a) *Grupo coliforme total*

1) Ventajas

- La ausencia de coliformes es una evidencia de la potabilidad bacteriológica del agua.
- La densidad de coliformes es una medida proporcional aproximada de la contaminación por desechos fecales.
- Si están presentes las bacterias patógenas de origen intestinal, las bacterias coliformes deben existir en mayor número, ya que están presentes siempre en el intestino humano y animales de sangre caliente, y se eliminan en gran número por las heces.
- Los coliformes persisten en medio acuático más que las bacterias patógenas de origen intestinal.
- Los coliformes son generalmente menos dañinos al hombre y pueden determinarse cuantitativamente por los procedimientos rutinarios de laboratorio.

2) Desventajas

- Algunos miembros del grupo coliforme tienen una amplia distribución en el medio ambiente en comparación a su presencia en los intestinos de los animales de sangre caliente.
- Algunas cepas del grupo coliforme pueden crecer en aguas contaminadas y por consiguiente esto hace difícil la evaluación de la presencia o grado de contaminación.
- Otras bacterias pueden interferir con la prueba de los coliformes dando resultados falsos positivos o falsos negativos.

b) *Grupo coliforme fecal*

1) Ventajas

- El 95% de los coliformes de origen fecal da positiva la prueba de temperatura.
- Estos organismos están relativamente ausentes si la contaminación es de origen fecal.
- El tiempo de supervivencia del grupo coliforme fecal en aguas es más corto que el de los coliformes no fecales. Por consiguiente una densidad alta de coliformes fecales indica una contaminación relativamente reciente.
- Los coliformes fecales generalmente no se multiplican fuera de los intestinos de animales de sangre caliente.

2) Desventajas

- Un grupo pequeño de coliformes fecales da negativa la prueba de temperatura.
- Actualmente se conoce poco acerca de la supervivencia relativa de coliformes fecales y de las bacterias patógenas entéricas en aguas contaminadas.

3.2. Esquema general del tratamiento de aguas residuales

En la actualidad se han desarrollado diversos procesos para el tratamiento de aguas residuales, con el fin de cumplir con las normas y requerimientos de calidad establecidos por las organizaciones gubernamentales.

Los procesos de tratamiento de las aguas residuales persiguen varios objetivos como:

- La eliminación de sólidos suspendidos, por medio de cribado o sedimentación.

- La eliminación de grasas, aceites y sólidos grasos por medio de flotación y desnatado, auxiliado en algunos casos por tratamientos químicos.
- La eliminación de sólidos coloidales a través de la floculación-coagulación, seguida de procesos de sedimentación y filtración.
- La neutralización de la acidez o alcalinidad excesiva, por adición de productos químicos.
- La eliminación o estabilización de los sólidos disueltos mediante precipitación química, intercambio iónico, procesos biológicos o sus combinaciones.
- La decoloración por tratamiento químico, con sedimentación o filtración o adsorción.
- La disminución de la temperatura de los residuos excesivamente calientes por enfriamiento.

Para el tratamiento de aguas residuales existen varios procesos de tratamiento; los cuales se pueden agrupar en tratamientos físicos, químicos y biológicos, no obstante lo anterior también se pueden clasificar en tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Se selecciona el tipo de tratamiento dependiendo de los contaminantes que contiene el agua residual y de las características o calidad del uso al que se pretende destinar. El tratamiento primario lo debe aproximar a esa calidad; si esta no elimina algún contaminante se selecciona otro tratamiento que sea compatible con el primero y que haga una segunda aproximación, llamándolo secundario; si aun no reúne las características; se selecciona un tercero.

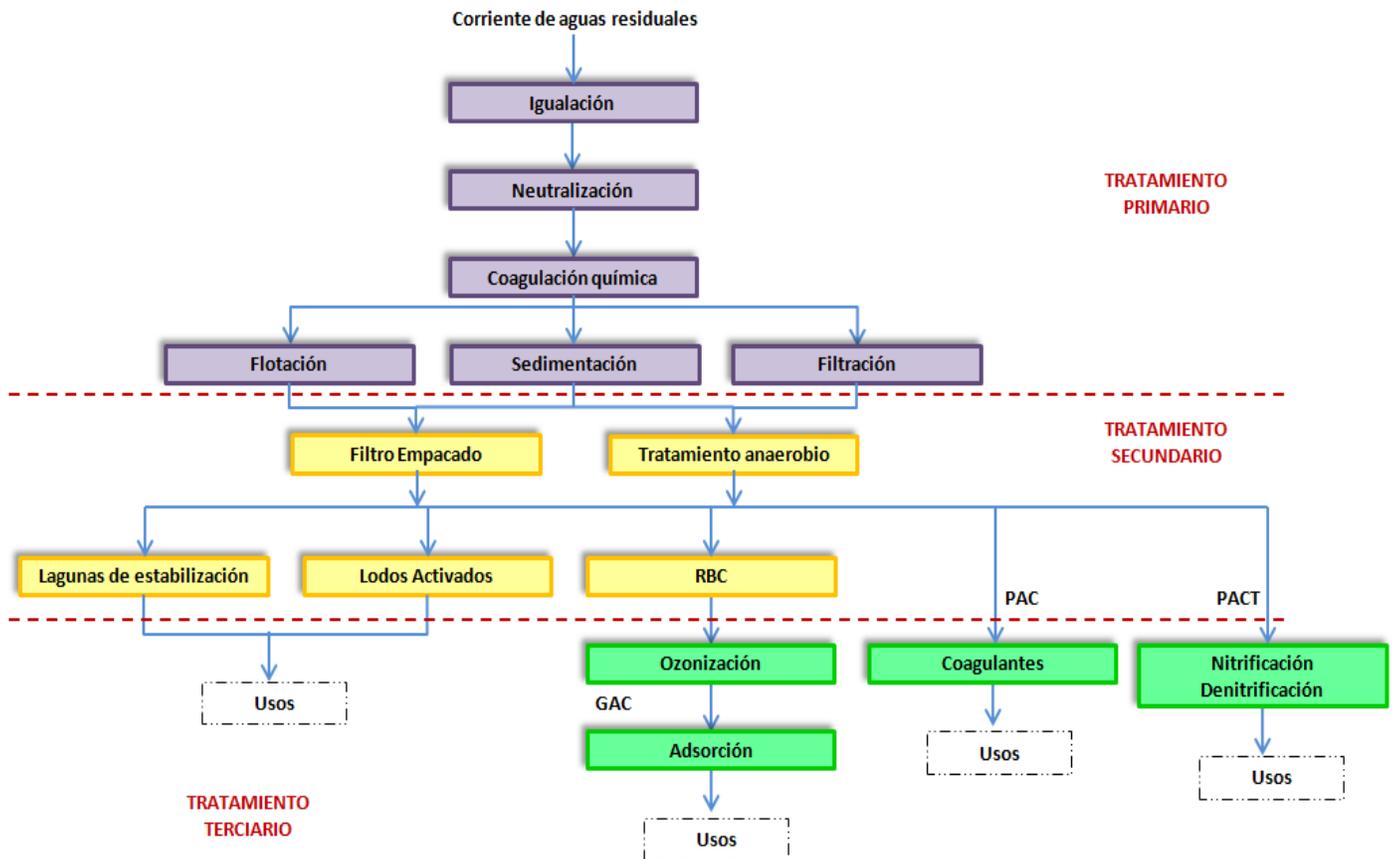


Ilustración 10.- Tipos de tratamiento para aguas residuales. [12,28]



En la ilustración 10 se muestra de forma esquemática la clasificación general de los diversos tratamientos existentes y principalmente los sistemas de tratamiento en estudio. Los procesos de tratamiento terciario son adicionales después del tratamiento biológico en el orden para remover residuos del tipo específico.

La filtración remueve sólidos suspendidos o coloidales, la adsorción por carbón granular activado (*GAC por sus siglas en inglés*) remueve orgánicos, la oxidación química también. Desafortunadamente, los sistemas terciarios no tratan grandes volúmenes de aguas residuales, pueden también ser ineficientes puesto que los procesos son para contaminantes específicos.

Existen sistemas de tratamiento que también pueden ser modificados de manera amplia en las capacidades y mejorar el funcionamiento, esto es mucho más práctico en las opciones anteriores. Un ejemplo, es adicionar carbón activado pulverizado (*PAC*) en los procesos de tratamiento biológico que absorben orgánicos y microorganismos no degradables; en el mercado se conoce como proceso PACT.

A continuación, se presenta una breve explicación acerca de los diferentes tratamientos de agua; dando especial énfasis a el tratamiento primario, y en particular; al sistema de coagulación, ya que es de suma importancia dentro del desarrollo de este proyecto.

3.3. Tratamiento Primario

Se utiliza fundamentalmente para acondicionar el agua a fin de poder aplicar después a algún tratamiento para disminuir o eliminar la contaminación orgánica o inorgánica. De igual modo, con el propósito de retirar sólidos perniciosos para el equipo de bombeo y equipo secundario. Los métodos más comunes de tratamiento primario son: cribado, homogenización, neutralización, sedimentación, separación de gases y aceites (*flotación*) y coagulación.

3.3.1. Igualación u Homogeneización

Los tanques de igualación u homogeneización, tienen la función de amortiguar las variaciones de las descargas de aguas residuales con el fin de tratar un gasto uniforme. La homogenización de una caudal consiste, simplemente, en la laminación de las variaciones del caudal para lograr un caudal constante o casi constante; además de aminorar las variaciones de la DBO del influente a los sistemas de tratamiento.

Esta técnica puede aplicarse en diversas situaciones diferentes. Las principales aplicaciones consisten en la homogenización de:

- ✓ Caudal en tiempo seco
- ✓ Caudales en tiempo de lluvia procedentes de redes de alcantarillado, separativas
- ✓ Caudales mixtos de aguas pluviales y redes

Las principales ventajas que se obtienen de la aplicación de la homogenización de caudales con las siguientes [22]:

1. Se ha podido constatar que la homogeneización aumenta las características de tratabilidad del agua residual.



2. Mejora el tratamiento biológico debido a la disminución o eliminación de los efectos causados por algas a causa de la dilución de sustancias inhibitoras y estabilización del pH
3. Mejora la calidad del efluente y el rendimiento de los tanques de sedimentación al trabajar con cargas de sólidos constantes
4. En el tratamiento químico, el amortiguamiento de las cargas aplicadas, mejora el control de la dosificación de reactivos y la fiabilidad del proceso

3.3.2. Neutralización

El tratamiento de neutralización se utiliza normalmente en los siguientes casos que se presentan en la depuración de aguas residuales:

1. Antes de la descarga de las aguas residuales en un medio receptor. La justificación para la neutralización es que la vida acuática es muy sensible a variaciones de pH fuera del intervalo cercano a 7.
2. Antes de la descarga de aguas residuales industriales al alcantarillado municipal. La especificación del pH de las descargas industriales en las alcantarillas se hace de forma frecuente.
3. Antes del tratamiento químico o biológico. Para los tratamientos biológicos, el pH del sistema se mantiene en un intervalo comprendido entre 6.5 y 8.5 para asegurar una actividad biológica óptima.

3.3.3. Coagulación

Se considera como coagulación al proceso de desestabilización de las partículas en estados: de suspensión y coloidal. Este proceso tiene dos etapas: la primera, la adición de uno o más productos químicos (coagulantes) para hacer inestables las partículas coloidales. La segunda consiste en la conglomeración de estas partículas desestabilizadas al entrar al contacto unas con otras. Si uno de estos pasos no está propiamente diseñado el proceso de coagulación no funcionara.

La coagulación es empleada para la remoción de materiales de suspensión presentes en forma de coloides. Los coloides están presentes como partículas sobre un rango de 1nm (10^{-7} cm) o 0,1 nm (10^{-8} cm). Los coloides presentes en las aguas pueden ser hidrofónicos o hidrofílicos. Los coloides hidrofónicos no poseen afinidad en los medios líquidos y carecen de estabilidad en presencia de electrolitos. Estos son realmente susceptibles a la coagulación.

Los coloides hidrofílicos son semejantes a las proteínas, exhibe una afinidad disfrazada para el agua. La absorción de retardadores de floculación es especialmente requerida en los tratamientos para llevar a cabo una efectiva coagulación. La estabilidad de un coloide se debe principalmente a las fuerzas de repulsión electrostática y en el caso de coloides hidrofílicos se debe a una capa de solución de agua que retarda la coagulación.

3.3.3.1. Coagulación-Floculación de las impurezas del agua

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con un peso específico superior a las del agua llamadas flóculos. Dicho proceso se usa para:



- Remoción de la turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente
- Remoción del color verdadero y aparente
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados por coagulación
- Destrucción de algas o plancton en general
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación del agua:

- a. La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas
- b. El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre si y formando una malla tridimensional de coágulos porosos

El primer aspecto, diferentes autores suele referirse como coagulación y al segundo como floculación.²⁰ La coagulación empieza en el primer instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores.

Tres mecanismos pueden actuar en el primer fenómeno: el de adsorción-desestabilización basada en las fuerzas electroestáticas de atracción y repulsión, el de puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides, y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua.

En el segundo aspecto debe distinguirse entre: Floculación ortocinética y pericinéctica, o en escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogoroff η . La primera es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas. La segunda es promovida, internamente dentro del líquido; por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel (movimiento browniano), y se realiza en un tiempo muy corto después de desestabilizada la partícula hasta que esta tiene un tamaño que se acerca a la escala de Kolmogoroff.

3.3.3.2. Potenciales del coloide

En un coloide se debe tener en cuenta, los siguientes potenciales (*ilustración 11*):

1. El potencial “ q ” que existe en la superficie del coloide, o potencial Nernst.
2. El potencial “ ϕ ” que existe en la superficie interior de la doble capa, donde empieza la parte difusa.
3. El potencial “ z ” que existe en el plano de cizalla.

²⁰ Coagular viene del latín “*cuagulare*” que significa aglutinar. Flocular de “*floculare*” que significa hacer un grumo o coágulo.

El plano de cizalla es el que separa el resto de la dispersión, la sección de la capa que se mueve con la partícula formando parte integral de ella; y esta situado en algún punto entre la superficie interior y la superficie exterior de la doble capa.

Como no se puede separar el coloide de los contraiones que lo rodean, el único potencial que se puede determinar con más o menos precisión es el potencial Z, o sea; el potencial en la superficie del plano de cizalla.

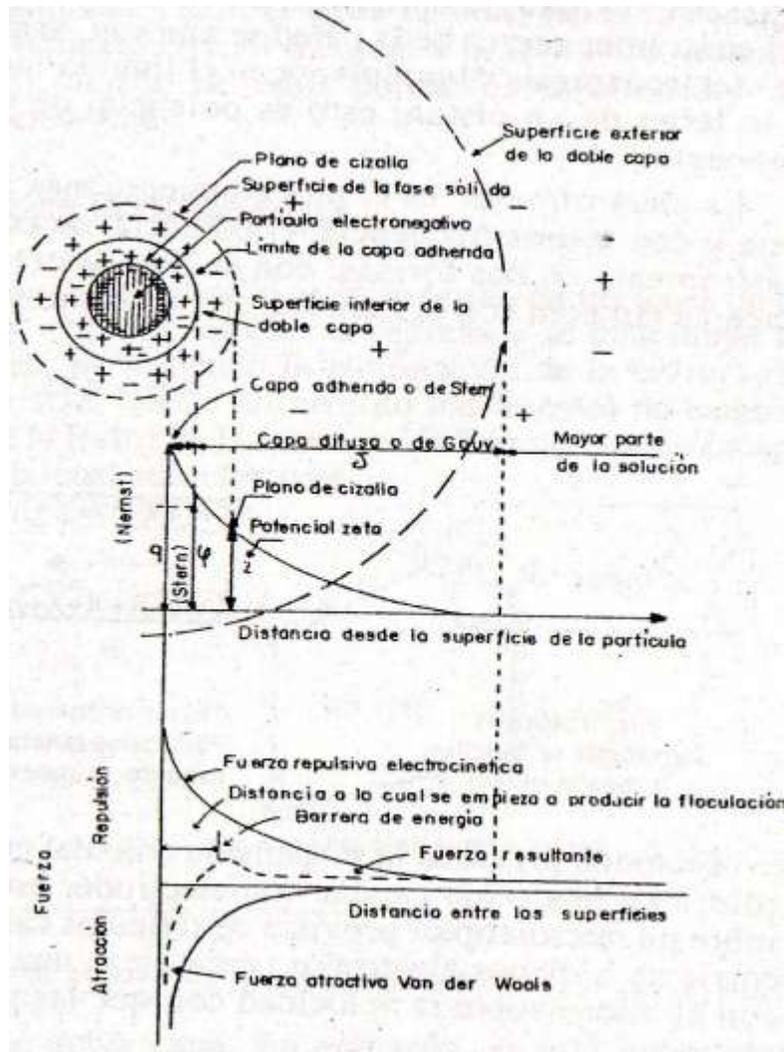


Ilustración 11.- Potenciales de un coloide.[3]

3.3.3.3. Potencial Zeta (z)

La teoría de la doble capa no está aun totalmente completa. La simplificación hecha por Helmholtz en 1879 da, sin embargo; una mayor comprensión del fenómeno. Este asimila la doble capa a un condensador de dos capas iguales y opuestas separadas por el espesor. Si las cargas son iguales a "q", el potencial de dicho condensador es el potencial "z".

La z potencial es determinada por la medición de la movilidad de partículas de coloides en celdas, que pueden observarse en microscopio. Entonces usualmente se muestra una

variación estadística en la movilidad individual de las partículas, alrededor de 20 o 30 debe de tener en promedio para cualquier determinación. La z potencial es:

- La encargada de la concentración para la determinación del potencial de iones.
- Adición de iones opuestos
- Concentración de la difusión de partículas de doble capa por el incremento de iones en la solución.

La coagulación óptima debe ocurrir cuando la “z” potencial sea igual a cero, esta es definida por el punto isoeléctrico.

3.3.3.4. Coagulación por neutralización de carga

La neutralización de las cargas de coloides liofóbicos, puede hacerse según Mackrle:

- Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide.
- Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las de los iones determinantes del potencial, que sean capaces de remplazar a estos en la capa de Stern.

Como lo esquematiza la ilustración 12, los coloides pueden adsorber:

- Iones o productos de hidrolisis simples como el $Al(OH)^{++}$ o el $Fe(OH)^{++}$ con pesos moleculares entre 44 y 135 y tamaños menores de $1 \mu\mu$ que se forman al inicio de la coagulación.
- Polímeros formados poco mas tarde, al continuar las reacciones hidrolíticas del coagulante con la alcalinidad y con el agua misma. Estas moléculas alcanzan pesos entre 256 (cuando $OH:Al$ es igual a 0.5) y 1430 (cuando $OH:Al$ es igual 11.25). el tamaño de estos polímeros es alrededor de $0.1 \mu\mu$ y tienden a ser octaédricos.

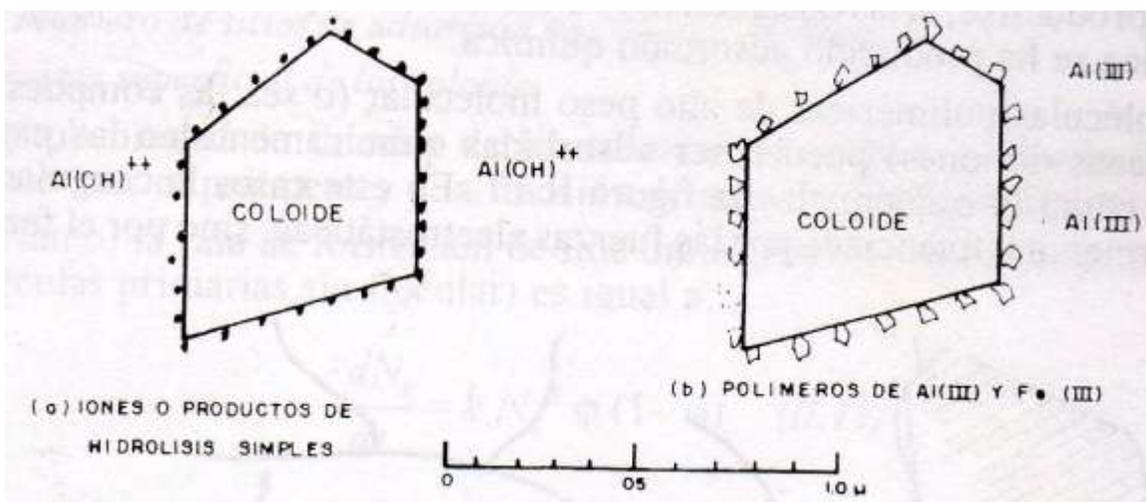


Ilustración 12.- Adsorción de contraiones en la partícula coloidal [3].



3.3.3.5. Coagulación por compresión de la doble capa

Incrementando la concentración del electrolito se incorporan contraiones en la capa difusa o de Gouy-Chapman, con lo cual ésta se represa y se disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía.

Es por ello que la adición de la sal neutra (electrolito indiferente) no cambia el potencial del coloide pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulómbicas, disminuyendo la distancia hasta la cual son efectivas [3].

La reducción del espesor de la doble capa, sin embargo, es más importante que la reducción del potencial "z" hasta el punto isoeléctrico ($z=0$). La adsorción de contraiones puede ser un fenómeno electrostático o químico. Si el fenómeno es puramente electrostático y lo que se agrega son contraiones en la capa difusa, los iones más pequeños podrán acercarse más a la superficie de la partícula y no se fijarán a puntos de adsorción determinados, sino que flotarán libremente a su alrededor. En este caso:

- La coagulación se produce cuando el potencial "z" se hace cero.
- El exceso de coagulantes agregados no puede producir estabilización de la suspensión, pues los coloides no pueden adsorber más contraiones de los que su carga primaria lo permite.
- Entre mayor sea la carga del contraión más disminuirá la carga del coloide de acuerdo con la ley de Schulze Hardy que dice: *"La precipitación de un coloide es efectuada por aquel ion del electrolito añadido, que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ion se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de cargas que posea"*

De acuerdo con esta ley se ha encontrado que un ión bivalente es de 30 a 60 veces más efectivo que un ión monovalente; y un ión trivalente, de 700 a 1000 veces más efectivo que un ión monovalente.

Esto se debe a que mientras más fuerte sea la carga eléctrica del contraión, más rápidamente neutraliza la partícula. Ahora bien, como los productos de la hidrólisis del Al(III) y el Fe(III) tienen cargas que van desde +5 hacia -1, la cantidad de coagulante que debe ser agregado a una suspensión dependerá más de la carga de los productos de hidrólisis que se formen que del número de partículas de la suspensión.

3.3.3.6. Coagulación por puente químico

Si la adsorción de contraiones es debida a fuerzas químicas se establecerán enlaces de hidrógeno, covalentes, iónicos, etc., entre las moléculas adsorbidas y las superficies de los coloides, en cuyo caso estas quedarán adheridas a puntos fijos de adsorción y su número podrá aumentar hasta cambiar la carga del coloide (*de negativo a positivo*) con lo que producirá su estabilización.

Por otra parte, entre más puntos de adsorción disponibles haya (*mas superficie de cubrir*) más moléculas capaces de ser adsorbidas (*coagulantes*) hay que agregar y serán más fácilmente adsorbidos los polímeros grandes que los pequeños.

Esto explica por qué, no siempre la coagulación se realiza a $z=0$ y puede incluso no producirse, si las dosis son muy altas: debido a que el lugar de adsorción electroestática se ha producido adsorción química.

Las moléculas poliméricas de alto peso molecular (o sea las compuestas por largas cadenas de iones) pueden ser adsorbidas químicamente en las partículas coloidales como se esquematiza en la ilustración 13. En este caso, la coagulación no está mayormente influenciada por las fuerzas electroestáticas, sino por el fenómeno coloidal en uno o más puntos fijos de adsorción, dejando al resto de la cadena libre, de forma que pueda flotar en el líquido y adherirse a su vez al otro coloide.

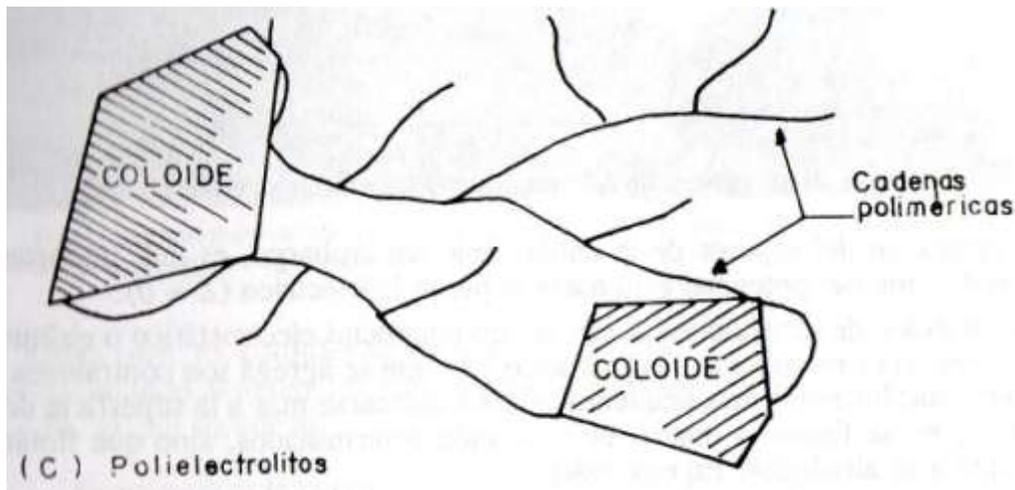


Ilustración 13.- Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita. [3]

Se forma así un puente molecular que une una partícula con otra. La repetición de este fenómeno entre diversas partículas es lo que permite la aglutinación de ellas en masas llamadas floculos.

Clase	Modo	Tipo de adsorción
Adsorción-desestabilización	Neutralización de la carga Compresión del doble lecho	Adsorción electroestática Adsorción química
Puente químico	Unión de partículas por medio de cadenas poliméricas	Adsorción química
Incorporación	Producción de precipitado químico	No hay

Tabla 17.- Clases de coagulación.

Si τ es el número de segmentos por molécula que posee un polímero, y β el número de segmentos adsorbidos por molécula, la cantidad de segmentos libres será $(\tau-\beta)$. La proporción de segmentos adsorbidos será β/τ . Por otro lado, si P_0 =concentración del polímero añadido y P =concentración residual de polímero después de realizada la adsorción; (P_0-P) será la concentración adsorbida y $(P_0-P) N$ (N =Número de Avogrado) las moléculas concentradas en la interfase. Por lo tanto, el número de sitios cubierto será:

$$\beta(P_0 - P)N$$

Y la fracción de sitios cubiertos en la superficie dada:



$$\varphi = \frac{\beta(P_0 - P)N}{s S_0}$$

En donde:

s: Número de sitios de adsorción por unidad de área

S₀: área superficial de los coloides

La probabilidad de flocular de los coloides es proporcional a la fracción de superficie por el polímero y la fracción de superficie no cubierta (1-φ). Por tanto, la tasa de formación de floc dn/dt (rata de disminución del número de partículas primarias sin flocular) es igual a:

$$\frac{dN}{dt} = k N_0^2 \varphi (1 - \varphi)$$

N₀= Número de partículas primarias sin flocular

Partiendo de esta última ecuación, se dice que:

- Cuando el polímero no es adsorbido (φ=0) el floc se desintegra espontáneamente y dN₀/dt se aproxima también a cero.
- Cuando la superficie esta totalmente cubierta (φ=1) no se pueden formar puentes y dN₀/dt se aproxima también a cero.
- En cambio, cuando φ=0.5 y la mitad de la superficie de los coloides esta cubierta por los segmentos poliméricos, el floc tiene la máxima estabilidad (dN₀/dt=máxima).

Esto explica el que la coagulación sea pobre o no se produzca cuando hay un exceso de polímeros. Pues en este caso, todos los sitios de adsorción pueden quedar cubiertos (φ=1) lo que reestabiliza las partículas sin que tal cosa signifique reversión del potencial "Z".

Por otro lado, una suspensión desestabilizada puede estabilizarse nuevamente si es sometida a una agitación violenta, puesto que las partículas llegan a quedar totalmente cubiertas por un polímero, al doblarse las cadenas poliméricas sobre si mismas y ocupar otros sitios en el mismo coloide al cual se han adherido.

El modelo de puente químico también explica la relación (*estequiométrica*) que existe entre la cantidad de superficie disponible o cantidad de coloides y la cantidad de coagulantes agregados.

Además, se puede comprender el hecho de que en muchos casos se obtenga coagulación con polímeros que tengan una carga igual a la de los coloides.

3.3.3.7. Coagulación por incorporación (o de barrido)

Se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. En ese momento se precipitan los hidróxidos que se forman por la reacción de alcalinidad y el agua misma con los coagulantes, con lo que se induce la producción de una masa esponjosa (*floculo de barrido*) que atrapa con su caída a los coloides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar, incorporadas dentro del precipitado que desciende.



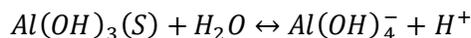
Este tipo de remoción de turbiedad, no es una verdadera coagulación pero es la que mas frecuentemente se produce, debido a que en la práctica, las dosis que se usan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio o hierro en el agua, a los pH y temperaturas normales de trabajo.

La incorporación por coagulación no excluye, sin embargo; la posibilidad de que simultáneamente se produzca también, en parte o en etapa inicial, coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. La coagulación corriente, pues, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se sobreponen o complementan.

3.3.3.8. Diagramas de Coagulación-Turbiedad

Los diagramas de coagulación son herramientas útiles para predecir las condiciones químicas que gobiernan el proceso. Dichos diagramas se usan para definir las dosis de coagulantes en función de los pH y se desarrollan a partir de los diagramas de estabilidad termodinámica para la fase solida del hidróxido de aluminio.

Por ejemplo, el ion aluminato, $Al(OH)_4^-$ es una especie soluble en equilibrio con el hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$ en los rangos alcalinos. La ecuación que describe este equilibrio se escribe así:



De aquí se saca la constante de equilibrio, así:

$$K_4 = \frac{[H^+][Al(OH)_4^-]}{Al(OH)_3(S)}$$

Como $Al(OH)_3=1$, si tomamos logaritmos negativos

$$\log[Al(OH)_4^-] = pH - 12.35$$

Esta es la ecuación de una línea recta con pendiente +1 y es la que forma el marco básico del diagrama de coagulación. Líneas similares se pueden derivar para otras especies hidrolíticas de aluminio, las cuales forman los limites de la región dentro de la cual existe el hidróxido de aluminio en su fase sólida.

Los resultados sobre coagulación fueron introducidos, dentro del diagrama $\log Al^{+++}$ en moles por litro vs pH de la solución mezclada y superpuestos a los diagramas de estabilidad.

Las líneas de estabilidad para $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)^{++}$ y $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ que forman el marco de los diagramas de coagulación y de las regiones donde las especies hidrolíticas solubles o el hidróxido de aluminio en fase sólida (*que tiene carga eléctrica*) interacciona con las especies coloidales para producir coagulación, se muestran en la ilustración 14.

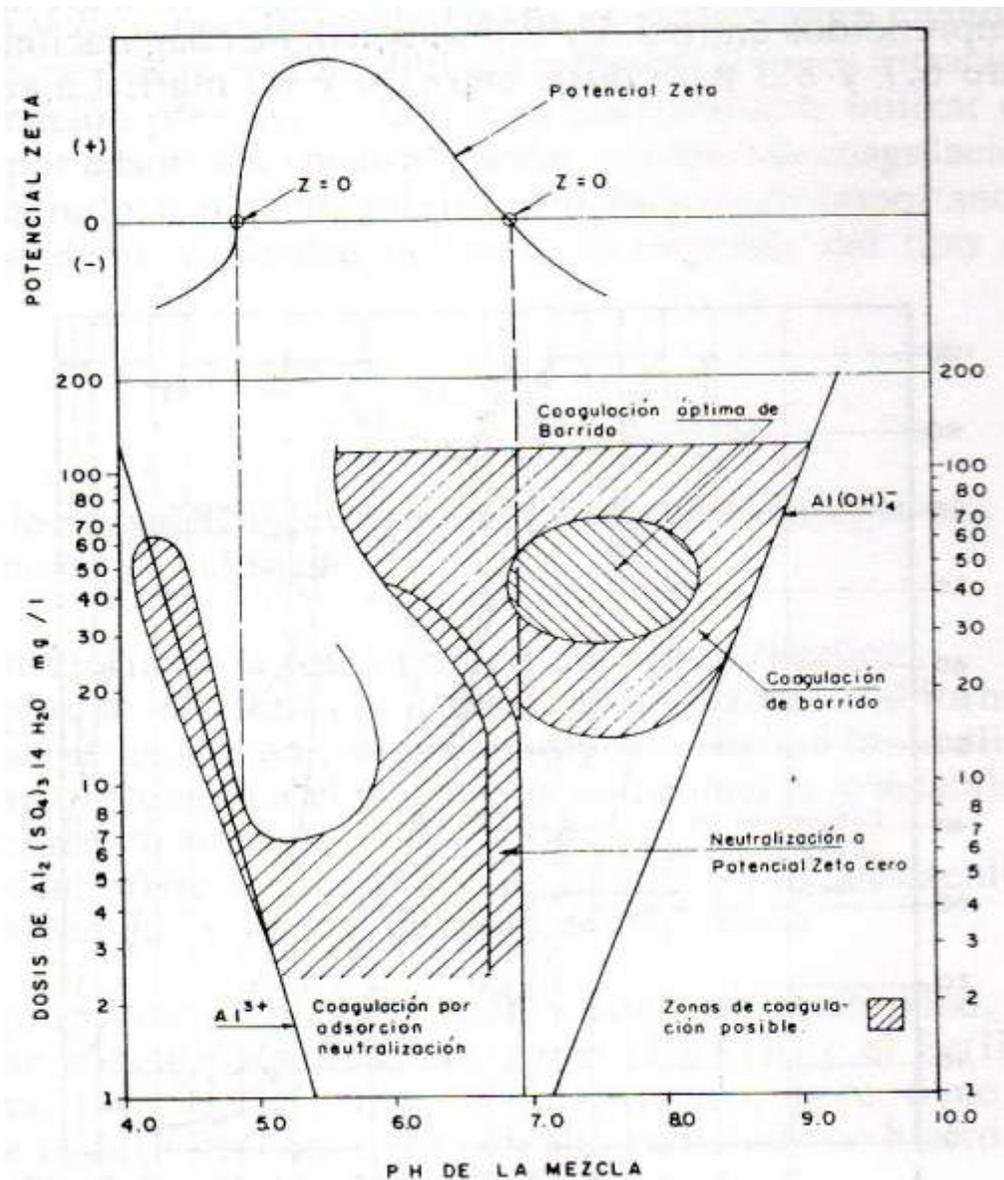


Ilustración 14.- Zonas de coagulación de turbiedad según los estudios de Amirtharajh y Mills para distintas dosis de sulfato de aluminio a distinto pH.²¹ [3]

La interacción entre coloides y el hidróxido de aluminio mostrada en la ilustración “indica también el potencial ζ resultante debido a estas interacciones”.

Se puede ver que con dosis superiores a 15 mg/L de sulfato de aluminio y pH comprendidos entre 5.5 y 9.0 se consigue coagulación de barrido, con un óptimo entre 6.7 y 8.3 para dosis entre 30 y 60 mg/L. La coagulación por adsorción-neutralización, en cambio, se logra con pH entre 5.0 y 7.0 y dosis de coagulantes entre 15 y 30 mg/L. A pH menores de 5 puede llegarse también a producirse adsorción-neutralización con dosis mayores hasta de 60 mg/L.

²¹ La forma de estas zonas varía de acuerdo con la calidad de agua.



En la parte superior del diagrama se incluye la curva del potencial "z" que muestra como a pH menor a 4.8 el potencial de las partículas se hace negativo. Por encima, tal valor se torna positivo y vuelve a pasar por z=0 a pH=6.8 para regresar a ser negativo de ahí en adelante.

Por tanto, existen dos regiones optimas en que se puede hacer la coagulación cerca del punto isoelectrico a pH=4.8 y pH=6.8. Entre estas dos regiones los coloides se reestabilizan debido al exceso de cargas positivas adsorbidas. Cabe aclarar que cada agua exhibe sus propias características y que por tanto el diagrama debe tomarse como una guía general, que de hecho puede variar, según el tipo de coloides presentes y de las condiciones de la fase líquida.

Como ejemplo, Campos y Di Bernardo (1991) trabajando con un agua de 200 UNT de turbiedad, 5.0 u.c. de color, 30 mg/L de alcalinidad y pH=7.5, obtuvieron una serie de curvas que se muestran en la ilustración 15, en las que se puede observar la similitud que ellas muestran con el diagrama presentado en la ilustración 14. A partir de las curvas de la ilustración 15 se trazaron las curvas de la ilustración 16 en las que se ve el distinto comportamiento de la coagulación por barrido y la coagulación por adsorción-neutralización.

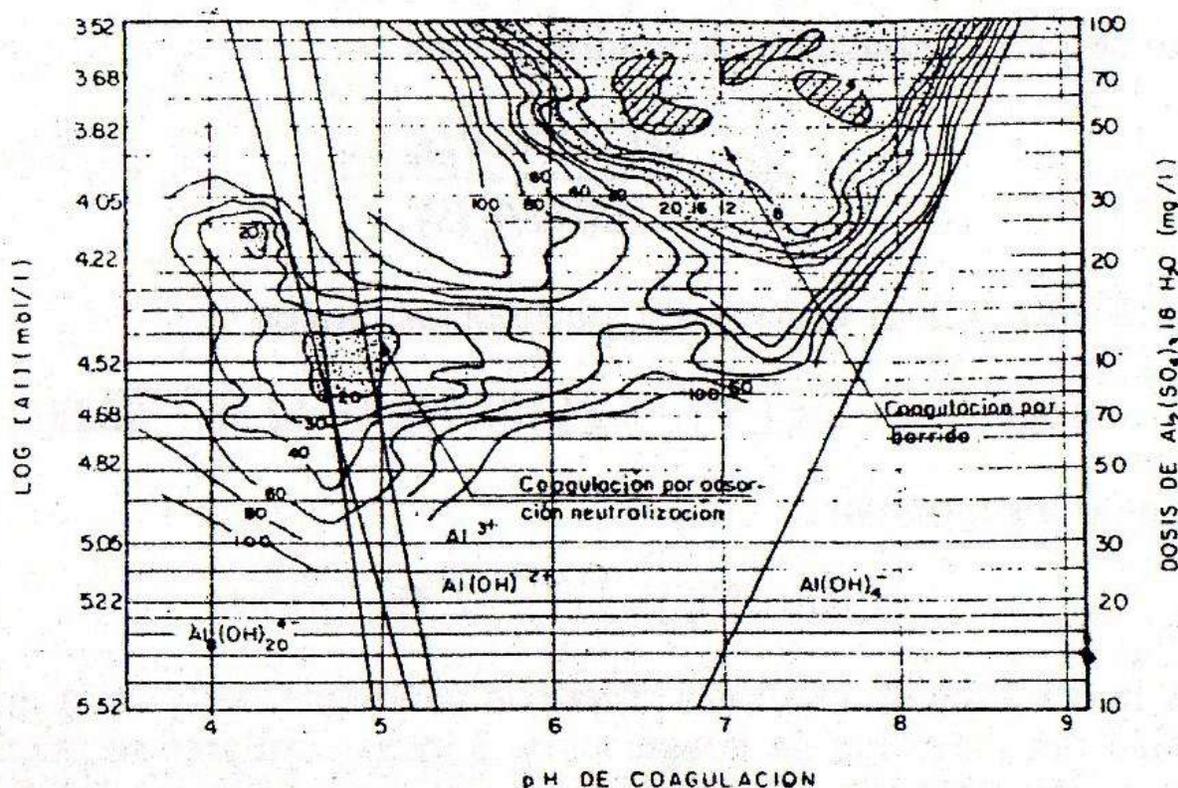


Ilustración 15.- Diagrama de coagulación obtenidas experimentalmente para aguas de 200 UNT de turbiedad, 5 u.c. de color verdadero y 30 mg/L de alcalinidad con pH de 7.5 (Según Campos y Di Bernardo)[3]

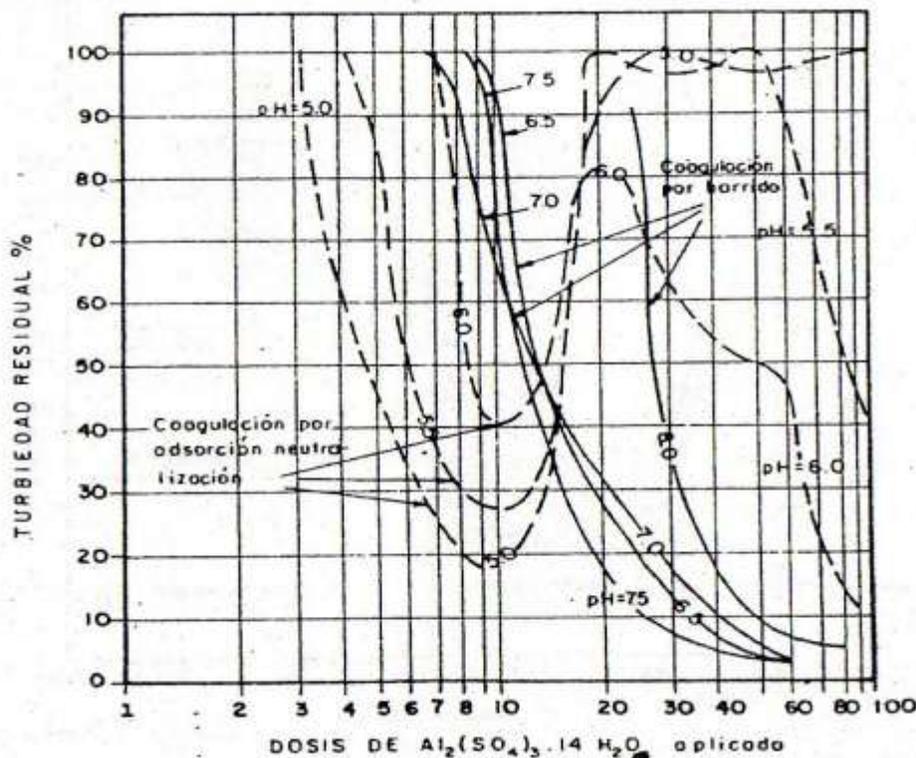


Ilustración 16.- Porcentaje de turbiedad residual para distintas dosis de coagulantes aplicadas a distintos pH del agua mezclada.

La primera se produjo a dosis muy altas, por encima de 30 mg/L que fue cuando se empezó a obtener 20% de turbiedad residual y siguió disminuyendo a valores superiores sin presentar un desmejoramiento de la calidad efluente, como con frecuencia ocurre en otras aguas cuando se sobrepasa cierto límite. En cambio a pH de 6.0 o menos las curvas para el mismo pH, siempre fueron claramente bimodales, y las dosis óptimas se situaron entre 8.0 y 12 mg/L. Esto demuestra que, mientras para coagulación por barrido las dosis capaces de producir coagulación aceptable, pueden variar con relativa amplitud: de 1 a 3, las que inducen coagulación por adsorción-neutralización, solo se hace con un estrecho rango de 1 a 1.5.

La distinción entre uno y otro tipo de coagulación es significativa cuando, como veremos mas adelante, se quiere realizar filtración directa (esto es filtración sin floculación, ni sedimentación previas) en la que es indispensable utilizar en todo momento coagulación por adsorción-neutralización, evitando la coagulación por barrido, la cual tiende a producir muchos sólidos. También es importante en la mezcla rápida en donde la velocidad del proceso depende del tipo de coagulación.

3.3.3.9. Remoción del color

Las razones por las cuales se suele hacer remoción de color en el agua son de orden estético (porque la mayoría de la gente prefiere un agua cristalina), químico-sanitario (porque interfiere con el proceso de cloración, al formar clorohalometanos, dificulta los análisis colorimétricos del agua, complica el proceso de coagulación y estabiliza el hierro y el magnesio en

solución) e industrial (porque interfiere en ciertos procesos industriales y obstaculiza el funcionamiento de resinas aniónicas de intercambio iónico).

El agua coloreada es generalmente blanda, ácida y con baja alcalinidad. El color se puede remover con coagulantes metálicos como el Al(III) y el Fe(III). Frecuentemente este último es más eficiente que el primero, pero tiene la desventaja de que si excede la dosis óptima, queda un alto contenido de hierro en el agua.

El pH para remover color es más bajo que el que se necesita para remover turbiedad, como se puede observar en la ilustración 17 tomada por Hall y Packham (1965). Para sales de aluminio el color se mueve mejor a pH entre 5.0 y 6.0 y la turbiedad entre 6.0 y 7.0. Para sales de hierro el pH óptimo para remoción de color esta entre 3.2 y 4.5 y para turbiedad entre 2 y 7.

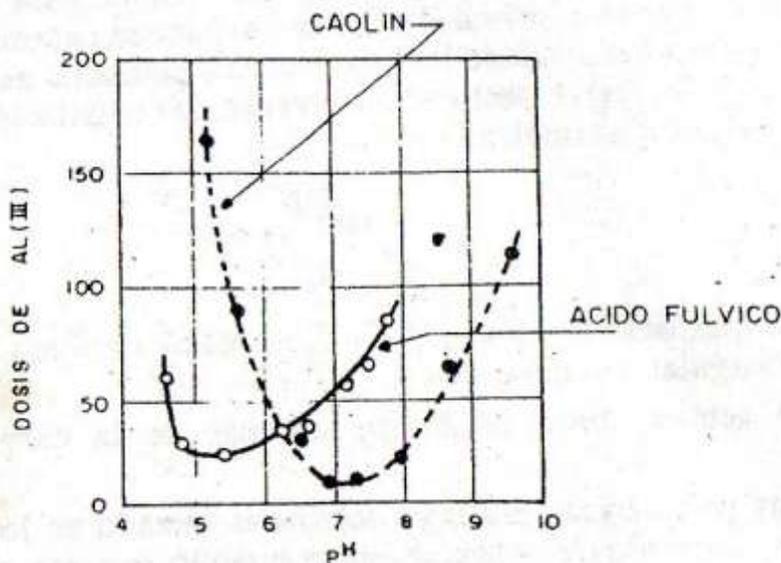


Ilustración 17.- Dosis de Al (III) necesaria para remover el 50% de color y la turbiedad del agua. Concentraciones iniciales: 25 mg/L de ácido fúlvico y 50 mg/L de caolín (Según Hall y Pckhman [3]).

Por eso la mezcla de color y turbiedad (especialmente si viene acompañada de alto contenido de hierro) puede dificultar más bien que ayudar en el proceso de coagulación. En este caso se necesita decidir si se requiere o no agregar alcalinidad y cual es el pH óptimo, lo cual sólo se puede hallar por medio de cuidadosa experimentación.

Por otra parte, debido a su naturaleza el floculo de color es extremadamente liviano y quebradizo y la presencia de turbiedad puede darle más peso y resistencia lo que resulta beneficioso en el proceso de sedimentación.

El pH óptimo debe ajustarse con mayor precisión a medida que el color inicial se hace mayor. Igualmente, el color residual que queda después del proceso de tratamiento depende del pH final del agua y no se puede reducir más allá del que corresponde a dicho pH, debido al efecto indicador que poseen las sustancias productoras de color.

La máxima reducción del color residual por lo general se obtiene al pH óptimo. Los iones de Ca^{++} y Mg^{++} , facilitan la coagulación del color ampliando la zona de pH en la cual se puede obtener su máxima remoción. Los iones de SO_4^- , en cambio, cuando están en

exceso, producen un floculo mas electronegativo, que disminuye la proporción de color que puede ser removido.

3.3.3.10. Mecanismos de remoción de color

Debido a la falta de conocimiento sobre la estructura química de las sustancias productoras de color, existe desacuerdo sobre cuales pueden ser los mecanismos que inducen su coagulación. Hay dos hechos, sin embargo, en los cuales existe consenso general:

- No neutralización:** La máxima remoción de color se obtiene cuando la carga de las partículas esta cerca del punto isoeléctrico, pero casi nunca exactamente en el punto isoeléctrico. A veces, esto puede coincidir con una mala remoción de color, como se puede observar en la ilustración 18.
- Estequiometría:** La cantidad de coagulantes metálicos necesarios para remover el color es directamente proporcional a la cantidad de color removido, como se observa en la ilustración 19.

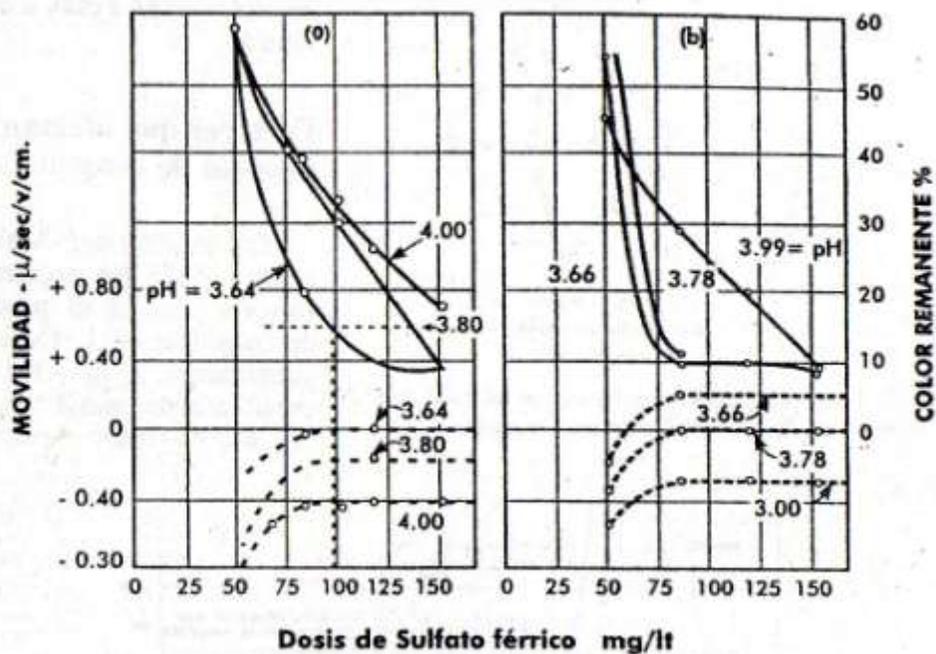


Ilustración 18.- Efecto del sulfato férrico en coagulación de aguas B y C a pH constante.

Estos dos hechos aparentes excluyen la posibilidad de que el mecanismo físico de desestabilización de coloides pueda jugar un papel importante.

El color puede ser removido:

- Por adsorción química en los precipitados poliméricos de los productos de hidrólisis de los coagulantes (*ilustración 20*), produciéndose una interacción entre estos y los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas pesadas de las sustancias productoras de color. Esto es posible sólo con pH altos.
- A pH bajos, en cambio, las sustancias húmicas interaccionan con los compuestos de aluminio positivamente cargados para formar un precipitado de fulvato de aluminio.

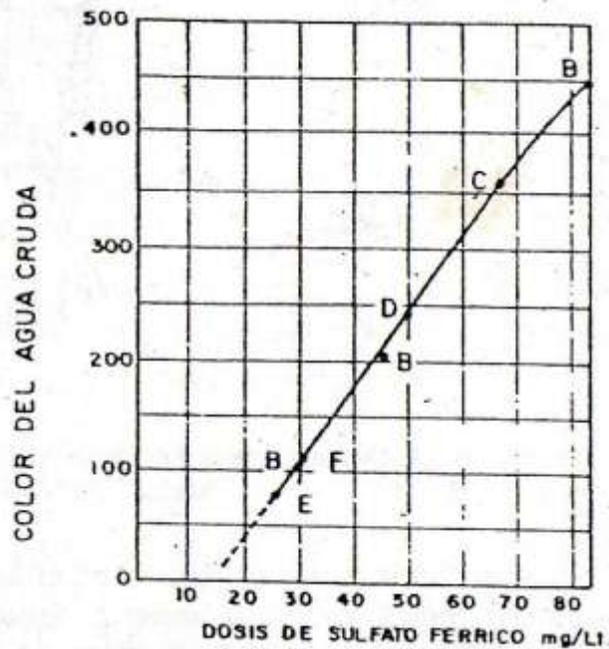


Ilustración 19.- Mínima dosis de sulfato férrico en función del color del agua cruda.

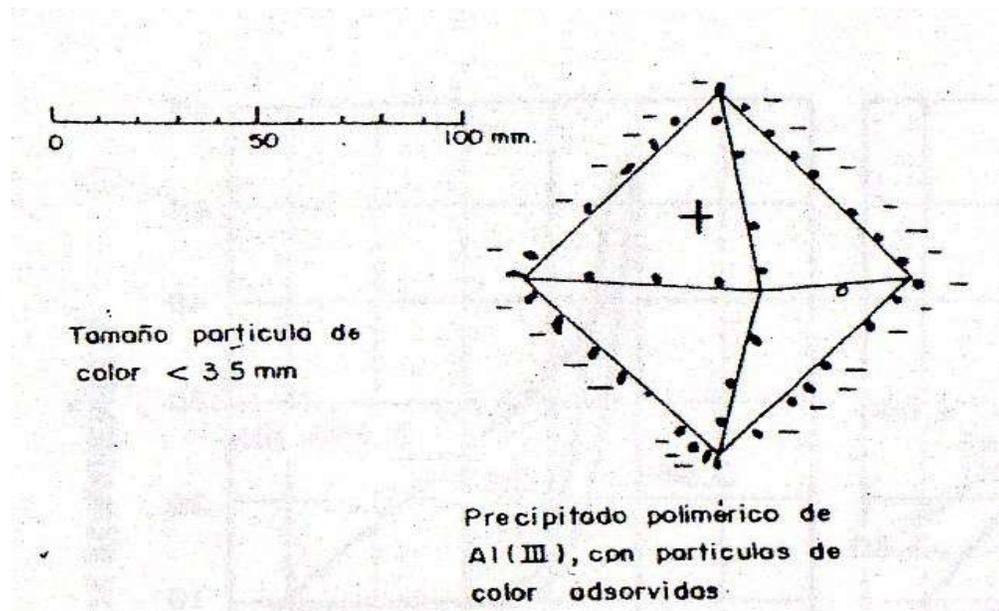


Ilustración 20.- Adsorción de color producida por los productos poliméricos de la hidrólisis de los coagulantes.

Existe gran controversia sobre cómo estos dos mecanismos actúan en el punto de máxima remoción. Cuando simultáneamente con el color está presente la turbiedad, la superficie de los coloides se hace mayor y esto estimula la adsorción de las moléculas de color, lo que se traduce en una menor dosis de coagulantes, como se puede ver en el diagrama de coagulación de la ilustración 21. Por último, la temperatura afecta todas las reacciones químicas y por tanto la coagulación. Aguas muy frías, alrededor del punto de congelación, no coagulan o coagulan mal.

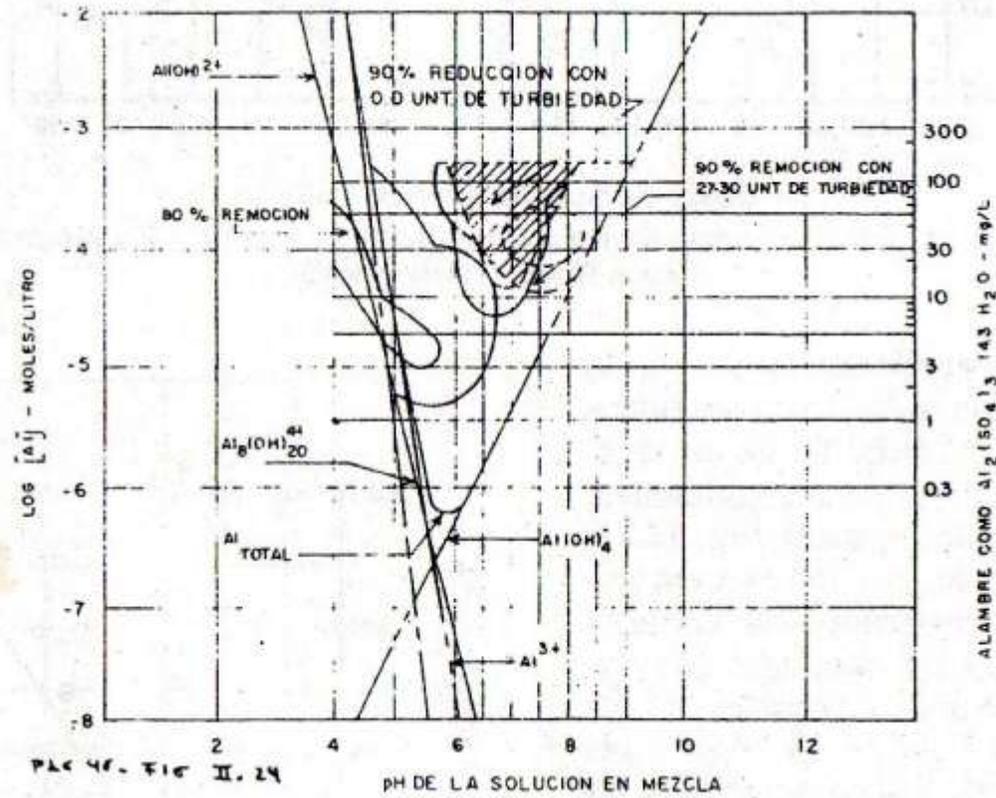


Ilustración 21.- Dominios de la remoción de color ácido húmico inicial, 4 mg/L (100 c.u.); turbiedad, 27-30 UNT)

3.3.3.11. Factores que alteran el proceso de coagulación

De acuerdo con Amirthrajah (1987) los siguientes factores afectan el proceso de coagulación:

- 1) Dosis de coagulantes
- 2) pH
- 3) Concentración de coloides o turbiedad
- 4) Color o concentración de sustancias orgánicas en el agua
- 5) Aniones o cationes presentes en el agua
- 6) Intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta
- 7) Movilidad electroforética de las partículas
- 8) Temperatura del agua

Como se ve, se trata de un fenómeno complejo en el que intervienen por lo menos ocho factores que pueden modificarlo. Los tres primeros factores se interrelacionan íntimamente. La dosis que se aplique depende del pH terminal del agua y de la concentración de coloides. Las aguas de mas difícil coagulación son las que tienen baja concentración de estos (*turbiedad menores a 20 UNT*), ya sea en presencia de color o no. Por otra parte, conviene que haya tanto partículas livianas como pesadas que le den peso al floculo. Cuando solo hay partículas finas se dificulta la coagulación.



3.3.3.12. Coagulantes

Los coagulantes los podemos clasificar en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen. En los polímeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se les agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa.

Sin embargo; es necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no depende en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar.

3.3.3.13. Coagulantes y Floculantes poliméricos (Polielectrolitos)

Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeras, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica.

El tipo de polímero que se forme depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales activos se denominan *polielectrolitos*.

Los que se usan en plantas de tratamiento son compuestos de alto peso molecular (10^4 a 10^7) que se aplican en muy pequeñas concentraciones (0.01 a 1.0 mg/L) lo que compensa parcialmente su alto precio. La razón para usar bajas dosis está en la cantidad tan enorme de segmentos que ellos poseen. La poliacrilamida, con un peso molecular de 5.5×10^6 , produce 10^{13} segmentos por litro de agua con una dosis de 0.1 mg/L.

De una investigación realizada sobre este tipo de sustancias en el Centro de Ingeniería Sanitaria, se desprenden las siguientes conclusiones: [3]

1. Los polielectrolitos usados en unión con coagulantes metálicos comunes producen un floculo que sedimenta rápidamente.
2. Con ciertas aguas, la dosificación de polielectrolitos en pequeñas cantidades reduce su gasto.
3. Las algas son rápidamente coaguladas con polielectrolitos catiónicos.
4. Todos los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas.
5. Dosis excesivas de polielectrolitos producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación.
6. Deben los polielectrolitos añadirse en forma de solución diluida para asegurar una completa mezcla.

Los polielectrolitos de importancia en el tratamiento de aguas pueden clasificarse de acuerdo a su origen o a su carga de la siguiente manera:



Según su origen

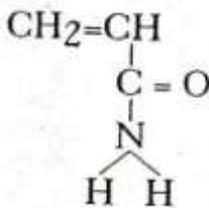
Polímeros naturales: Son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos (*almidón, glucósidos*). Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes y son usados por los nativos en forma empírica. En la tabla 18 se muestran algunos de los nombres de algunas de estas sustancias.

Nombre común	Se extrae de	Parte de donde se obtiene
Alginato de sodio	Algas pardas marinas (<i>Phaeophyceae</i>)	Toda la planta
Tuna	<i>Opuntia ficus indica</i>	Las hojas
Almidones	Maíz Papa Yuca Trigo	El grano o el tubérculo
Semillas de nirmali	<i>Strychnos potatorun</i>	Las semillas
Algarrobo	Quebracho, acacia o algarrobo <i>Schinopsis Lorentzii</i>	Corteza del árbol
Gelatina común	Animales	Residuos de animales Huesos
Carboximetil celulosa	Arboles	Corteza de árbol
Goma de guar	<i>Cyanopsis psoraloides</i>	Semillas

Tabla 18.- Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes.

Una de las ventajas de los polielectrolitos naturales es su baja toxicidad pues en muchos casos son empleados como alimentos o aditivos alimenticios.

Polímeros sintéticos: son compuestos orgánicos producidos por medio de transformación química de derivados del carbón y del petróleo. Incluye la mayoría de los compuestos manufacturados por la industria y de mayor venta comercialmente. Muchos, aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco. Otros son líquidos con concentraciones de 10% al 60% de polímeros activos (*Packman considera que el 90% de ellos tienen como monómero básico la acrilamida [3]*).



La poliacrilamida es típicamente un polímero no iónico que puede manejarse de forma muy variada. Esto tiene la ventaja de que permite sintetizar una gran variedad de compuestos, con distintas propiedades y aplicaciones.

Según su carga

Un polímero puede tener o no carga eléctrica. Los que no la tienen se llaman no iónicos, los que la tienen pueden ser catiónicos (*carga positiva*) o aniónicos (*carga negativa*) y, debido a la multiplicidad de los grupos iónicos presentes en las cadenas poliméricas, reciben el nombre genérico de polielectrolitos.

Los derivados de la poliacrilamida son no iónicos y los de la poliacrilamida hidrolizada son aniónicos. Los compuestos catiónicos son usualmente derivados de amonio cuaternario o de imina de polietileno (*ilustración 22*).

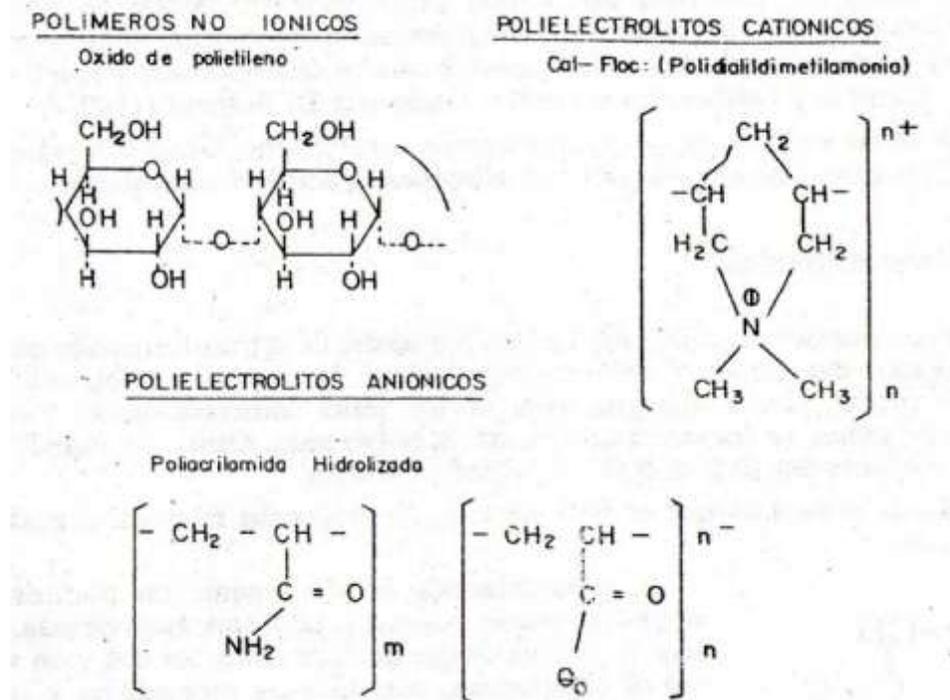


Ilustración 22.- Ejemplos de polielectrolitos.

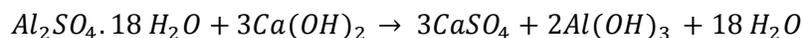
3.3.3.14. Coagulantes Metálicos

Existe una gran variedad de coagulantes metálicos que se pueden clasificar en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios.

Coagulación con sales de aluminio

Las sales de aluminio forman un floculo ligeramente pesado. Las más conocidas de estas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio.

El coagulante más popular en la aplicación de aguas de tratamiento es el sulfato de aluminio [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$], este puede ser utilizado en estado sólido o líquido. Cuando el aluminio es adicionado al agua en presencia de alcalinidad, la reacción es:



Altas dosis de aluminio usadas en el tratamiento de algunas aguas industriales pueden llevar cerca de postprecipitaciones de floculos de aluminio dependiendo del pH de la floculación.

El cloruro de polialuminio, es un derivado polimérico del aluminio. Los beneficios de este coagulante son: una mejor formación de floculo, un más amplio rango de pH, menor generación de lodos y poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos.

Su peor desventaja es que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio o el cloruro férrico pero podría equilibrarse este costo si conjuntamente con los coagulantes metálicos, hay necesidad de usar polielectrolitos.



Coagulación con sales de hierro

Las sales de hierro tienen su ventaja sobre las sales de aluminio en algunos casos, porque forman un floculo más pesado y de mayor velocidad de asentamiento y porque pueden trabajar con un rango de pH más amplio. Por tanto se usan cuando el sulfato de aluminio no produce una coagulación adecuada o cuando los sedimentadores están demasiado recargados y resulta económico aumentar el peso del floculo para incrementar la eficiencia de estos. Las más conocidas de las sales de hierro son:

Cloruro Férrico: se consigue en tres formas, como cristales hidratados amarillos o cafés, como cristales anhídridos de color verde oscuro, o como solución del 35% a 45%. Cualquiera que sea la forma en que venga, el cloruro férrico se aplica en solución del 2% al 20%, según el tamaño de la planta y la capacidad del aparato dosificador.

El cloruro férrico puede trabajar con pH tan bajo como 4 o tan alto como 11. Sin embargo, se suele utilizar más bien con agua ácida y blanda, fuertemente coloreada y que contiene ácido sulfúrico. Los lodos provenientes de la coagulación con hierro son muy corrosivos, tienen un color café oscuro y suelen manchar o teñir los objetos y las corrientes de agua; es por eso que son difíciles de manejar.

Sulfato férrico: se encuentra en forma anhidra como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, pero más comúnmente en su forma hidratada como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. La adición de un álcali (cal o soda ash) en combinación con el coagulante resulta en un rango más alto del pH que puede ir desde 3.5 hasta 11. Suele sin embargo, preferirse que trabaje con aguas más ácidas.

Sulfato ferroso: es la fuente más barata de hierro como coagulante, ordinariamente se usa hidratado como $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y se conoce con el nombre de "coperas". Una de las desventajas es la que debe usarse en combinación con cal. En la práctica es conveniente agregarle un pequeño exceso de cal, de 1 a 5 mg/L, sin sobrepasar cierto límite para evitar la precipitación posterior del hidróxido férrico en las tuberías.

El sulfato ferroso se utiliza para agua turbia, fuertemente alcalina, con pH superior a 8 y es, por tanto, inadecuado para tratar agua blanda, especialmente si su contenido de color es alto ya que la alcalinidad interfiere con la remoción de color.

Coagulantes auxiliares

La adición de algunos químicos puede encargarse de la coagulación junto a un ascenso en el crecimiento extenso o una rápida población de flóculos. La sílica activada es una pequeña cadena de polímeros, esta funciona hasta atar todas las partículas microfinas de aluminio hidratado. En altas dosis, la sílica puede inhibir la formación de floculos a causa de sus propiedades electronegativas. Las dosis utilizadas son de 5 a 10 mg/L.

Los polielectrolitos pueden aumentar el peso molecular de polímeros que contienen grupos que absorben y forman puentes entre partículas o cargas de flóculos. Los flóculos grandes (0.3 a 1 mm) se producen de esta manera cuando pequeñas dosis de polielectrolitos (1 a 5 mg/L) son adicionados en conjunto con aluminio o cloruro de hierro. Los polielectrolitos son materiales sin afectación junto al pH y así mismo pueden servir como coagulante para reducir la efectiva carga en un coloide.

A causa de la complejidad de las reacciones involucradas, la experimentación en laboratorio es esencial para estabilizar el pH óptimo y las dosis de coagulantes para el tratamiento de aguas. Dos procedimientos pueden ser seguidos para este propósito: la

prueba de jarras en el que el pH y la dosis del coagulante son variados hasta lograr las condiciones de operación óptimas el cual fue utilizado dentro del presente proyecto como forma mas viable para la selección de dosificación de polímeros y coagulantes; y el control por "z" potencial propuesto por Riddick, en el que el coagulante es adicionado cuando la "z" es igual a cero [3].

3.3.4. Sedimentación

El primer tratamiento importante que sufren las aguas residuales después de las precedentes fases preliminares es, generalmente, la sedimentación de los sólidos suspendidos en un tanque adecuado en el que se mantienen las aguas por un lapso de 0.5 a 3 horas o más, que es suficiente para permitir que el 40 a 65% de los sólidos finamente divididos, se pose en el fondo del tanque, del cual se extraen por medio de colectores mecánicos, en forma de lodos. La sedimentación primaria es una operación unitaria diseñada para concentrar y remover sólidos suspendidos orgánicos del agua residual.

Antaño, cuando se consideraba que el nivel primario era suficiente como único tratamiento, la sedimentación primaria era la operación unitaria más importante de una planta. Su diseño y operación fueron determinantes en la reducción de las cargas de desecho que se disponían en los cuerpos receptores. En la actualidad, los requerimientos de tratamiento a nivel secundario han otorgado a la sedimentación primaria un rol menor. No obstante, muchos de los procesos unitarios de tratamiento secundario son capaces de manejar los sólidos orgánicos sólo si se ha llevado a cabo una buena remoción de arena y escoria durante el pretratamiento.

La sedimentación primaria puede llevarse a cabo en tanques rectangulares alargados o en tanques circulares. En los tanques rectangulares, como el mostrado en la ilustración 23, la espuma se retira utilizando unas rastras de lodo que, de manera alternada, después de recorrer el tanque por el fondo, regresan a su punto de partida recorriendo la superficie del agua, lo que se aprovecha, como se dijo, para remover la espuma. El material flotante se desplaza de esta manera hasta un sitio donde se colecta, ubicado a cierta distancia hacia atrás del vertedor del efluente, y allí es retirado al pasar sobre un vertedor de espuma o por medio de una rastra transversal.

Por su parte, los tanques circulares cuentan con un brazo desnatador que está unido a la rastra de lodos, como se muestra en las ilustraciones 24 y 25.

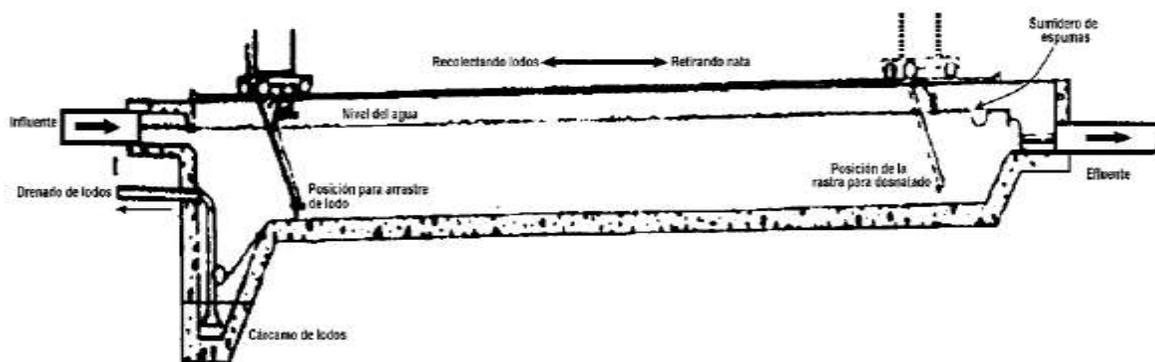


Ilustración 23.- Tanque rectangular alargado con rastra para lodo.

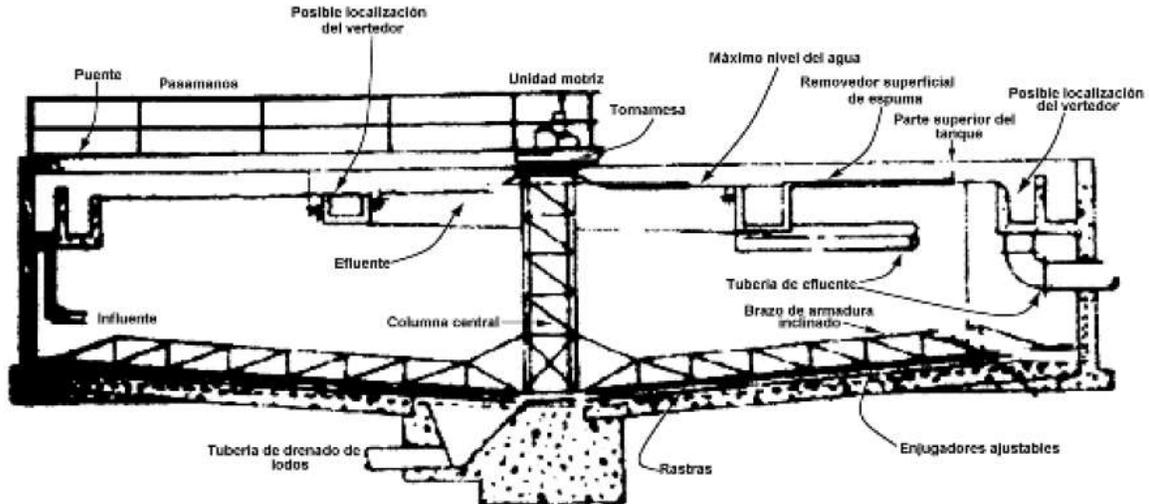


Ilustración 24.- Tanque sedimentador primario de tipo circular, con alimentación por el borde.

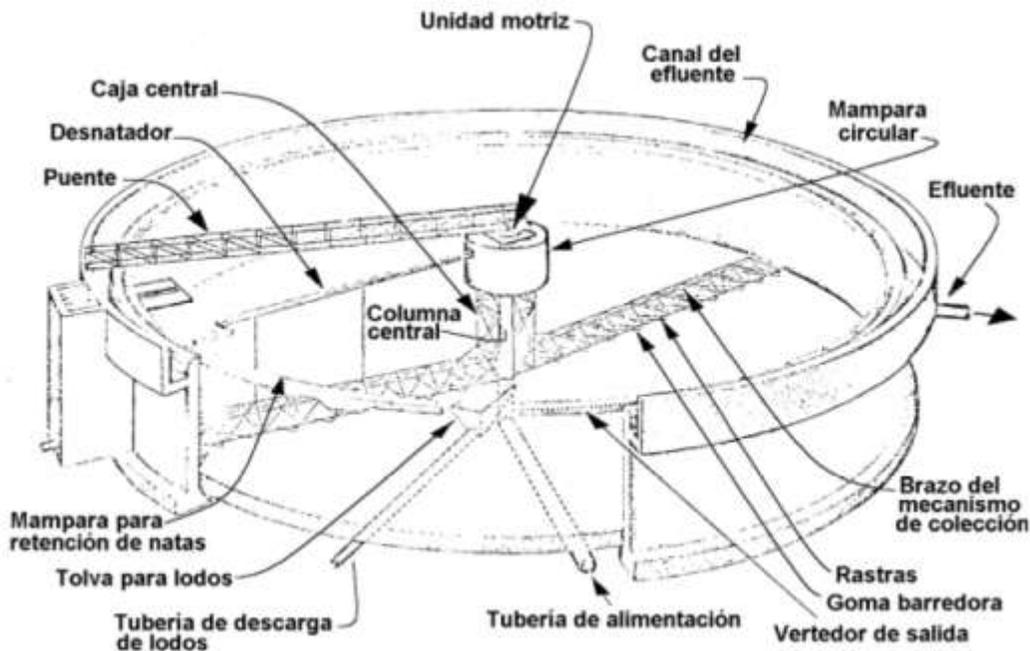


Ilustración 25.- Sedimentador circular, alimentación central con rastras para recolección de lodos.

A diferencia de los tanques rectangulares, cuyo flujo es horizontal, en los tanques circulares es de tipo radial. El agua a tratar se introduce por el centro o por la periferia del tanque. El sistema de alimentación central es el más usado; no obstante, ambas configuraciones producen buenos resultados.

Este proceso está planeado como complementario en el desarrollo total de la limpieza del agua. La función básica de la sedimentación es separar partículas suspendidas del agua. De acuerdo a la demanda de agua que se tenga que tratar, los tanques de sedimentación varían en forma y tamaño, el tipo de flujo que manejen y de los mecanismos de autolimpieza aplicados.



3.4. Tratamiento secundario

Se puede dividir en dos grandes apartados: aerobio y anaerobio. El más popular sobre todo en plantas de tratamiento de aguas municipales, es el aerobio, que tienen a su vez una serie de variantes, todos activados convencionales, de mezcla completa, de alta tasa, aireación extendida, por pasos, proceso Kraus, oxígeno puro, lagunas aireadas, facultativas, zanjas de oxigenación, biodiscos y reactor de cargas secuenciales.

Para agua residual con mucha carga orgánica se utilizan los anaerobios, los más comunes: fosa séptica, tanque Imhoff, manto de lodos de flujo ascendente, reactor de metanación y biofiltros. Estos procesos tienen como finalidad el tratamiento biológico del agua residual para coagular y eliminar los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica.

3.4.1. Lodos activados

Se le conoce así al conjunto de procedimientos de tratamiento que poseen en común la operación de poner en contacto el agua residual con una masa biológica preformada en un tanque de aireación, con la finalidad de lograr que la materia orgánica presente en el agua residual sea degradada o descompuesta a sustancias más simples e inocuas para el ambiente, a través de la acción de microorganismos presentes.

Este proceso consiste en que el agua residual se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión, al contenido del reactor se le denomina líquido-mezcla. Dentro del reactor las bacterias en suspensión convierten la materia orgánica a sustancias más simples a través de una serie compleja de reacciones químicas. Estas son catalizadas por sustancias orgánicas presentes en los microorganismos llamadas enzimas.

Ventajas

- Alta remoción de la carga orgánica
- Efluentes de buenas características organolépticas
- No requiere sedimentación primaria ni digestión de lodos
- Procesos estables, cuando los lodos son manejados apropiadamente
- Poco espacio de instalación
- Fácilmente expandibles

Desventajas

- Requiere de equipo mecanizado
- Personal capacitado
- Eventual aspersión de partículas de agua y espuma
- Mayor mantenimiento y reposición de equipos
- Produce gran cantidad de fango
- La opción puede ser la más costosa

3.4.2. Lagunas de aireación

Es uno de los métodos de depuración biológica más antiguos y empleados en países donde la utilización del espacio es más factible que en nuestro entorno. Los rendimientos que pueden alcanzarse con el lagunaje superan las exigencias del vertido. El funcionamiento y exploración de las aguas es muy simple, los fangos producidos en el



proceso se acumulan en el fondo de las lagunas de sedimentación y solo debe efectuarse las extracciones muy de tarde en tarde, el tiempo entre evacuaciones puede llegar a 3 o 4 años, que facilita la operación de la planta en municipios donde no se dispone de equipos especializados de mantenimiento conocedores de la tecnología de los procesos biológicos. Esto hace de esta solución un proceso muy adecuado para poblaciones hasta 5000 habitantes donde no existen problemas de espacio.

3.5. Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios consideran operaciones más caras y sofisticadas, como filtración por carbón activado, desmineralización por osmosis inversa o resinas, coagulación-sedimentación-filtración y métodos electroquímicos. Estos se recomiendan cuando el costo del agua es muy alto y conviene su reciclado al 100%.

El tratamiento de aguas residuales y procesos químicos unitarios se utilizan generalmente junto con operaciones físicas unitarias y procesos biológicos unitarios, con el fin de conseguir los objetivos del tratamiento. Algunas de las aplicaciones de estos procesos son enlistadas en la tabla 19.

Proceso	Aplicación
Precipitación química	Eliminación de fosforo y aumento de la eliminación de sólidos en suspensión en instalaciones de sedimentación primario utilizadas en el tratamiento fisicoquímico.
Adsorción	Eliminación de materia orgánica no eliminada en los tratamientos químicos y biológicos. Decoloración del agua residual.
Desinfección	Destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades.
Desinfección con cloro	Destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades.
Decloración	Eliminación de cloro combinado residual total remanente después de la cloración.
Desinfección con ozono	Destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades.
Otros	Productos químicos utilizados con objetivos específicos en el tratamiento de agua residual.

Tabla 19.- Aplicaciones de los procesos unitarios en el tratamiento de las aguas residuales. [21]

3.6. Reúso del agua residual

Se estima que en el año 2008 en México se reutilizaron 5,051 millones de m³ de agua (equivalente a un caudal de 160 m³/s). En el reúso de agua de origen municipal destaca la transferencia de aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción se reutilizan dichas aguas en las industrias, así como en las termoeléctricas, como es el caso de la central termoeléctrica de Villa de Reyes en San Luis Potosí. En el reúso de agua de origen industrial (*no municipal*) destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de caña en el estado de Veracruz.

En la ilustración 26 se pueden identificar las diferentes transferencias de agua entre los usos. Los usos del agua residual reutilizada pueden ser utilizados en varias funciones, para uso doméstico única y exclusivamente para actividades de jardinería, lavado de patios, sanitarios, etc., y para uso comercial (*como lavado de patios, accesorias, auto lavados, etc.*).

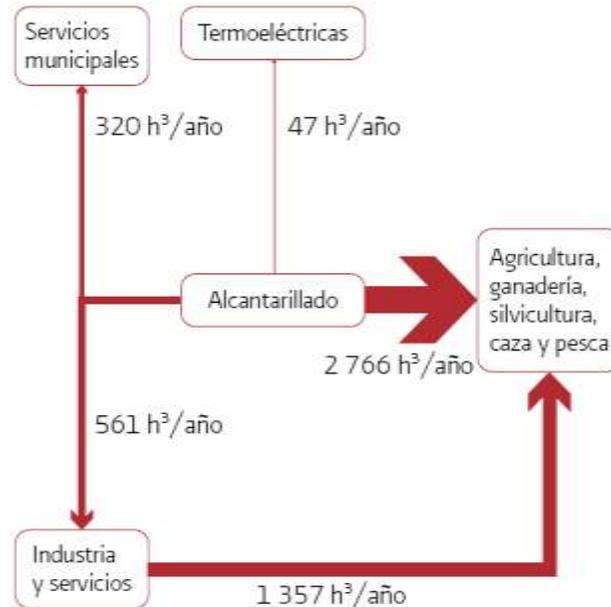


Ilustración 26.- Reúso del agua residual en México, 2009²² [46]

3.7. Normatividad aplicable

El principal instrumento jurídico que regula la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas propiedad de la nación; así como la prevención de la calidad es respaldado por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917; que en su artículo 27 señala que las tierras y las aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la nación, la cual ha tenido y tiene derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada. [6,8]

La Normatividad Mexicana es una serie de normas cuyo objetivo es asegurar valores, cantidades y características mínimas o máximas en el diseño, producción o servicio de los bienes de consumo entre personas morales y/o físicas, sobre todo los de uso extenso y de fácil adquisición por el público en general, poniendo atención especial en el público no especializado en la materia.

De estas normas existen dos tipos básicos en la legislación mexicana, las Normas Oficiales Mexicanas llamadas Normas NOM y las Normas Mexicanas llamadas Normas NMX, de las cuales las NOM son de uso obligatorio en su alcance y las segundas expresan una recomendación de parámetros o procedimientos, aunque si son mencionadas como parte de una NOM como de uso obligatorio, por lo que su observancia es a su vez obligatoria.

Se dice que toda agua, sobre todo para consumo humano; no debe de contener microorganismos patógenos ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Por tanto, ciertas aguas deben cumplir con normas bacteriológicas y fisicoquímicas para que se

²² Nota: hm³/año= 1 millón de metros cúbicos por año.



pueda ser considerada dentro de las normas reglamentarias; dependiendo de las características establecidas en cada lugar.

3.7.1. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* [56], es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en lo que se refiere a la preservación del equilibrio ecológico, así como protección al ambiente en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

En si, este cuerpo normativo esta constituida por cuerpos jurídicos que contienen criterios ambientalistas de carácter global que ayudan a regular la conservación y mejoramiento del ambiente como un todo. Esta tiene por objeto establecer bases para:

- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.
- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación.
- La preservación, restauración y mejoramiento del ambiente.
- La preservación y protección de la biodiversidad.
- El aprovechamiento sustentable, la preservación y la restauración del suelo, agua y los demás recursos naturales.
- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.
- El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre estas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en material ambiental.
- El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

3.7.2. Ley de Aguas Nacionales

Presentada el 1º de Diciembre de 1992, es reglamentaria de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo territorio nacional, sus disposiciones son de orden publico y de interés social teniendo por objeto la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control; así como la preservación de la cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable. [57]

Como asunto relevante, el artículo 112 de esta ley menciona, que en caso de descarga de aguas residuales a bienes nacionales, se cobra un derecho federal por la utilización de los bienes como cuerpos receptores de las descargas, independientemente de que se cumpla con la legislación ecológica, es decir; no es en sustitución de las obligaciones de tratamiento de aguas residuales, sino que, cuando no se cumplan con las normas y condiciones particulares de descarga deberán efectuar su pago, muy aparte de la aplicación de sanciones que procedan. No es un derecho por contaminar, sino lo contrario; para descontaminar a través del uso o aprovechamiento de los cuerpos receptores que diluyan la descarga o restablezcan la calidad perdida.



3.8. Normas Oficiales Mexicanas

Un caso importante de normatividad secundaria esta constituido por las Normas Oficiales Mexicanas, las cuales con entendidas como un conjunto de reglas científicas o tecnológicas que establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de las actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente.

El Instituto Nacional de Ecología y la Comisión Nacional del Agua expidieron en forma coordinada normas oficiales mexicanas para la prevención y control de la contaminación del agua. Lo que se persigue con estas normas es unificar los principios y criterios de las políticas y estrategias en materia ambiental, determinando los parámetros de emisión dentro de los cuales se garanticen las condiciones necesarias para el bienestar de la población; así como el de asegurar la preservación y restauración del equilibrio ecológico, protegiendo además al ambiente. La nomenclatura establecida cambio de ECOL a SEMARNAT de acuerdo con modificaciones de nomenclaturas especificadas en el diario oficial de la federación el 3 de Abril del 2003.

NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes de las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada por el Diario Oficial de la Federación el 6 de Enero de 1997.

NOM-002-SEMARNAT-1996. La norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de Junio de 1998.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de Septiembre de 1998.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Correspondiente a Protección Ambiental.- Lodos y Biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de Agosto del 2003.

3.9. Normatividad para las descargas de aguas residuales

La preservación de la calidad y cantidad de agua de los ríos y cuencas naturales, requiere de un uso racional del recurso y de un control de las descargas de las aguas residuales, para lo cual la Comisión Nacional del Agua ha dividido al país en diferentes zonas para el cobro de derechos por el uso del recurso.

La finalidad del cobro, es obligar a la empresa o industria a realizar la construcción de plantas de tratamiento en lugar de pagar por la descarga de aguas residuales fuera de los límites establecidos. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son las herramientas utilizadas para controlar y eliminar la contaminación del agua. A través de ellos, se mejora la calidad de la misma, se propicia la posibilidad de su reúso y se protegen tanto a los cuerpos receptores como a la salud pública.



De acuerdo con las características que se necesitan para evaluar los parámetros de influentes y efluentes; existen normas mexicanas nacionales expedidas por el gobierno las cuales presentan los métodos adecuados dependiendo del parámetro necesario a evaluar, y que frecuentemente son utilizados en diferentes laboratorios certificados con la finalidad de cumplir con las especificaciones recomendadas.

Existen diferentes normas mexicanas nacionales dirigidas, en particular al análisis de aguas, sin embargo; como anteriormente se menciona, estas no son de carácter obligatorio. Para fines del proyecto, una de las necesidades primordiales es la eliminación de color en la descarga final, por lo que se presenta en la tabla 19 algunas de las normas que pueden consultarse para llegar a la meta en específico.

Clave	Nombre o concepto	Objetivo
NMX-AA-003-SCFI-1980	Aguas residuales - Muestreo	Esta norma establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes.
NMX-AA-004-SCFI-2000	Análisis de agua - Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba	Establece el método de prueba para la determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-038-SCFI-2001	Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba	Esta norma mexicana establece el procedimiento para la determinación en campo y en el laboratorio de la turbiedad en muestras de agua residual, residual tratada y natural, en un intervalo de trabajo de 0,01 a 40 UNT (unidades de turbiedad), pudiendo incrementar este intervalo, realizando diluciones de muestras con concentraciones mayores de 40 UNT.
NMX-AA-045-SCFI-2001	Análisis de agua - Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba	Esta norma mexicana establece el método para la determinación de color aparente y/o verdadero, en aguas naturales, residuales y residuales tratadas con tonos amarillos.
NMX-AA-051-SCFI-2001	Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba	Esta norma mexicana establece el método de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de metales disueltos, totales, suspendidos y recuperables en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-093-SCFI-2000	Análisis de agua - Determinación de la conductividad electrolítica - Método de prueba	Establece el método de prueba para la determinación de conductividad electrolítica en agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada residual, salina y residual tratada.

Tabla 20.- Normas Nacionales Mexicanas para la determinación de parámetros de control. [31, 32, 33]



Capítulo 4.- Metodología aplicada

El presente capítulo describe una serie de actividades dedicadas a la evaluación de criterios y procedimientos para seleccionar las alternativas de tratamiento con respecto a la dosificación de coagulantes y polímeros ayudantes de floculación de acuerdo con las variaciones de calidad de la fuente.

Estas variaciones juegan un papel muy importante, ya que pueden influir directamente en la remoción de color y/o turbiedad, y son función del tipo de problema existente en las aguas, por lo cual la revisión indicada ayuda a investigar cuáles son las pruebas de laboratorio y cómo interpretar los datos.

4.1. Acopio de información

Antes de la realización de algún muestreo, se pudo observar variaciones importantes en la calidad de agua durante el paso de los días, las cuales pueden relacionarse principalmente a la producción realizada dentro de las instalaciones del proceso textil en relación al consumo de agua para el proceso.

La ilustración 27 muestra la secuencia lógica de las unidades del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales actual de la planta textil tomada como referencia para la elaboración del presente documento, la cual se obtuvo a partir de visitas de campo realizadas para el estudio. (**Ver Anexo C**)

Esta secuencia presenta un tren de tratamiento del tipo biológico/fisicoquímico constituido por 3 etapas principales: Tratamiento primario constituido por el pre-tratamiento del influente y la laguna de igualación. Tratamiento secundario empezando por el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria; pasando posteriormente a un tratamiento fisicoquímico en el que se contemplan los tanques de mezcla rápida y mezcla lenta. Tratamiento terciario, el cual es la parte final del proceso en el que se presenta un segundo sistema de sedimentación y un sistema de trenes de filtración y adsorción.

De acuerdo con la información proporcionada, el sistema recibe un flujo de 200 litros/s (720 m³/h), y este al pasar por las diferentes etapas del sistema que cumplen con ciertas características para preparar el fluido para su descarga final al cuerpo receptor.

Para una mejor representación del sistema, las tablas 21, 22 muestran una breve descripción de lo que consiste cada una de las etapas del proceso de tratamiento.

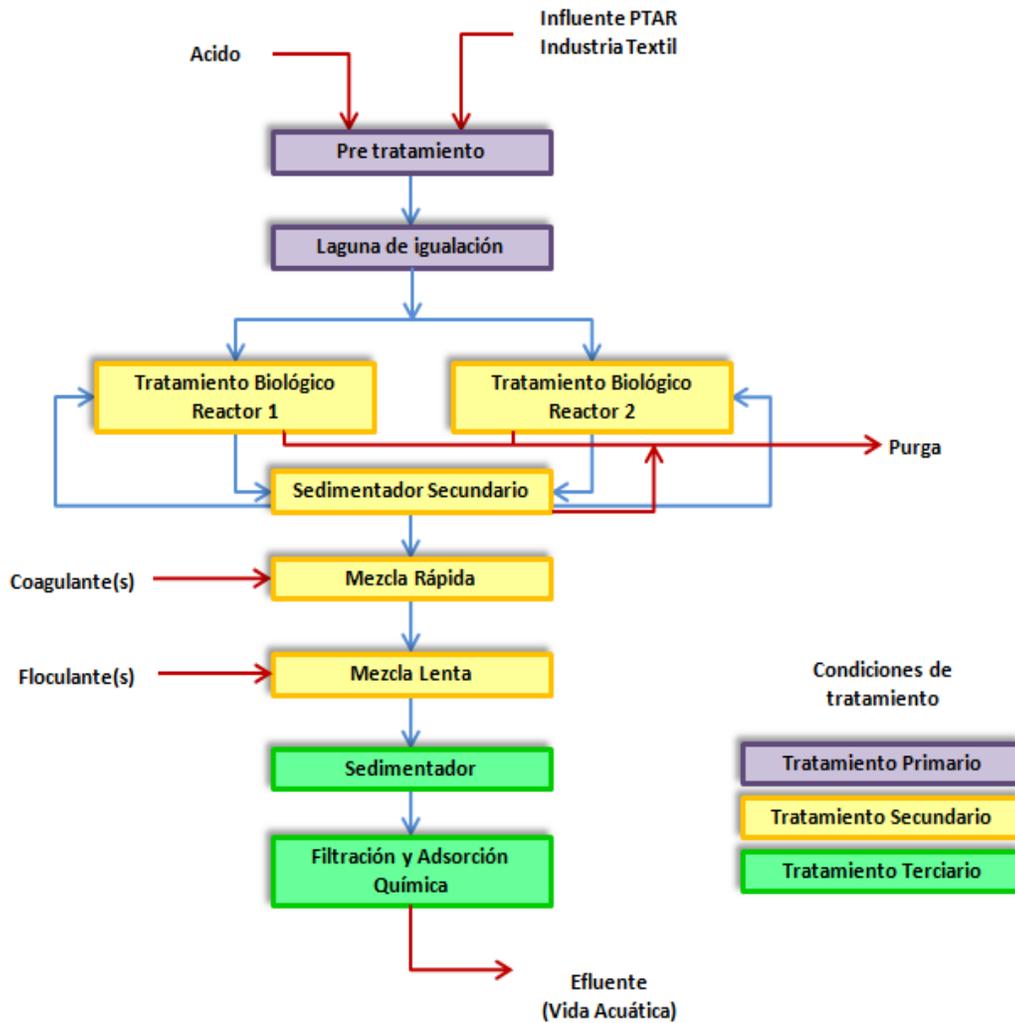


Ilustración 27.- Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.²³

Tabla 21.- Descripción de las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales.

Condiciones de tratamiento		Descripción
Tratamiento primario	Pre-tratamiento	Corresponde al primer paso del tratamiento, aquí es donde se recibe la entrada del influente en la planta de tratamiento el cual corresponde a un gasto promedio de 200 litros/s (720 m ³ /h) y las descargas de los diferentes procesos de la planta textil presentan descargas de distintos tonos de color. En este punto se agrega ácido sulfúrico con la finalidad de bajar la basicidad con la que llega la fuente.
	Laguna de igualación	Una vez pasado por el pre-tratamiento, el influente es inmediatamente dirigido a la laguna de igualación en la cual se mantiene en constante mezcla para bajar la temperatura y ajustar el pH. A diferencia del pre-tratamiento, en este punto el influente deja de presentar diferentes tonalidades quedando finalmente en tonalidades entre gris y café oscuro.

²³ Creación propia realizada de acuerdo a datos obtenidos en campo proporcionados por personal de operación de la planta.



Tratamiento secundario	Tratamiento biológico (Reactores)	<p>Cuando el agua es tratada y equilibrada para su mejor tratamiento; es enviada a un proceso de lodos activados. Es aquí donde las aguas se mezclan con microorganismos en suspensión dentro del un tanque de aireación. Teóricamente y de acuerdo a la literatura; la carga orgánica, la demanda de oxígeno y el crecimiento biológico son uniformes, sin embargo; en la práctica esto es difícilmente alcanzable por lo que se trata de mantener el reactor a las mejores condiciones posibles para su buen funcionamiento.</p> <p>En esta unidad los microorganismos en suspensión (SSV) utilizan la materia orgánica soluble y coloidal como fuente de nutrientes que, en presencia del oxígeno la convierten en nuevas células y desechos metabólicos.</p>
	Sedimentador	<p>El papel principal del sistema de sedimentación es concentrar y remover por sedimentación los sólidos arrastrados en el efluente de los reactores biológicos. Parte de los lodos recuperados se recirculan a los sistemas de reacción biológica y otra parte de ellos (lodos excedentes) se envían directamente a un sistema de digestión aerobio para se tratamiento.</p>
	Tanque de mezcla rápida	<p>Durante esta parte del sistema, se pasa de un sistema biológico a un sistema fisicoquímico. Los tanques de mezcla rápida son también conocidos como tanques de coagulación, dependiendo del proceso para el que sean utilizados. Consiste en un tanque equipado con un sistema de retromezclado que proporciona un gradiente de mezcla entre 300 y 400 $\text{seg}^{-1(24)}$. En esta parte del proceso, se suministran los insumos correspondientes a la coagulación; y esta comienza en el instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo, que atrapan partículas por medio de reacciones físicas y químicas formando así flóculos.</p>
	Tanque de mezcla lenta	<p>También llamados tanques de floculación, estos trabajan con gradientes de velocidad entre 60 y 70 seg^{-1}. Aquí se dosifica un polímero de floculación que ayuda a madurar los flóculos o partículas desestabilizadas de la mezcla rápida, promovida internamente dentro del líquido por el movimiento de agitación que las partículas tienen y se realiza en tiempos cortos.</p>
Tratamiento terciario	Sedimentador	<p>Las partículas desestabilizadas de los procesos de coagulación y floculación serán separadas del sistema en el tanque de sedimentación, el cual cuenta con un área mínima para separar dichas partículas en forma de lodo para así evitar que la mínima cantidad de contaminantes pasen a los sistemas de filtración y hacer más efectivo el proceso.</p>
	Tren de filtración	<p>Los sistemas de filtración están constituidos principalmente por carbón y arena. Las unidades de arena se encargan principalmente de realizar remociones de DBO, DQO, SST, turbiedad, nitrógeno y fosforo. Por otro lado, las unidades de carbón son las responsables de eliminar cantidades de color, olor y sabor en las aguas tratadas.</p>

Tabla 22.- Descripción de las diferentes etapas de tratamiento de aguas residuales (Continuación).²⁵

²⁴ Unidad de medida del gradiente de velocidad.

²⁵ Creación propia realizada de acuerdo a datos obtenidos en campo proporcionados por personal de operación de la planta.



4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo general

Realizar una selección de insumos químicos (coagulantes y floculantes), para una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil, con la finalidad de reducir la cantidad de color residual al final del tren de tratamiento. El punto principal de los ensayos es determinar las dosis más favorables que cubran con los requerimientos a un menor costo.

4.2.2. Objetivos particulares

- ♣ Analizar las condiciones de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de una planta textil.
- ♣ Establecer y seleccionar los parámetros de control del proceso de tratamiento de aguas.
- ♣ Realizar las pruebas experimentales para la selección de coagulantes y polímeros de ayuda de floculación.
- ♣ Determinar las dosis óptimas de operación de coagulantes y polímeros de floculación.

4.3. Hipótesis

Si las condiciones de operación del proceso de tratamiento de aguas son las adecuadas, y sólo si los gradientes de velocidad de mezcla registrados en los historiales son los correctos dentro de los procesos de coagulación y floculación, entonces se tendrá una selección de insumos químicos adecuados para sustitución en el proceso; con ayuda de diferentes pruebas a nivel laboratorio, ya que estos parámetros permitirán tener una mejor simulación del proceso.

4.4. Selección de los parámetros de control

Para efectuar la selección de las alternativas de tratamiento, es necesario reunir información sobre la calidad de la fuente que nos permite conocer las variaciones que existen a lo largo del tiempo.

El punto principal a retomar es el de seleccionar insumos químicos de coagulación y floculación, que sustituyan los actuales con el fin de obtener mejores resultados.

Los parámetros de calidad decisivos para seleccionar la alternativa de tratamiento adecuada son: turbiedad, color, sólidos suspendidos totales (SST) y metales. Por otra parte, de acuerdo a las necesidades planteadas, los parámetros a cumplir al final de la descarga en la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria textil se muestran en la tabla 23.



Parámetros	Limites permitido
pH (U)	6.5-7.5
SST (mg/L)	30
Color (Pt/Co)	15
Grasas y Aceites (mg/L)	10
Aluminio (mg/L)	0.05
Cadmio (mg/L)	0.004
Plomo (mg/L)	0.03
Fierro (mg/L)	1.0
Zinc (mg/L)	0.02
Mercurio (mg/L)	0.0005
Fosforo (mg/L)	0.05
Detergentes (mg/L)	0.1
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	0.06

Tabla 23.- Parámetros de control requeridos en el sistema de descarga de la PTAR²⁶.

4.4.1. Selección de los parámetros óptimos de los procesos

La determinación de los parámetros de los procesos mediante simulación en laboratorio es necesaria para optimizar los sistemas existentes. Durante la evaluación de un sistema, las pruebas funcionan para determinar si las unidades están operando de acuerdo con las condiciones que el agua requiere y durante la operación de la planta, permitiendo ajustar los procesos a las mencionadas condiciones.

Entre las variables que influyen en la remoción de color y turbiedad se puede citar: tipos de dosis de coagulante empleado, el efecto del pH, alcalinidad, tipo y origen del color, turbiedad y las dosis de los ayudantes de coagulación. Estos factores pueden ser determinados con exactitud a nivel de laboratorio y son una función principal del problema a tratar, pudiendo analizar las siguientes variables químicas:

- Selección del coagulante más apropiado.
- Determinación de la dosis optima del coagulante.
- Determinación de la influencia del pH en la coagulación.
- Evaluación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación y floculación.
- Determinación conjunta de la dosis y pH óptimos.
- Forma y secuencia de la aplicación de las sustancias químicas.
- Determinación de la influencia que la concentración de los coagulantes tiene en la coagulación

Para cumplir el objetivo planteado; la revisión indicada del proceso de *coagulación-floculación* pueden servir para ayudar a que investigar en los ensayos mediante pruebas de jarras y como interpretar algunos de los datos obtenidos.

4.4.1.1. Coagulación simultanea de color y turbiedad

El color y la turbiedad reaccionan de manera diferente en la coagulación; por lo que resulta difícil el tratamiento de agua que tiene concentraciones objetables de ambos. Cuando hay suficiente cantidad de arcilla para absorber todas las sustancias húmicas del agua, la presencia de los materiales orgánicos adsorbidos incrementa la dosis de polímero para remover la turbiedad. Cuando existe un exceso de ácidos húmicos la

²⁶ PTAR: Planta de Tratamiento de Agua Residual.

turbiedad es cubierta con compuestos orgánicos y los *ácidos húmicos y fúlvicos* permanecen en solución. El polímero reacciona primero con los compuestos orgánicos solubles para formar precipitados coloidales. Después se completa con un polímero adicional que reacciona con la turbiedad y las partículas orgánicas coloidales. La dosis de polímeros es más alta que las necesarias para remover solo turbiedad. En otras palabras, las dosis de coagulantes con mayores para tratar aguas con solo color o la turbiedad.

4.5. Equipos utilizados

La coagulación es un proceso utilizado en plantas de tratamiento de aguas como parte inicial de una serie de procesos que incluyen coagulación, sedimentación, filtración y floculación para la remoción de turbiedad, color, bacterias, virus, algas y otros compuestos en estado coloidal.

En laboratorio, uno de los equipos más usados en el tratamiento de las aguas como elemento de control de la coagulación es el equipo de prueba de jarras. Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos como se muestra en la ilustración 28:

- Un agitador mecánico previsto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 rpm, aunque actualmente existen equipos que operan con velocidades de hasta 400 rpm).
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
- Vasos de precipitado de 500 a 2000 mililitros de capacidad, de cristal refractario

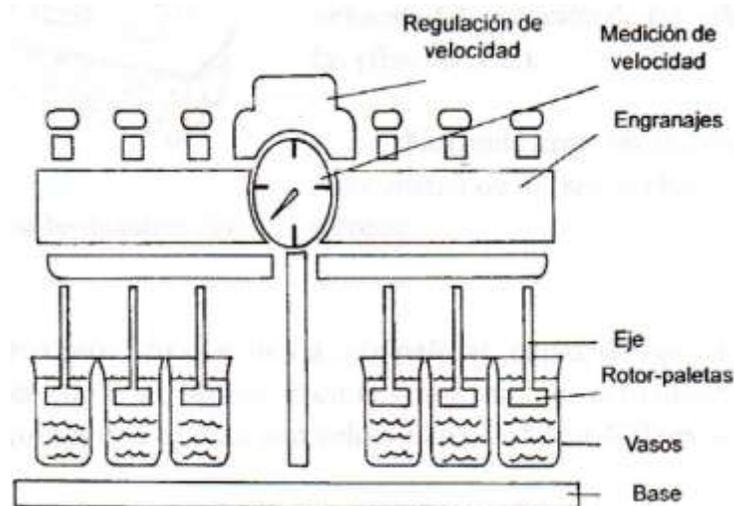


Ilustración 28.- Equipo de prueba de jarras.

4.5.1. Sistema de dosificación

Uno de los detalles más importantes en una planta de tratamiento de agua potable es el punto de dosificación del coagulante. Para obtener la mejor eficiencia es muy importante tener una excelente adición en el punto de mezcla rápida donde se dosifica el coagulante. El primer segundo después de la dosificación es el tiempo más importante para el proceso de coagulación. En este punto, respecto a cada coagulante tiene diferentes velocidades de reacción, y pueden tener un buen comportamiento aún con una mezcla menor.

Especialmente los productos PAC son conocidos por su alta velocidad de reacción y una coagulación más rápida.

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

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

En general, se recomienda aplicar la dosis de coagulante muy cerca del agitador, con el equipo operando con el gradiente de mezcla y aplicando exactamente lo que se debe efectuar en el mezclador de la planta. Los equipos de prueba de jarras automáticos, que permiten velocidades de hasta 300 rpm son ideales para efectuar simulación de procesos, y en ellos la bondad de los resultados depende mucho de la exactitud con la que se ejecuta la prueba.

4.5.2. Sistema de agitación

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética y pueden utilizarse una o mas paletas.

Cuando no se utilizan estatores, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos. La inercia producida durante el ensayo de floculación ocasiona la formación de un helicoide que afecta el proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón, se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo, tales como los indicados en la ilustración 29.

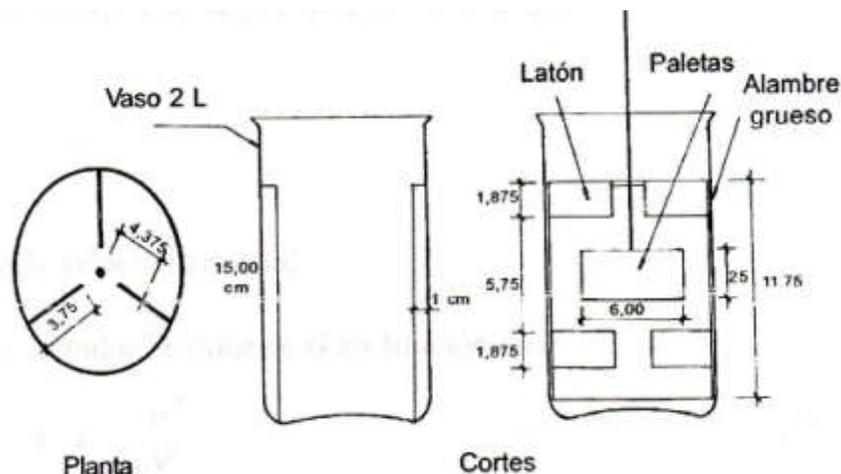


Ilustración 29.- Estatores o deflectores.

4.5.3. Descripción de las jarras

Las jarras o vasos que se usan deben poder ser acomodados en el aparato y adaptados dependiendo de las condiciones y modificaciones encontradas en la planta.

En lo posible; debe evitarse el lavado de las jarras con detergentes, ya que muchos de estos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio o del material del que estén hechas. Si estos no son completamente removidos, pueden afectar los resultados de la pruebas en forma significativa. La ilustración 30 muestra las características de los vasos.

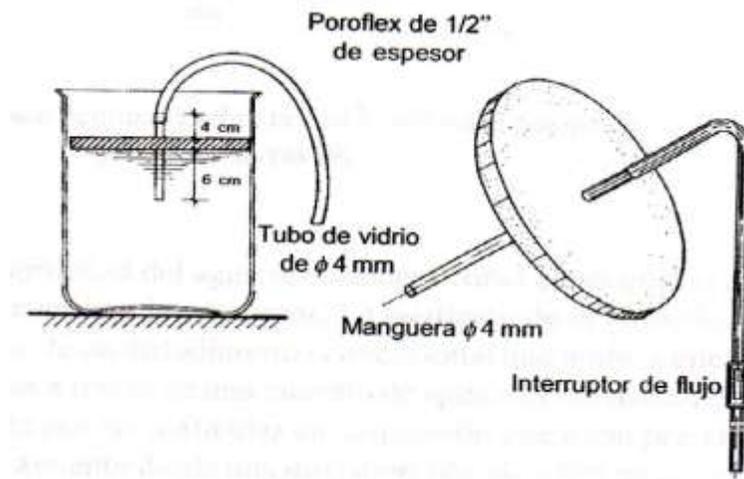


Ilustración 30.- Características de los vasos de prueba de jarras y sifón para toma de muestras.

4.5.4. Sistema de toma de muestras

Después de la toma de la mezcla rápida y floculación, se tiende a sedimentar en condiciones adecuadas. Los estatores descritos anteriormente ayudan a minimizar la rotación persistente del agua dentro del vaso durante el periodo de sedimentación. Luego se succiona el sobrenadante con una pipeta volumétrica (puede ser de 50 ml) a la misma profundidad en todos los vasos o por medio de un sifón de 3 mm del tubo de vidrio como se muestra en la ilustración 30.

Antes de tomar la muestra, se debe descartar a través del sifón, aproximadamente 10 ml de agua y luego tomar algo más de 30 ml de muestra para la determinación de los parámetros deseados. Se debe tener un abastecimiento de más o menos 50 vasitos para tomar muestras. Con algo de practica y la ayuda de un cronometro, se pueden obtener controles precisos de tiempo.

4.6. Consideraciones generales para la ejecución de prueba de jarras

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

- a. Equipo usado para las prueba



- b. Análisis de laboratorio requerido
- c. Dosis del coagulante
- d. Concentración del coagulante
- e. Sistema de adición del coagulante
- f. Dosificación del polímero ayudante de floculación
- g. Sistema de adición del ayudante de floculación
- h. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida
- i. Tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta
- j. Sistema de toma de muestras

Entre las observaciones generales que se deben tener en cuenta al ejecutar la prueba de jarras tenemos: El tiempo y secuencia de dosificación: en algunas ocasiones el coagulante se adiciona a cada muestra a diferentes tiempos según el turno. Tal procedimiento es inefectivo, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación; debido a que el tiempo entre la adición del coagulante y el ayudante siempre es crítico.

4.7. Antecedentes de la descarga

Con la finalidad de conocer las circunstancias de entrada de la fuente al proceso de coagulación-floculación; se realizaron muestreos simples y compuestos y se midieron los principales parámetros de campo con lo que se pudo determinar que el agua a tratar llega en las condiciones presentadas en la tabla 24.

Parámetros medidos	Condición min-max
Color (Pt/Co)	1115-2500
Turbidez (FAU)	119-309
SST (mg/l)	108-306
TDS (mg/l)	1470-1747
pH	7.98-8.52
T (°C)	28.8-29.8
Aluminio (mg/l)	0.52

Tabla 24.- Parámetros de fuente de entrada al proceso de coagulación-floculación.

Por otro lado, los insumos utilizados en el tratamiento antes de la implementación de nuevos polímeros correspondían al amplio catálogo de productos, los cuales para fines de este proyecto, los identificaremos de la siguiente manera:

- **P-106.-** Es un sulfato férrico (Fe_3+) en presentación líquida.
- **O-138.-** Es una formulación de sales de aluminio y coagulantes orgánicos en presentación líquida.
- **S-4500.-** Floculante de muy alto peso molecular.

Para definir las condiciones de descarga que se encontraron al final del sistema; también se realizaron muestreos simples y compuestos, los cuales fueron enviados a laboratorio.

De acuerdo con los resultados de los análisis, las condiciones de descarga que se obtienen con la aplicación de los polímeros anteriores son las que se presentan en la tabla 25:



Parámetros de control	Valores
Color (Pt/Co)	241-915
Turbidez (FAU)	28-82
SST (mg/l)	19-65
pH	7.89-7.98
Aluminio (mg/l)	0.094-0.15
Cadmio (mg/l)	<0.002
Fierro (mg/l)	0.787-1.6
Mercurio (mg/l)	<0.001
Plomo (mg/l)	<0.08
Zinc (mg/l)	0.029-0.265

Tabla 25.- Parámetros de descarga con la aplicación de los polímeros anteriormente citados.

Comparando los resultados de la descarga utilizando los insumos mencionados; la tabla 26 muestra la comparación encontrada:

Parámetro	Unidad		Observaciones
	Objetivo	Tratado	
pH	6.5-7.5	7.89-7.98	El pH de descarga se encuentra arriba del límite máximo permitido por 0.39-0.48
SST (mg/L)	30	19-65	La cantidad de SST llega a salir del límite por 35 mg/L
Color (Pt/Co)	15	241-915	Difícilmente se encuentra dentro del límite solicitado.
Aluminio (mg/L)	0.05	0.094-0.15	Fuera del límite permitido por 0.044-0.1 mg/L
Fierro (mg/L)	1.0	0.787-1.6	Fuera del límite por 0.6 mg/L

Tabla 26.- Parámetros requeridos comparados con los obtenidos utilizando los insumos anteriores.

4.8. Soluciones químicas empleadas

Para poder llegar a obtener las necesidades de descarga, se seleccionaron diferentes polímeros, productos de venta comercial que por su naturaleza se identificaran de la siguiente forma:

- **Cloruro Férrico (CFe):** Coagulante en solución. Utilizado en el tratamiento de aguas residuales, para la potabilización del agua, y en la industria electrónica para el grabado químico de plaquetas de circuito impreso.
- **Sulfato Férrico y Ferroso (SICO)(SOSO):** Coagulantes en solución. Muy eficientes con dos rangos de trabajo de pH. El rango más bajo empieza en aproximadamente 3.5 y termina en pH 7.0 para un agua con alcalinidad alta. El rango más alto es de 8.0 hasta por lo menos 9.5.
- **PAC HB (Policloruro de Aluminio) (PHB):** Coagulante inorgánico catiónico utilizado en el tratamiento de agua potable, efluentes industriales con excelentes resultados en industria textil, papelera, minera, alimenticia, etc.
- **Sulfato de Aluminio (SA):** Coagulante en solución. Generalmente se puede encontrar en diferentes presentaciones: producto estándar con un alto contenido de hierro residual, y producto libre de hierro, que prácticamente no contienen nada de hierro.



- **FL4540:** Cloruro de Polidialil dimetil amonio (Polidadmac) de mediano peso molecular en forma líquida con excelentes aplicaciones en tratamiento de agua potable, industrial, municipal, textil, papelera, minera así como en aplicaciones directa en la fabricación de diversas clases de papeles.
- **FO4140, FO4190, FO4290, FO4650 y FO4800:** Polímeros catiónicos que pueden funcionar como agentes desestabilizadores por formación de enlaces de puente, neutralización de carga, o ambos.
- **FO4350 y FO4490:** Poliacrilamida que se utiliza ampliamente como agente floculante en el tratamiento del agua y las aguas residuales y como agente reforzador en los procesos de fabricación de papel en la industria papelera.

4.8.1. Ventajas y desventajas de los coagulantes empleados

Cloruro férrico

Ventajas

- ✓ El coagulante de bajo costo.
- ✓ Alta velocidad de reacción.
- ✓ El rango bajo de pH 3.5 – 7.0 es superior en la remoción de sustancias orgánicas, bacteria y plankton.
- ✓ El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de Hierro y Manganeso.
- ✓ No hay problemas con el Aluminio residual.
- ✓ Muchas veces eficiente sin ayuda de un polímero ayudante de floculación.

Desventajas

- El producto requiere un mejor diseño de proceso que el Sulfato de Aluminio o PAC.
- Problemas en el proceso pueden causar un color y precipitación en el agua tratada.
- La dosis de Hierro es mayor a la dosis de Aluminio (el peso molecular es mayor).
- Muy corrosivo para manejar y almacenar.
- Comercialmente disponible solo en presentación líquida.

Policloruro de aluminio (PAC)

Ventajas

- ✓ Normalmente no requiere un ajuste del pH
- ✓ En comparación con el Sulfato de Aluminio:
 - * Un rango de trabajo de pH más amplio
 - * Aluminio residual más bajo
- ✓ Mejor comportamiento que el Sulfato de Aluminio:
 - * En aguas frías
 - * En la remoción de sustancias orgánicas
 - * En la remoción de turbiedad y color
 - * Produce menos lodo
- ✓ Manejo más fácil de producto líquido y sólido
- ✓ Menor consumo de polímero
- ✓ Menor dosis de Aluminio residual que con el Sulfato de Aluminio
- ✓ Velocidad de reacción muy alta
- ✓ Ahorro importante en fletes cuando se utiliza un producto seco
- ✓ El producto sólido se disuelve fácil, sin insolubles

Desventajas

- Precio más alto por kg que con el Sulfato de Aluminio (compensado con una menor dosis)
- Un pH demasiado alto para la coagulación puede bajar la remoción de sustancia orgánica



Sulfato de aluminio

Ventajas

- ✓ Conocido. Buena disponibilidad.
- ✓ Plantas normalmente diseñadas para el polímero
- ✓ El personal capacitado generalmente conoce su comportamiento
- ✓ Autoridades no cuestionan el uso del Sulfato de Aluminio
- ✓ Forma flóculo blanco casi invisible

Desventajas

- Se requiere normalmente un control del pH
- El rango de trabajo de pH muy limitado
- La remoción de material orgánica en el proceso limitada
- Problemas con agua de alta turbiedad
- Muchas veces requiere un ayudante de floculación para la maduración de floculos.
- Problemas con alto contenido de Aluminio residual

Sulfato férrico y ferroso

Ventajas

- ✓ Muchas veces el coagulante de bajo costo
- ✓ Alta velocidad de reacción
- ✓ El rango bajo de pH 3.5-7.0 es superior en la remoción de sustancias orgánicas, bacteria y plankton
- ✓ El rango alto de pH 8.0-9.5 es usado para la remoción de Hierro y Manganeseo
- ✓ No hay problemas con el Aluminio residual
- ✓ Muchas veces eficiente sin polímero ayudante de floculación
- ✓ Fácil y seguro a manejar y almacenar, tanto líquido como sólido

Desventajas

- El producto requiere un mejor diseño de proceso que el Sulfato de Aluminio o PAC
- Problemas en el proceso pueden causar un color y precipitación en el agua tratada
- La dosis de Hierro es mayor a la dosis de Aluminio
- El producto sólido necesita una muy buena mezcla en la unidad de dilución

Los principales ensayos de dosificación que se determinaron en laboratorio son los siguientes:

- Selección de los coagulantes apropiados.- Consiste en efectuar ensayos con todos los coagulantes disponibles. El que proporciona la mayor eficiencia al menor costo se selecciona para su evaluación final.
- Rango de dosis optimas empleadas.- Se selecciona de acuerdo a las características del floculo, el que produce la mayor desestabilización de las partículas coloidales, que permitan la formación de flóculos grandes, compactos y pesados.
- Concentración óptima del coagulante.- influye mucho en la eficiencia de la mezcla rápida, lo que modifica los resultados del proceso de coagulación.
- pH óptimo de coagulación.- Ayuda principalmente a mejorar los resultados de los insumos utilizados.
- Dosis de modificador de pH.- Se calcula dependiendo del pH utilizado en el proceso.
- Selección de ayudante de floculación y dosis óptima.- También seleccionado por medio de combinaciones de floculantes, esperando los mejores resultados para su evaluación.

Los insumos enlistados fueron utilizados y probados en combinaciones entre coagulantes y posteriormente con cada uno de los floculantes.

4.9. Técnica

De acuerdo al mecanismo de operación de la prueba de jarras, la secuencia para su ejecución consiste en los siguientes pasos:

1. Se considero un punto de muestreo simple (a la salida del sedimentador secundario) en la planta de tratamiento de aguas residuales, tomando 20 litros de muestra enjuagando el recipiente recolector por lo menos 3 veces antes con el agua a muestrear y posteriormente tomando la cantidad correspondiente de muestra de agua; todo esto se realizo por la mañana (fotografía 1).



Fotografía 1.- Recipiente de muestreo de agua.

2. Se realizo la medición de los parámetros de campo correspondientes a: Color, Turbidez (FAU²⁷), sólidos totales disueltos, pH y temperatura, registrando los resultados obtenidos de cada una de las muestras simples obtenidas (fotografía 2).²⁸



Fotografía 2.- Toma de parámetros de campo.

²⁷ FAU (Unidades de atenuación de formazina). Unidad de calibración conforme a la norma internacional ISO 7027 para medidas de turbidez utilizando el método de la luz transmitida basado en una solución de formazina.

²⁸ Esta actividad se realizó para cada una de las mezclas probadas, previo a las pruebas de laboratorio.

3. Se prepararon soluciones de floculantes, la cual consistió principalmente en elaborar una mezcla al 0.1% de floculante más agua manteniendo en constante agitación, hasta observar una composición uniforme, tal como se puede observar en la fotografía 3.



Fotografía 3.- Preparación de polímeros ayudantes de floculación a una concentración de 0.1%.

4. Se prepararon soluciones de 200 mL de diferentes mezclas de coagulantes. Para la preparación de dichos coagulantes, los porcentajes entre las mezclas entre uno y otro variaron con respecto a las observaciones presentadas a lo largo de las pruebas. Las mezclas consideradas para la evaluación se presentan en la tabla 27:



Fotografía 4.- Preparación de coagulantes.

5. Se realizaron análisis de prueba de jarras, para el procedimiento experimental se llenaron las jarras de medio litro con la muestra de agua (es importante considerar que las jarras que se utilizaron fueron cuadradas, ya que el sistema real presenta esa característica).



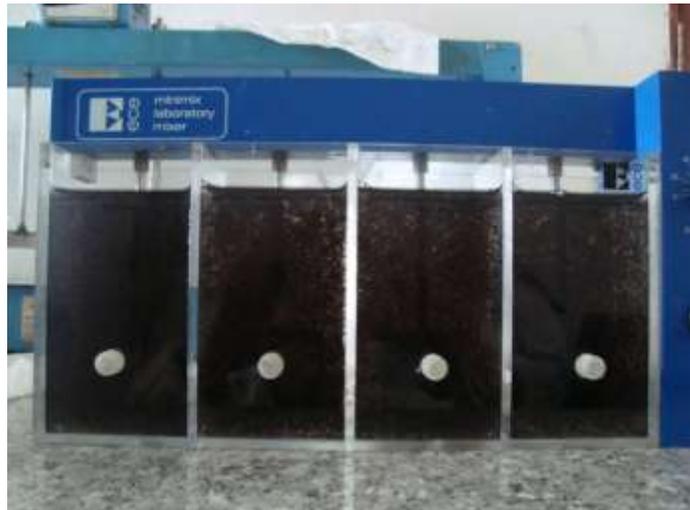
Fotografía 5.- Llenado de jarras para pruebas de laboratorio.

6. Se realizaron prueba de coagulación donde se utilizó una mezcla determinada de coagulantes y floculante correspondiente. La mezcla rápida mantuvo una agitación de 200 rpm con tiempos de 6 min (fotografía 6).



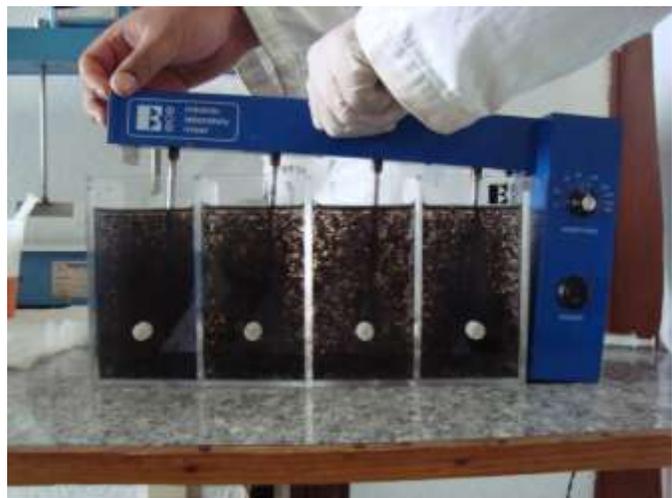
Fotografía 6.- Prueba de coagulación.

7. Se alternó la dosificación de floculante, con 60 rpm durante 2.5 min para mezcla lenta; de acuerdo con las condiciones solicitadas por los operadores de la planta de tratamiento (fotografía 7).



Fotografía 7.- Prueba de floculación.

8. Después de la representación del tratamiento fisicoquímico en la prueba de jarras, se dejó un periodo de sedimentación de 5 minutos (fotografía 8).



Fotografía 8.- Periodo de sedimentación.

9. Se extrajo una muestra del sobrenadante bordeando las jarras y sin agitar el agua, para proceder a la medición de los parámetros correspondientes obtenidos al final de cada una de las pruebas (*fotografía 9*).



Fotografía 9.- Extracción de muestra.

10. Posteriormente se analizaron los resultados obtenidos (*fotografía 10*).

Parámetro	Código	Fecha	Resultado
Presión de hidrogeno	NMX-AA-008-SCFI-2000	03/02/12	7.04 unidades
E. coli	NMX-AA-019-SCFI-2001	03/02/12	0.0699 mg/L
Resorte seco	NMX-AA-019-SCFI-2001	09/02/12	3.01 mg/L
Sólidos Suspendedos Totales	NMX-AA-014-SCFI-2001	10/02/12	25.0mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	15/02/12	8.52mg/L
Color		09/02/12	< 0.01 mg/L
Fluoruro		08/02/12	0.062 mg/L
Asa	NMX-AA-051-SCFI-2001		0.119 mg/L
Alum		14/02/12	0.188 mg/L
Aluminio		15/02/12	0.479 mg/L
Mercurio Elemental	NMX-AA-026-SCFI-2001	02/02/12	0.024 mg/L
Cloro	MR015/HACU/D02000	03/02/12	78.0 U PpCo
Conductividad Eléctrica	NMX-AA-019-SCFI-2000	03/02/12	3.4 mg/L
Materia	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	0.002 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	NMX-AA-001-SCFI-2000	17/02/12	121.97 mg/L

Fotografía 10.- Análisis de resultados.

Coagulantes	Polímeros
	FO4140
	FO4190
FL4540+CFe	FO4290
FL4540+PHB	FO4350
FL4540+SA	FO4490
FL 4540+SICO +SOSO	FO4650
	FO4800

Tabla 27.- Mezclas de coagulantes utilizados y polímeros de floculación

En el diagrama de bloques (*ilustración 31*) se presenta de manera general el procedimiento realizado para la evaluación de cada una de las muestras utilizadas; tomando en cuenta que el procedimiento experimental es similar en cada uno de los casos.

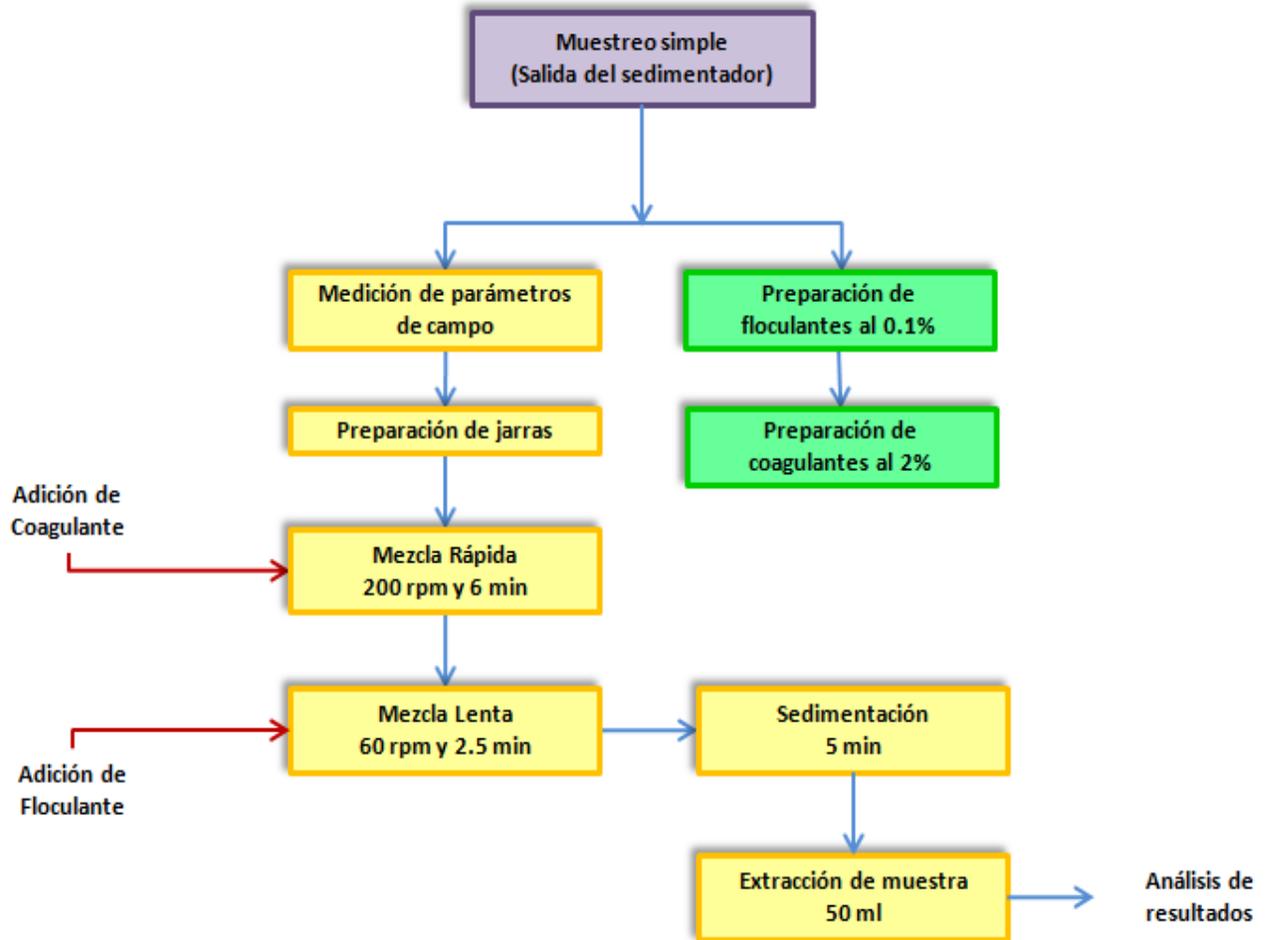


Ilustración 31.- Diagrama de bloques del procedimiento experimental realizado.²⁹

4.10. Lista de materiales y equipos

- ✓ Equipo de prueba de jarras con 4 jarras cuadradas de 0.5 litros
- ✓ Equipo de prueba de jarras con 4 jarras circular de 2 litros
- ✓ Equipo HACH para la determinación de pH, SST y μ s
- ✓ Colorímetro HACH DR/890
- ✓ Una balanza
- ✓ Espátula
- ✓ 10 jeringas hipodérmicas de 10 ml
- ✓ 5 jeringas hipodérmicas de 3 ml
- ✓ 5 jeringas hipodérmicas de 5 ml
- ✓ Vasos de plástico
- ✓ Pipeta graduada de 1 ml
- ✓ Pipeta volumétrica de 50 ml
- ✓ Probeta graduada de 1000 ml
- ✓ Acido sulfúrico
- ✓ Coagulante y polímeros de coagulación a prueba
- ✓ Muestra de agua cruda

²⁹ Creación propia realizada de acuerdo con el procedimiento seguido para la toma de muestras y experimentación.



4.11. Resultados

Durante el desarrollo de la etapa de experimentación, se realizaron muestras simples durante un periodo de 10 días, en cada una de las muestras obtenidas se tomaron los parámetros correspondientes a Turbidez, Sólidos Suspendedos Totales y Color.

Para la toma de muestra; sólo se consideró un punto de muestreo simple, correspondiente a la salida del sedimentador secundario en la planta de tratamiento de aguas. El muestreo fue evaluado extrayendo una muestra de agua por la mañana.

El fin por el cual se realizó la toma de parámetros de campo, es el de conocer las características del agua cruda, previo a la entrada del tratamiento fisicoquímico; es decir, antes de la entrada de influente a los sistemas de mezcla rápida y lenta. De acuerdo con los datos obtenidos de las condiciones del agua cruda, se presenta la tabla 28:

Día	Fecha	Turbidez (FAU)	SST (ppm)	Color (Pt/Co)
Jueves	26-ene-12	243	233	1780
Martes	31-ene-12	259	231	2110
Miércoles	01-feb-12	285	264	2290
Jueves	02-feb-12	309	289	2500
Lunes	20-feb-12	259	282	2160
Martes	21-feb-12	251	259	2155
Miércoles	22-feb-12	133	114	1115
Jueves	23-feb-12	134	118	1485
Lunes	27-feb-12	270	306	2283
Martes	28-feb-12	119	108	1125

Tabla 28.- Condiciones del agua cruda muestreada.

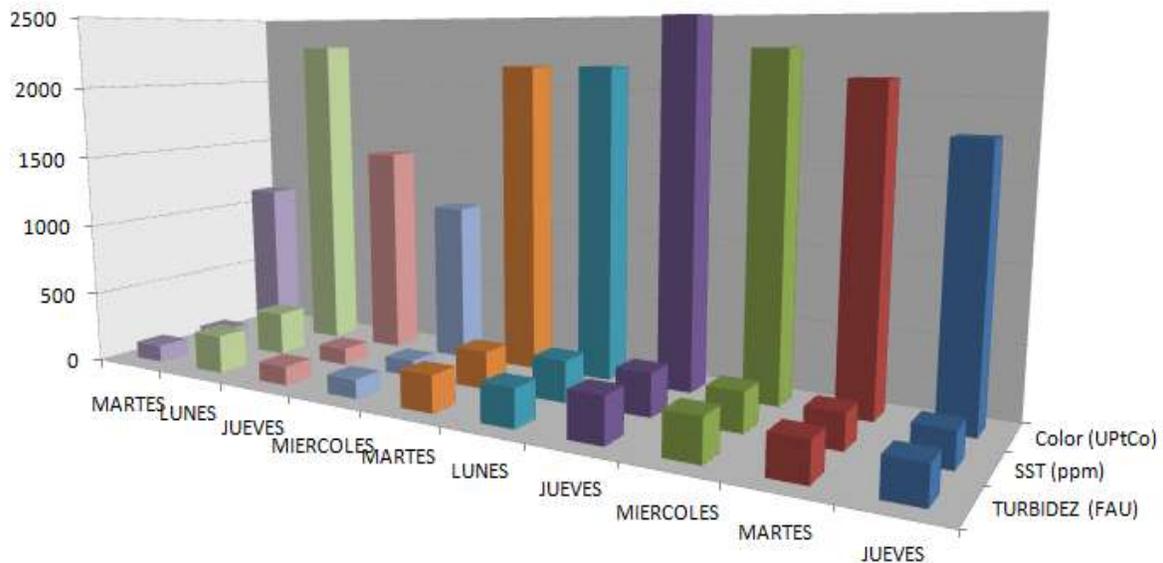


Gráfico 17.- Comparación grafica de parámetros obtenidos de las muestras de agua cruda.

En el gráfico 17 se observa la diferencia que existe entre cada una de las muestras tomadas a lo largo de los 10 días, como se puede ver los niveles de color que presentan las muestras son muy elevados en comparación con los valores de turbidez y SST.



Realizando una comparación entre turbidez y SST, de acuerdo con los datos de la tabla 28, se obtiene el gráfico 18.

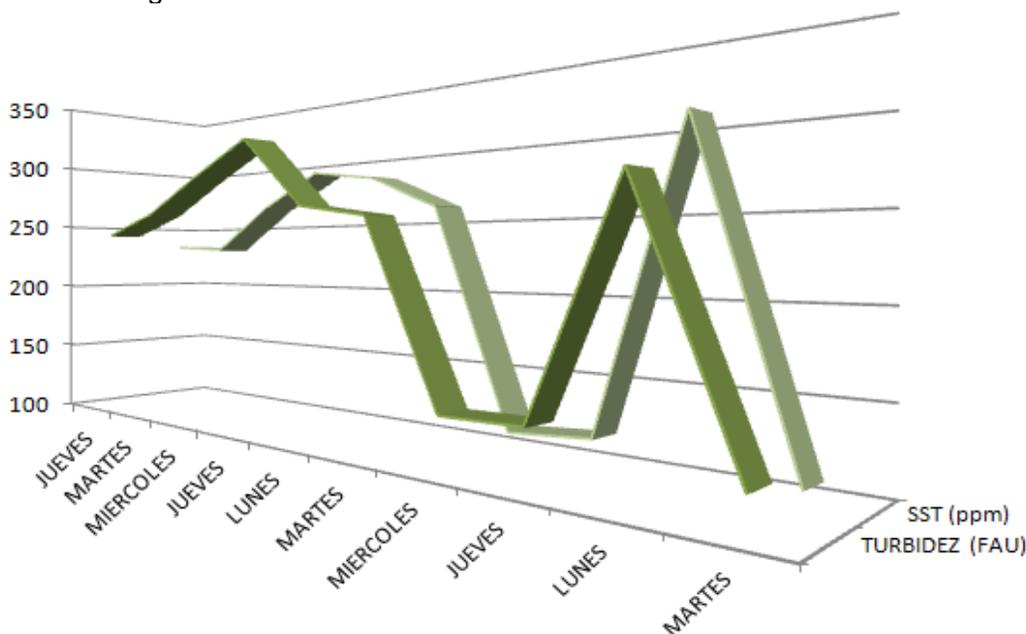


Gráfico 18.- Comparación entre SST y turbidez de acuerdo con los datos obtenidos del agua cruda.

Existe una relación entre la cantidad de sólidos suspendidos totales y la turbidez, ya que esta última se presenta debido a la presencia de partículas en suspensión, es decir; cuantos más sólidos haya en un líquido, mas sucia parecerá está y por lo tanto más alta será la turbidez.

A pesar de encontrar valores con respecto a los parámetros anteriormente mencionados, el problema principal al cual se hace referencia es la cantidad de color que contiene las aguas residuales; motivo por el cual se realizaron una serie de pruebas a lo largo de varios días.

El color del agua depende de sustancias que se encuentran disueltas como de las partículas que se encuentran en suspensión, es por ello que es importante conocer estos tres parámetros, ya que uno tiende a depender de los otros.

De acuerdo con los valores obtenidos; las cantidades de color varían de entre los 1000 UPt/Co y 2500 UPt/Co (*Unidades Platino/Cobalto*). Esta variación puede ser generada dependiendo del tipo de proceso que se lleve a cabo, ya que existe una relación entre el tipo de teñido y entre cada una de las fibras textiles.

Una vez conocidas las condiciones en las cuales se encontraron cada una de las muestras de agua cruda a lo largo de cada uno de los días, se realizaron diferentes pruebas a nivel laboratorio para la determinación de una mejor selección de coagulante y floculantes; con la finalidad de llegar al objetivo planteado.

A continuación, se presentan las diferentes pruebas realizadas en cada una de los eventos experimentales contemplando cada una de las muestras obtenidas.



4.11.1. Pruebas experimentales

Para determinar una combinación más aceptable con la finalidad de lograr el objetivo planteado, durante el periodo de pruebas se realizaron varias mezclas de coagulantes, tomando como favorables aquellas que arrojaran valores de color residual más bajo.

En esta parte, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas separadas por cada uno de los días en donde se tomaron muestras puntuales.

- **26 de Enero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 243
SST (ppm): 233
Color (Pt/Co): 1780

Se realizaron varias pruebas de jarras, con diferentes mezclas y concentraciones de coagulantes. Las tablas 29, 30 y 31; presentadas a continuación corresponden a mezclas de coagulantes; en las cuales se utilizó como floculante el FO4800.

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc ml	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA	17.2	688	1	56	539	67
2	15% FL4540 + 85% SA	17.2	688	1.5	89	723	105
3	20% FL4540 + 80% SA	17.2	688	1.5	86	800	98
4	25% FL4540 + 75% SA	17.2	688	3	106	1003	124

Tabla 29.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA.

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc ml	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
5	10% FL4540 + 90% PHB	6.4	256	1.2	73	595	85
6	15% FL4540 + 85% PHB	6.4	256	1.2	59	540	67
7	20% FL4540 + 80% PHB	6.4	256	1.2	54	521	65
8	25% FL4540 + 75% PHB	6.4	256	2	76	698	91

Tabla 30.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB.

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
9	10% FL4540 + 90% CFe	11.2	448	1	70	815	90
10	20% FL4540 + 80% CFe	11.2	448	1	48	595	66
11	25% FL4540 + 75% CFe	11.2	448	1.5	41	578	60

Tabla 31.- Combinación de coagulantes FL4540 y CFe.

De acuerdo a los resultados arrojados después de las pruebas de jarras realizadas con diferentes concentraciones de insumos (*coagulantes y floculantes*); se tomaron en cuenta aquellas combinaciones que presentaron valores de color final más bajo, de las cuales una correspondió a combinación de FL4540+SA, dos a FL4540+PHB y una a FL4540+CFe; las cuales se pueden identificar en las tablas por estar en color rojo.

Una vez seleccionado determinadas mezclas, se repitió la prueba una vez comparando las 4 combinaciones seleccionadas; de las cuales se obtuvieron los resultados de la tabla 32.



No. Prueba	Coagulantes	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
12	10% FL4540 + 90% SA	17.2	688	1	49	479	59
13	15% FL4540 + 85% PHB	6.4	256	1	63	535	72
14	20% FL4540 + 80% PHB	6.4	256	1	59	548	73
15	25% FL4540 + 75% CFe	11.2	448	1.5	82	835	98

Tabla 32.- Resultados obtenidos de la comparación de diferentes mezclas de coagulantes (Día 1).

Haciendo una comparación entre los valores obtenidos de las mezclas, se puede observar en el gráfico 19, que la mezcla correspondiente a FL4540+SA es la que presentó mayor remoción de SST y Turbidez, siguiéndole la correspondiente a FL4540+PHB. Por otro lado, la misma mezcla también tuvo como resultado una menor cantidad de color residual, como se observa en el gráfico 20.

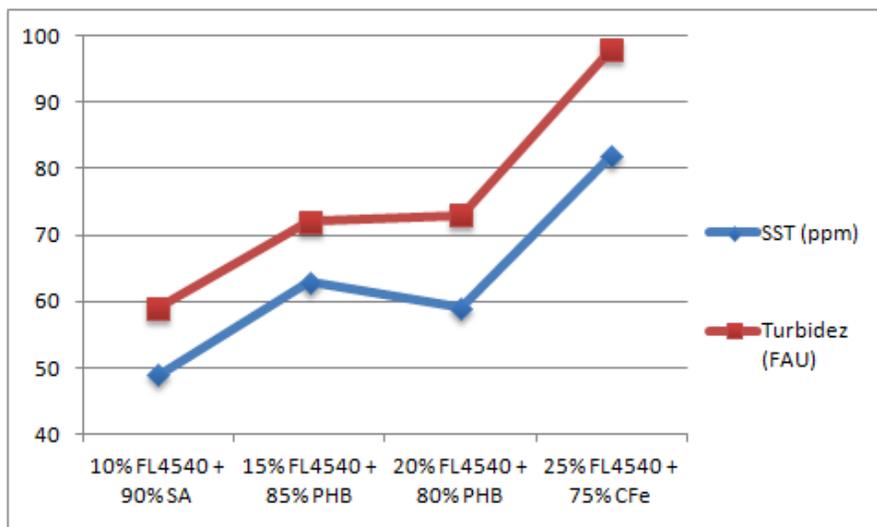


Gráfico 19.- Comparación de SST y Turbidez.

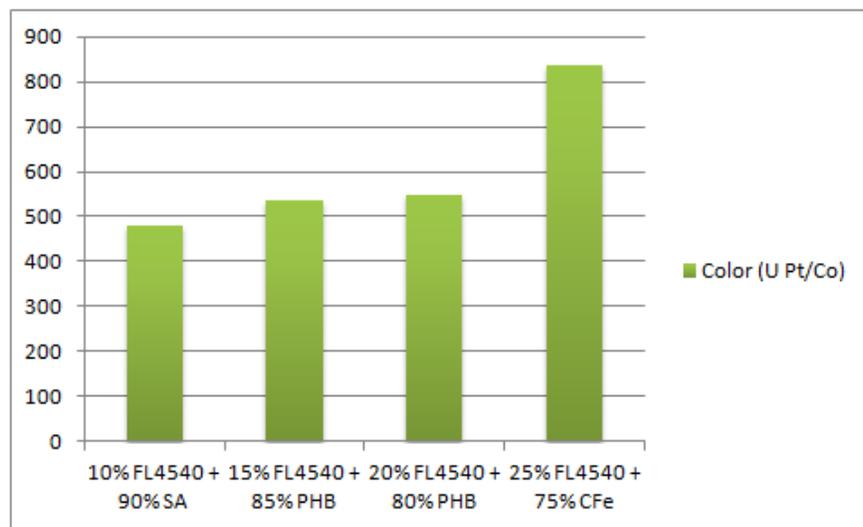


Gráfico 20.- Color residual obtenido al final de la prueba de jarras resultado de la selección de mezclas.



Con estos resultados, se utilizaron estas mejores mezclas para realizar una comparación de floculantes, es decir, se realizaron pruebas de jarras probando los porcentajes de coagulantes con diferentes floculantes a una concentración de 0.10% proporcionados; arrojando los siguientes datos.

No. Prueba	10% FL4540 + 90% SA 760 ppm SA	Floculante ml	ppm	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
16	FO4140	1.5	3	78	1040	100
17	FO4290	1.5	3	14	195	20
18	FO4490	1.5	3	62	593	76
19	FO4650	1.5	3	17	213	24
20	FO4190	1.5	3	14	200	21
21	FO4350	1.5	3	9	168	19
22	FO4800	1.5	3	12	211	18

Tabla 33.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+SA.

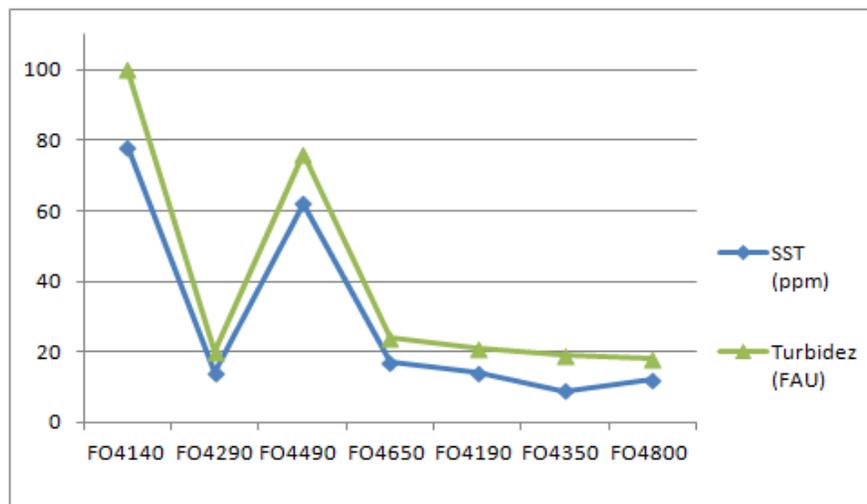


Gráfico 21.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+SA.

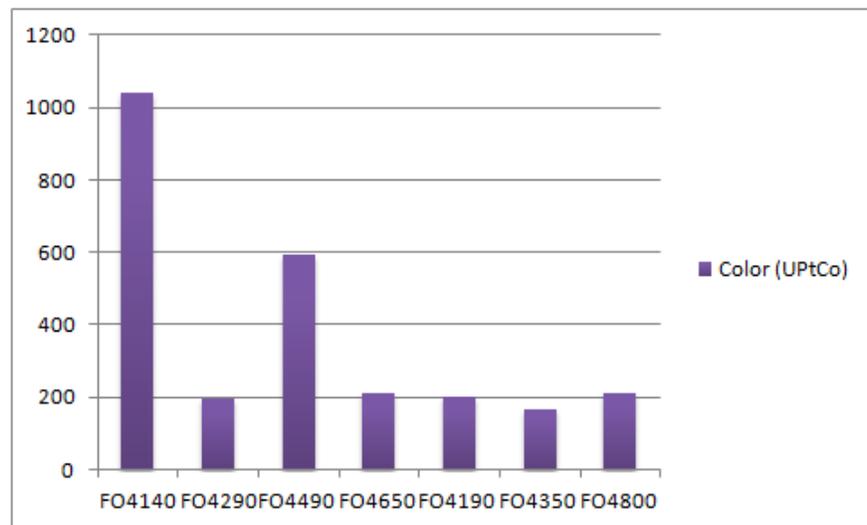


Gráfico 22.- Comparación del color residual obtenido de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+SA.



De la tabla 33, cuatro de los siete floculantes fueron los que dieron los mejores resultados con respecto al color residual; teniendo como mejor alternativa el FO4350 (gráfico 21 y 22), mientras que en la tabla 34 sólo dos presentan una cantidad de color baja (alta en comparación son la mezcla FL4540+SA); aunque los cuatro tienen un rango de color elevado (gráfico 23 y 24).

No. Prueba	15% FL4540 + 85% PHB 280 ppm PHB	Floculante ml	ppm	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
23	FO4290	1.5	3	24	321	34
24	FO4350	1.5	3	21	315	26
25	FO4490	1.5	3	38	435	47
26	FO4650	1.5	3	37	426	47

Tabla 34.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+PHB.

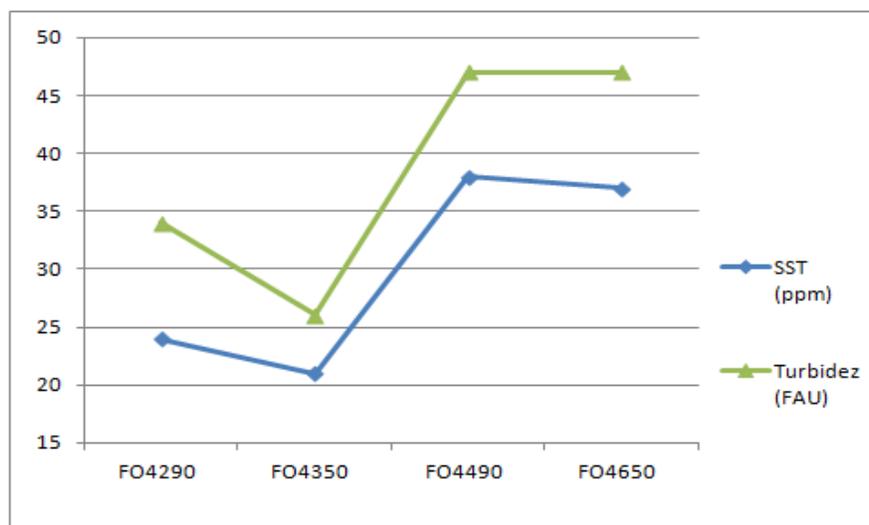


Gráfico 23.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+PHB.

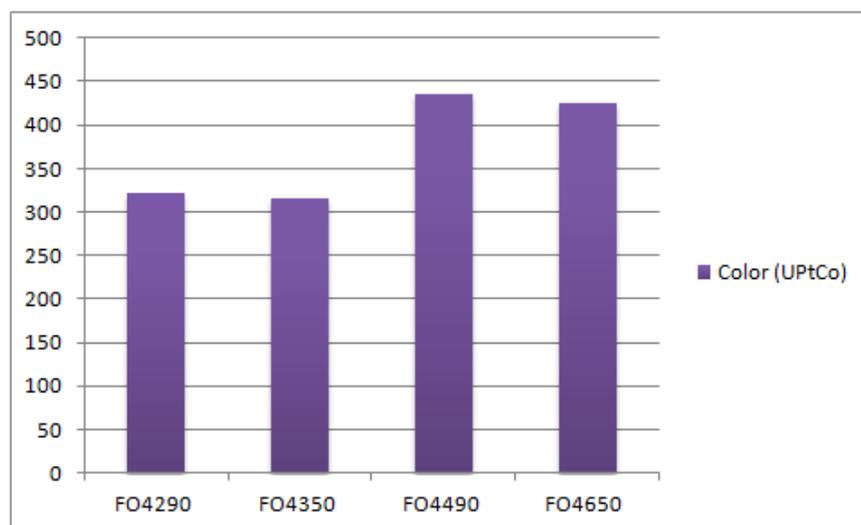


Gráfico 24.- Comparación del color residual obtenido de los diferentes floculantes probados en mezcla FL4540+PHB.



Esta secuencia fue realizada a lo largo de las pruebas posteriores, por lo que se presenta de la misma manera durante los siguientes 2 días.

- **31 de Enero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 259
SST (ppm): 231
Color (Pt/Co): 2110

Las tablas siguientes corresponden a mezclas de coagulantes; en las cuales se utilizó como floculante el FO4800.

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA	34.4	688	1.5	43	425	56
2	10% FL4540 + 90% SA	34.4	688	2	45	426	55
3	15% FL4540 + 85% SA	34.4	688	2	49	492	60

Tabla 35.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA.

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
4	10% FL4540 + 90% PHB	16	320	1	23	274	28
5	10% FL4540 + 90% PHB	16	320	1	19	268	27
6	15% FL4540 + 85% PHB	16	320	1	18	239	27
7	15% FL4540 + 85% PHB	16	320	1	19	249	25

Tabla 36.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB.

Para la siguiente prueba, se realizó un cambio en el tipo de coagulante (*utilizando un FL4635*) con el PHB, esperando tener resultados más satisfactorios; sin embargo, no se observó una mejora significativa, teniendo como mejor alternativa la utilización del FL4540 (*tabla 37*).

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
8	10% FL4635 + 90% PHB	16	320	1.5	31	370	41
9	15% FL4635 + 85% PHB	16	320	1.5	26	355	42
10	10% FL4540 + 90% SA	34.4	688	2	39	363	45
11	15% FL4540 + 85% PHB	16	320	1	22	295	28

Tabla 37.- Combinación de coagulantes FL4635/FL4540 y PHB comparado con FL4540 y SA.

Una vez obtenidos resultados, se utilizaron las mejores muestras tomando como criterio las combinaciones que presentaron una cantidad de color residual menor para la comparación de floculantes, arrojando como resultado los siguientes datos.

No. Prueba	15% FL4540 + 85% PHB 320 ppm	Floculante ml	ppm	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
12	FO4290	1.5	3	14	221	20
13	FO4350	1.5	3	10	170	16
14	FO4650	1.5	3	12	179	16
15	FO4800	1.5	3	18	264	23

Tabla 38.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+PHB.

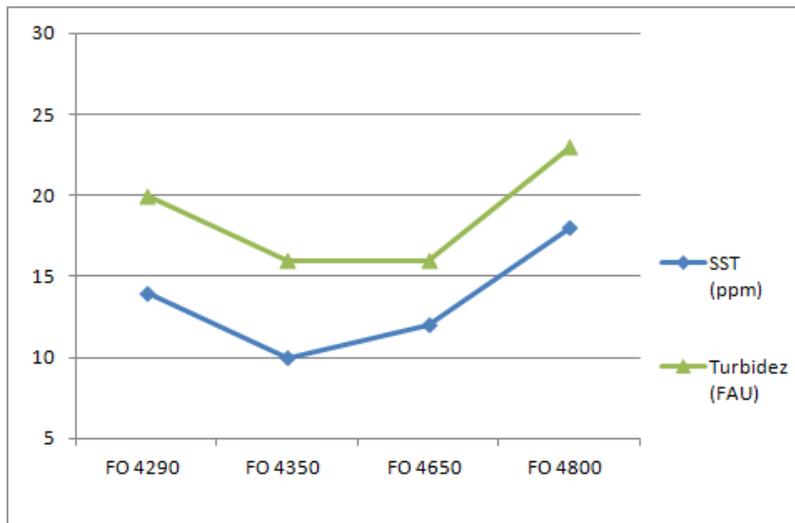


Gráfico 25.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez en mezcla FL4540+PHB.

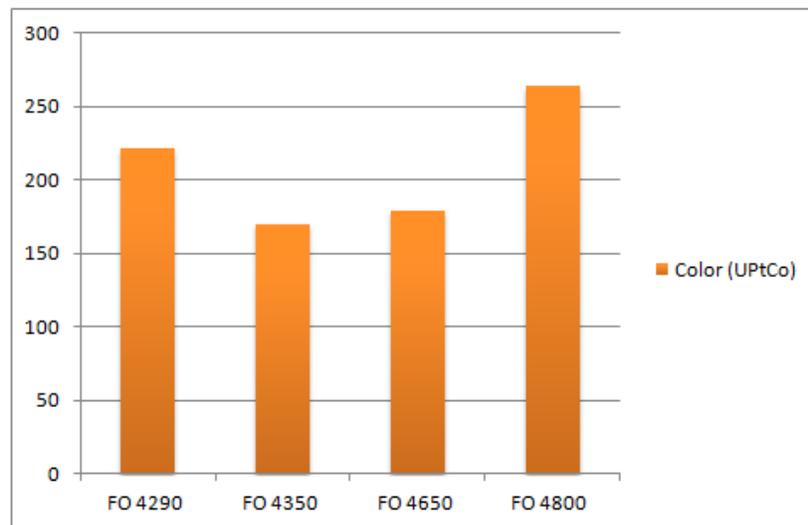


Gráfico 26.- Comparación de color en mezcla FL4540+PHB.

A comparación de las pruebas realizadas con fecha de 26 de Enero, en esta ocasión solo se utilizaron los floculantes que tuvieron como resultado valores de color menor; reduciendo así la cantidad de insumos a comparar en las muestras. En el caso de la combinación FL4540+PHB los floculantes más prometedores son el **FO4350** y **FO4650** (tabla 38 y gráficos 25 y 26), mientras que el caso de la mezcla FL4540+SA el único polímero que presento un mejor resultado en el color residual fue el **FO4800** (tabla 39 y gráficos 27 y 28).

No. Prueba	10% FL4540 + 90% SA 688 ppm	Floculante ml	ppm	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
16	FO4290	1.5	3	7	209	16
17	FO4350	1.5	3	8	184	23
18	FO4650	1.5	3	17	230	19
19	FO4800	1.5	3	11	149	13

Tabla 39.- Comparación de floculantes con mezcla FL4540+SA.

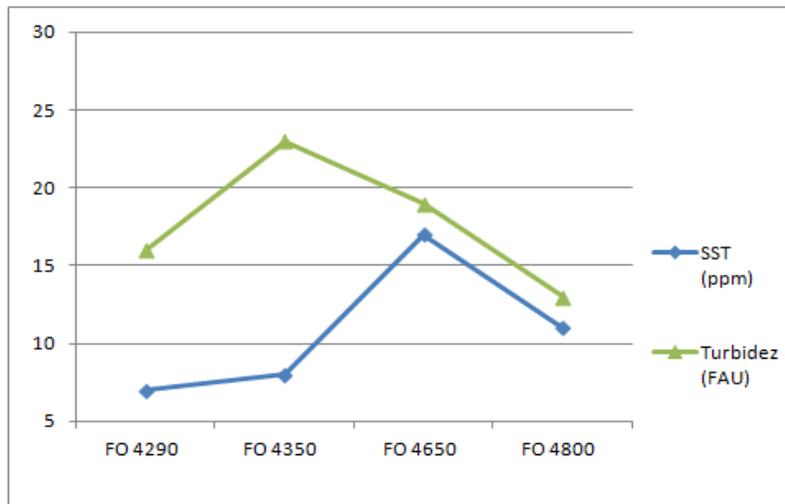


Gráfico 27.- Comparación de la cantidad de SST y Turbidez en mezcla FL4540+SA.

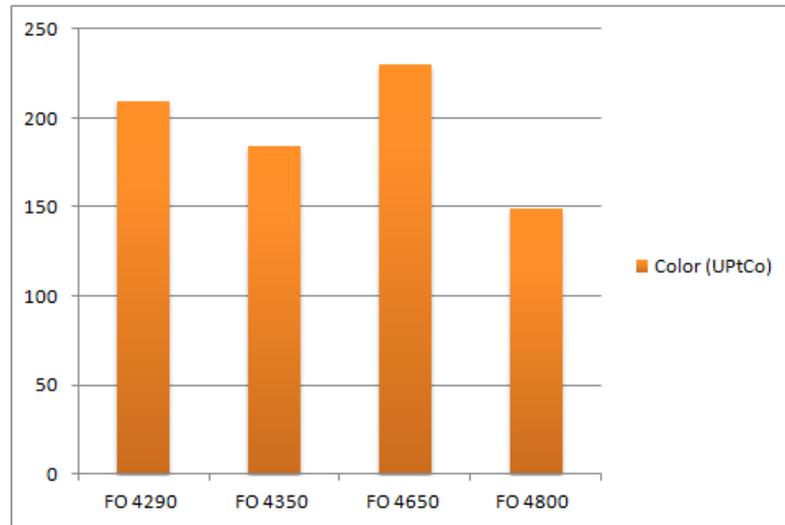


Gráfico 28.- Comparación de color en mezcla FL4540+SA.

• **01 de Febrero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 285

SST (ppm): 265

Color (Pt/Co): 2290

Se presentan a continuación mezclas de coagulantes; en las cuales se utilizó como floculante el FO4800. En este caso, no se varió en el porcentaje de concentración de los coagulantes utilizados, sino en la cantidad de mezcla agregada a la prueba (tabla 40 y 41).

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPT/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA	30	600	1.5	47	458	58
2	10% FL4540 + 90% SA	33	660	1	42	429	54
3	10% FL4540 + 90% SA	36	720	1	44	406	49
4	10% FL4540 + 90% SA	39	780	1.5	49	423	51

Tabla 40.- Combinación de coagulantes FL4540 y SA variando la cantidad de coagulante agregado.



No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
5	15% FL4540 + 85% PHB	12	240	1.5	31	323	36
6	15% FL4540 + 85% PHB	15	300	1	24	296	35
7	15% FL4540 + 85% PHB	18	360	1	22	258	29
8	15% FL4540 + 85% PHB	21	420	1.5	22	237	26

Tabla 41.- Combinación de coagulantes FL4540 y PHB variando la cantidad de coagulante agregado.

De las combinaciones analizadas, se utilizaron para compararlas con algunas obtenidas en días anteriores a la prueba, teniendo como resultados lo siguiente:

No. Prueba	Coagulante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
12	10% FL4540 + 90% SA	36	720	1.5	48	512	66
13	15% FL4540 + 85% SA	36	720	1.5	52	507	71
14	10% FL4540 + 90% PHB	12	240	1	37	409	52
15	15% FL4540 + 85% PHB	12	240	1	31	360	42

Tabla 42.- Comparación de mezcla FL4540+SA y FL4540+PHB.

Una vez con los resultados presentados, se prosiguió a realizar la última prueba de floculantes, con la finalidad de determinar de manera completa el polímero más satisfactorio para la sustitución en el tratamiento.

Como dato importante, tanto en las pruebas realizadas anteriormente como en las presentadas en este día, los porcentajes de mezcla de FL4540+PHB que favorecieron la remoción de los parámetros de campo fueron de 15%+85%, por otro lado; con respecto a la mezcla FL4540+SA el porcentaje corresponde a 10%+90%.

Considerando estos porcentajes, se muestran los resultados obtenidos comparando 4 floculantes diferentes en cada una de las combinaciones.

No. Prueba	15%FL4540 + 85% PHB 240 ppm	Floculante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
19	FO4190	1.5	3	1.5	24	324	33
20	FO4290	1.5	3	1	19	320	36
21	FO4650	1.5	3	1	16	285	27
22	FO4800	1.5	3	1	15	329	32

Tabla 43.- Comparación de floculantes en mezcla 10%FL4540+90%PHB.

No. Prueba	10% FL4540 + 90% SA 720 ppm	Floculante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
23	FO4190	1.5	3	3	27	313	41
24	FO4290	1.5	3	3	28	350	47
25	FO4650	1.5	3	2	7	223	24
26	FO4800	1.5	3	1	9	132	12

Tabla 44.- Comparación de floculantes en mezcla 10%FL4540+90%SA.

Haciendo una comparación gráfica entre los floculantes utilizados en cada una de las mezclas, se pudieron realizar los gráficos 29 y 30 para la solución 15%FL4540+85%PHB.

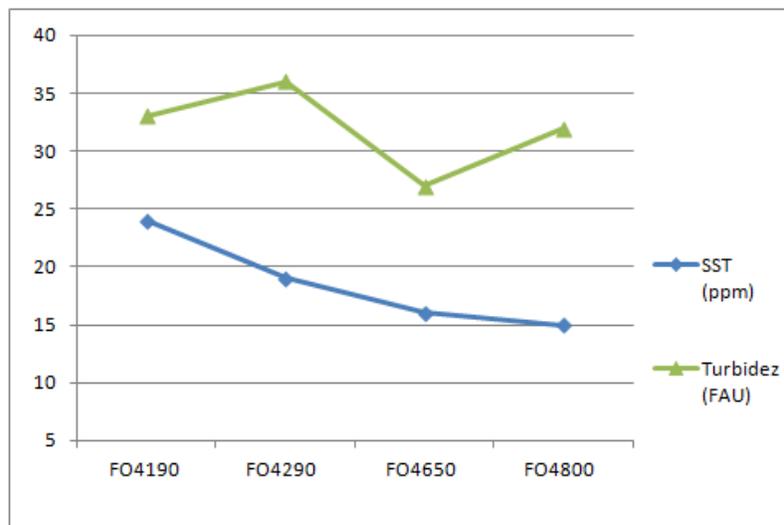


Gráfico 29.- Cantidades de SST y Turbidez residual obtenida de la comparación de floculantes en mezcla FL4540+PHB.

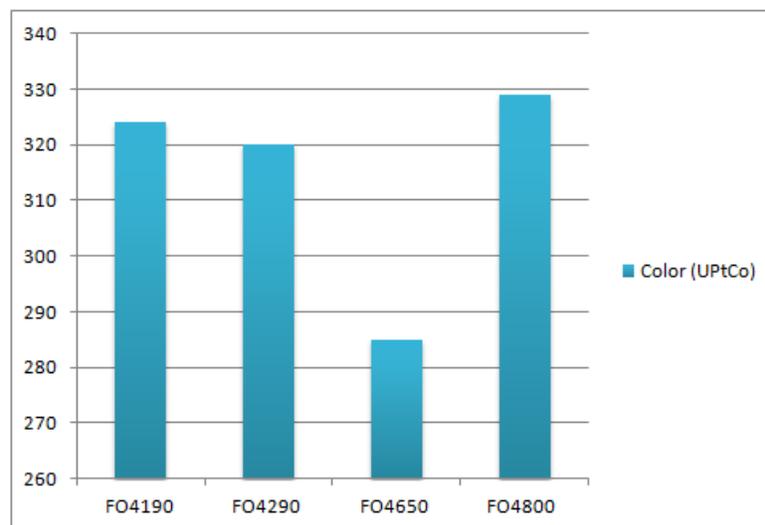


Gráfico 30.- Comparación de color residual obtenido de la mezcla FL4540+PHB comparando diferentes floculantes.

Haciendo la comparación respectiva con pruebas realizadas el 31 de Enero, el mejor resultado obtenido con relación a la cantidad de color residual corresponde al floculante FO4650 en la mezcla 15%FL4540+85%PHB, que en pruebas anteriores también había presentado mejores resultados en comparación con los demás

Para la mezcla 10%FL4540+90%SA, el polímero que obtuvo mayor remoción de color corresponde al FO4800, que a pesar de no ser el único que presenta una remoción aceptable, si es mayor en comparación con los demás floculantes.

En el caso de la mezcla 10%FL4540+90%SA se presentan los gráficos 31 y 32, donde se puede observar mas a detalle la diferencia que se presenta en cada uno de los floculantes utilizados.

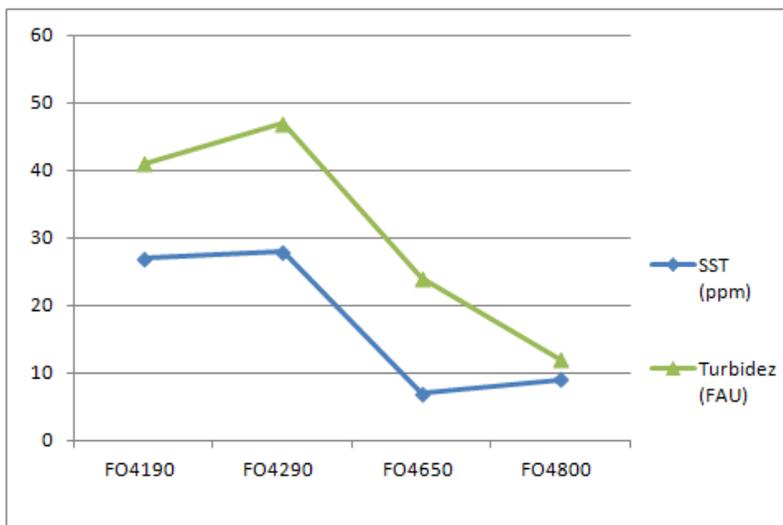


Gráfico 31.- Cantidades de SST y Turbidez residual obtenida de la comparación de floculantes en mezcla FL4540+SA.

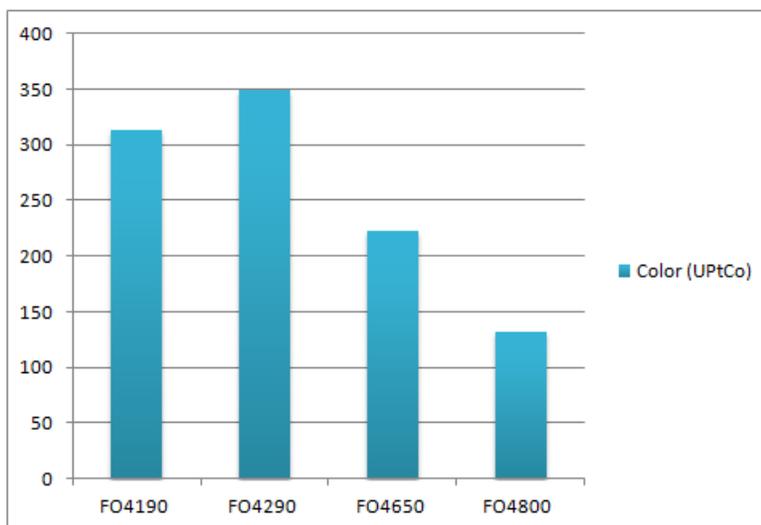


Gráfico 32.- Comparación de color residual obtenido de la mezcla FL4540+SA comparando diferentes floculantes.

- **02 de Febrero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 309
SST (ppm): 289
Color (Pt/Co): 2500

Para este día, sólo se realizó una prueba de comparación, utilizando mezclas de FL4540+SA, FL4540+PHB y P-106+O-138, este último corresponde a los insumos utilizados en el sistema de tratamiento de agua.

La primera mezcla se realizó utilizando el floculante FO4800, en la segunda se utilizaron el FO4290 y el FO4650 (*a pesar de haber seleccionado el FO4650, se decidió compararlo con otro que tuvo resultados favorables*); y por último el S-4500 que es el floculante utilizado en el sistema.



De acuerdo con la prueba, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 45, mientras que la comparación de parámetros se observan en los gráficos 33 y 34.

No.	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90%SA + FO4800	19	760	1	10	167	15
2	15% FL4540 + 85% PHB + FO4290	8.5	340	1.5	28	301	33
3	15% FL4540 + 85% PHB + FO4650	8.5	340	1.5	25	284	30
4	P-106+ O-138 + S-4500	9.9	396	3	40	438	54

Tabla 45.- Comparación de mezclas de coagulantes seleccionados con los utilizados en la planta de tratamiento.

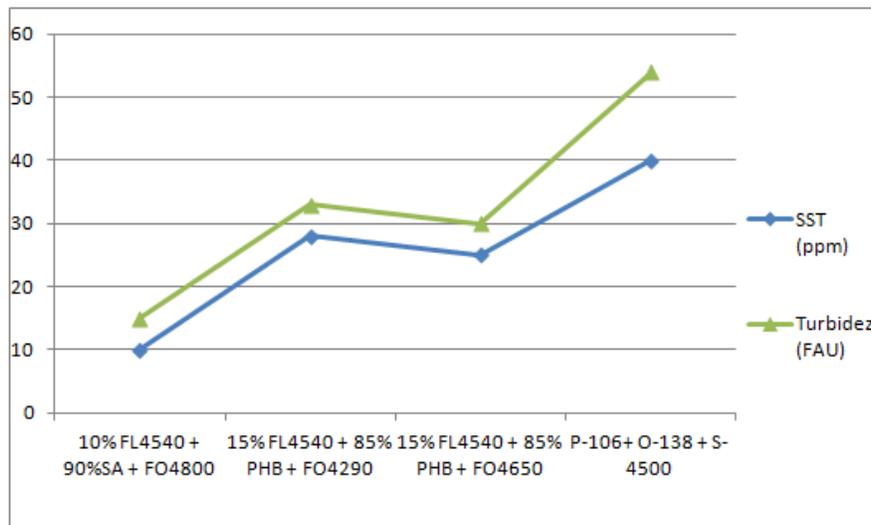


Gráfico 33.- Resultados obtenidos de SST y Turbidez de las mezclas seleccionadas.

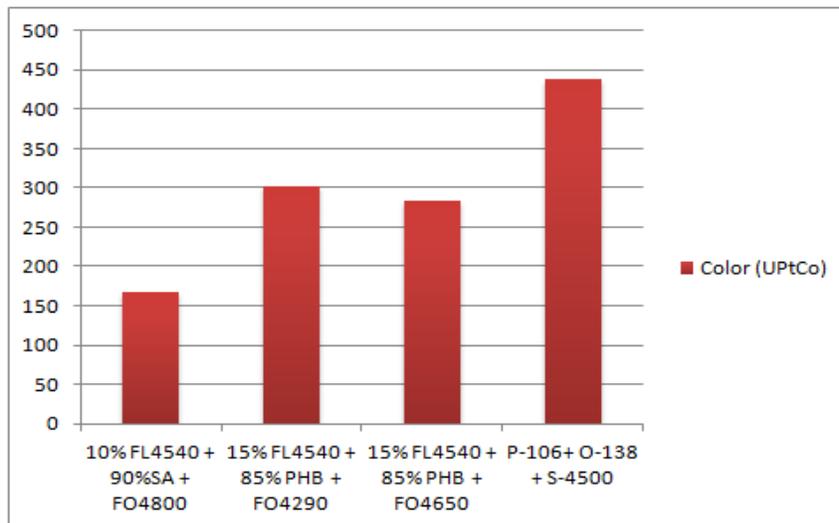


Gráfico 34.- Resultados obtenidos con respecto al color residual obtenido en las mezclas seleccionadas.

Aparentemente, la mezcla que ofrece mejores resultados con respecto a SST, turbidez y color residual corresponde a 10%FL4540+90%SA, seguido por el 15%FL4540+85%PHB. Para el caso de la segunda mezcla, estos resultados fortalecen la selección del floculante FO4650; ya que la cantidad de remoción de color es mayor en comparación con el otro floculante.



• **20 de Febrero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 259
SST (ppm): 282
Color (Pt/Co): 2160

En el caso de las pruebas realizadas durante esta fecha, se utilizaron dos insumos más en mezclas diferentes; las cuales se identifican como SICO (correspondiente a una mezcla de 10% FL4540 + 90% SICO) y SOSO (correspondiente a una mezcla de 10% FL4540 y 90% SOSO), estas combinaciones fueron preparadas de manera individual y combinadas a la hora de realizar las pruebas de jarras, utilizando como floculante el FO4650.

De estos polímeros nuevos seleccionados; se realizaron combinaciones entre el SA y el PHB a las concentraciones ya seleccionadas anteriormente; también entre los mismos SICO y SOSO, de dichas pruebas se obtienen los resultados presentados en las tablas 46, 47 y 48.

No.	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	19.5	780	1	17	169	20
2	SICO + SOSO + FO4650	10.5	420	1	51	494	60
3	SOSO + SICO + FO4650	10.5	420	1	60	484	64
4	P-106+ O-138 + S-4500	10.5	420	2	48	434	55

Tabla 46.-Comparación de mezclas de FL4540 + SA, SICO + SOSO y polímeros utilizados en planta de tratamiento.

No.	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
5	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800	19.5	780	1.5	37	383	48
6	SICO + SOSO + FO4650	12	480	1.5	37	425	51
7	SICO + (10% FL4540 + 90% SA) + FO4650	10.5	420	1.5	51	525	61
8	P-106+ O-138 + S-4500	10.5	420	1.5	41	381	48

Tabla 47.- Pruebas con mezcla SICO + SOSO y SA.

No.	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
9	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800	19.5	780	1	36	382	49
10	SICO + SOSO + FO4650	12	480	1	37	425	55
11	(15% FL4540 + 95% PHB) + FO4650	7.5	300	1.5	48	442	53
12	P-106+ O-138 + S-4500	10.5	420	2	42	387	43

Tabla 48.- Pruebas con mezcla SICO + SOSO y PHB.

De los resultados obtenidos, los de la tabla 46 presentan mejores resultados son las pruebas 1 y 2, de la 47 la correspondientes a las 5 y 8 y las de la 48 la 9 y 10. Con respecto a la prueba 1, en esta se utilizó 3ppm de floculante que a diferencia de la 5 sólo se utilizaron 2 ppm. Los polímeros utilizados como nueva alternativa, presentaron resultados aceptables con respecto a la cantidad de SST y Turbidez, sin embargo las cantidades de color residual presentados se encuentran por arriba de los 400 UPt/Co.



En el gráfico 35 se muestran los datos correspondientes a las cantidades de SST y turbidez obtenidos en las combinaciones utilizadas; mientras que en el gráfico 36 se observan las cantidades de color residual. De manera significativa puede verse que la mezcla 1 es la que presenta las menores cantidades de color, SST y turbidez, seguido por las mezclas 5 y 6.

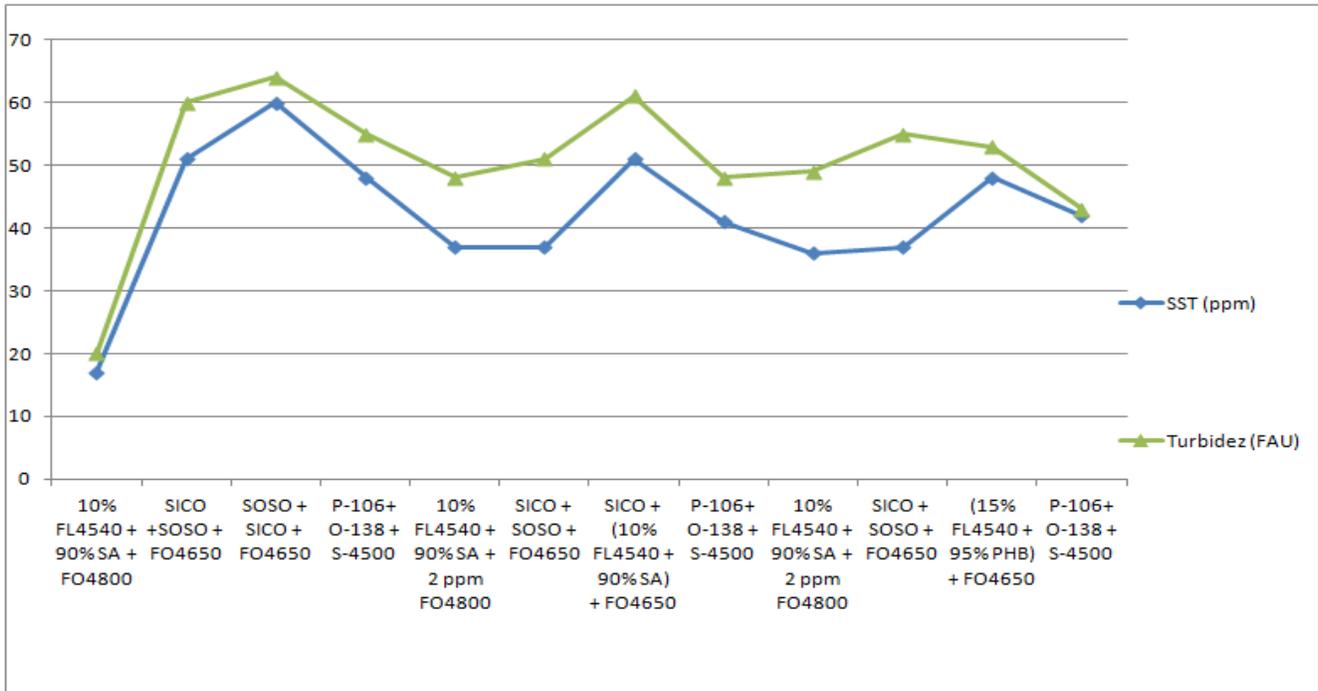


Gráfico 35.- Comparación de SST y turbidez residual de las mezclas utilizadas.

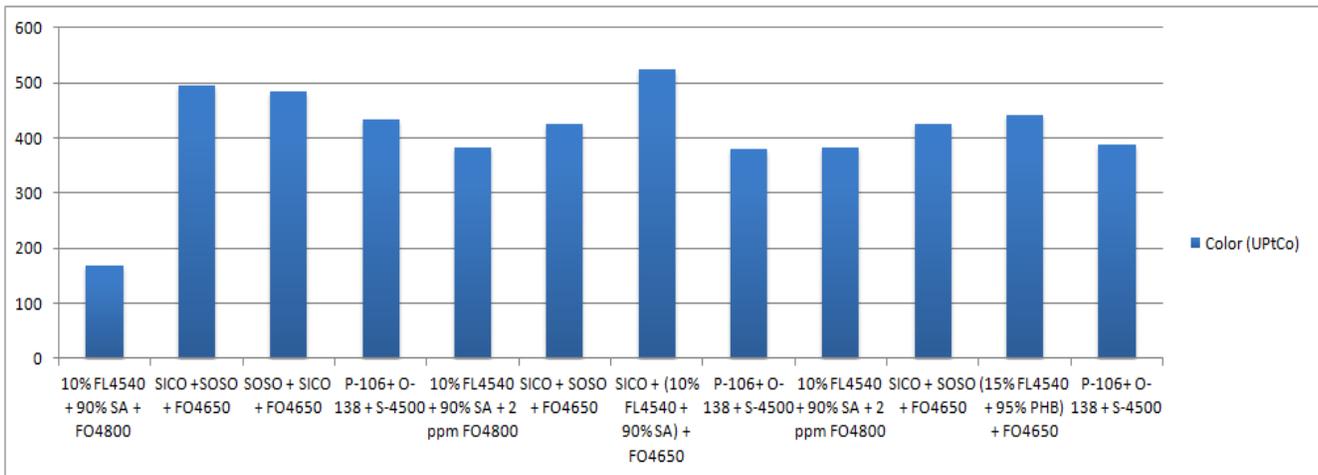


Gráfico 36- Color residual resultante de la mezclas utilizadas.

• **21 de Febrero**
Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 251
SST (ppm): 259
Color (Pt/Co): 2155



Para estas pruebas, se utilizó la mezcla correspondiente a 10%FL4540+90%SA, con la misma cantidad de coagulante pero variando las cantidades de floculante. Además se volvió a efectuar una combinación de SICO+SOSO comparándola con mezclas de FL4540+SA y FL4540+PHB (tablas 49 y 50).

No. Prueba	Mezclas	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	18	720	3	40	361	46
2	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	18	720	1	15	171	19
3	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	15	600	2	19	199	22
4	P-106+ O-138 + 3 ppm S-4500	10.5	420	3	159	1950	191

Tabla 49.- Mezclas de FL4540+SA adicionando cantidades variables de floculante, comparando con insumos de línea.

No. Prueba	Mezclas	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
5	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800	15	600	1	20	198	22
6	SICO + SOSO + FO4800	12	480	1	33	338	39
7	(10% FL4540 + 90% PHB) + FO4650	7	280	1	42	392	46
8	P-106+ O-138 + S-4500	13.5	540	1	132	1765	161

Tabla 50.- Comparación de FL4540 + SA, FL4540 + PHB y SICO + SOSO.

Para la comparación de estos datos, las mezclas 1, 2, 3, 5 y 6 presentaron datos de color residual bajo, aunque 3 correspondieron a valores menores a los 200 UPt/Co y 2 a valores mayores a 300.

De acuerdo con ello, se repitieron las pruebas con las mezclas en las cuales se obtuvieron valores menores a 200 UPt/Co de color, dándonos como resultado los datos obtenidos en la tabla 51.

No. Prueba	Mezclas	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
9	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800	15	600	1	19	205	23
10	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800	15	600	1.3	24	250	28
11	P-106+ O-138 + 3 ppm S-4500	12	480	2.5	65	915	82
12	P-106+ O-138 + 3 ppm S-4500	10.5	420	2.5	76	1150	94

Tabla 51.- Comparación de datos obtenidos de una mezcla de FL4540+SA y P-106+O-138+S-4500.

Considerando que las combinaciones presentadas tenían valores de color residual bajo, se decidió adicionar cantidades de floculantes menores a las utilizadas en la primera prueba. Como consecuencia, se presentó una remoción tanto de color como de SST y turbidez, pero los valores obtenidos fueron mayores a los que inicialmente se habían obtenido.

De acuerdo con ello, en gráfico 37, muestra que las pruebas 9 y 10 remueven de manera significativa las cantidades de color, SST y turbidez; esto en comparación con los productos utilizados actualmente dentro del sistema de tratamiento.

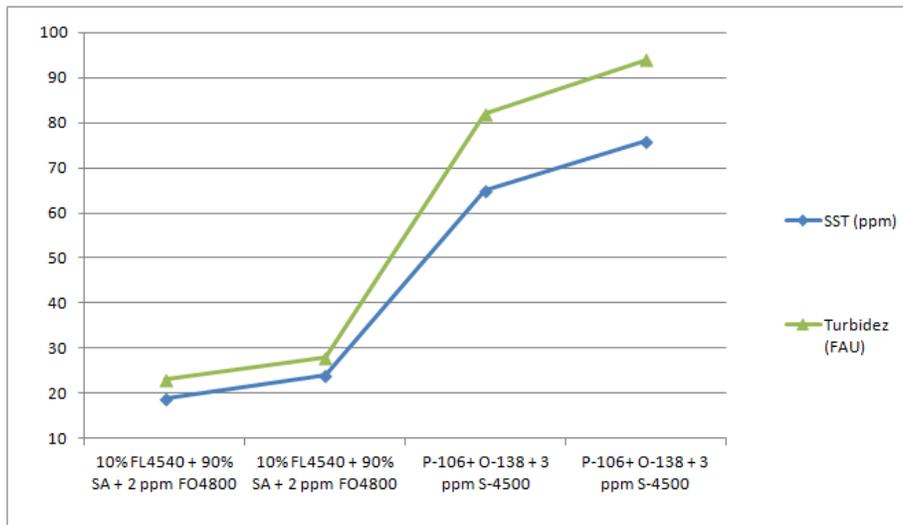


Gráfico 37.- Representación grafica de los valores obtenidos de SST y Turbidez de acuerdo con los datos de la tabla 51.

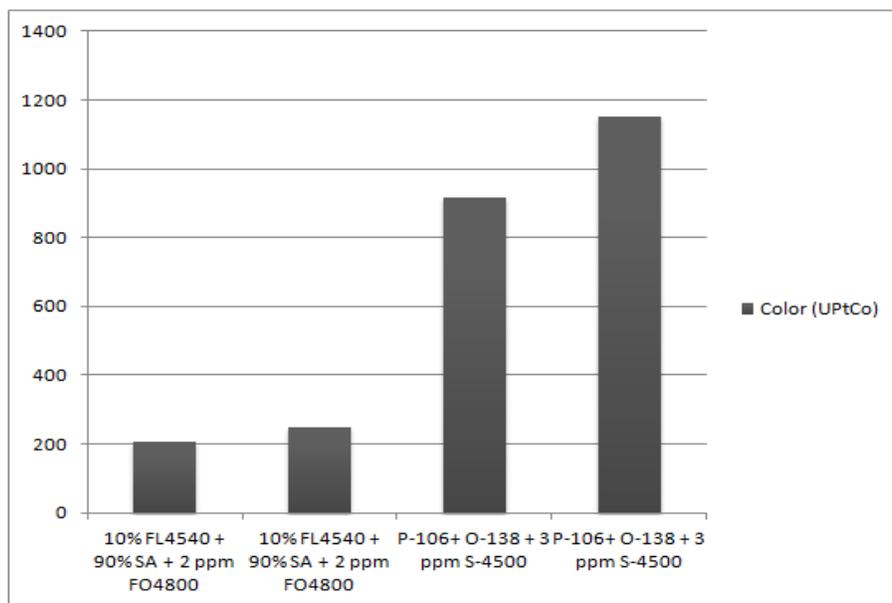


Gráfico 38.- Representación grafica del color residual de acuerdo con los valores de la tabla 51.

• **22 de Febrero**

Condiciones de agua cruda:

Turbidez (FAU): 133

SST (ppm): 114

Color (Pt/Co): 1115

Tomando en consideración las pruebas realizadas un día anterior; y considerando la variación de la cantidad de floculante agregado a las mezclas; se prosiguió a realizar pruebas con las cantidades que correspondientes a las que presentaron valores más bajos con respecto a los parámetros establecidos.

En el primero de los casos se utilizaron soluciones correspondientes a FL4540+SAFO4800 en este caso se utilizaron dosificaciones de floculante de entre 1 y



1.5, aunque también se variaron las cantidades de coagulante, teniendo como resultado los valores de la tabla 52.

No. Prueba	4 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	10	400	1.5	28	346	37
2	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	12	480	1.5	21	302	34
3	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	14	560	1	17	221	23
4	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	16	640	1	18	226	24

Tabla 52.- Mezclas correspondientes a FL4540+SA+FO4800 variando la cantidad de coagulante y floculante.

Como resultado se tiene que la mezcla correspondiente a la prueba 3 presenta valores menores en los parámetros de medición en comparación a las demás pruebas; este seguido inmediatamente por la prueba 4. Una vez realizadas estas pruebas, se sometieron las correspondientes a mezclas de FL4540+PHB+FO4650 con las mismas características que en el caso anterior; es decir, variando las cantidades de coagulantes y floculantes, dándonos como resultado los datos presentados en la tabla 53.

No. Prueba	2 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
5	15% FL4540 + 85% PHB + 2 ppm FO4650	5	200	1.5	39	411	48
6	15% FL4540 + 85% PHB + 2 ppm FO4650	6	240	1.5	37	393	46
7	15% FL4540 + 85% PHB + 2 ppm FO4650	7	280	1.5	28	358	42
8	15% FL4540 + 85% PHB + 2 ppm FO4650	8	320	1	28	319	36

Tabla 53.- Mezclas correspondientes a FL4540+PHB+FO4650 variando las cantidades de coagulante y floculante.

Para este caso; se puede notar que la prueba 8 presenta los valores mas bajos de color, aunque las cantidades de SST y turbidez sean muy parecidas que en comparación con las demás. Por ultimo, se realizaron pruebas de jarras para mezclas de SICO+SOSO+FO4650, que al igual que en los otros casos, también se realizaron variaciones de coagulantes y floculantes, dando como resultado los valores de la tabla 54.

No. Prueba	2 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPt/Co)	Turbidez (FAU)
9	SICO + SOSO + FO4650	7.5	300	2.5	59	798	74
10	SICO + SOSO + FO4650	9	360	2.5	49	735	67
11	SICO + SOSO + FO4650	10.5	420	1.5	40	477	54
12	SICO + SOSO + FO4650	12	480	1.5	35	432	44

Tabla 54.- Mezclas correspondientes a SICO+SOSO+FO4650 variando las cantidades de coagulante y floculante.

Como es notable, aquí la prueba con menor cantidad de color residual es corresponde a la numero 12, aunque los valores obtenidos presentan cantidades arriba de los 400 UPt/Co, los cuales con demasiado altos para tomarlos como una alternativa de sustitución para el tratamiento de agua.

Considerando las pruebas que tuvieron mejores resultados; se efectuaron nuevas pruebas variando un poco la dosificación de coagulantes y floculantes en las mezclas de FL4540+PHB+FO4650, SICO+SOSO+FO4650 y P-106+O-138+S-4500; de los cuales se obtuvieron los valores presentados en la tabla 55.



No. Prueba	4 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
13	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	14	560	1	17	195	22
14	15% FL4540 + 85% PHB + 4 ppm FO4650	9	360	2	19	271	26
15	SICO + SOSO + FO4650	13.5	540	1	29	367	39
16	P-106+ O-138 + S-4500	10.5	540	3	23	316	30
17	P-106+ O-138 + S-4500	10.5	540	1.5	19	241	28

Tabla 55.- Comparación de parámetros resultantes a partir de datos obtenidos en pruebas de jarras.

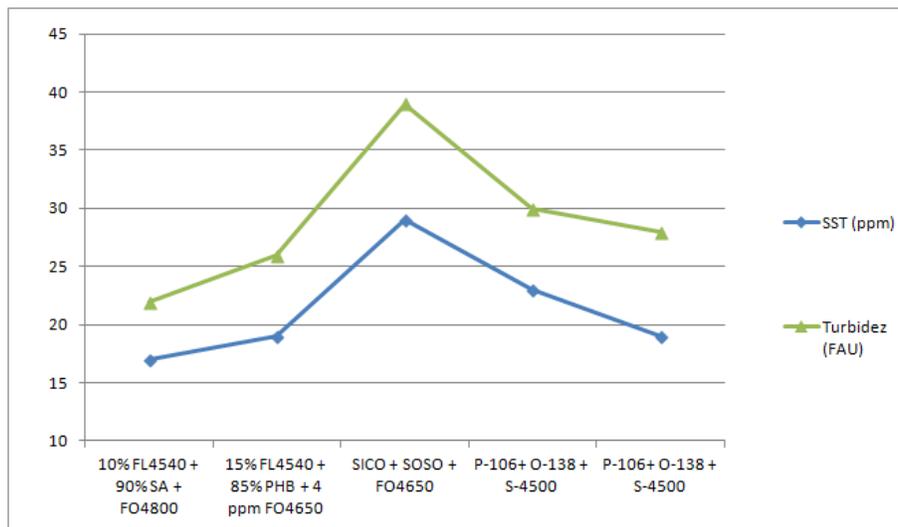


Gráfico 39.- Representación grafica de la cantidad de SST y Turbidez resultantes de acuerdo con la tabla 55.

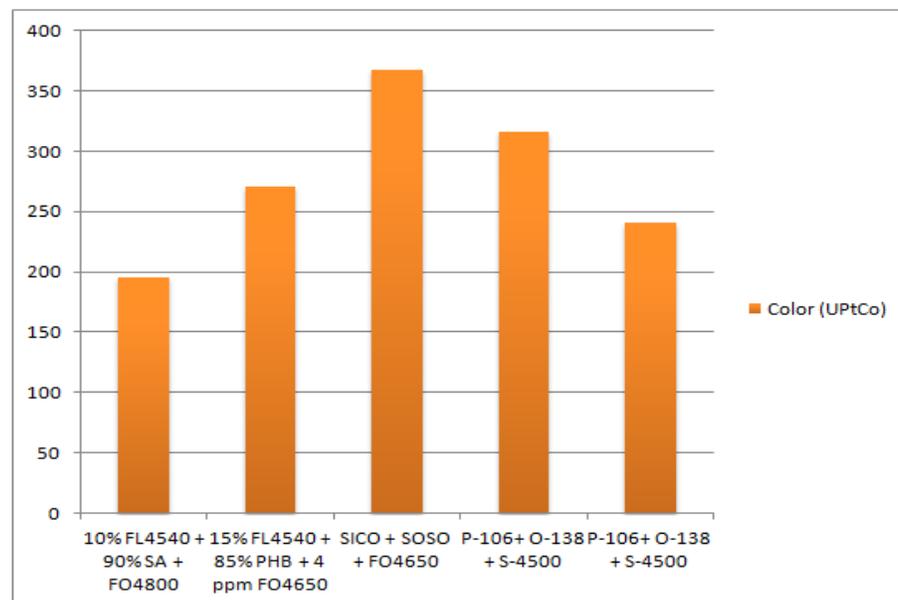


Gráfico 40.- Comparación de color resultante de las diferentes mezclas utilizadas en la tabla 55.

El gráfico 39 se puede observar las variaciones encontradas en relación a la cantidad de SST y turbidez que se presentó después de la prueba de jarras realizada con diferentes mezclas de coagulantes, quedando la mezcla 13 y 14 como las que proporcionan los mejores beneficios con respecto a estos parámetros. Sin embargo, en gráfico 40, se observa que la prueba 13 presenta un color residual por debajo de los 200 UPt/Co,



mientras que la 14 lo mantiene por arriba de los 250 UPt/Co; un así no deja de ser una buena opción para la sustitución en el tratamiento.

- **23 de Febrero**

Condiciones de agua cruda

Turbidez (FAU): 134

SST (ppm): 118

Color (Pt/Co): 1485

Considerando que la mezcla de FL4540+SA+FO4800 presenta una remoción de parámetros aceptable, se realizaron pruebas de jarras sin variar las cantidades tanto de coagulante como floculante, y se compara contra la mezcla de SICO+SOSO+FO4650; dándose los resultados presentados en la tabla 56.

No. Prueba	2 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	14	560	1	24	241	28
2	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	14	560	1	27	292	34
3	SICO + SOSO + FO4650	12	480	1.5	37	469	47
4	SICO + SOSO + FO4650	12	480	1.5	34	444	44

Tabla 56.- Comparación de resultados de mezclas de FL4540+SA+FO4800 y SICO+SOSO+FO4650.

Con la finalidad de encontrar una alternativa para remoción de color, se utilizaron soluciones de hidróxido de calcio; las cuales fueron probadas con mezclas de FL4540+SA+FO4800 a diferentes dosificaciones, de las cuales se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 57.

No. Prueba	3 PPM Floculante	Hidróxido de calcio ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
5	10% FL4540 + 90% SA+ FO4800	0	0	1	28	354	42
6	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	2	10	1	28	381	42
7	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	4	20	1	30	351	40
8	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	6	30	1	31	378	43

Tabla 57.- Datos obtenidos en mezclas de jarras aplicando cantidades de Hidróxido de Calcio a diferentes concentraciones.

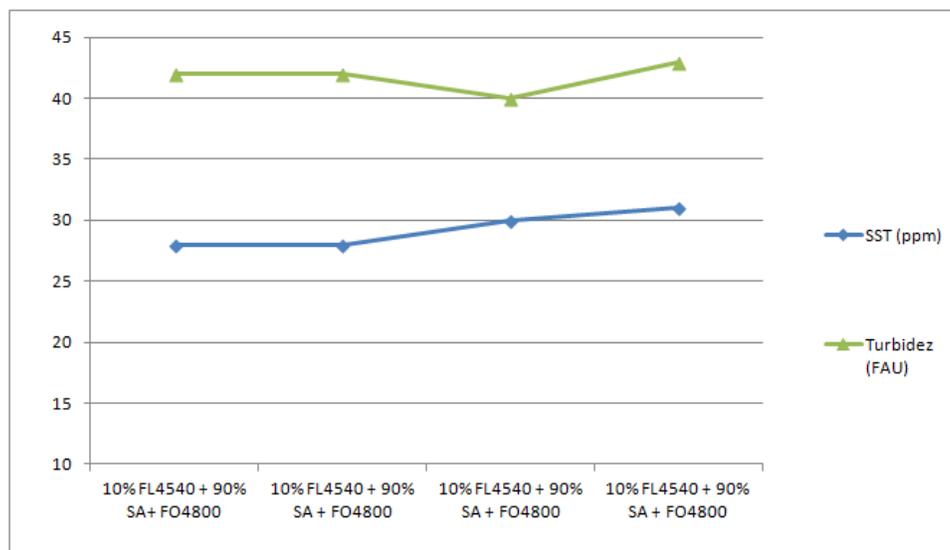


Gráfico 41.- Representación grafica de los valores presentados de SST y turbidez en la tabla 56.

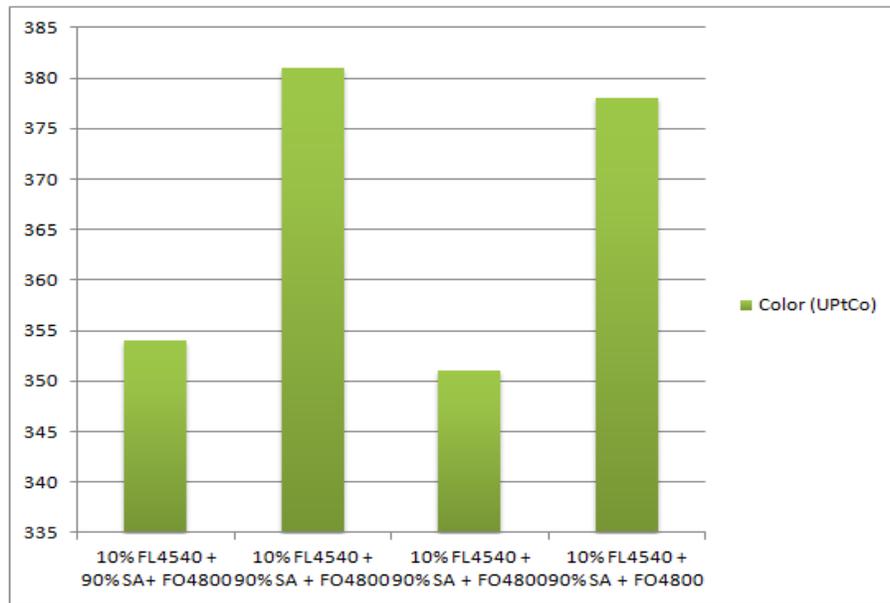


Gráfico 42.- Representación grafica de los valores presentados de color en la tabla 56.

De las 4 pruebas realizadas en donde se utilizan dosificaciones de hidróxido de calcio, la 6 y la 8 presentan valores muy alto de color residual, y la 5 y 7 mucho más bajos. Sin embargo, estos valores obtenidos son demasiado altos en comparación con las pruebas realizadas en días anteriores, además de que se encuentran muy por arriba de los 300 UPt/Co.

- **27 de Febrero**

Condiciones de agua cruda

Turbidez (FAU): 270

SST (ppm): 306

Color (Pt/Co): 2283

En estas ultimas pruebas, volvieron a utilizarse las mezclas de FL4540+SA+FO4800, FL4540+PHB+FO4650 y SICO+SOSO+FO4650; variando las concentraciones de coagulantes y floculantes en cada una de las pruebas realizadas de las cuales, aparentemente las que presentan una mejor remoción de color son las correspondientes a la primera combinación (tabla 58), seguidas de la segunda (tabla 61) y por último de las de la tercera mezcla (tablas 59 y 60).

No. Prueba	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
1	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	19	760	1	22	167	17
2	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	19.5	780	1	25	172	26
3	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	20	800	1	24	160	19
4	10% FL4540 + 90% SA + FO4800	20.5	820	1	24	135	16

Tabla 58.- Pruebas con mezcla de FL4540+SA+FO4800 a diferentes dosificaciones.



No. Prueba	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
5	SICO + SOSO + FO4650	9	360	3	136	1520	138
6	SICO + SOSO + FO4650	10.5	420	2	74	570	74
7	SICO + SOSO + FO4650	11.5	460	1	53	470	55
8	SICO + SOSO + FO4650	12.5	500	1	44	335	46

Tabla 59.- Pruebas de mezcla SICO+SOSO+FO4650 a diferentes combinaciones.

No. Prueba	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
9	SICO + SOSO + FO4650	12.5	500	3	41	358	43
10	SICO + SOSO + FO4650	13.5	540	1	35	301	40
11	SICO + SOSO + FO4650	14.5	580	1	43	370	45
12	SICO + SOSO + FO4650	15.5	620	1	41	386	47

Tabla 60.- Pruebas de mezcla SICO+SOSO+FO4650 a diferentes combinaciones (continuación).

No. Prueba	3 PPM Floculante	Coagulante ml	ppm	Floc	SST (ppm)	Color (UPtCo)	Turbidez (FAU)
13	15% FL4540 + 85% PHB + FO4560	16	640	1	38	177	36
14	15% FL4540 + 85% PHB + FO4560	17.5	700	3	55	308	43
15	15% FL4540 + 85% PHB + FO4560	19	760	3	54	271	49
16	15% FL4540 + 85% PHB + FO4560	20.5	820	3	56	325	55

Tabla 61.- Pruebas de mezcla FL4540+PHB+FO4650 a diferentes combinaciones.

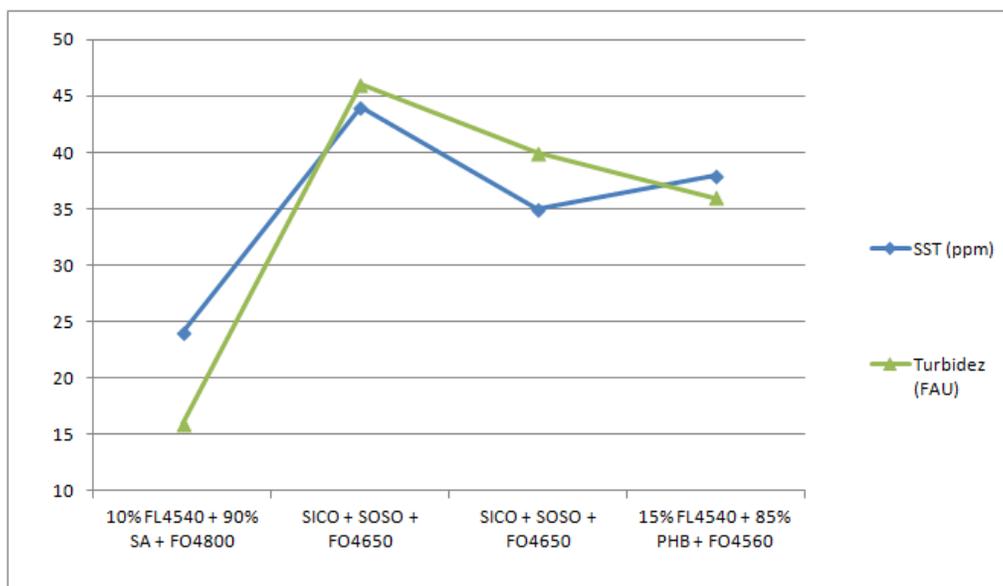


Gráfico 43.- Comparación de parámetros SST y turbidez de las pruebas de jarras.

De los datos reportados en las tablas anteriores, 4 muestras presentan los valores más bajos de SST, turbidez (Gráfico 43) y color. En primer lugar la combinación FL4540+SA presenta un color residual por debajo de los 150 UPt/Co mientras que la mezcla FL4540+PHB esta por arriba de este rango. Con respecto a la combinación SICO+SOSO los valores de color están por arriba de los 300 UPt/Co. Estas comparaciones de color se presentan a continuación en el gráfico 44.

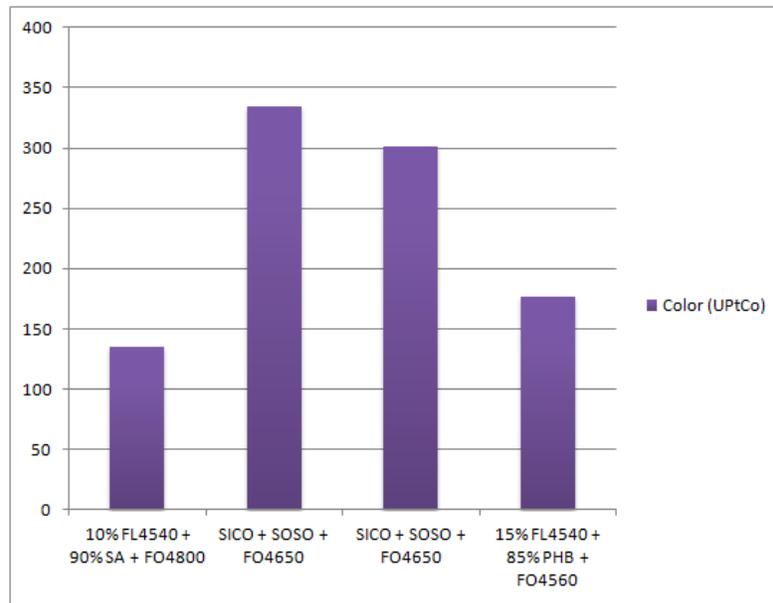


Gráfico 44.- Cantidad de color residual obtenido de las muestras utilizadas en prueba de jarras.

4.11.2. Resultados de laboratorio

A partir de los datos recopilados con las múltiples pruebas experimentales, utilizando diferentes tipos de coagulantes y polímeros, se procedió a realizar análisis de laboratorio correspondientes a la cantidad de metales que poseían cada una de las muestras, esto para poder observar las tendencias de los resultados obtenidos gracias a las variaciones del agua residual.

Las combinaciones probadas, a nivel laboratorio presentan resultados satisfactorios, que como tal pueden ser utilizados dentro del proceso; sin embargo, algunas de las combinaciones presentan cualidades más eficientes que otras.

4.11.2.1. Análisis de laboratorio en relación a metales

Aparentemente de acuerdo con las comparaciones realizadas con las diferentes mezclas, las combinaciones de FL4540+SA y FL4540+PHB son las más prometedoras; aun así se realizó una selección de pruebas con la finalidad de conocer los parámetros finales en relación a metales. En primer lugar, se tomaron varias muestras para su análisis. Las propuestas consideradas que se muestran en la tabla 62 son las siguientes:

No.	Mezcla	ppm	Floc
1	10% FL4540+90% SA+FO4800	790	1
2	15% FL4540+85% PHB+FO4650	370	1.2
3	P-106+O-138+S-4500	420	2
4	SICO+SOSO+FO4650	480	1.5
5	10% FL4540+90% SA+2 ppm FO4800	780	1.5
6	P-106+O-138+S-4500	420	1.5

Tabla 62.- Listado de propuestas para análisis de laboratorio.

Las tres primeras propuestas, fueron tomadas el día 1 de Febrero y enviadas a laboratorio certificado para su evaluación. La finalidad principal era conocer los parámetros



resultantes en materia de metales, ya que los únicos conocidos directamente en campo corresponden a parámetros como SST, color y turbidez. Además de tomar muestras de polímeros considerados para prueba, también se realizó una prueba con los insumos utilizados en operación en la planta de tratamiento; con la finalidad de comparar las condiciones que brinda la aplicación de estos y compararlos con los que se pretenden utilizar para la reducción de costos.

Las propuestas 4, 5 y 6; fueron recolectadas el día 29 de Febrero, se conservaron y emitieron posteriormente a laboratorio. En esta ocasión, se tomó en consideración la mezcla de SICO y SOSO, ya que de acuerdo a los valores obtenidos con respecto a los SST, color y turbidez se consideró la mezcla en su momento como una alternativa viable para su uso.

A continuación, en la tabla 63 se muestran las mezclas seleccionadas para someter a análisis por un laboratorio certificado, en donde no solo se pretende conocer de manera más exacta las cantidades correspondientes a color, SST y turbiedad; sino también las cantidades correspondientes a metales (tabla 64).

No	Mezcla
1	15% FL4540 + 85% SA + FO4800
2	15% FL4540 + 85% PHB + FO4650
3	P-106+ O-138 + S-4500
4	FL4540 + SICO/SOSO + FO4650
5	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800
6	P-106+ O-138 + S-4500

Tabla 63.- Combinaciones para análisis de laboratorio.

Parámetros	1	2	3	4	5	6
SST (mg/L)	5	6	11	37	37	41
Color (Pt/Co)	162	188	177	425	383	381
Turbidez (FAU)	15	11	11	51	48	48
pH	7.04	8.13	7.89	7.49	7.87	-
Temp. (°C)	-	-	-	21.8	20.0	20.8
Cond. (µs/cm ³)	5.4	5.48	7.89	3699	-	2966
Al (mg/L)	0.479	0.497	0.151	0.15	0.62	0.06
Cd (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.002	<0.002	<0.002
Pb (mg/L)	0.062	18.58	<0.08	0.03	<0.01	<0.01
Fe (mg/L)	0.188	3.06	0.787	0.16	0.095	0.12
Zn (mg/L)	0.119	29.98	0.265	6.39	0.0059	0.0195
Hg (mg/L)	0.002	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
P (mg/L)	3.01	6.1	6.89	-	-	-

Tabla 64.- Resultados de análisis de laboratorio certificado.

Después de todo este análisis cualitativo de los diversos coagulantes y polímeros disponibles, se observa de una forma concienzuda y determinante la diferencia entre cada uno de estos productos para el problema en cuestión, de los cuales las combinaciones correspondientes a FL4540+SA+FO4800 y FL4540+PHB+FO4650 son las que más prometedoras; por lo que hay que tomarlas en cuenta para la aplicación en planta; confirmando que en cuestión a la remoción de SST y metales los resultados lo suficientemente cercanos a los valores requeridos o por lo menos se remueve una cantidad de color considerable.

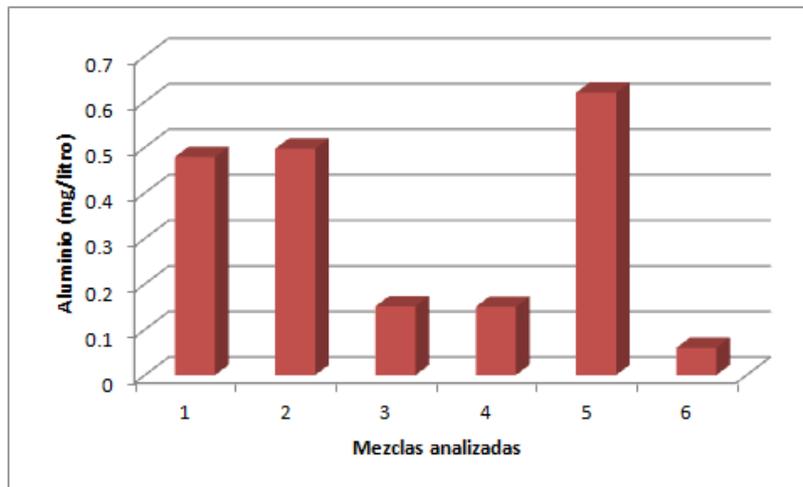


Gráfico 45.- Aluminio residual de las mezclas analizadas.

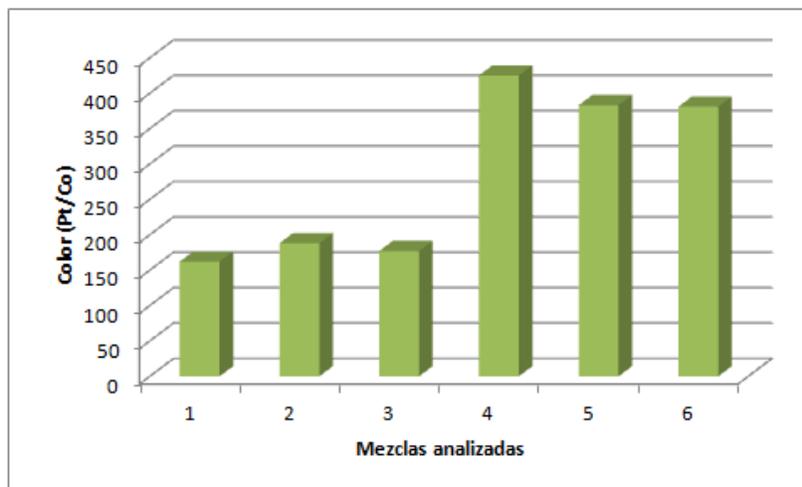


Gráfico 46.- Color residual de las mezclas analizadas.

A pesar de que la mezcla analizada correspondiente a SICO/SOSO+FO4650 tiene una cantidad menor de descarga de aluminio en relación con las demás mezclas analizadas; esta no se toma como una opción viable para su utilización debido principalmente a la cantidad de color remanente que se deja en la muestra (gráfico 46).

Uno de los problemas más graves que se encuentra en las mezclas; y de forma peculiar la mezcla que contiene SA (sulfato de aluminio), es el aluminio remanente que se resulta en el agua tratada (gráfico 45). Actualmente existen diferentes formas de eliminar este material, una de ellas es mediante tratamiento químico; ya sea con la incorporación de algún ácido o hidróxido el cual es dosificado generalmente antes de la aplicación de coagulantes y polímeros en el tratamiento fisicoquímico. Estas soluciones suelen aumentar los costos de operación de manera mínima; debido principalmente a los costos de venta en los que se encuentran; pero sin embargo aumentan así la eficiencia de remoción de metales de acuerdo a la adaptación del agua tratada, disminuyendo o aumentando el pH.

Para comprobar el funcionamiento de estos métodos, se incorporaron ciertas dosis de ácido sulfúrico al 98% e hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), con la finalidad de encontrar un



medio mas adecuado para la remoción de color, además de que los polímeros funcionan mejor con ciertas características de pH. Este funcionamiento fue aplicado para soluciones compuestas de FL4540+SA+FO4800, ya que de acuerdo a los análisis realizados anteriormente; esta presento resultados que pueden cumplir con la descarga requerida. Para obtener una mezcla de comparación con los diferentes parámetros, también se analizaron mezclas con polímeros utilizados en línea de proceso (*tabla 65*).

#	Mezcla
1	P-106+ O-138 + S-4500
2	P-106+ O-138 + S-4500 pH 8.15
3	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+Ca(OH)₂
4	10% FL4540 + 90% SA + FO4800 pH 8.25
5	10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+H ₂ SO ₄ pH 7.34
6	10% FL 4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+H ₂ SO ₄ pH 7.49
7	10% FL 4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800 pH 8.52

Tabla 65.- Listado de muestras para análisis con pH modificado.

Parámetros	1	2	3	4	5	6	7
Fecha	21-Feb	22-Feb	23-Feb	23-Feb	21-Feb	22-Feb	21-Feb
SST (mg/L)	65	19	30	27	19	17	24
Color (Pt/Co)	60	60	200	90	90	200	150
Turbidez (FAU)	82	28	40	34	23	22	28
pH inicial	8.52	8.15	8.28	8.25	7.34	7.49	8.52
Al (mg/L)	0.94	<0.06	0.39	0.41	0.16	0.17	0.44
Cd (mg/L)	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Pb (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.036	<0.01	<0.01
Fe (mg/L)	1.6	1.1	0.64	0.59	0.13	0.17	0.32
Zn (mg/L)	0.0291	0.044	0.0088	0.089	0.0134	0.0125	0.0223
Hg (mg/L)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

Tabla 66.- Resultados de laboratorio certificado.

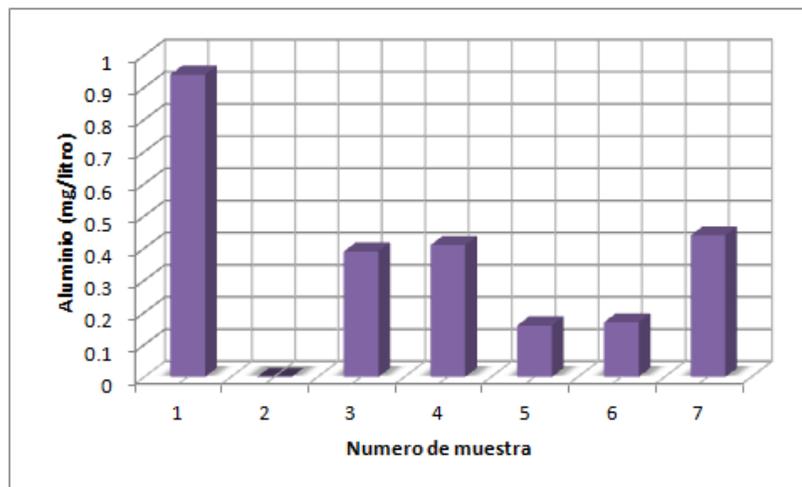


Gráfico 47.- Comparación de muestras con relación al aluminio residual.

Como se puede observar, cuando se varía el pH con ácido sulfúrico no solo se obtiene una mejor función de los coagulantes, sino que también una remoción en metales como fierro y aluminio, dejando niveles bajos de los mismos (*gráfico 47*). Por otro lado, al aplicar soluciones de hidróxido de calcio, además de remover pocas cantidades de metales, la cantidad remoción de SST es mínima; debido al desequilibrio de cargas que presenta en la presencia de los coagulantes. (**Ver anexo B**)



4.12. Economía

Normalmente el precio es el factor más importante para la selección de un coagulante. Esto no significa que el precio por kg contra otro coagulante sería más barato, sino que el costo global del tratamiento debe de ser más económico. Esta evaluación es normalmente un trabajo complicado en la planta, que tiene que ser realizada por el operador, considerando los siguientes aspectos:

- ♣ *Costo de coagulante*
- ♣ *Dosis de coagulante*
- ♣ *Costo de polímero*
- ♣ *Dosis de polímero*
- ♣ *Costo de ayudantes de filtración*
- ♣ *Agua perdida en el lavado de los filtros*
- ♣ *Costo del ajuste de pH*
- ♣ *Costo de desinfección*
- ♣ *Producción de lodo*

Es recomendable que el operador, como cliente, haga el esfuerzo para estudiar y entender la estructura de los costos y el precio de los coagulantes, incluyendo: materias primas, fletes, empaque y almacenamiento del producto, para tener el conocimiento suficiente de cuales pueden ser los puntos principales de mejoramiento en el proceso desde el punto de vista técnico y económico.

Como finalidad principal de los análisis de laboratorio realizados se pretende una disminución de costos de operación con la sustitución de insumos químicos dentro del tratamiento de aguas residuales. De acuerdo con lo estipulado por los diferentes operadores encargados de la planta de tratamiento de aguas residuales, el costo de operación de la planta corresponde a un valor de 3 pesos por m³, del cual sólo este costo corresponde directamente a la aplicación de insumos.

Para las características planteadas, el flujo del sistema de acuerdo a diseño es de 250 L/seg, sin embargo; de la capacidad total solo se utiliza en promedio un flujo de 200 L/seg.

Por otro lado, se consideró la utilización de la mezcla correspondiente a 10%FL4540 + 90%SA +FO4800, utilizando 800 ppm (*mg/L*) con respecto a la mezcla de coagulante y 0.96 ppm con respecto al polímero de ayuda de floculación. De acuerdo a ello; se realizó una consulta con alguna empresa encargada de comercializar los polímeros para prueba, proporcionando la información con respecto a los costos de productos (*tabla 67*):

Producto	Costo
SA	\$ 15.00 Kg
FL4540	\$ 23.04 Kg
FO4800	\$ 61.44 Kg
H ₂ SO ₄	\$ 4.3 Litro

Tabla 67.- Costos de productos.

Cabe mencionar que el sulfato de aluminio es un coagulante muy conocido y puede ser adquirido por diferentes empresas que tengan giros relacionados a la venta de insumos para tratamiento de aguas, de igual manera el ácido sulfúrico. Por otro lado, los FL4540 y



FO4800 son polímeros que pueden ser considerados como insumos de venta exclusiva por algunas empresas.

Ahora, tomando en cuenta los costos proporcionados, además de los porcentajes y las ppm utilizadas dentro de las pruebas experimentales para uso, se determinó el costo aproximado de operación siguiente (**Ver anexo A**):

- ✓ SA (Sulfato de Aluminio): \$ 1.63 pesos por m^3
- ✓ FL4540 (Polidacma): \$ 0.28 pesos por m^3
- ✓ FO4800 (Polímero de ayuda de floculación): \$ 0.0091 pesos por m^3

Con respecto al ácido sulfúrico, no se determina un costo ya que no se pretende utilizar por decisión del personal responsable. Por otro lado, haciendo el comparativo del costo generado con las pruebas y el costo producido por los insumos utilizados anteriormente, se tiene una disminución del costo por m^3 de 33%, considerando que el costo original es de 3 pesos por m^3 y el obtenido por las pruebas con nuevos polímeros es de 2 pesos por m^3 (costo calculado aproximado de 1.91 pesos por m^3).

Es importante hacer mención de que estos costos son aproximados, ya que la cantidad de insumos utilizados en pruebas de laboratorio varían de manera significativa a los que pueden utilizarse en un sistema de tratamiento real; esto debido principalmente a los cambios de dimensión entre una prueba de jarras además de otras consideraciones como el flujo, tiempos de retención y los sistemas de dosificación.



5.- Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

De acuerdo a lo presentado en este proyecto, y después de hacer diferentes comparaciones con diferentes mezclas de polímeros tanto nuevos como los utilizados en la línea de tratamiento de aguas; se puede decir que la mejor opción de insumos corresponde a la combinación de FL4540+SA+FO4800 con ayuda de una cierta cantidad de ácido sulfúrico (*aproximadamente 2 ml a nivel laboratorio con concentración del 98%*) incorporado con la finalidad de retirar la mayor cantidad de metales posible; esto en relación a los resultados arrojados al hacer las evaluaciones correspondientes tanto en practicas de laboratorio en campo como en las obtenidas por medio de un laboratorio certificado.

- 1 P-106+ O-138 + S-4500
- 2 P-106+ O-138 + S-4500 pH 8.15
- 3 10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+Ca(OH)₂
- 4 10% FL4540 + 90% SA + FO4800 pH 8.25
- 5 10% FL4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+H₂SO₄ pH 7.34**
- 6 10% FL 4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800+H₂SO₄ pH 7.49
- 7 10% FL 4540 + 90% SA + 2 ppm FO4800 pH 8.52

Parámetros	Condiciones requeridas	Mejor resultado	% Remoción
pH (U)	6.5-7.5	7.34	97.8%
SST (mg/L)	30	19	100.0%
Color (Pt/Co)	15	90	-83.0%
Aluminio (mg/L)	0.05	0.16	-31.2%
Cadmio (mg/L)	0.004	<0.002	100.0%
Plomo (mg/L)	0.03	0.036	100.0%
Fierro (mg/L)	1	0.13	100.0%
Zinc (mg/L)	0.02	0.0134	100.0%
Mercurio (mg/L)	0.0005	<0.001	100.0%

Considerando como opción la mezcla mencionada se obtiene una disminución de costo de aproximadamente 33 % por m³ en comparación con el costo original presentado en el proceso de tratamiento, eso sin tomar en cuenta la cantidad de ácido sulfúrico. Ahora, las cantidades utilizadas en laboratorio pueden variar de manera considerable en la aplicación directa en una planta de tratamiento; esto debido a que las condiciones de operación, las dimensiones de los equipos, además del flujo, los tiempos de retención y los tipos de sistema de dosificación.

En este punto, es muy importante mencionar, que aun con la mezcla indicada *algunas de las condiciones de descarga no entran de acuerdo a los requerimientos solicitados en el objetivo del proyecto*; como es el caso notable del color y del aluminio residual, sin embargo, las cantidades de obtenidas son aptas para ser enviadas a un tratamiento terciario, el cual consiste en trenes de filtración de arena y carbón; aunque se debe de tener un especial cuidado en la cantidad de metales que pudiera existir al final del sistema debido a que puede ser en determinado momento un factor perjudicial dentro del tren de



tratamiento debido a que este tendrá como objetivo eliminar el exceso de color, cierta cantidad de metales, entre otros parámetros para llegar así a condiciones deseadas.

Por otro lado, el objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios, y en este caso en particular, del tratamiento fisicoquímico utilizado antes del tratamiento terciario. De acuerdo a ello, la finalidad de obtener la calidad de agua a la descarga con respecto al color y disminución de la cantidad de metales remanentes esta fijada a obtenerse con ayuda de los trenes de filtración.

En esta situación en particular, el tipo de filtración que se utiliza corresponde a medios granulares (*filtros de arena y carbón activado*) con flujo descendente (*es decir, de arriba hacia abajo*). El problema principal que puede presentarse en las pruebas es que los medios filtrantes con los que están empacados los filtros hayan perdido eficiencia, debido principalmente a su excesivo uso y mal mantenimiento con respecto a su lavado, dando como resultado una disminución en el área de paso de flujo además de una desmejora en la calidad del efluente, acompañado de pérdida de medio filtrante.

En otro orden de ideas, es importante mencionar que, con la prueba de jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación de una planta de tratamiento. Sin embargo, dado el pequeño volumen que tienen los vasos, en comparación con el gran volumen que presentan los tanques reales; la prueba constituye una representación parcial. Las razones para esto son de orden físico y químico y, entre otras; las siguientes:

- a. En los reactores existe un flujo continuo; mientras que en las jarras no hay un flujo como tal. Esto hace que, al aplicar en el sistema los coagulantes y polímeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual; debido principalmente a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que en la otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la prueba de jarras el agua queda retenida todo el tiempo que dura el ensayo.
- b. La escala de las jarras no guarda una relación con la escala del floculo. Por lo tanto la proporción entre la escala de la turbulencia que se produce en jarras con relación a la que se produce en el reactor y el tamaño de los flóculos es diferente, lo que afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.
- c. La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa del agua pueden ser mucho mejor controlados en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento, aun más si no se tiene el equipo adecuado.

No obstante estas deficiencias, la prueba de jarras sigue siendo el método más usual de los que hasta ahora se dispone para el control de los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación. Hay que tomar en cuenta, que el hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que, por desgracia, suele ser bastante común.



Recomendaciones

Con respecto a la realización de las diferentes pruebas experimentales, se suscitaron varios acontecimientos de los cuales es importante tomar en cuenta para eventualidades futuras y evaluaciones con el mismo método para una mejor obtención de resultados.

La mayoría de los equipos comerciales olvidan un detalle importante que es la causa de muchos resultados erróneos, y corresponde a la adición de insumos a la hora de la ejecución de prueba de jarras. La adición de los reactivos químicos debe de realizarse en un tiempo efectivo e igual si se efectúa una comparación de jarras; esto debido a que en la mayoría de los casos la velocidad de adición de los reactivos es demasiado lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidez para avanzar con la dosificación.

Para la realización de las pruebas, también se debe de considerar tener una jarra testigo en cada una de las comparaciones con dosificaciones diferentes. La prueba testigo juega un papel muy importante *que desafortunadamente no se tomó en cuenta dentro de las pruebas experimentales de este proyecto*, ya que ésta; muestra cuales con la modificaciones que llega a sufrir una muestra de agua cruda antes de una prueba de jarras y después de ella, dando a conocer las condiciones de cambio con respecto a los parámetros de campo medibles en laboratorio.

Otro factor importante que puede ahorrar mucho tiempo de evaluación y proporcionar mejores resultados corresponde a conocer la naturaleza de los reactivos utilizados. Es muy importante determinar cuáles son las condiciones de pH, temperatura, etc., en que un coagulante puede remover más cantidad de color; ya que este puede tener variaciones de remoción debido a las condiciones en las que se encuentre trabajando en el sistema, además de que puede ser factor importante en determinar la cantidad total de insumo a utilizarse.

Por otro lado, sería factible realizar una adición en el sistema de ácido sulfúrico, ya que este ayuda a modificar las condiciones del agua cruda con respecto al pH y favorece el trabajo de los coagulantes para la remoción de ciertos parámetros



Bibliografía

- [1] (1999). *Especificación técnica para proyecto de obras. Simbología de equipo de proceso. P.2.0401.01. 1ª ed.* Subdirección de tecnología y desarrollo profesional.
- [2] Aguirre Rodríguez, M. D. y Torres Solorío, O. A. (2005). *Evaluación del tratamiento de aguas residuales municipales para el uso industrial en torres de enfriamiento en el contexto del desarrollo sustentable.* Tesis de Licenciatura. Fes Zaragoza. UNAM.
- [3] Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua.* 3ª ed., (Tomo 1 y 2), Ed. Mc Graw Hill.
- [4] Ávila, Sánchez C. A. y Moreno, Álvarez J. R. (2005) *Uso y reúso del agua en la ciudad de México, una solución al abasto.* Trabajo publicado por la Universidad Autónoma Metropolitana, en colaboración con el Prof. Fernando Sancén Contreras.
- [5] Castillo Escalante, I. (2003). *Problemas de calidad del agua en México.* Publicación del seminario sobre instrumentos económicos para cuencas ambientales. Instituto nacional de ecología. Pág. 30-34.
- [6] *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.* Título primero: Capítulo I de las Garantías Individuales. Artículo 27. Ed. Alco. Pág. 22-23.
- [7] Cortina Domínguez, C.F. y Márquez Ortiz, R. (2008). *Alternativa de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.* Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA). IPN.
- [8] Echavarieta Albiter C. (2005). *Evaluación y diseño de una planta de tratamiento de agua municipal para alimentación a calderas en el esquema de desarrollo sustentable.* Tesis de Maestría. Facultad de Química. UNAM.
- [9] Flores Torres, G. E. (2004). *Evaluación de la contaminación generada por el vertido de aguas residuales provenientes de la industria textil en Zinapécuaro, Michoacán.* Tesis de Maestría. Escuela Superior de Ingeniería Textil. IPN.
- [10] García Colín, L. y Bauer Ephrussi, M. (1996) *Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable (el caso de México).* Programa Universitario de Energía, UNAM. Pág. 92.
- [11] Garret, H. (1968). "The tragedy of the commons". Science, Vol.162. No. 3859. Pág. 1243-1248. Artículo.
- [12] Gil Juárez, A. (2005). *Ingeniería conceptual y básica del tratamiento de aguas residuales domésticas.* Tesis de Licenciatura. Fes Zaragoza. UNAM
- [13] Gómez Rojas, J. C. y Márquez Huitzil, J. (2001). *Geografía.* 3ª ed., 3ª reimp., Publicaciones Cultural. Pág. 116-118.
- [14] Higashida Hirose, B. Y. (1996). *Ciencias de la salud.* 3ª ed., Editorial. Mc Graw Hill. Págs. 5, 405-407.
- [15] Ignacio Funes, C. (2002). *Geografía general.* Decimoquinta edición. Ed. Limusa. Pág.131-138.
- [16] *Indicadores para la evaluación del desempeño ambiental.* (2000). Instituto nacional del ecología, dirección general de gestión e información ambiental. SEMARNAP. 1ª ed., ISBN: 968-817-460-2. Pág. 113-116.
- [17] Jaimes Castro, C.L.; Vega Eustaquio, J. y Pineda Celis, J. (2009). *Manual de procedimientos de operación y mantenimiento preventivo para la planta de tratamiento de aguas residuales del*



- centro comercial Galerías Coapa*. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME). IPN.
- [18] Jardon U. Juan J. (1995). *Energía y Medio Ambiente una perspectiva económica y social*. Edit. UNAM, México. Pág. 100.
- [19] Maskew Fair, G. (1996). *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales (Ingeniería sanitaria y de aguas residuales)*. Vol. 2. Decima reimp., Ed. Limusa.
- [20] Metcalf & Eddy, Inc. (1975). *Report to national commission on water quality on assessment of thechnologies and costs for publicity owned treatment works*. Vol. 2 realizado según la public law 92-500. Boston.
- [21] Metcalf & Eddy, Inc. (1994). *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Traductor Juan de Dios Trillo Montsoriu. 3ª ed., Ed. Labor S.A.
- [22] Metcalf & Eddy, Inc. (1996). *Ingeniería, tratamiento y disposición de aguas residuales*. 2ª ed., Ed. Mc Graw Hill. México.
- [23] Münch Galindo, L. (2002). *Métodos y técnicas de investigación*. 2ª ed., 10ª reimp, Ed. Trillas. Pág. 35-43, 81-90.
- [24] Pérez, Carreón J. y Castro de Esparza, M. L. (1981). *Manual de instrucción. Procesos unitarios-Ensayos de laboratorio-Determinación de variables químicas*. Programa regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la calidad del agua. CEPIS.
- [25] Ramírez Cortina, R. C. (1991). *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*. México.
- [26] Rodríguez, A. J. (2002). *Arranque y operación de reactores anaerobios*. Universidad del Valle de Cali, Colombia. Artículo.
- [27] Walter Weber, Jr. (1979). *Control de calidad del agua. Procesos fisicoquímicos*. 1ª ed., 1ª reimp., Ed. Reverte.
- [28] Wesley W. Eckenfelder, Jr. (1989). *Industrial water pollution control*. 2ª ed., Ed. Mc Graw Hill. Pag. 40-109.
- [29] Fair, Gordon M., Geyer, J., Okun, D. (1973). *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Vol. 1 y 2. Ed. Limusa. México.
- [30] De la Cruz, Hernández M. (2012). *Muestreo, preservación de muestras y caracterización de aguas residuales*. Documento publicado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, correspondiente al área de Química Ambiental.
- [31] NMX-AA-093-SCFI-2000.- Análisis de agua-Determinación de la conductividad electrolítica-Método de prueba.
- [32] NMX-AA-045-SCFI-2001.- Análisis de agua-Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
- [33] NMX-AA-038-SCFI-2001.- Análisis de agua-Determinación de color turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
- [34] "Agua". La Jornada, edición especial. México. (2005). Pág. 12, 208.
- [35] "Información especializada en ecología y medio ambiente". Revista Tecnología Ambiental, edición especial. México. (2006). Pág. 12.



Documentos y páginas electrónicas

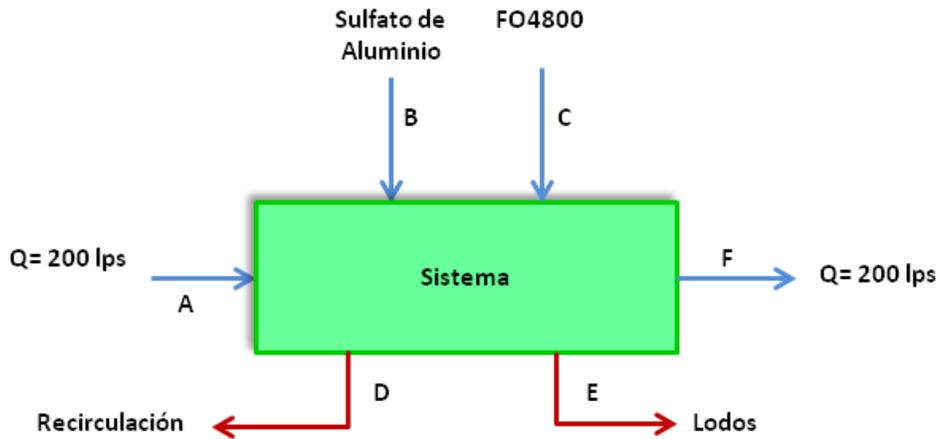
- [35] XXII Congreso de Centro América y Panamá de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. "Superación Sanitaria y Ambiental: El reto". *Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro*. (2005). Fecha de consulta: 08 de Octubre del 2012. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia18.pdf>
- [36] Acciones universitarias a favor del agua. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. (2012). Noticias, red de agua, UNAM. http://www.agua.unam.mx/noticias/2012/unam/not_unam_marzo01.html
- [37] *Agua como recurso*. Fecha de consulta: 12 de Abril del 2012. Artículo. http://www.comoves.unam.mx/articulos/agua_recurso/agua1.html
- [38] *Agua e industria en la economía verde*. (2005) Programa de ONU-Agua para la promoción y la comunicación del marco del decenio (UNW-DPAC). Fecha de consulta: 18 de Mayo del 2012 http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/pdf/info_brief_water_and_industry_spa.pdf
- [39] Arellano, S. (2010). La población en México, tendencias y prospectiva. Revista México Social. Fecha de consulta: 22 de Abril del 2012. <http://mexicosocial.org/secciones/especial/item/92-lapoblacionenmexicotendenciasyprospectiva.html>.
- [40] Asociación nacional de la industria química. Kemira de México-Productos. Fecha de consulta: 21 de Agosto del 2012. <http://www.aniq.org.mx/pqta/empresas.asp?id=1>
- [41] Asociación nacional de la industria química. SNF Floerger –Productos. Fecha de consulta: 21 de Agosto del 2012. <http://www.aniq.org.mx/pqta/empresas.asp?id=3>
- [42] *Atlas del agua en México*. (2011). Comisión Nacional del Agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Págs. 30-40. Fecha de consulta 24 de Abril del 2011. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-28-11.pdf>
- [43] Bensusan, G. (2009). *La crisis y sus efectos en la industria textil y del vestido-Red de solidaridad de la maquila*. Artículo electrónico. Fecha de consulta: 21 de mayo del 2012. http://es.maquilasolidarity.org/sites/es.maquilasolidarity.org/files/RSM-Crisis_y_Sector_Vestido_en_Mexico-2009-10.pdf
- [44] Don Hinrichsen, Bryan Robey, M. A. and Ushma D. Upadhyay. *Solutions for a water-short world*. (1998). Population reports. Serie M, No. 14. Baltimore, Johns Hopkins School of Public Health. World Conservation Union (IUCN). PRB and USAID. Fecha de consulta: 29 de Marzo del 2012. <http://archive.k4health.org/toolkits/INFO-publications/solutions-water-short-world>
- [45] Escobar Delgadillo, J. L. (2008). *El desarrollo sustentable en México (1980-2007)*. Revista digital universitaria. ISSN: 1607-6079. Publicación mensual. Vol. 9 No. 3. Artículo electrónico. Fecha de consulta: 12 de Abril del 2012. <http://www.revista.unam.mx/ejemplares.html>
http://www.revista.unam.mx/index_mar08.htm
- [46] *Estadísticas del agua en México*. (2011). Comisión Nacional del agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Págs. 18-33, 43-46, 73-76. Fecha de consulta: 22 de Abril del 2011. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.pdf>
- [47] Gil Ibarra, E. (2003) El agua o la vida. Artículo electrónico. Fecha de consulta: 30 de Marzo del 2012. http://www.elortiba.org/pdf/el_agua_o_la_vida.pdf
- [48] Gray rey, M. S. (2007). *La escasez del agua en el mundo y la importancia del acuífero guaraní para Sudamérica: relación abundancia-escasez*. Publicación electrónica del Programa Recursos



- Naturales y Desarrollo. Fecha de consulta: 17 de Abril del 2012.
<http://www.caei.com.ar/es/programas/recursosn/17.pdf>
- [49] *La industria textil y del vestido en México.* (2010 y 2011). Serie estadísticas sectoriales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Págs. 8-12. Fecha de consulta: 21 de Mayo del 2012.
http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/Textil/2011/ITVM-2011.pdf
http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/Textil/2010/ITVM-2010.pdf
- [50] Larson, J. y Sarukhán J. (2007) *Cuando los bienes comunes son menos trágicos: dominios eminentes y privilegios comerciales en la valoración patrimonial del México rural.* Gaceta ecológica 67. Pág. 7, 9, 21-23. Artículo electrónico. Fecha de consulta: 30 de Marzo del 2012.
http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=389
- [51] Medellín, P. (2002). *Industria y agua.* Pulso diario de San Luis Potosí, sección Ideas. Pág. 4a. Fecha de consulta: 19 de Mayo del 2012. <http://ambiental.uaslp.mx/docs/PMM-AP021017.pdf>
- [52] *Medio ambiente y desarrollo sostenible.* Recursos de biología y ecología. Fecha de consulta: 12 de Abril del 2012. http://www.bioygeo.info/pdf/02_Medio_Ambiente_y_Developmento_Sostenible.pdf
- [53] *Nuestro futuro común.* Fecha de consulta: 12 de Abril del 2012.
<http://supervir.org/archi02/des10.pdf>
- [54] *Problemática del agua en el mundo.* Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA). Fecha de consulta: 29 de Marzo del 2012.
www.pnuma.org/reccnat/esp/documentos/cap1.pdf
- [55] *Problemática del agua y la importancia de las aguas subterráneas.* Documento electrónico. Fecha de consulta: 17 de Abril del 2012. <http://www.aguaenmexico.org/images/ciclohidrologico2.pdf>
- [56] Sainz Santamaría, J. y Becerra Pérez, M. (2007). *Los conflictos por el agua en México: Avances de la investigación.* Gaceta ecológica 67. Pág. 61-68. Artículo electrónico. Fecha de consulta: 30 de Marzo del 2012. http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=389
- [57] Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Nueva Ley publicada por el Diario Oficial de la Federación el 28 de Enero de 1998. Fecha de consulta: 31 de Mayo del 2012.
http://www.shcp.gob.mx/LASHCP/MarcoJuridico/MarcoJuridicoGlobal/Leyes/254_lgeeph.pdf
- [58] Ley de Aguas Nacionales. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de Diciembre de 1992. Fecha de consulta: 31 de Mayo del 2012.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf>
- [59] Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. Publicada el 24 de Diciembre del 2007 en el Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 31 de Mayo del 2012.
<http://www.cmp.org/apoyos/NotaReformasLeyFederaldeAguas2007.pdf>
- [60] Ultraturb. Tratamiento de agua. Fecha de consulta: 21 de Agosto del 2012 http://www.hachlange.es/shop/action_g/download%3Bdocument/DOK_ID/5612/type/pdf/lkz/ES/spkz/es/TOKEN/xEJBh-CRiqVnwWwTPozK4VeUig/M/Gg-WGg



Anexo A



$$A + B + C = D + E + F$$

$$A = 200 \text{ lps}$$

$$B = 800 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \left(200 \frac{\text{l}}{\text{s}} \right) = 160000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 160 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

$$C = 0.96 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \left(200 \frac{\text{l}}{\text{s}} \right) = 192 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0.192 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Coagulante

$$160 \frac{\text{g}}{\text{s}} \rightarrow 100\%$$

$$x_1 \rightarrow 90\% = 144 \text{ g/s}$$

$$x_2 \rightarrow 10\% = 16 \text{ g/s}$$

Floculante (FO4800)

$$0.192 \frac{\text{g}}{\text{s}} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) = 1.92 + 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Si: } 1 \text{ kg} \rightarrow \$61.44$$

$$\text{Entonces: } 1.92 + 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \rightarrow \$ 0.01179 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\frac{\$ 0.01179 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \$ 0.0091 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Sulfato de Aluminio

$$144 \frac{g}{s} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \right) = 518.4 \frac{\text{kg}}{h}$$

Si: 1 kg \rightarrow \$15

$$\text{Entonces: } 0.144 \frac{\text{kg}}{s} \rightarrow \$ 2.16 \frac{\text{kg}}{s}$$

$$\frac{\$ 2.16 \frac{\text{kg}}{s}}{1.32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \$ 1.63 \frac{\text{m}^3}{s}$$

FL4540

$$16 \frac{g}{s} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \right) = 57.6 \frac{\text{kg}}{h}$$

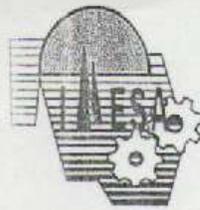
Si: 1 kg \rightarrow \$23.04

$$\text{Entonces: } 0.016 \frac{\text{kg}}{s} \rightarrow \$ 0.36 \frac{\text{kg}}{s}$$

$$\frac{\$ 0.36 \frac{\text{kg}}{s}}{1.32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \$ 0.28 \frac{\text{m}^3}{s}$$



Anexo B



INGENIERÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, S.A. DE C.V.

SERVICIO INTEGRAL DE CONSULTORÍA AMBIENTAL

AQ-011

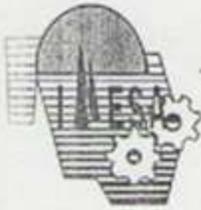
INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS

Determinación	Método Analítico	Fecha	Resultado
Potencial de hidrogeno	NMX-AA-008-SCFI-2000	03/02/12	7.04 unidades OK
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	03/02/12	0.0699 mg/L. OK
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	09/02/12	3.01 mg/L. OK
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	10/02/12	25.0mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	15/02/12	8.52mg/L
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	< 0.01 mg/L
Plomo		08/02/12	0.062 mg/L OK
Zinc		0.119 mg/L OK	
Hierro		14/02/12	0.188 mg/L OK
Aluminio		15/02/12	0.479 mg/L
Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	02/02/12	0.628 mg/L
Color	M8025/HACH/DR2000	03/02/12	78.0 U Pt/Co
Conductividad Electrolitica	NMX-AA-039-SCFI-2000	03/02/12	5.4 mg/L/CM OK
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	0.002 mg/L
Demada Quimica de Oxigeno	NMX-AA-093-SCFI-2000	17/02/12	121.97 mg/L

FL4540 + SA + FO4800

Determinación	Método Analítico	Fecha	Resultado
Potencial de hidrogeno	NMX-AA-008-SCFI-2000	03/02/12	8.13 unidades
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	03/02/12	0.0777 mg/L.
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	09/02/12	6.1 mg/L. MKS
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	10/02/12	8.67 mg/L. OK
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	10/02/12	3.05 mg/L. OK
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	< 0.01 mg/L
Plomo		08/02/12	18.585 mg/L
Zinc		29.98mg/L	
Hierro		14/02/12	3.063 mg/L
Aluminio		15/02/12	0.497 mg/L
Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	02/02/12	0.571 mg/L. OK
Color	M8025/HACH/DR2000	03/02/12	103.0 U Pt/Co
Conductividad Electrolitica	NMX-AA-039-SCFI-2000	03/02/12	5.48 mg/L
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	0.002 mg/L
Demada Quimica de Oxigeno	NMX-AA-093-SCFI-2000	17/02/12	196.72 mg/L. OK

15% FL4540 + 85% PHB + FO4650



INGENIERÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, S.A. DE C.V.

SERVICIO INTEGRAL DE CONSULTORÍA AMBIENTAL

CONTINUA INFORME DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE LA MUESTRA DE AGUA DENOMINADA

P-106 + O-138 + S-4500

MUESTRA: LINEA 4
NUMERO UNICO: 2574

Parámetro	Código de Muestra	Fecha de Análisis	Resultado
Potencial de hidrogeno	NMX-AA-008-SCFI-2000	03/02/12	7.89 unidades
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	03/02/12	0.0824 mg/L
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	09/02/12	6.89 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	10/02/12	26.2 mg/L
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	15/02/12	3.94 mg/L
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	07/02/12	< 0.01 mg/L
Plomo		08/02/12	< 0.08 mg/L
Zinc		08/02/12	0.265 mg/L
Hierro		14/02/12	0.787 mg/L
Aluminio		15/02/12	0.151 mg/L <i>0.4</i>
Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	02/02/12	3.656 mg/L
Color	M8025/HACH/DR2000	03/02/12	30.0 U Pt/Co <i>0.1</i>
Conductividad Electrolítica	NMX-AA-039-SCFI-2000	03/02/12	7.89 mg/L
Mercurio	NMX-AA-051-SCFI-2001	09/02/12	< 0.001 mg/L <i>0.1</i>
Demanda Química de Oxígeno	NMX-AA-093-SCFI-2000	17/02/12	121.97 mg/L

OBSERVACIONES

Los datos reportados se refieren exclusivamente a las condiciones descritas en el presente informe.
El término < indica que el parámetro determinado se encuentra en una concentración menor al límite práctico de la técnica.
N.D. Significa no detectado.
La fecha corresponde a la obtención del resultado.
Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización previa por escrito de Ingeniería y Estudios Ambientales, S.A. de C.V.

Director General
Q.F.B. Irma Retana C.



SICO + SOSO+ FO4650

PARAMETRO	UNIDAD	METODO DE PRUEBA	RESULTADO
Aluminio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,15
Cadmio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,002
Fierro	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,16
Mercurio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,001
Plomo	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,035
Zinc	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	6,39

10% FL4540+90%SA+FO4800

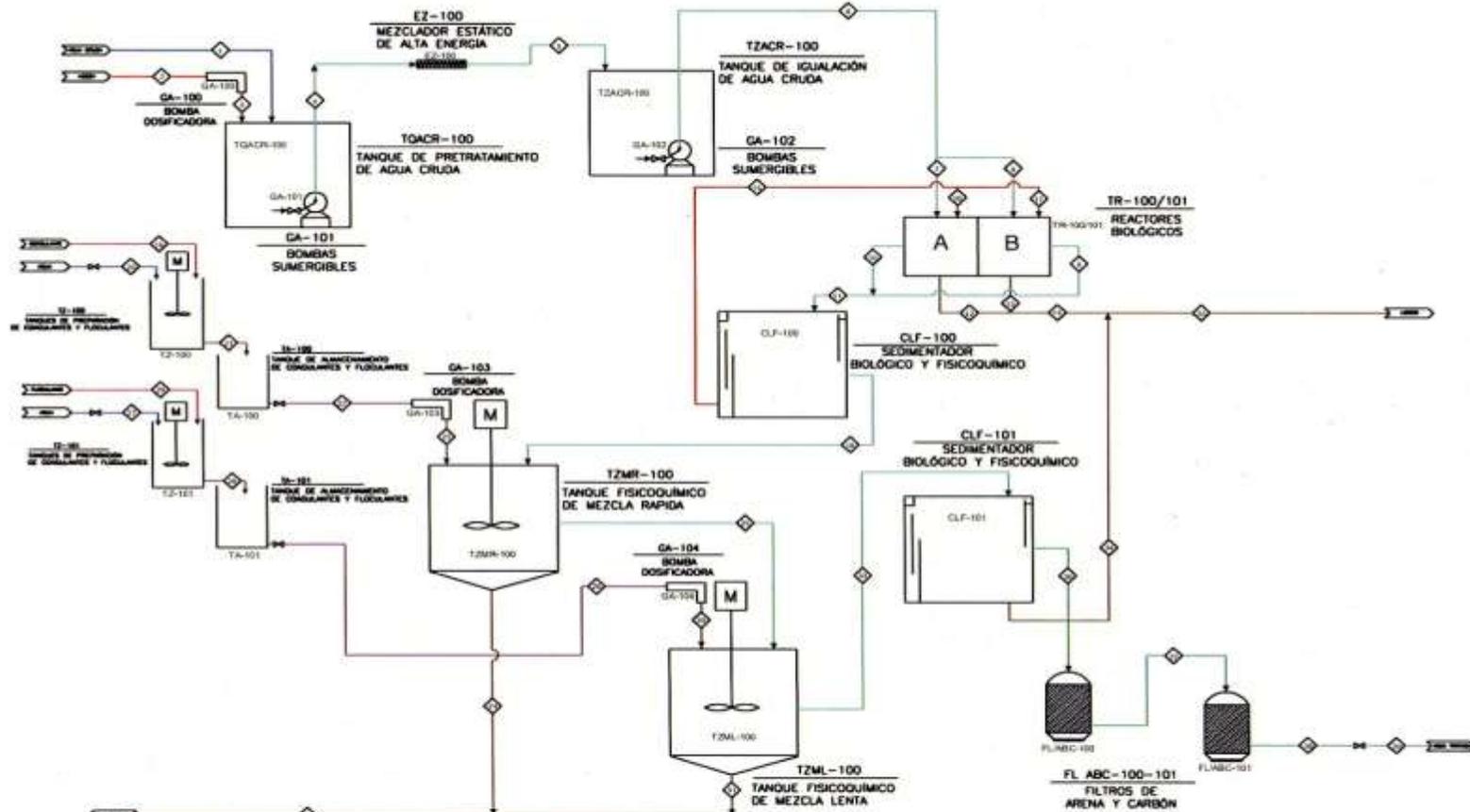
PARAMETRO	UNIDAD	METODO DE PRUEBA	RESULTADO
Aluminio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,62
Cadmio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,002
Fierro	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,095
Mercurio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,001
Plomo	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,01
Zinc	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,0059

P-106 + O-138+ S-4500

PARAMETRO	UNIDAD	METODO DE PRUEBA	RESULTADO
Aluminio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,06
Cadmio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,002
Fierro	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,12
Mercurio	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,001
Plomo	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0,01
Zinc	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001	0,0195



Anexo C



ELABORÓ:
LORENA CERECEDO SILES

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

ASESOR (A):
M. EN I. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ TAGLE

EDICIÓN 2013	
FECHA ELAB.	04/05/2013
APRO.	04/07/13
REVISÓ R.F.	

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

ESC. SIN	INGENIERÍA QUÍMICA	REV. A
----------	--------------------	--------