



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
CIVIL Y GEOMÁTICA

TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

EUGENIO GONZÁLEZ GARCÍA

TUTOR M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ



MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCG/SEAC/UTIT/067/08

Señor
EUGENIO GONZÁLEZ GARCÍA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES"

- INTRODUCCIÓN
- I. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO
 - II. GIROS INDUSTRIALES NACIONALES Y SU CONTRIBUCIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA
 - III. OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
 - IV. PROPUESTA DE TRENES DE TRATAMIENTO PARA DIFERENTES PROCESOS INDUSTRIALES
 - V. CASO DE ESTUDIO NACIONAL
 - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de Septiembre del 2008.
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA
GGZ/RSU/gar.

AGRADECIMIENTOS

Doy mis más sinceros agradecimientos a la M.I. Alba Beatriz Vázquez González por su tutoría para la realización de esta tesis. Ya que gracias a su profesionalismo y experiencia, a su accesibilidad y a la atención prestada, pude realizar el trabajo aquí presentado que sin su dirección no hubiese sido posible. Gracias también por la formación que usted, junto a mis demás profesores dentro de la Facultad de Ingeniería de nuestra máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México, me han instruido. Una educación veraz y muy valiosa, siempre resaltando en el alumno valores humanos como el respeto, la honestidad, el trabajo, la responsabilidad, la comunicación, la amistad y la puntualidad.

Quiero extender especialmente estos agradecimientos a mi comité tutorial. Al Ingeniero Héctor Guzmán Olguín, Ingeniero Marcos Trejo Hernández, Maestro en Ingeniería Octavio García Domínguez y por supuesto también de manera muy especial al Dr. Enrique César Valdez. Gracias a todos ustedes profesores por su comprensión y apoyo.

Quiero agradecer al Ing. Eugenio González Javier, quien siempre ha sido el apoyo de mi familia, mi padre pero también mi amigo. Sin duda yo no hubiera soñado con llegar a ser un ingeniero civil si no hubiese sido por ti papá. ¡Eres un gran ingeniero!, tuve la oportunidad de acompañarte de niño tantas veces, pude verte resolver problemas, tomar decisiones, dirigir frentes de trabajo, realizar investigación desde laboratorio, siempre observando y analizando, conduciéndote con integridad, con pasión y entrega. Yo sé que me falta mucho aún, pero quisiera ser tan buen ingeniero como tú o mejor si se puede. Por todo esto y muchas cosas más, ¡Gracias papá!

Después pero no menos importante es mi madre la Doctora María del Rosario García Vidal, siempre tan trabajadora y estudiosa. Una gran mujer que junto a mi padre me inculcó los valores más importantes que tengo y sobretodo el amor a Dios que siempre nos acompaña y guarda de peligro. Una madre muy cariñosa y amorosa, que junto a mis hermanas me cuido, me protegió y nos curó a todos tantas veces cuando estuvimos enfermos, perdiendo el sueño por la preocupación de curar a sus hijos. ¡Gracias mamá!, te quiero mucho y sin duda eres un gran médico, me fascina mucho preguntarte cosas médicas y platicar contigo profundamente. Sé que a veces te atosigo pero son mis ganas de decir cuánto te quiero y lo contento que estoy de temerte con nosotros. Eres una mujer muy valiente y te admiro mucho.

Gabriela Galicia Vázquez, mi amiga, mi novia, mi esposa, la mujer que amo con todo mi ser, que me hace ser mejor persona, la chica que me quita el sueño, la mujer que admiro por su dedicación al estudio, a la investigación y al trabajo, pero más por los valores humanos que posee. Gracias por tu apoyo, durante mis estudios y durante la realización de esta tesis. Y gracias de nuevo Gaby por el apoyo que como Maestra en Ciencias Bioquímicas me brindaste en la revisión de varios aspectos químicos y biológicos que cubre este trabajo.

También quiero dar las gracias a mis hermanas porque siempre me han querido y protegido, a Chayo porque siempre está allí, contenta y amorosa. Es una niña muy trabajadora y estudiosa, sin duda eso lo heredo de nuestros padres, te quiero mucho Chayo. A Lulú, es la que más me hace rabiar pero porque la quiero mucho y quiero que este bien. Lulú quiero aprovechar para reconocer el esfuerzo que has realizado en tu formación profesional, se que tu formación es muy buena (igual a la mía, colega) y aunque también vas comenzando se que lo harás bien.

Gracia a mis primos y amigos por la amistad incondicional que me han ofrecido, gracias Lety, Pedro, Rodrigo, Eric Pierce, Erick Hajar, Ángel, Oscar Cortez, Felipe de Jesús, Cesar, Chio, Lupe y a mis demás compañeros. A mis familiares en Villahermosa, Tabasco, con los que crecí y formaron parte de mis tristezas y alegrías, a mi abuelita y mis padrinos en Villahermosa. También a mi familia en el Distrito Federal porque nos recibieron con los brazos abiertos y nos acompañaron en los buenos y difíciles momentos, muy en especial a mi tía Ceci y mi tío Rafa; por su compañía, consejos y amistad.

Quiero también dar un agradecimiento muy especial a mis lindos suegros Roger y Lolita, así como a mi linda cuñis Llana por la calurosa acogida que me han dado como parte de la familia. He tenido la bonita oportunidad de conocerlos y quererlos. Gracias familia.

¡Gracias principalmente a Dios por todas las bendiciones que me ha dado!, ¡Gracias a los seres queridos que ya no están conmigo, y que saben que los extraño y siempre los tengo en mi corazón!

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Ing. Héctor Javier Guzmán Olguín
SECRETARIO	Ing. Marcos Trejo Hernández
VOCAL	M.I. Alba Beatriz Vázquez González
1 ^{er.} Suplente	Dr. Enrique César Valdez
2 ^{do.} Suplente	M.I. Octavio García Domínguez

TUTOR DE TESIS:

M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

ÍNDICE

<i>Capítulo</i>	<i>Página</i>
Carta de Aceptación del Tema de Tesis.....	I
Agradecimientos.....	II
Índice.....	V
Introducción.....	XII
1. El Tratamiento de las Aguas Residuales en México.....	1
1.1 Cobertura de Infraestructura Hidráulica.....	2
1.2 Cuerpos de Agua Superficiales.....	3
1.3 Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Superficiales.....	6
1.4 Cuerpos de Agua Subterráneas.....	10
1.5 Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos de Agua Subterráneos.....	10
1.6 Origen de las Aguas Residuales.....	11
1.7 Infraestructura de Tratamiento para Agua Residual Municipal.....	14
1.8 Infraestructura de Tratamiento para Agua Residual Industrial.....	17

1.9	Reúso del Agua Residual.....	20
2.	Giros Industriales Nacionales y su Contribución a la Contaminación del Agua.....	22
2.1	Relaciones Internacionales en Materia de Cooperación Ambiental.....	23
2.2	Sistema de Clasificación Empleado en México.....	24
2.3	Giros Industriales.....	33
2.3.1	Industria de la Siderúrgica.....	35
2.3.2	Industria de la Petroquímica.....	36
2.4	Características del Agua Residual en los Diversos Giros Industriales..	38
2.4.1	Características del Agua Residual en la Industria Metalúrgica.....	43
2.4.2	Características del Agua Residual en la Industria Textil.....	45
2.4.3	Características del agua residual en la Industria de Curtiduría..	48
2.4.4	Características del agua residual en la industria de Conservas..	49
2.4.5	Características del Agua Residual en la Industria Láctea.....	50
2.4.6	Características del Agua Residual en la Industria Cervecera,	

Destilerías y Farmacéuticos.....	52
2.4.7 Características del Agua Residual en la Industria Azucarera....	54
2.4.8 Características del Agua en la Industria Alimenticia.....	56
2.4.9 Características del Agua Residual en la Industria Química.....	59
2.4.10 Características del Agua Residual en la Industria Petroquímica.....	61
3. Operaciones y Procesos Unitarios Utilizados en el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.....	64
3.1 Operaciones Unitarias de Tratamiento.....	64
3.1.1 Operaciones Unitarias Empleadas en el Tratamiento Preliminar.....	64
3.1.2 Cribas o Rejillas.....	65
3.1.3 Desarenadores	65
3.1.4 Homogenización de Caudales.....	67
3.1.5 Medidores de Flujo.....	67
3.1.6 Operaciones Unitarias Empleadas en Tratamiento Primario...	68

3.1.7	Sedimentación Primaria.....	69
3.1.8	Separadores API.....	71
3.1.9	Operaciones Unitarias Empleadas en Tratamiento Secundario.....	72
3.1.10	Separadores Formados por Laminillas.....	73
3.1.11	Operaciones Unitarias Empleadas en Tratamiento Terciario.....	74
3.1.12	Adsorción con Carbón Activado.....	74
3.1.13	Ósmosis Inversa.....	75
3.1.14	Filtración en Medio Granular.....	75
3.1.15	Filtración A través de Membrana.....	78
3.1.16	Flotación.....	78
3.1.17	Métodos Electrolíticos.....	81
3.1.18	Radiación con Rayos Ultravioleta.....	81
3.2	Procesos Unitarios de Tratamiento.....	82
3.2.1	Procesos Unitarios Empleados en el Tratamiento	

Preliminar.....	82
3.2.2 Precipitación Química	83
3.2.3 Procesos Unitarios Empleados en Tratamiento	
Secundario.....	84
3.2.4 Biofiltros o Filtros Percoladores.....	85
3.2.5 Lodos Activados.....	86
3.2.6 Aireación Extendida.....	87
3.2.7 Lagunas.....	87
3.2.8 Filtros Sumergidos Aireados.....	89
3.2.9 Procesos Anaerobios.....	90
3.2.10 Sistema de Colchón de Lodo en Flujo Ascensional.....	93
3.2.11 Humedades de Carrizo.....	94
3.2.12 Pozo Profundo.....	95
3.2.13 Sedimentación Secundaria.....	97
3.2.14 Procesos Unitarios Empleados en Tratamiento	
Terciario.....	98

3.2.15	Métodos de Biosorción de Iones Metálicos por	
	Mohos Microscópicos.....	99
3.2.16	Coagulación Química.....	99
3.2.17	Floculación.....	99
3.2.18	Ozonificación.....	100
4	Propuesta de Trenes de Tratamiento para Diferentes Procesos Industriales...	101
4.1	Tren de Tratamiento para la Industria de Acabados Textiles.....	102
4.2	Tren de Tratamiento para la Industria de la Curtiduría.....	106
4.3	Tren de Tratamiento para la Industria del Azúcar.....	109
4.4	Tren de Tratamiento para la Industria de Acabados Metálicos.....	110
4.4.1	Tren de Tratamiento para Cianuros.....	111
4.4.2	Tren de Tratamiento para Cromo.....	113
4.4.3	Tren de Tratamiento para Ácidos y Alcalis.....	116
4.4.4	Tren de Tratamiento para Metales Pesados.....	118
4.5	Tren de Tratamiento para la Industria de Minerales no Metálicos.....	119
4.6	Tren de Tratamiento para la Industria Petrolera.....	120

4.7	Tren de Tratamiento para la Industria Química.....	121
4.7.1	Tren de Tratamiento para Vertidos Ácidos.....	122
4.8	Tren de Tratamiento para la Industria de la Celulosa y el Papel.....	124
5	Caso de Estudio Nacional.....	128
	Conclusiones y Recomendaciones.....	136
	Bibliografía.....	139

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se trata el origen, las características y los métodos de tratamiento de las aguas residuales industriales. El objetivo es la integración de información relativa a los giros industriales y su calidad, además de mostrar las alternativas de tratamiento para los principales procesos industriales.

El capítulo 1 muestra un panorama de la infraestructura hidráulica existente y los procesos de saneamiento que se aplican al agua residual en México.

El capítulo 2 presenta la clasificación de actividades económicas de origen industrial para poder contar con un registro detallado e histórico, que nos permita realizar análisis a los diferentes sectores de la economía, aplicar censos, comparar datos a nivel estatal, federal e internacional. Con ayuda del sistema de clasificación podemos determinar que giros industriales son los más importantes por la generación de aguas residuales y sus contaminantes, y el efecto que causan dichas actividades al medio ambiente. Se incluye la caracterización de las aguas residuales de diversos giros industriales nacionales.

En el capítulo 3 se describen las operaciones y procesos unitarios que son empleados para el tratamiento de las aguas residuales industriales. El capítulo 4 incluye propuestas de trenes de tratamiento que pueden ser aplicados a los vertidos de las industrias contaminantes.

El capítulo 5 presenta un caso de estudio, en el cual se dispone de información básica para su análisis y datos acerca de las acciones implantadas para abatir el nivel de contaminación que generan sus vertidos. Se presenta la propuesta de tren de tratamiento a dicho caso.

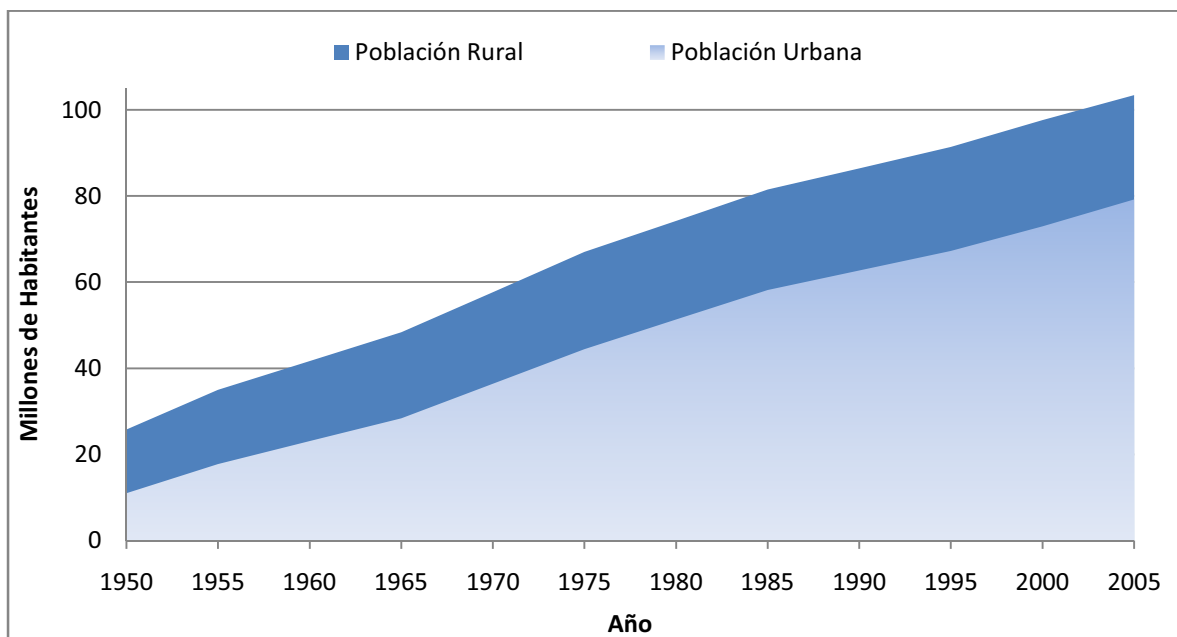
Capítulo 1

EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

El agua es un elemento esencial para garantizar la gran riqueza natural de México. Tiene un papel fundamental debido a su importancia en el bienestar social, en el desarrollo económico y en la preservación ecológica del país. El agua está relacionada con el bienestar social cuando hablamos de suministro de agua potable a la población, alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales; ubicando en este último el interés particular de esta tesis.

La población del país en el año 1950 se contaba en 25 millones de habitantes, 55 años después en el 2005 la población se cuadruplico con un total de 103 millones de habitantes, tal como se muestra en la Figura 1.1. La concentración de habitantes en zonas urbanas es un fenómeno evidentemente creciente, en el año 1950 los habitantes en zonas urbanas tan solo eran 11 millones, en el 2005 se incremento en 79 millones de habitantes.

Figura 1.1 Población en México (1950-2005)



Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En México las mayores concentraciones de población se localizan en el centro y norte del país, estas cuentan con el mejor crecimiento económico, allí radica el 77% de la población nacional. Sin embargo se han desarrollado en regiones donde la disponibilidad de agua para sus ciudades es baja, 31% de la disponibilidad nacional. Situación contraria ocurre en la región sureste del país, donde se concentra el restante 23% de la población nacional, estas regiones tiene el 69% en disponibilidad nacional de agua.

El volumen anual de agua que se distribuyó en uso agrícola, público y para las industrias, sin considerar la generación de energía eléctrica, a diciembre de 2006 fue de 77,321 millones de metros cúbicos (hm^3), del cual 14% se destinó al uso público, el 9% a las industrias y 77% (el mayor porcentaje) de este volumen para la agricultura. El uso predominante del agua en el país es agrícola, a diferencia de los países desarrollados donde el mayor consumo se destina al sector industria. En el sector industrial el agua se emplea principalmente en centrales termoeléctricas. ⁽²⁾

México es un país subdesarrollado o en vías de desarrollo, por ende el aprovechamiento que se tiene del agua no es bueno. Las eficiencias en el uso son muy bajas; en el sector agrícola van del 33 - 55% y en las ciudades son de 50 – 70%.

Las bajas eficiencias en el uso del agua, el abrumante crecimiento de la poblacional y la escasez de agua, han ocasionado que el agua de los ríos y lagos no sea suficiente en varias zonas de la República Mexicana. Incluso las fuentes de abastecimiento subterráneas se encuentran ya sobreexplotadas. Aunado a esto la calidad natural del agua a nivel nacional se ha deteriorado. ⁽²⁾

1.1 COBERTURA DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

La extensión territorial del país es de 1'964,375 kilómetros cuadrados, de los cuales 5,127 km^2 pertenecen a territorio de islas o superficie insular y 1'959,248 km^2 a la superficie continental, sin considerar la zona económica de mar territorial de 3'149,920 km^2 que le pertenece. ⁽³⁾

En la República Mexicana, solo una pequeña parte del porcentaje de inversión de infraestructura se destina al agua. En la Tabla 1.1, se indican los porcentajes invertidos en el

periodo presidencial del 2000 - 2006. Se resalta que el porcentaje menor pertenece al sector agua.

Tabla 1.1 Inversión de Infraestructura en México

SECTOR	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
AGUA	4%	3%	5%	7%	5%	9%	6%
ELECTRICIDAD	17%	19%	21%	19%	14%	14%	14%
COMUNICACIONES Y TRANSPORTES	39%	40%	30%	24%	34%	32%	40%
HIDROCARBUROS	39%	38%	44%	51%	47%	48%	40%

Fuente: Programa Nacional de Infraestructura 2006-2012. Presidencia de la República ⁽¹⁾ (modificado por el autor)

En el año 2000 el país tenía un 88% de cobertura en agua potable, un 76% en alcantarillado y un 23% en cobertura de tratamiento de aguas residuales (considerando zonas urbanas y rurales). Según datos del Programa Nacional de Infraestructura 2006 – 2012, con el porcentaje de inversión en infraestructura 2000 – 2006, se logró ampliar la cobertura al año 2006 aumentando a un 90% en agua potable, 86% alcantarillado y 36% en cobertura de tratamiento de aguas residuales (incluyendo zonas urbanas y rurales).

En México se tiene implantada la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, que al 2006 contó con 1,026 sitios, éstos distribuidos a lo largo y ancho del país. La realización de determinaciones fisicoquímicas y biológicas se lleva a cabo en la Red Nacional de Laboratorios, que se constituye en 13 laboratorios regionales, 16 estatales y el Laboratorio Nacional de Referencia con sede en nuestra Ciudad Capital.

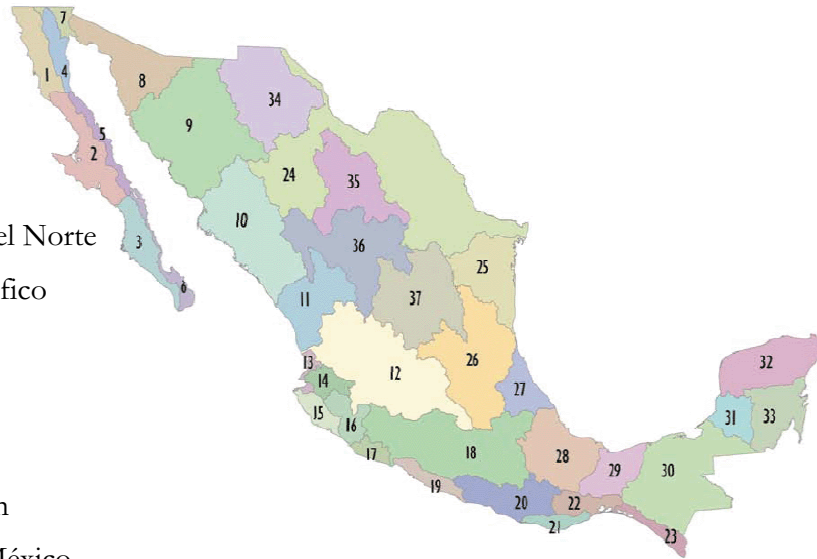
1.2 CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

Nuestro territorio está dividido en 718 cuencas hidrográficas y estas a su vez se encuentran agrupadas en 37 regiones hidrológicas (Tabla 1.2). Para poder administrar los recursos hídricos, el país se divide en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas que a su vez, están formadas por agrupaciones de cuencas. La CONAGUA es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo de la administración del agua en México y desempeña sus funciones a través de los

13 Órganos de Cuencas (antes Gerencias Regionales) para las Regiones Hidrológico-Administrativas (Región H-A) que se presentan en la Figura 1.2:

- I. Península de Baja California
- II. Noroeste
- III. Pacífico Norte
- IV. Balsas
- V. Pacífico Sur
- VI. Río Bravo
- VII. Cuencas Centrales del Norte
- VIII. Lerma-Santiago-Pacífico
- IX. Golfo Norte
- X. Golfo Centro
- XI. Frontera Sur
- XII. Península de Yucatán
- XIII. Aguas del Valle de México

Figura 1.2 Regiones Hidrológico-Administrativas



Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾

Tabla 1.2 Regiones Hidrológicas

REGIONES HIDROLÓGICAS					
1	Baja California Noroeste	13	Río Huicicila	25	San Fernando-Soto La Marina
2	Baja California Centro-Oeste	14	Río Ameca	26	Pánuco
3	Baja California Suroeste	15	Costa de Jalisco	27	Norte de Veracruz
4	Baja California Noreste	16	Armería-Coahuayana	28	Papaloapan
5	Baja California Centro-Este	17	Costa de Michoacán	29	Coatzacoalcos
6	Baja California Sureste	18	Balsas	30	Grijalva-Usumacinta
7	Río Colorado	19	Costa Grande de Guerrero	31	Yucatán Oeste
8	Sonora Norte	20	Costa Chica de Guerrero	32	Yucatán Norte
9	Sonora Sur	21	Costa de Oaxaca	33	Yucatán Este
10	Sinaloa	22	Tehuantepec	34	Cuencas Cerradas del Norte
11	Presidio-San Pedro	23	Costa de Chiapas	35	Mapimí
12	Lerma-Santiago	24	Bravo-Conchos	36	Nazas-Aguanaval
				37	El Salado

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

Tabla 1.3 Principales Vertientes en el País

NO.	RÍO	REGIÓN H-A	GASTO (HM ³ /AÑO)	CUENCA (KM ²)	LONG. RÍO (KM)
1	Balsas	IV	16,587	117,406	770
2	Santiago	VIII	7,849	76,416	562
3	Verde	V	5,937	18,812	342
4	Ometepec	V	5,779	6,922	115
5	El Fuerte	III	5,176	33,590	540
6	Papagayo	V	4,237	7,410	140
7	Yaqui	II	3,163	72,540	410
8	San Pedro	III	3,528	26,480	255
9	Cultacán	III	3,161	15,731	875
10	Suchiate	XI	2,737	203	75
11	Ameca	VIII	2,165	12,214	205
12	Armería	VIII	2,015	9,795	240
13	San Lorenzo	III	1,680	8,919	315
14	Coahuayana	VIII	1,867	7,114	203
15	Colorado	I	1,863	3,840	160
16	Sinaloa	III	2,126	12,260	400
17	Baluart	III	1,838	5,094	142
18	Acaponeta	III	1,438	5,092	233
19	Plaxtla	III	1,415	11,473	220
20	Tehuantepec	V	950	10,090	240
21	Coatán	XI	751	605	75
22	Huicicila	VIII	410	1,194	50
23	Grijalva-Usumacinta	XI	115,536	83,553	1,521
24	Papaloapan	X	44,662	46,517	354
25	Coatzacoalcos	X	32,752	17,369	325
26	Pánuco	IX	20,330	84,956	510
27	Tonalá	X	11,389	5,679	82
28	Bravo	VI	5,588	226,280	2,018
29	Tecolutla	X	6,885	7,903	375
30	Nautla	X	2,284	2,785	124
31	Antigua	X	2,193	2,827	139
32	Tuxpan	X	2,580	5,899	150
33	Soto La Marina	IX	2,086	21,183	416
34	Candelaria	XII	2,011	13,790	150
35	Cazones	X	1,716	2,688	145
36	San Fernando	IX	1,545	17,744	400
37	Lerma	VII	4,908	47,116	708
38	Nazas	VII	1,999	57,101	600
39	Aguanaval	VII	509	32,138	481

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007 ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En los ríos del país, escurren un aproximado anual de 400,000 millones de metros cúbicos de agua (hm^3), incluyendo las aportaciones de caudales que provienen de otros países y excluyendo los escurrimientos que se generan en este país pero cuyos caudales derivan en otro país.

El 87% de 400,000 millones de m^3 de escurrimiento de agua del país se genera en cuencas que representan el 58% de la extensión territorial continental y que generan un total de 39 ríos principales (Tabla 1.3).

Tan solo el 65% del escurrimiento superficial pertenece a 7 ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá. Las cuencas de estos 7 ríos representan el 22% de la superficie del país.

1.3 MONITOREO DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES

La evaluación de la calidad del agua al año 2006 se realizó solo en 503 estaciones, ya que las estaciones que no contaban con datos no se utilizaron. Esta evaluación se llevó a cabo con la medición de 3 indicadores; la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno y la medición de Sólidos Suspendedos Totales (SST). En la Tabla 1.4 se muestra la relación indicador-No. de estaciones).

Tabla 1.4 Sitios de Monitoreo para Indicadores de la Calidad del Agua, 2006

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA	NÚMERO DE SITIOS DE MONITOREO
DBO_5	443
DQO	429
SST	406

EL NO. TOTAL DE ESTACIONES ES DE 503; SIN EMBARGO NO SE UTILIZARON LAS ESTACIONES QUE NO CONTABAN CON DATOS.
CONAGUA, SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA.

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007 ⁽³⁾ (modificado por el autor)

La DBO_5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua que provienen casi en su totalidad de las descargas de aguas residuales.

Tabla 1.5 Distribución Porcentual de las Estaciones de Monitoreo, DBO_5 . (2006)

CALIDAD POR MEDICION DE DBO_5	PORCENTAJE ESTACIONES
Excelente	40.4%
Buena Calidad	25.3%
Aceptable	17.6%
Contaminada	11.3%
Fuertemente Contaminada	5.4%

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007.⁽³⁾
(modificado por el autor)

El incremento de la concentración de materia orgánica que muestra el parámetro de la DBO_5 repercute en el contenido de oxígeno disuelto en el agua provocando su disminución. Situación que provoca el detrimento de la calidad del agua y por ende viene la consecuente afectación al ecosistema. La distribución porcentual de las estaciones para la calidad de agua monitoreada para la DBO_5 se muestra en la Tabla 1.5.

Tabla 1.6 Distribución Porcentual de las Estaciones de Monitoreo, DQO. (2006)

CALIDAD POR MEDICION DE DQO	PORCENTAJE ESTACIONES
Excelente	19.6%
Buena Calidad	18.9%
Aceptable	23.8%
Contaminada	26.8%
Fuertemente Contaminada	11.0%

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007.⁽³⁾
(modificado por el autor)

Si el parámetro DQO es alto indica presencia de sustancias que no provienen de descargas municipales, sino de los sectores industriales, también llamadas descargas de aguas residuales industriales (Tabla 1.6).

Tabla 1.7 Distribución Porcentual de las Estaciones de Monitoreo, SST. (2006)

CALIDAD POR MEDICION DE SST	PORCENTAJE ESTACIONES
Excelente	45.3%
Buena Calidad	33.0%
Aceptable	14.0%
Contaminada	5.4%
Fuertemente Contaminada	2.2%

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST), tienen su origen tanto en las aguas residuales como en la erosión del suelo (Tabla 1.7). El incremento en SST, DBO y DQO hace que los cuerpos de agua pierdan la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática.

Tabla 1.8 Escalas de Clasificación de la Calidad del Agua

DBO ₅		DQO		SST	
mg/l	CLASIFICACIÓN	mg/l	CLASIFICACIÓN	mg/l	CLASIFICACIÓN
DBO ₅ ≤ 3	EXCELENTE	DQO ≤ 10	EXCELENTE	SST ≤ 25	EXCELENTE
3 < DBO ₅ ≤ 6	BUENA CALIDAD	10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD	25 < SST < 75	BUENA CALIDAD
6 < DBO ₅ ≤ 30	ACEPTABLE	20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE	75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE
30 < DBO ₅ ≤ 120	CONTAMINADA	40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA	50 < SST ≤ 400	CONTAMINADA
120 < DBO ₅	FUERTEMENTE CONTAMINADA	200 < DQO	FUERTEMENTE CONTAMINADA	400 < SST	FUERTEMENTE CONTAMINADA

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En la medición de la DBO_5 el agua es clasificada de acuerdo a su intervalo de déficit de oxígeno. Un cuerpo de agua que se clasifica en calidad “Excelente” contiene un agua no contaminada. Un agua de “Buena Calidad” es un agua superficial con bajo contenido de materia orgánica biodegradable. La clasificación “Aceptable” pertenece a un cuerpo de agua con inicio de contaminación por materia orgánica biodegradable, que aún conserva la capacidad de autodepuración bajo esa concentración o puede ser un cuerpo de agua que sufre descargas de aguas residuales previamente tratadas biológicamente. Cuando se otorga la clasificación de “Contaminada” son aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas (no tratadas), principalmente de origen municipal. Por último la clasificación de “Fuertemente Contaminada” se designa para aguas superficiales que están sufriendo un fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas, tanto municipales como industriales (Tabla 1.8).

En la medición de la DQO el agua clasificada como “Excelente” es de igual forma un agua no contaminada. En la clasificación “Buena Calidad” se encuentran las aguas con bajo contenido de materia orgánica tanto biodegradable como materia orgánica no biodegradable. Los cuerpos de agua en calidad “Aceptable” tienen indicios de contaminación, pero mantienen de igual forma la capacidad de autodepuración o son cuerpos de agua con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. El agua superficial “Contaminada” tiene descargas de aguas residuales crudas, principalmente de aguas residuales municipales. Los cuerpos de agua con una clasificación de “Fuertemente Contaminada” tienen un fuerte impacto de aguas residuales no tratadas de origen municipal e industrial (Tabla 1.8).

En la medición de la SST, los cuerpos de agua son clasificados de igual forma en calidad excelente, buena, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada (Tabla 1.8). La clasificación “Excelente” es una clase de agua que se aparta de la condición general de los cuerpos de agua, y se refiere a una muy buena calidad en cuanto a SST. La clasificación “Buena Calidad” tiene poco contenido de sólidos suspendidos, generalmente es una condición natural de los ríos y lagos, favorece la conservación de comunidades de peces, además que a esta agua se le suele dar un uso agrícola sin restricción. La clasificación “Aceptable” en cuerpos de agua, muestra indicios de contaminación, esta puede ser con descargas de aguas residuales tratadas

biológicamente, actualmente es una condición regular para peces, pero mantiene un uso restringido para el riego agrícola. La clasificación “Contaminada” es definitivamente para agua de mala calidad, que presenta descarga de aguas residuales crudas, el agua presenta un alto contenido de material suspendido. La clasificación “Fuertemente Contaminada”, son aguas con gran impacto de descargas de aguas residuales crudas, de origen municipal e industrial, esta agua tienen una alta carga contaminante y es inadecuada para los peces.

1.4 CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos (unidades hidrogeológicas). La importancia del agua subterránea es notable si se refiere al volumen utilizado por los principales usuarios del suministro de agua; aproximadamente 37% (28, 341 millones de metros cúbicos) del volumen total anual que se concesiona para usos consuntivos es de origen subterráneo.

Hay un aumento de acuíferos sobreexplotados de 32 acuíferos en 1975 a 104 acuíferos en 2006, de éstos se extrae casi el 60% de su volumen de agua, destinado para varios usos.

En las aguas subterráneas se presenta un fenómeno llamado “Intrusión Marina” en el que el agua de mar se introduce por el subsuelo hacia el interior del continente, éste ocasiona la salinización del agua. La Intrusión Marina ocurre cuando el grado de extracción de agua subterránea provoca el abatimiento del nivel freático por debajo del nivel del mar, rompiendo así el equilibrio dinámico entre el agua de los acuíferos (agua dulce) y el agua de mar.

Existen en México 17 acuíferos con intrusión marina, esto provoca que las reservas con agua dulce se salinicen. El fenómeno se presenta en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. La CONAGUA tiene redes piezométricas distribuidas en 211 acuíferos del país, que registran los niveles de agua en ellos.

1.5 MONITOREO DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEOS

Otro control que se realiza sobre los recursos de agua del país es en la medición de la calidad del agua subterránea. En particular interesa evaluar la salinización de esta agua. Los Sólidos

Totales es uno de los parámetros que se utilizan para evaluar el grado de salinización de las aguas subterráneas. De acuerdo a la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) se puede clasificar a las aguas subterráneas en dulces, ligeramente salobres y salobres salinas (Tabla 1.9).

Tabla 1.9 Clasificación de las Aguas por Concentración de SDT

SDT (mg/l)	CLASIFICACIÓN
SDT<1,000	DULCES
1,000<SDT<2,000	LIGERAMENTE SALOBRES
2,000<SDT<10,000	SALOBRES
10,000<SDT	SALINAS

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾
(modificado por el autor)

Cabe mencionar que el límite entre el agua dulce y la clasificada en ligeramente salobres (1,000 mg/L) coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la norma NOM-127-SSA1-1994, en la cual se establecen los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano y regula el tratamiento en materia de calidad del agua para consumo humano.

1.6 ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES

En nuestro país las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales y no municipales. Las municipales corresponden a las aguas que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales (urbanos y rurales). Las aguas residuales no municipales son descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, este es el caso de la industria autoabastecida.

En los centros urbanos se generan anualmente 7,630 millones de metros cúbicos de aguas residuales, se recolectan en las redes de alcantarillado 6,500 millones de m³ y reciben tratamiento 2,350 millones de m³, lo que representa que el 30.7% de la generación de aguas sucias son tratadas para poder ser reintegradas a los cuerpos de agua, sin degradar la calidad de éstas, en la Tabla 1.10 se presentan los gastos medios correspondientes. Con las aguas residuales provenientes de los centros urbanos se generan 2'060,000 toneladas de DBO₅ al año, de este volumen casi el 85% (1'750,000) se recolecta mediante el alcantarillado y poco más del 25% (520,000 de DBO₅) se logra remover mediante tratamiento.

Tabla 1.10 Caudal del Agua Residual Municipal

AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	CAUDAL [m³/s]
GASTO GENERADO	242
CAPTADO EN LAS REDES	206
GASTO TRATADO	74.4
DBO₅ GENERADA/AÑO	2'064,000 TON
DBO₅ RECOLECCIÓN/AÑO	1'750,000 TON
DBO₅ REMOVIDA/AÑO	520,000 TON

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾
(modificado por el autor)

Tabla 1.11 Caudal del Agua Residual Industrial y Contenidos de DBO₅.

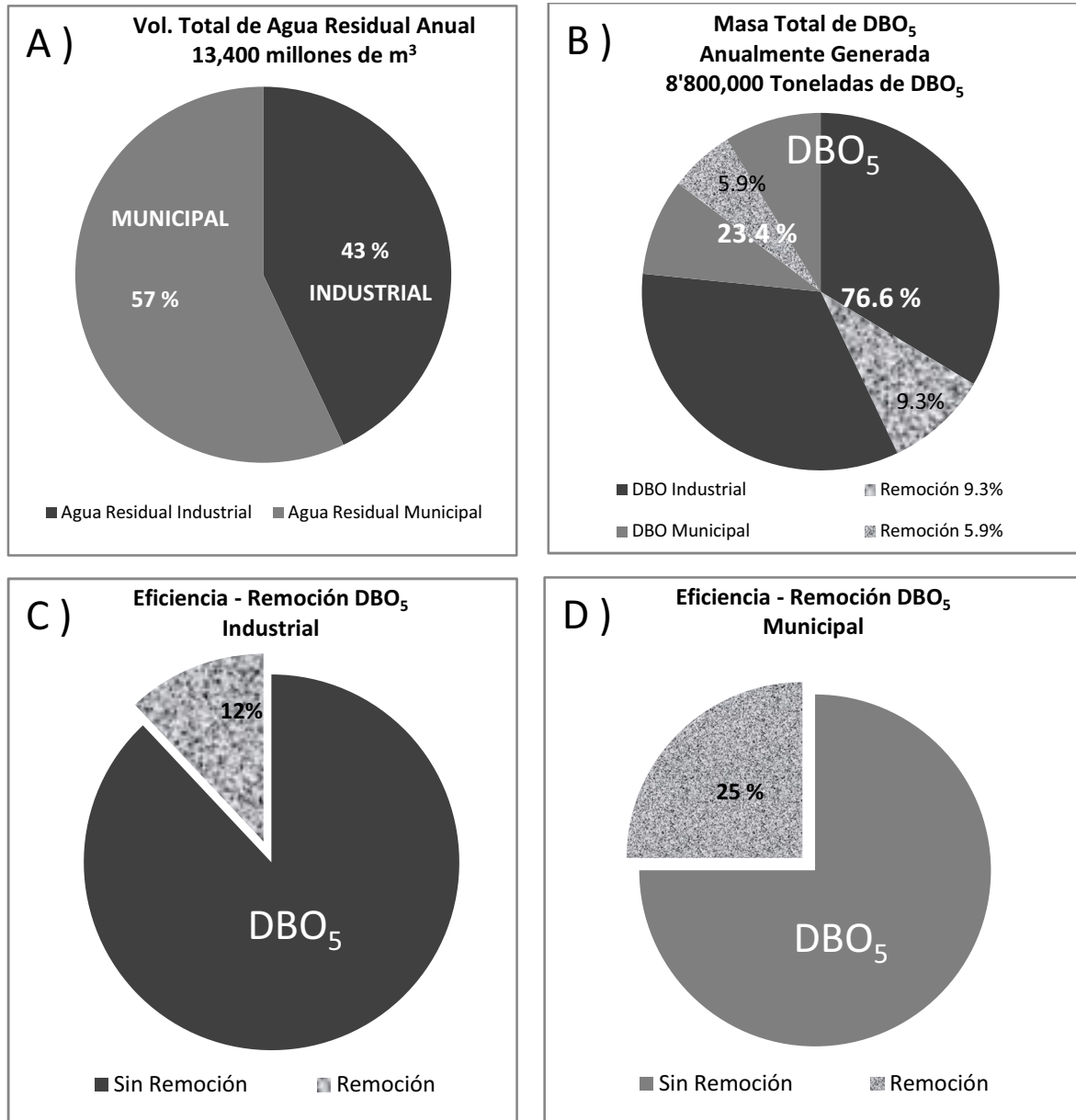
AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	CAUDAL [m³/s]
GASTO GENERADO	183
GASTO TRATADO	27.7
DBO₅ GENERADA/AÑO	6'740,000 TON
DBO₅ REMOVIDA/AÑO	820,000 TON

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾
(modificado por el autor)

En cuanto a la industria se generan 5,770 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año (agua residual industrial), recibe tratamiento el 15% (870 millones de m³). De un total de 6'740,000 toneladas de DBO₅ que son generadas al año se logran remover en los sistemas de

tratamiento 820,000 toneladas de DBO_5 , con lo que se llega a una remoción del 12%, Tabla 1.11).

Figura 1.3 Volumen Total y Remoción de DBO_5 en las Aguas Residuales



Fuente: Adaptado de Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾

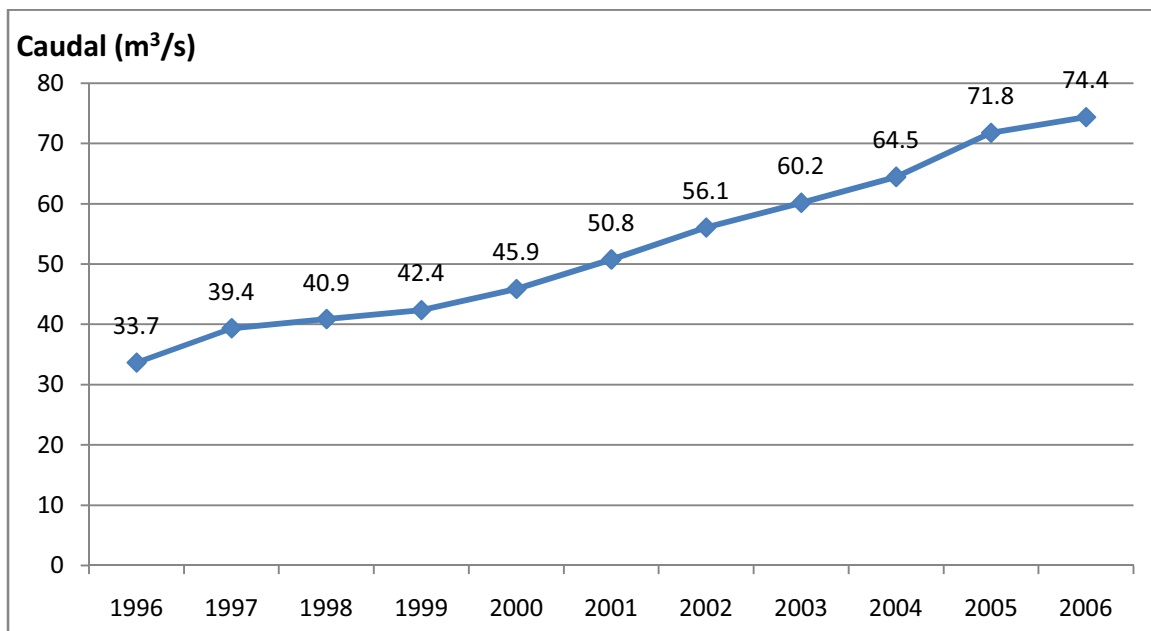
Si contamos tanto la generación de aguas residuales de los centros urbanos como las industriales o no municipales, se tiene un volumen de 13,400 millones de m³ anuales, Figura 1.3.A. El 57% de este volumen son aguas residuales municipales en la red de alcantarillado, más pérdida y a estas les corresponde el 23.4% de generación de DBO_5 , Figura 1.3.B. El

volumen generado por la industria corresponde al 43% (de origen no municipal, el que se descarga directamente a los cuerpos receptores) y éste contribuyen con el 76.6% de generación de DBO_5 , Figura 1.3.B. Sin embargo el volumen de aguas residuales no municipales tienen un porcentaje de tratamiento menor (solo 15% del volumen anual generado de agua residual industrial es tratado) que el de las aguas residuales de origen municipal (solo 30.7% del volumen anual generado de agua residual municipal es tratado) y la cantidad de DBO_5 removida también es menor (12% de remoción en aguas residuales no municipales-25% en las municipales. Figura 1.3.Cy1.3.D).

1.7 INFRAESTRUCTURA DE TRATAMIENTO PARA AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

En agua residual municipal el porcentaje de tratamiento es bajo (de 30.7% al año 2006) con relación al volumen de generación de aguas residuales municipales. Pero cuando nos referimos a la eficiencia de tratamiento tenemos un ligero aumento de 30.7% a 36%, ya que no todo el volumen generado de aguas residuales es recolectado y conducido por la red de alcantarillado (solo $206 \text{ m}^3/\text{s}$ de $242 \text{ m}^3/\text{s}$, en el año 2006), ya que una parte se pierde y no llega a ser recolectada por la red municipal.

Figura 1.4 Caudal de Aguas Residuales Municipales Tratadas, serie anual 1996-2006.



Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En México las 1,593 plantas de tratamiento en operación al 2006 trataron 74.4 m³/s de los 206 m³/s de agua residual captada por la red de alcantarillado, esto es el 36% de dicho gasto, en la figura 1.4 se muestra el gasto de aguas residuales tratadas, 1996-2006.

Los principales procesos de tratamiento en el país son; biodiscos, dual, filtros biológicos, lagunas de estabilización, lagunas aireadas, lodos activados, tratamiento primario y primario avanzado, reactor anaerobio de flujo ascendente, reactor enzimático, tanque Imhoff, tanque séptico, wetland, zanjas de oxidación, entre otros (Tabla 1.12).

Tabla 1.12 Principales Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, 2006.

PROCESO	NO.	CAUDAL TRATADO	PORCENTAJE
Biodiscos	7	0.48	0.6%
Dual	9	4.05	5.4%
Filtros Biológicos	43	3.49	4.7%
Lagunas de Estabilización	622	13.81	18.6%
Lagunas Aireadas	19	5.07	6.8%
Lodos Activados	372	30.93	41.6%
Primario	15	2.09	2.8%
Primario Avanzado	17	9.85	13.2%
R.A.F.A.	122	1.06	1.4%
Reactor Enzimático	50	0.09	0.1%
Tanque Imhoff	63	0.42	0.6%
Tanque Séptico	82	0.16	0.2%
Wetland	110	0.42	0.6%
Zanjas de Oxidación	23	2.17	2.9%
Otros procesos	39	0.28	0.4%
Total	1,593	74.39 m ³ /s	100%

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾
(modificado por el autor)

Tabla 1.13 Plantas de Tratamiento de A. R. Municipal en Operación al 2006, por Entidad Federativa.

No.	ENTIDAD FEDERATIVA	NO. DE PLANTAS EN OPERACIÓN	CAPACIDAD INSTALADA (m ³ /s)	CAUDAL TRATADO (m ³ /s)
-	Distrito Federal	30	6.54	3.53
1	Aguascalientes	101	3.72	3.29
2	Baja California	28	6.41	4.44
3	Baja California Sur	16	1.11	0.82
4	Campeche	10	0.08	0.05
5	Coahuila de Zaragoza	13	3.46	2.75
6	Colima	47	0.69	0.38
7	Chiapas	11	1.11	0.95
8	Chihuahua	116	7.98	6.24
9	Durango	138	3.47	2.55
10	Guanajuato	36	4.93	3.69
11	Guerrero	33	3.21	1.80
12	Hidalgo	8	0.06	0.05
13	Jalisco	95	3.42	3.28
14	México	78	7.30	4.73
15	Michoacán de Ocampo	21	1.53	1.04
16	Morelos	22	1.25	1.01
17	Nayarit	59	1.90	1.17
18	Nuevo León	61	13.09	11.10
19	Oaxaca	56	0.87	0.66
20	Puebla	82	3.12	2.42
21	Querétaro Arteaga	63	1.00	0.77
22	Quintana Roo	29	2.08	1.60
23	San Luis Potosí	12	1.99	1.30
24	Sinaloa	107	4.79	3.82
25	Sonora	66	3.75	2.58
26	Tabasco	60	1.46	1.21
27	Tamaulipas	33	3.44	3.44
28	Tlaxcala	39	1.03	.74
29	Veracruz	86	4.53	2.53
30	Yucatán	12	0.08	0.07
31	Zacatecas	25	0.39	0.34
Total	31 Edos. y el D.F.	1,593	99.76	74.39

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

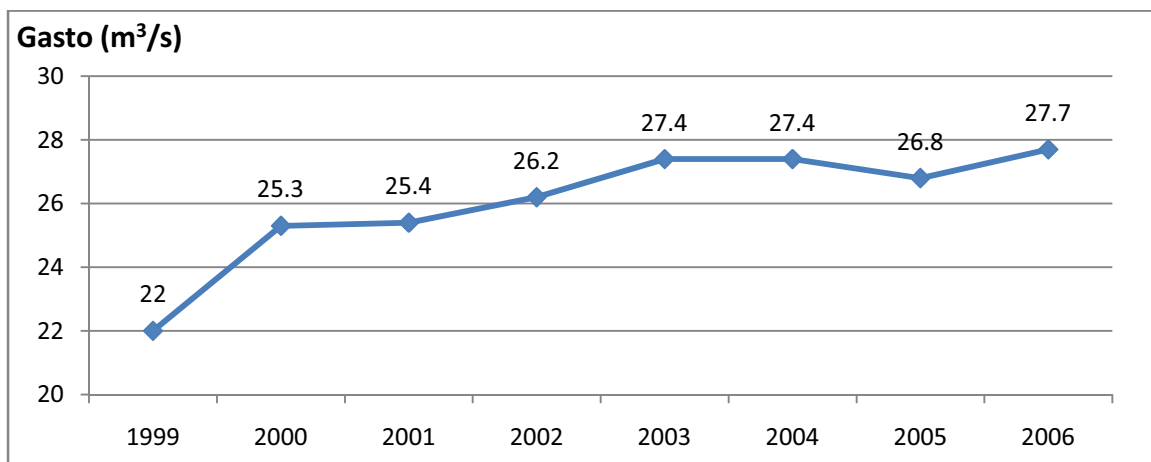
En la República Mexicana el estado de Durango cuenta con el mayor número de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (138 plantas), le sigue Chihuahua (116), Sinaloa (107) y Aguascalientes (101). Actualmente los 31 Estados y el Distrito Federal cuentan con plantas de tratamiento. El estado que tiene el menor número de plantas de tratamiento es Hidalgo con 8, luego Campeche con 10, Chiapas con 11 (en la tabla 1.13 se muestra la relación de número de plantas de tratamiento de agua residual municipal, por entidad federativa; la capacidad instalada y el gasto tratado).

El estado de Nuevo León cuenta con el mayor caudal tratado para aguas residuales municipales, de $11.10 \text{ m}^3/\text{s}$ (capacidad instalada $13.09 \text{ m}^3/\text{s}$) y está en el lugar 18 en número de plantas de tratamiento (61), mientras que el estado de Durango es el primero en mayor número de plantas (138), trata $2.55 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto se debe a que Nuevo León es el estado que cuenta con más infraestructura de mayor capacidad instalada para el tratamiento de aguas residuales municipales.

1.8 INFRAESTRUCTURA DE TRATAMIENTO PARA AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

En 1999 con la capacidad instalada para tratamiento de agua residual industrial a nivel nacional se trataban $22 \text{ m}^3/\text{s}$, al 2006 el gasto tratado es de $27.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (de $183 \text{ m}^3/\text{s}$, generación de agua residual industrial 2006), Figura 1.5.

Figura 1.5 Caudal de Aguas Residuales Industriales Tratadas, serie anual 1999-2006.



Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en el país se realizan principalmente tratamiento primario, secundario y terciario. El tratamiento primario busca realizar un ajuste del pH y remover materiales en suspensión (orgánicos e inorgánicos) con tamaños a partir de 0.1 mm en adelante. Con el secundario se busca remover materiales orgánicos coloidales que se encuentran disueltos. El propósito del tratamiento terciario es remover materiales disueltos (gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus), Tabla 1.14.

Tabla 1.14 Principales Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, 2006.

TIPO DE TRATAMIENTO	PROPÓSITO	NO,	CAUDAL TRATADO	PORCENTAJE
Primario	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm.	725	10.05	36.3%
Secundario	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos.	1,047	15.19	54.9%
Terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus.	71	0.82	3.0%
No especificado		25	1.59	5.8%
Total		1,868	27.66 m ³ /s	100%

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

En cobertura para plantas de tratamiento de Agua Residual Industrial suman 1,868 distribuidas por entidad federativa (Tabla 1.15).

El estado de México cuenta con 245 unidades de plantas de tratamiento de Agua Residual Industrial (es el estado con mayor número de plantas), le sigue Baja California con 186, Veracruz con 160, Querétaro con 110, Tabasco con 108, Tlaxcala con 104 y Puebla con 98. El estado que cuenta con el menor número de plantas de tratamiento de agua residual industrial es Quintana Roo con 2 plantas, Nayarit con 4, Baja California Sur, Guerrero y Zacatecas con 7 y Colima con 8 (en la tabla 1.15 se muestra la relación de número de plantas de tratamiento de Agua Residual Industrial por entidad federativa; la capacidad instalada y el gasto tratado).

Tabla 1.15 Plantas de Tratamiento de A. R. Industriales en Operación al 2006, por Entidad Federativa.

No.	ENTIDAD FEDERATIVA	NO. DE PLANTAS EN OPERACIÓN	CAPACIDAD INSTALADA (m ³ /s)	CAUDAL TRATADO (m ³ /s)
-	Distrito Federal	15	0.04	0.04
1	Aguascalientes	42	0.20	0.10
2	Baja California	186	0.45	0.16
3	Baja California Sur	7	0.01	0.01
4	Campeche	31	0.08	0.06
5	Coahuila de Zaragoza	64	0.86	0.59
6	Colima	8	0.47	0.31
7	Chiapas	18	0.69	0.69
8	Chihuahua	20	0.66	0.29
9	Durango	37	0.76	0.45
10	Guanajuato	45	0.40	0.18
11	Guerrero	7	0.05	0.04
12	Hidalgo	40	1.64	0.98
13	Jalisco	27	1.45	1.45
14	México	245	3.47	2.44
15	Michoacán de Ocampo	35	2.33	1.07
16	Morelos	68	2.26	2.16
17	Nayarit	4	0.16	0.16
18	Nuevo León	83	4.13	3.00
19	Oaxaca	13	1.08	0.94
20	Puebla	98	0.62	0.43
21	Querétaro Arteaga	110	1.08	0.51
22	Quintana Roo	2	0.01	0.01
23	San Luis Potosí	73	1.28	.55
24	Sinaloa	75	2.93	0.49
25	Sonora	28	0.60	0.46
26	Tabasco	108	0.61	0.15
27	Tamaulipas	46	1.60	0.83
28	Tlaxcala	104	0.39	0.35
29	Veracruz	160	11.63	8.63
30	Yucatán	62	0.14	0.10
31	Zacatecas	7	0.16	0.04
Total	31 Edos. y el D.F.	1,868	42,23	27.66

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

El estado de Veracruz tiene el mayor caudal tratado de 8.63 m³/s (capacidad instalada 11.63 m³/s) y es el tercero con más plantas de tratamiento (160), esto es contrastante si resaltamos que el estado de México con el mayor número de plantas (245), trata 2.44 m³/s. Ya que Veracruz es el estado que cuenta con más infraestructura con mayor capacidad instalada en el caso de aguas residuales industriales.

1.9 REÚSO DEL AGUA RESIDUAL

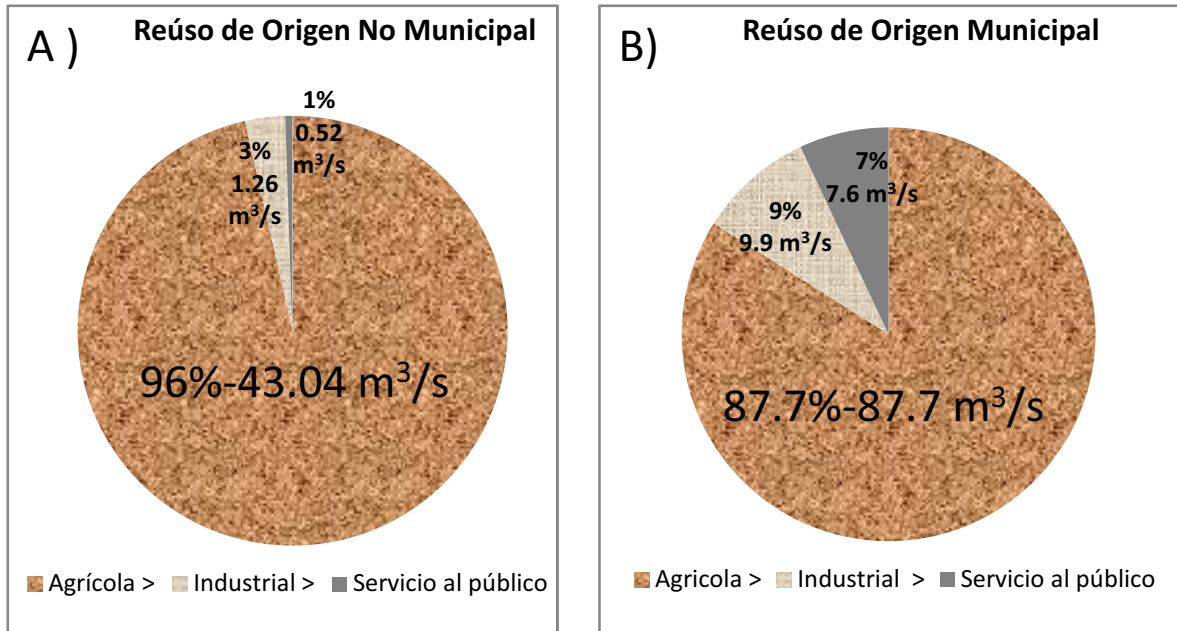
El utilizar agua residual tratada ayuda a cubrir la demanda de agua, su reúso aplica principalmente en la agricultura, en menor proporción esto ocurre en la industria, servicios múltiples, usos secundarios y para la recarga de acuíferos, Tabla 1.16. Actualmente en México se reúsan 150 m³/s, el 70% (105.2 m³/s) del reúso es de origen municipal y el restante 30% (44.8 m³/s) industrial, Figura 1.6.

Tabla 1.16 Destino del Agua de Reúso

SECTOR	DESTINO DEL AGUA DE REÚSO
AGRICOLA	Es destinada para el riego de áreas de cultivo de caña de azúcar, riego de arboles, forrajes, cítricos, nogales y pastizales.
	CONTACTO HUMANO DIRECTO Llenado de lagos y canales artificiales recreativos, uso en fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.
SERVICIOS AL PUBLICO	CONTACTO HUMANO INDIRECTO U OCASIONAL Riego de jardines, camellones en autopistas y avenidas, uso de en fuentes de ornato, en campos de golf, para abastecimiento de hidrantes en los sistemas contra incendio, para el llenado de lagos artificiales no recreativos, como barreras hidráulicas de seguridad y para el riego de áreas verdes en panteones.
INDUSTRIA	El agua se utiliza como elemento en los sistemas de enfriamiento, en el lavado de equipo, de áreas de trabajo y estanques de acuicultura, riego de áreas verdes y en los servicios sanitarios.

Fuente: Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾ (modificado por el autor)

Figura 1.6 Reúso de Agua Residual Municipal y No Municipal



Fuente: adaptado de Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, 2007. ⁽³⁾

El reúso del agua tratada de origen industrial (no municipal, 44.8 m³/s), se distribuye con 43.04 m³/s en la agricultura, 1.26 m³/s a la industria y 0.52 m³/s en servicios al público. El reúso del agua de origen municipal (105.2 m³/s), se distribuye en 87.7 m³/s en la agricultura, 9.9 m³/s para la industria y 7.6 m³/s en servicios al público, Figura 1.6.

Capítulo 2

GIROS INDUSTRIALES NACIONALES

Y SU CONTRIBUCIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua que necesita la industria puede llegar desde una captación independiente o a través de una red de suministro. Cada proceso industrial requiere ciertas características especiales en el agua, pues dependiendo del proceso deberá estar exenta de determinados contaminantes.

Las aguas se denominan “aguas contaminantes” cuando las impurezas que contiene representan elementos nocivos para el uso al que va destinada. Por lo tanto, es el grado de calidad requerido el que determina si una impureza es contaminante o no lo es. ⁽⁵⁾

A su vez los procesos industriales, introducen nuevos contaminantes en el agua. También los cuerpos receptores del efluente están sujetos a calidades mínimas de vertido; por ejemplo, para un cuerpo receptor, si el efluente no cumple, debe someterse a otros tratamientos para obtener la calidad que permitan la descarga.

Las técnicas de tratamiento de agua contaminada abarcan una gran variedad de procesos. Si el agua residual de la industria tuviera siempre una composición constante de contaminantes presentes, su saneamiento para su disposición final sería determinado y simple. Sin embargo; éste no es el caso y la variabilidad de las impurezas, junto con las alternativas diferentes de tratamiento que se pueden elegir, cada una apropiada para unas condiciones determinadas, requieren de una evaluación experta, basada en conocimientos especializados.

La condición del agua residual industrial es determinada por el giro de la industria, pues de ello dependerán los procesos en los que interviene el agua y por lo tanto las características de las impurezas que ésta adquiere.

En la industria el agua interviene como medio de transporte, en el lavado o enjuague, en transformaciones químicas, usada como disolvente, como subproducto de procesos físicos de filtración y destilación, como medio de transporte de calor, entre otros. Los procesos de la industria añaden elementos al agua como los metales pesados y ciertas sustancias orgánicas, motivo por el cual las industrias requieren autorizaciones basadas en estudios de impacto ambiental.

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, de acuerdo a su naturaleza química pueden ser orgánicos o inorgánicos, se puede referir a ellos específicamente pero en lo general estos se tratan dentro de una definición amplia, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Contaminantes Presentes en el Agua Residual Industrial

CONTAMINANTES EN EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Materia orgánica soluble
Aceites, grasas y material flotante.
Nutrientes
Sólidos en suspensión y materia coloidal.
Color, turbidez y olor.
Acidez o alcalinidad,
Metales pesados.
Contaminantes orgánicos especiales, etc.

Fuente: adaptado de Tratamiento de Aguas Industriales. ⁽⁵⁾

Es difícil trasladar el tratamiento convencional de agua residual municipal a los vertidos industriales ya que con frecuencia la materia orgánica no es el contaminante principal.

2.1 RELACIONES INTERNACIONALES EN MATERIA DE COOPERACIÓN AMBIENTAL

El contexto nacional e internacional de la industria mexicana dentro del Tratado de Libre Comercio (TLC) y del ingreso de México a la Organización de Cooperación y Desarrollo

Económico (OCDE), ambos ocurridos en 1994 traen nuevas implicaciones tanto económicas como ambientales.

El TLC es considerado como el tratado comercial con mayores consideraciones ambientales que se ha establecido a la fecha. En particular por los acuerdos paralelos derivados en materia de Cooperación Ambiental y Laboral, que plantean la posibilidad de que existan sanciones comerciales para los países socios que no cumplan con la normatividad ambiental vigente.⁽⁶⁾

La adhesión de México a la OCDE significó la definición de su posición respecto a las declaraciones y los principios establecidos por el consejo de dicha organización. Por lo cual México será sujeto periódicamente a una revisión de su desempeño ambiental, que tiene por objeto ayudar a identificar áreas en las que se requiere superar deficiencias y donde se abren posibilidades de cooperación técnica por parte los países que conforman la organización.

En este marco México debe lograr el cambio tecnológico que se requiere en la industria para satisfacer las necesidades ambientales y para mejorar la calidad y competitividad de los productos industriales, sin que por ello se ponga en peligro la sustentabilidad de las actividades del sector manufacturero y agravar el desempleo.

Los países en vías de desarrollo se encuentran en gran desventaja respecto a los industrializados al no contar con los procesos limpios de producción y las tecnologías industriales para generar productos respetuosos del ambiente que se ajusten a los criterios y normas ecológicas que se aplican cada vez más a los productos en los países importadores del primer mundo (EUA).

2.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN EMPLEADO EN MÉXICO

La clasificación de actividades económicas tiene su antecedente en la Clasificación Mexicana de Actividades Económicas (CMAE), cuya primera aparición se remonta en los Censos Económicos de 1961. Este sistema de clasificación experimentó varias revisiones dando origen a la Clasificación Mexicana de Actividades y Productos (CMAP) en 1981. Esta última clasificación se ha ido actualizando con la realización de los censos económicos, en la actualidad contamos con la 5ª versión de la CMAP.

En la construcción de la Clasificación Mexicana de Actividades y Productos (CMAP) se utilizó como base la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU), misma que es recomendada por la Organización de Naciones Unidas (ONU).

Un Sistema de Clasificación de Actividades Económicas está estructurado de modo que permita la localización de cualquier actividad o grupo de actividades de manera rápida. La estructura se basa en la clasificación de las actividades, de forma que parta de la actividad general y llegue a una sub-actividad particular, luego a la singular. El clasificador parte del reconocimiento de diversas actividades: Primarias (agropecuarias); Secundarias (Industriales); Terciarias (Prestación de Servicios y Comercializadoras). Con ello el Sistema de Clasificación adquiere un carácter analítico que permite la ubicación de actividades de acuerdo con un proceso de producción similar, que enlaza las actividades según las características técnicas de cada proceso de producción.

Tabla 2. 2 Ejemplo del CMAP

<i>NIVEL</i>	<i>CÓDIGO CMAP</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
SECTOR	3	INDUSTRIAS MANUFACTURERAS
SUBSECTOR	31	PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS, BEBIDAS Y TABACO
RAMA	3112	INDUSTRIAS DE PRODUCTOS LACTEOS
CLASE	311222	PRODUCCIÓN DE CREMA, QUESO Y MANTEQUILLA. Producción de derivados lácteos, como: queso, crema, mantequilla, lactosa, caseína, sueros de leche, entre otros. Sean éstos de leche de vaca o cabra. Exclusiones: Producción de helados y paletas, 311232; Producción de otros alimentos a base de leche, 311239; Producción de cajetas y otros dulces a base de leche, 311231.

Fuente: Actividades de producción de Bienes. INEGI, censos económicos 1999. ⁽⁷⁾ (modificado)

El CMAP incluye distintos niveles de agregación (ver Tabla 2.2), identificados de la siguiente manera:

- Sector (un dígito)
- Subsector (dos dígitos)

- Rama (cuatro dígitos)
- Clase de Actividad (seis dígitos)

Lo anterior permite un manejo de datos flexible y acorde con las necesidades o intereses de los usuarios de la información. El clasificador de actividades económicas carece de duplicidades y garantiza la existencia de un código para cada actividad económica.

A principios de 1990 México acordó trabajar conjuntamente con los representantes de generación de estadísticas de Estados Unidos y Canadá, sobre el diseño de un clasificador de actividades común para los países de la región, éste se denominó Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) y su propósito es la generación y presentación de la información bajo un sistema internacional homogéneo.

La necesidad de que los resultados de un censo industrial sean comparables en el tiempo y que a la par tengan homogeneidad internacional, originaron la presentación de las cifras de los Censos Económicos 1999 a partir de diferentes estructuras de clasificación, la CMAP y en una segunda versión los datos definitivos de los Censos Económicos 1999 tendrán que ser dados a conocer bajo las estructuras SCIAN y CIIU.

En los Censos Económicos 1999, se realizó la cobertura censal más amplia en la historia de México, dentro de ella se llevó a cabo el XV Censo Industria. La planta industrial de acuerdo al Censo Industrial de estadística, Geografía e Informática se puede considerar que está constituida por cuatro sectores:

- a) Manufacturero
- b) Extractivo (minería y petróleo)
- c) Construcción
- d) Eléctrico (Generación, transmisión y suministro de energía eléctrica)

En la Tabla 2.3 se muestra el sector de la Industria de Minería y Extracción de Petróleo, los subsectores que le conforman y sus ramas, según la CMAP. La clasificación completa (Sector, Subsector, Rama y Clase) se puede encontrar en los censos económicos 1999 INEGI.

Tabla 2. 3 Sector Extractivo (Minería y Petróleo), Subsectores y Ramas.

SECTOR	SUBSECTOR	RAMA
2 MINERÍA Y EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO	21 MINERÍA DE CARBÓN	2100 MINERÍA DE CARBÓN
	22 PETRÓLEO Y GAS NATURAL	2200 EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL
	23 EXTRACCIÓN DE MINERALES METÁLICOS	2310 MINERÍA DE HIERRO
		2320 EXTRACCIÓN Y/O BENEFICIO DE MINERALES METÁLICOS NO FERROSOS
	29 EXPLOTACIÓN DE MINERALES NO METÁLICOS	2910 EXTRACCIÓN Y/O BENEFICIO DE ROCAS, ARENA Y ARCILLA
		2920 EXTRACCIÓN Y/O BENEFICIOS DE OTROS MINERALES NO METÁLICOS

Fuente: Actividades de producción de Bienes. INEGI, censos económicos 1999. ⁽⁷⁾ (modificado)

En la Tabla 2.4 se muestra el sector de la Industria Manufacturero, los subsectores que le conforman y sus ramas, según la CMAP. La clasificación completa (Sector, Subsector, Rama y Clase) se puede encontrar en los censos económicos 1999 INEGI.

Tabla 2. 4 Sector Manufacturero, Subsectores y Ramas.

SECTOR	SUBSECTOR	RAMA			
3	INDUSTRIAS MANUFACTURERAS	31	PRODUCTOS ALIMENTICIOS, BEBIDAS Y TABACO	3111	INDUSTRIA DE LA CARNE
				3112	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS LÁCTEOS
				3113	ELABORACIÓN DE CONSERVAS ALIMENTICIAS, INCLUYE CONCENTRADOS PARA CALDOS. EXCLUYE LAS DE CARNE Y LECHE EXCLUSIVAMENTE
				3114	BENEFICIO Y MOLIENDA DE CEREALES Y OTROS PRODUCTOS AGRÍCOLAS
				3115	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE PANADERÍA
				3116	MOLIENDA DE NIXTAMAL Y FABRICACIÓN DE TORTILLAS
				3117	FABRICACIÓN DE ACEITES Y GRASAS COMESTIBLES
				3118	INDUSTRIA AZUCARERA
				3119	FABRICACIÓN DE COCOA, CHOCOLATE Y ARTÍCULOS DE CONFITERÍA
				3121	ELABORACIÓN DE OTROS PRODUCTOS ALIMENTICIOS PARA EL CONSUMO HUMANO
				3122	ELABORACIÓN DE ALIMENTOS PREPARADOS PARA ANIMALES
				3130	INDUSTRIA DE LAS BEBIDAS

		3140	INDUSTRIA DEL TABACO
		3211	INDUSTRIA TEXTIL DE FIBRAS DURAS Y CORDELERIA DE TODO TIPO
		3212	HILADO, TEJIDO Y ACABADO DE FIBRAS BLANDAS. EXCLUYE DE PUNTO
		3213	CONFECCIÓN CON MATERIALES TEXTILES. INCLUYE LA FABRICACIÓN DE TAPICES Y ALFOMBRAS DE FIBRAS BLANDAS
32	TEXTILES, PRENDAS DE VESTIR E INDUSTRIA DEL CUERO	3214	FABRICACIÓN DE TEJIDOS DE PUNTO
		3220	CONFECCIÓN DE PRENDAS DE VESTIR
		3230	INDUSTRIA DEL CUERO, PIELES Y SUS PRODUCTOS. INCLUYEN LOS PRODUCTOS DE MATERIALES SUCEDANEOS. EXCLUYE CALZADO Y PRENDAS DE VESTIR DE CUERO, PIEL Y MATERIALES SUCEDANEOS
		3240	INDUSTRIA DEL CALZADO. EXCLUYE DE HULE Y/O PLÁSTICO
33	INDUSTRIAS DE LA MADERA Y PRODUCTOS DE MADERA, INCLUYE MUEBLES	3311	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE ASARRADERO Y CARPINTERÍA. EXCLUYE MUEBLES
		3312	FABRICACIÓN DE ENVASES Y OTROS PRODUCTOS DE MADERA Y CORCHO. EXCLUYE MUEBLES
		3320	FABRICACIÓN Y REPARACIÓN DE MUEBLES PRINCIPALMENTE DE MADERA. INCLUYE COLCHONES

34	PAPEL Y PRODUCTOS DE PAPEL, IMPRENTAS Y EDITORIALES	3410	MANUFACTURA DE CELULOSA, PAPEL Y SUS PRODUCTOS
		3420	IMPRENTAS, EDITORIALES E INDUSTRIAS CONEXAS
35	SUSTANCIAS QUÍMICAS, PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO Y DEL CARBÓN, DE HULE Y DE PLÁSTICO	3511	PETROQUÍMICA BÁSICA
		3512	FABRICACIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS BÁSICAS. EXCLUYE LAS PETROQUÍMICAS BÁSICAS
		3513	INDUSTRIA DE LAS FIBRAS ARTIFICIALES Y/O SINTÉTICAS
		3521	INDUSTRIA FARMACÉUTICA
		3522	FABRICACIÓN DE OTRAS SUSTANCIAS Y PRODUCTOS QUÍMICOS
		3530	REFINACIÓN DE PETRÓLEO
		3540	INDUSTRIA DEL COQUE, INCLUYE OTROS DERIVADOS DEL CARBÓN MINERAL Y DEL PETRÓLEO
		3550	INDUSTRIA DEL HULE
36	PRODUCTOS MINERALES NO METÁLICOS. EXCLUYE LOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO Y DEL CARBÓN	3611	ALFARERÍA Y CERÁMICA. EXCLUYE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
		3612	FABRICACIÓN DE MATERIALES DE ARCILLA PARA LA CONSTRUCCIÓN
		3620	FABRICACIÓN DE VIDRIO Y PRODUCTOS DE VIDRIO
		3691	FABRICACIÓN DE CEMENTO, CAL, YESO Y OTROS PRODUCTOS A BASE DE MINERALES NO METÁLICOS

37	INDUSTRIAS METÁLICAS BÁSICAS	3710	INDUSTRIA BÁSICA DEL HIERRO Y DEL ACERO
		3720	INDUSTRIAS BÁSICAS DE METALES NO FERROSOS. INCLUYE EL TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLES NUCLEARES
38	PRODUCTOS METÁLICOS, MAQUINARIA Y EQUIPO. INCLUYE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS Y DE PRECISIÓN	3811	FUNDICIÓN Y MODELO DE PIEZAS METÁLICAS, FERROSAS Y NO FERROSAS
		3812	FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS, TANQUES Y CALDERAS INDUSTRIALES. INCLUSO TRABAJOS DE HERRERÍA
		3813	FABRICACIÓN Y REPARACIÓN DE MUEBLES METÁLICOS
		3814	FABRICACIÓN DE OTROS PRODUCTOS METÁLICOS. EXCLUYE MAQUINARIA Y EQUIPO
		3821	FABRICACIÓN, REPARACIÓN Y/O ENSAMBLE DE MAQUINARIA Y EQUIPO PARA FINES ESPECÍFICOS, CON O SIN MOTOR ELÉCTRICO INTEGRADO. INCLUYE MAQUINARIA AGRÍCOLA
		3822	FABRICACIÓN, REPARACIÓN Y/O ENSAMBLE DE MAQUINARIA Y EQUIPO PARA USOS GENERALES, CON O SIN MOTOR ELÉCTRICO INTEGRADO. INCLUYE ARMAMENTO
		3823	FABRICACIÓN Y/O ENSAMBLE DE MÁQUINAS DE OFICINA, CÁLCULO Y PROCESAMIENTO INFORMÁTICO

		FABRICACIÓN Y/O ENSAMBLE DE MAQUINARÍA, EQUIPO Y 3831 ACCESORIOS ELECTRICOS. INCLUYE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
		FABRICACIÓN Y/O ENSAMBLE DE EQUIPO ELECTRONICO DE 3832 RADIO, TELEVISIÓN, COMUNICACIONES Y DE USO MEDICO
		FABRICACIÓN Y/O ENSAMBLE DE APARATOS Y ACCESORIOS DE USO 3833 DOMÉSTICO. EXCLUYE LOS ELECTRONICOS
		3841 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
		FABRICACIÓN, REPARACIÓN Y/O ENSAMBLE DE EQUIPO DE 3842 TRANSPORTE Y SUS PARTES. EXCLUYE AUTOMÓVILES Y CAMIONES
		FABRICACIÓN, REPARACIÓN Y/O ENSAMBLE DE INSTRUMENTOS Y 3850 EQUIPO DE PRECISIÓN. INCLUYE INSTRUMENTAL QUIRÚRGICO. EXCLUYE LOS ELECTRONICOS
39	OTRAS INDUSTRIAS MANUFACTURERAS	3900 OTRAS INDUSTRIAS MANUFACTURERAS

Fuente: Actividades de producción de Bienes. INEGI, censos económicos 1999. ⁽⁷⁾ (modificado)

La clasificación CMAP, ubica en el sector 4 el sector económico de la Electricidad. En el sector económico 5 se encuentra la actividad económica de la Construcción, compuesto por las ramas de la Edificación, Construcción de obras de urbanización, Construcción e instalaciones industriales, otras construcciones, instalaciones y trabajos especiales.

2.3 GIROS INDUSTRIALES

Según el “XV Censo Industrial” las actividades económicas del país que tienen mayor impacto al ambiente son las pertenecientes al sector manufacturero de la planta industrial del país. (Ver Tabla 2.5)

Tabla 2. 5 Industrias más Contaminantes

CLASIFICACIÓN CIU		CLASIFICACIÓN CMAP	
CODIGO	DESCRIPCIÓN	CODIGO	DESCRIPCIÓN
3411	PULPA DE MADERA PAPEL Y CARTÓN	3410	MANUFACTURA DE CELULOSA, PAPEL Y SUS PRODUCTOS
3511	SUSTANCIAS QUÍMICAS INDUSTRIALES BÁSICAS	3511	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS PETROQUÍMICOS BÁSICOS
3530	REFINERÍAS DE PETROLEO	3530	REFINACIÓN DEL PETROLEO
3692	CEMENTO, CAL Y YESO	3691	FABRICACIÓN DE CEMENTO, CAL, YESO Y OTROS PRODUCTOS
3710	INDUSTRIAS BÁSICAS DE HIERRO Y ACERO	3710	INDUSTRIA BÁSICA DEL HIERRO Y DEL ACERO
3720	INDUSTRIAS BÁSICAS DE METALES NO FERROSOS	3720	INDUSTRIAS BÁSICAS DE METALES NO FERROSOS

Fuente: Murillo, Romero y Samaniego. *Industria y Medio Ambiente en México.* ⁽⁸⁾ (modificado)

A esta determinación se llegó agrupando contaminantes del sector manufacturero y tomando los dos principales emisores por cada uno de ellos, luego se identificó aquellas industrias que se encontraban en el grupo al menos tres veces y se obtuvo un conjunto de 6 industrias (Tabla 2.5).

En la Tabla 2.5 se muestran estas 6 ramas del sector manufacturero de la industria, con la clasificación mexicana CMAP y su ubicación correspondiente en la clasificación CIU de la ONU. Observamos que aún cuando ciertas categorías de la CIU y la CMAP coinciden directamente, este no es siempre el caso: la rama 3410 de CMAP es más amplia que la 3411 de la CIU ya que tiene otras actividades que en la clasificación CIU se incluyen en otras categorías. Las ramas 3691 (en 3692 de la CIU), la 3530, 3710 y 3720 tienen equivalentes directos en ambas clasificaciones.

Estas industrias contaminantes no han sido identificadas utilizando datos específicos de la industria mexicana, sino coeficientes genéricos calculados con base en datos de la industria norte americana. Si bien estos coeficientes han sido aplicados a varios países para la ubicación de los sectores más contaminantes, resulta perfectamente factible que otras industrias que no se encuentran en esta lista sean más contaminantes para el caso mexicano. Sin embargo, dada la ausencia de mediciones directas de contaminantes, esta posibilidad no puede ser comprobada empíricamente. ⁽⁸⁾

Los cinco estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria contaminante de manufactura de celulosa, papel y sus productos, a 1998 son:

- Nuevo León (10-20%).
- Veracruz (0-10%).
- Querétaro (0-10%).
- Estado de México (20-30%).
- Distrito Federal (0-10%).

Los cuatro estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria contaminante de petroquímica básica, a 1998 son:

- Tamaulipas (0-10%).
- Veracruz (más del 30%).
- Chiapas (10-20%).
- Puebla (0-10%).

Los cinco estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria contaminante de la refinación del petróleo, a 1998 son:

- Nuevo León (10-20%).
- Veracruz (10-20%).
- Chiapas (20-30%)
- Hidalgo (20-30%).
- Guanajuato (10-20%).

Los cinco estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria contaminante de la fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos, a 1998 son:

- Nuevo León (0-10%).
- Puebla (0-10%).
- Estado de México (10-20%).
- Hidalgo (10-20%).
- Jalisco (10-20%).

Los cinco estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria básica contaminante del hierro y del acero, a 1998 son:

- Coahuila (20-30%).
- Nuevo León (20-30%).
- San Luis Potosí (0-10%).
- Veracruz (10-20%).
- Michoacán (10-20%).

Los cinco estados con la mayor contribución a la producción bruta de la industria básica contaminante de metales no ferrosos, a 1998 son:

- Sonora (20-30%).
- Coahuila (20-30%).
- San Luis Potosí (10-20%).
- Estado de México (0-10%).
- Distrito Federal (10-20%).

2.3.1 INDUSTRIA DE LA SIDERURGICA

México es el segundo productor de acero en América Latina y el 16° en el mundo. Según datos del XV censo industrial del INEGI, en 1998 existían 136 unidades económicas en la industria siderúrgica, entre micro, pequeñas, medianas y grandes empresas. La industria del acero sobresale entre los sectores productivos más importantes del país debido al número de personas empleadas, la cantidad de divisas que representan sus exportaciones y su constante inversión en investigación y desarrollo. Esta industria ocupa el primer lugar nacional en el consumo de electricidad (10.1% del consumo total) y el segundo lugar en el consumo de gas

natural (31.5% del total) y es de los principales usuarios de ferrocarriles (9.8% del volumen nacional de carga). Representa el inicio de una importante cadena productiva que alimenta a otros sectores como el de la construcción, los electrodomésticos, la industria petrolera, la automotriz, la de maquinaria y equipos industriales, los implementos agrícolas, la minería, y la industria naval. Aun cuando las empresas siderúrgicas no se encuentran entre las más grandes del país, éstas si se encuentran entre las que más invierten en investigación y desarrollo tecnológico.

2.3.2 INDUSTRIA DE LA PETROQUÍMICA

La industria petrolera se divide en tres grandes ramas, la de las actividades relacionadas con la extracción y el transporte del petróleo crudo, la que abarca las actividades relacionadas con la refinación del petróleo crudo y la rama de las actividades de transformación más complejas.⁽²⁰⁾

Las actividades relacionadas con la refinación de petróleo comprenden actividades de almacenaje y transporte interno, a los procesos de desalación del petróleo crudo, Cracking térmico, Cracking catalítico, Hidrocracking, Polimerización, Alquilación, Isomerización, Reforming, Hidrotratamiento y Producción de asfalto. La localización de las refinerías nacionales es función directa de la ubicación de los centros consumidores, debido a la demanda de consumibles que ejercen estos los principales núcleos industriales.

Los productos que se obtienen mediante el paso del petróleo crudo por los procesos de refinación anteriormente mencionados son: gasolina, Kerosina, diesel, combustóleo, asfalto, lubricantes, grasas, parafinas y gas licuado.

La refinación del petróleo crudo hasta la obtención de productos primarios comprende un amplio número de procesos, en los cuales la función primordial del agua es la de efectuar un enfriamiento adecuado del equipo y productos a la salida de los procesos. Del volumen total de agua que se demanda en estas actividades, más de la mitad se destina a enfriamiento, provocando un incremento de la temperatura. La demanda que ejercen los procesos productivos en sí, no es mayor del 20%.

La industria petroquímica provee materias primas para la elaboración de gran cantidad de productos a partir de la transformación de petróleo crudo y gas natural. Esta industria abastece de materia prima a más de 40 ramas del sector productivo y mercados del país. México representa el 4.8% de la producción mundial de crudo, el 1.4% de la producción mundial de gas natural, mientras que sólo participa con el 0.6% de la producción de petroquímicos y químicos a nivel mundial.

Respecto al sector de plásticos, según el Banco de Comercio Exterior (Bancomext), México es el consumidor de plásticos número 17 a nivel mundial, el segundo consumidor de Latinoamérica (consumo anual de 3 millones de toneladas) y es el segundo consumidor de refrescos (por debajo de Estados Unidos Americanos). Así mismo la industria del plástico es el quinto generador de empleo en el sector manufacturero. La industria del plástico esta constituida por grandes grupos químicos, de los cuales alrededor del 80% está ubicado en zonas petroquímicas del país (Tamaulipas y Veracruz, por la influencia del puerto de Altamira). El segmento de mercado más importante en la industria del plástico es el de envases y empaques, con una participación del 40% a más en la industria de las bebidas, alimentos, farmacéuticos y cosméticos.

Con respecto al tereftalato de polietileno (PET), éste se clasifica dentro la producción de la industria de la petroquímica secundaria (como una resina sintética). Según la CMAP, la producción de PET grado botella está clasificada dentro de la rama 3512 (fabricación de sustancias químicas básicas, excluyendo a las petroquímicas básicas). A su vez se clasifica dentro de la clase 351231 (fabricación de resinas sintéticas y plastificantes).

El PET ha destacado como uno de los plásticos más utilizados en la industria textil, de películas fotográficas y cintas de casetes. A partir de 1976 el PET se empezó a utilizar en la fabricación de envases, principalmente para bebidas. Actualmente este compuesto se utiliza en la fabricación de telas, películas y envases (de refrescos, jugos, agua y aceites).

El consumo del PET para la fabricación de botellas ha aumentado en las últimas décadas, principalmente como un sustituto del vidrio. Entre sus ventajas comparativas resaltan: menor

precio de la botella, menor peso del envase y como consecuencia menores gastos de transporte. Estas características lo convierten en un producto atractivo y exitoso.

Tabla 2. 6 Consumo de los Principales Plásticos en México, 2000

PLÁSTICO	ABREVIATURA	MILES DE TONELADAS
Polietileno de baja densidad	PEBD	870
Polietileno de alta densidad	PEAD	658
Polipropileno	PP	643
Tereftalato de polietileno	PET	413
Policloruro de vinilo	PVC	355
Poliestireno	PS	265

Fuente: Murillo, Romero y Samaniego. *Industria y Medio Ambiente en México.* ⁽⁸⁾ (modificado)

Sin embargo, el notable crecimiento del uso del PET en el mercado nacional ha traído también importantes consecuencias ambientales, entre las que destacan la generación de residuos sólidos municipales y la consecuente contribución a la saturación de los rellenos sanitarios del país.

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LOS DIVERSOS GIROS INDUSTRIALES

Anteriormente la mayor parte de industrias vertían sus aguas residuales a colectores municipales. Otra pequeña parte lo hacía directamente sobre cauces naturales (sin aplicar tratamiento alguno). Actualmente los responsables de las plantas industriales tienen por lo menos tres opciones en relación con la eliminación de sus aguas residuales: una es enviar las aguas residuales industriales directamente a la planta de tratamiento de agua residual municipal; otra es enviar las aguas residuales industriales a una planta de tratamiento de agua residual industrial y después de esto a un colector municipal o a un curso de agua; la tercera es verter sus aguas residuales industriales directamente sobre un cauce, una vez que se ha comprobado cuidadosamente que la calidad de vertido es aceptable. Esto se pudo hacer en la medida que las características del agua residual industrial lo permitan y no dañen los procesos de tratamiento de una planta municipal. Se debe tomar en cuenta que el hecho de verter un agua residual industrial que contenga fuertes concentraciones de contaminantes (aunque estos sean similares

a los existentes en el agua residual de origen municipal) puede elevar los costos de tratamiento, ya que es más factible tratar un caudal pequeño con concentraciones altas de contaminantes, que un caudal mayor contaminado, (proveniente de combinar las aguas residuales municipales con las industriales). Los municipios a su vez pueden: excluir todos los vertidos industriales o solo algunos; exigir un tratamiento de origen para todos los vertidos industriales de forma que sus características de DBO y sólidos sean parecidas a la de las aguas residuales municipales; recibir todos los vertidos industriales o todos, excepto aquellos que sean peligrosos para los procesos de la planta municipal de tratamiento.

La mayoría de los vertidos industriales contienen solamente algún constituyente perjudicial, su eliminación permite que el líquido resultante se pueda tratar conjuntamente con las aguas residuales municipales. Es muy poca la diferencia que existe entre un vertido industrial que resultaría totalmente intratable para una planta municipal y otro que contenga sólo ciertos contaminantes (unos cuantos), que resulten intratables cuando se mezclen las agua residuales de la industria con las aguas residuales municipales. Por ello es necesario determinar las características de las aguas residuales de los diferentes giros industriales.

Tabla 2. 7 Descargas de Aguas Residuales Industriales a Cuerpos de Agua Nacionales 1998-1999 INE

PARAMETRO	CANTIDAD	NO. EMPRESAS QUE REPORTARON
Grasas y aceites mg/l	23,268.58	298
Materia Flotante (presente ó ausente)	Ausente	295
Sólidos Suspendidos Totales mg/l	138,443.89	279
DBO mg/l	379,540.91	276
Arsénico total mg/l	200.11	179
Cadmio total mg/l	319.67	177
Cianuro total mg/l	84.32	182
Cobre total mg/l	298.8	195
Cromo hexavalente mg/l	64.98	176
Fósforo total mg/l	5,331.76	155
Mercurio total mg/l	62.5	161
Níquel total mg/l	136.04	180
Nitrógeno total mg/l	2,2629.72	154
Plomo total mg/l	219.34	188
Zinc total	304.71	198

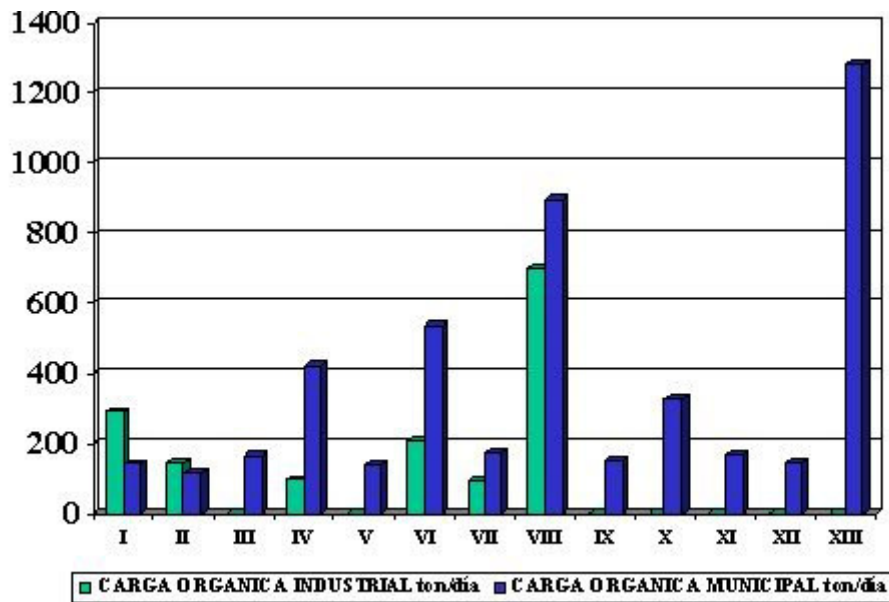
Resultados del análisis de la base de datos sobre descargas de aguas residuales industriales a cuerpos de agua nacionales 1998-1999 Instituto Nacional de Ecología (muestra de 314 empresas)

Fuente: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/327/v.html> ⁽¹⁵⁾ (Adaptado)

Un análisis realizado a la base de datos de descargas de aguas residuales a cuerpos de aguas nacionales, muestra los datos de la tabla 2.7, descargas al año de 314 empresas por parámetro representativo de sus efluentes.

En la figura 2.1 se muestra la descarga orgánica anual en acuíferos nacionales por región Hidrológica administrativa de 1999. La carga orgánica de origen industrial (barra a la izquierda), la de origen municipal (barra a la derecha). Es necesario hacer notar que no se cuenta con descarga industriales en las siguientes regiones V, IX, X, XI, XII, y XIII.

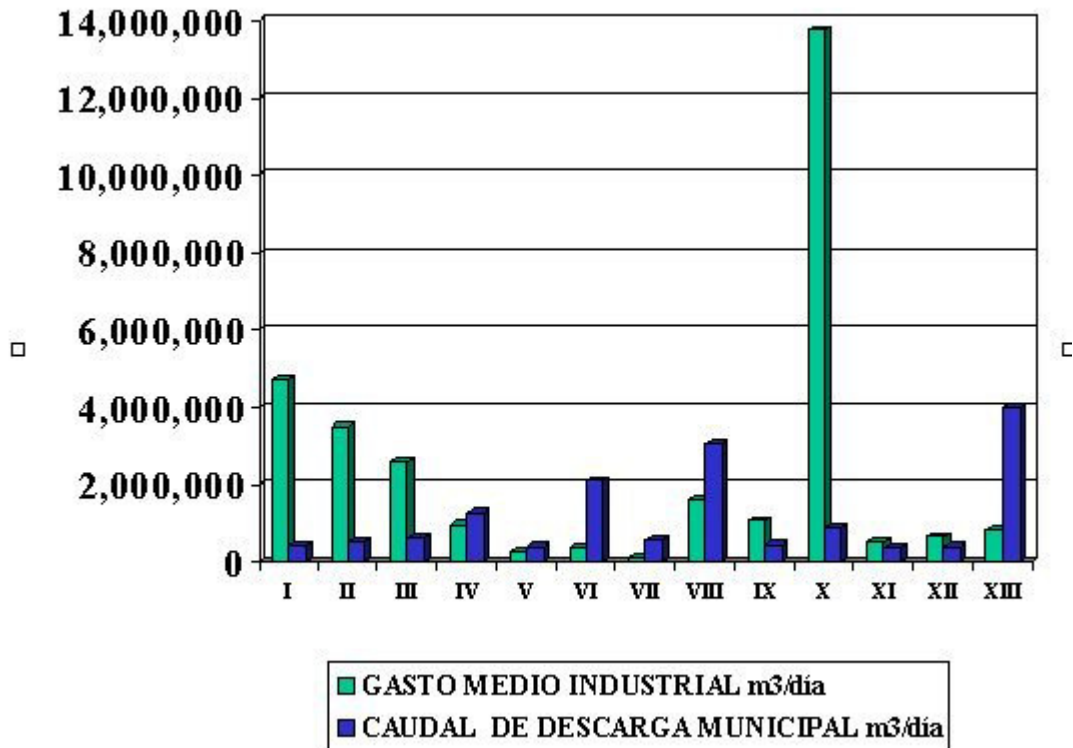
Figura 2. 1 Descarga Industrial en Acuíferos Nacionales por Región Hidrológica Administrativa



Fuente: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/327/v.html> ⁽¹⁵⁾

La figura 2.2 nos muestra la descarga de aguas residuales industriales y municipales a los cuerpos de aguas nacionales en 1999. Observamos que la tendencia de descarga orgánica a los cuerpos de agua nacionales se incrementa en las descargas industriales (barra a la izquierda).

Figura 2. 2 Descarga Industrial en Cuerpos de Aguas Nacionales por Región Hidrológica Administrativa



Fuente: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/327/v.html> ⁽¹⁵⁾

Tabla 2. 8 Estadísticas de Carga Orgánica por Industria

ORIGEN DE LA DESCARGA	CARGA ÓRGANICA (10 ³ TON de DBO ₅)		
	2000	2001	2002
Alimenticia	187.0	192.5	193.0
Azúcar	1601.0	1749.5	1750.0
Beneficio de Café	32.0	32.0	32.0
Celulosa y Papel	101.0	108.0	108.0
Cerveza y Malta	271.5	272.0	272.0
Curtiduría	7.0	9.0	9.0
Destilería y Vitivinicultura	230.0	230.0	230.0
Minera	56.0	56.0	56.0
Petrolera	1113.0	1186.0	1186.0
Química	453.0	406.0	406.0
Textil	14.0	14.0	14.0
Otros Giros ¹	1115.0	669.0	794.5

Fuente: Materia Orgánica Descargada en Aguas Residuales Industriales. SEMARNAT ⁽¹⁴⁾

La Tabla 2.8 muestra las estadísticas de 2000, 2001 y 2002 de carga orgánica generada por la industria mexicana. En ella podemos ubicar los sectores industriales más importantes de

acuerdo a la carga orgánica presente en sus efluentes, podemos señalar a la industria azucarera como la rama más perjudicial de acuerdo a sus niveles de carga orgánica, le sigue la industria petrolera y la Química.

En la Tabla 2.8, se hace referencia a otros giros no citados en el listado de la tabla, agrupándolo en la clasificación “Otros Servicios”, como son la manufactura, acabado de metales, metalmecánica, etc.

Tabla 2.9 Volumen de Descarga de Aguas Residuales Industriales

ORIGEN DE LA DESCARGA	CAUDAL DESCARGADO (m ³ /s)			
	1998	2000	2001	2002
Azúcar	64.8	42.0	45.9	45.9
Otros giros	59.9	20.6	13.6	12.9
Petrolera	6.2	10.7	11.4	11.4
Química	13.4	6.9	6.9	6.9
Celulosa y Papel	4.5	5.1	5.5	5.5
Otros giros agroindustriales, textil y minería	7.8	9.1	10.2	10.1
Alimenticia	1.2	2.9	3.0	3.0
Cerveza y Malta	1.4	1.6	1.6	1.6
Textil	2.9	0.7	0.7	0.7
Beneficio de Café	1.5	0.2	0.3	0.3
Minera	ND	0.8	0.8	0.8
Destilería y vitivinicultura	0.0	0.4	0.4	0.4
Curtiduría	0.0	0.1	0.1	0.1

Fuente: Descarga de Aguas Residuales Industriales por Giro. SEMARNAT ⁽¹³⁾

De la tabla 2.9 vemos que la industria del azúcar es también el sector productivo con mayor volumen de descarga de aguas residuales, le sigue la industria Química.

Del análisis de las tablas 2.9 y 2.8 observamos que la industria azucarera es la principal fuente de contaminación respecto a aguas residuales industriales en el país, no solo por ser la actividad industrial que descarga un mayor volumen de aguas residuales, si no porque sus efluentes contienen alta carga orgánica.

Por consiguiente la industria del azúcar, la química y la industria petrolera son los sectores productivos que merecen mayor atención, no solo por la importancia de su actividad económica dentro del país, sino también por el impacto que ejercen al medio ambiente.

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA

Los vertidos de la industria de la siderúrgica y transformados metálicos comprenden las de industrias refinadoras y de tratamientos superficiales y abarcan una amplia gama de materiales. Los vertidos provienen no solo de la fabricación de acero, sino también de muchos más metales (cobre, aluminio, por mencionar algunos); los vertidos se producen al limpiar las superficies de piezas metálicas usadas, tales como motores de aviones antes de su envío al servicio; el recubrimiento de un metal con otro, con fines de protección. Estos vertidos contienen diferentes concentraciones de sustancias metálicas, ácidos, álcalis y grasa. Se caracterizan por su toxicidad, contenido orgánico relativamente bajo y contenido de grasas. (Ver Tabla 2.10)

Tabla 2. 10 Contaminantes del Agua Residual en la Industria Metalúrgica

CONTENIDO
Sustancias metálicas
Ácidos
Álcalis
Grasa

Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾ (adaptado)

El origen de los vertidos de la siderúrgica se produce principalmente por los subproductos de los hornos de coque, zonas de laminación y de decapados. Los vertidos contienen compuestos de cianuros, fenoles, minerales, coque, piedra caliza, ácidos, álcalis, aceites solubles e insolubles y costras de laminación (Tabla 2.11). También podemos encontrar en el vertido productos de la preparación del coque, estos se añaden al agua en el proceso de enfriamiento, donde el coque caliente se lava con agua. El polvo del coque presente en esta agua de enfriamiento se denomina “cisco de coque” y generalmente se trata de recuperar del agua.

Tabla 2. 11 Características del Agua Residual en la Industria de la Siderúrgica

CARACTERÍSTICAS
Cianuros
Fenoles
Minerales
Coque
Piedra caliza
Ácidos
Álcalis
Aceites solubles e insolubles
Costras de laminación

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

Los vertidos de la coquización en la siderúrgica provienen de la destilación final, donde se obtienen productos tales como benceno, tolueno y xileno de la naftalina bruta. El fenol y materiales con demanda de oxígeno son los principales contaminantes.

En el proceso de la purificación húmeda del gas proveniente del alto horno, se produce agua cargada de polvo tragante, por medio de purificadores húmedos (que son atomizadores de agua) de flujo descendente se logra limpiar el polvo de los gases ascendentes.

Tabla 2. 12 Contenido de Acido y Metales (A. R. Decabado)

ÁCIDO Y METAL	mg/l
H ₂ SO ₄	59.7-163.5
Cu	4.0-22.6
Zn	4.3-41.4
Cr	0-0.56
Fe	0.1-0.21

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

Antes del acabado final a los productos de acero, el fabricante debe eliminar la suciedad, grasa y especialmente la costra de óxido de hierro que se acumula en el metal durante la fabricación. Normalmente eso se realiza sumergiendo el acero en ácido sulfúrico diluido. Este proceso se

conoce como “Decabado”, este proceso produce un residuo denominado “líquido decapante”, compuesto principalmente de ácido sin usar y de las sales de hierro (ver Tabla 2.12). El ácido sulfúrico (H_2SO_4) reacciona con las sales de hierro, formando $FeSO_4$ (sulfato Ferroso), mientras hay mas concentración $FeSO_4$, se inhibe al ácido sulfúrico (sin reaccionar o sin usar) aún existente. En este punto el líquido decapante deberá verterse y sustituirse por ácido sulfúrico nuevo.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Los residuos textiles son generalmente coloreados, muy alcalinos, muy elevada DBO, muchos sólidos en suspensión y con temperatura elevada. Los vertidos de la industria de fibras sintéticas son parecidos a los de las fábricas químicas y su tratamiento depende de los procesos químicos usados en la fabricación de la fibra (Tabla 2.13).

Tabla 2. 13 Contaminantes del Agua Residual en la Industria Textil

CONTENIDO
Colorantes
Elevada Alcalinidad
Elevada DBO
Muchos Sólidos Suspendidos
Elevada Temperatura

Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾ (adaptado)

Las sustancias contaminantes proceden de las impurezas naturales extraídas de las fibras y de los productos químicos empleados en el proceso y que son después eliminados. Los procesos productores varían por el material del que se trate. En esta industria los materiales se pueden subdividir en 3 grupos: algodón, lana y fibras sintéticas.

En el proceso para obtención de *fibras de Algodón* se utilizan colas derivadas de la celulosa para el empesado. El tejido con apresto es conocido como “género crudo”, el género crudo se desapresta (se elimina el apresto en la operación de acabado), para hacer posible el tratamiento húmedo, posterior se cuece en autoclave para eliminar las impurezas naturales luego se blanquea, se merceriza (para dotar al tejido de brillo, resistencia y afinidad por el tinte), se tinta

o estampa y finalmente, se le da apresto nuevamente a fin de hacerle más resistente al desgaste y más suave al tacto.

El vertido de la industria textil del algodón se conforma por los residuos de las colas y aprestos, por residuos cáusticos y vertidos compuestos, con cada uno de estos contribuyen en DBO, sólidos totales y en la alcalinidad de las aguas de desecho. (Ver Tabla 2.14)

Tabla 2. 14 Características del Agua de Desecho en la industria de Textiles de Algodón

CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS	PORCENTAJE DE VOLUMEN TOTAL	APORTACIÓN DE DBO	SÓLIDOS TOTALES	ALCALINIDAD TOTAL
Colas y Aprestos	16%	53%	36%	6%
Cáusticos	19%	37%	43%	60%
Compuestos	65%	10%	21%	34%

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

El *residuo de las colas y aprestos* conforma el 16% del volumen total de residuos producidos, estos residuos constituye el 53% de DBO, un 36% de los sólidos totales y un 6% de la alcalinidad.

Los *residuos cáusticos* constituyen el 19% del volumen total, un 37% de la DBO, un 43% de los sólidos totales y un 60% de la alcalinidad total.

Los *vertido compuesto* procedente de todos los demás procesos (lavado, blanqueo, tintado y acabado), constituyen el 65% del volumen total, aportan el 10% de la DBO, el 21% de los sólidos totales y el 34% de la alcalinidad total.

Los *vertidos de lana* tienen su origen en los procesos de descrudado, tintado, engrasado, batanado, carbonizado y lavado. Las impurezas naturales o adicionales que pueda contener la lana, son eliminadas mediante procesos de lavado con detergentes en soluciones alcalinas calientes (muchas lanas se lavan ya con disolventes orgánicos con fin de atenuar el impacto). Después del lavado se recupera por destilación el disolvente cargado de grasa. En el proceso tintado se hace circular la solución colorante y caliente a través de la lana, este proceso se lleva a cabo dentro de una caldera. A continuación se realiza el proceso de aceitado, el aceite

(generalmente de oliva) se mezcla con agua y se pulveriza sobre la lana, el aceite aumenta la cohesión de las fibras y ayuda en el hilado, pero posteriormente, en el proceso de acabado hay que eliminar de la lana todo el aceite mediante lavados. Después que la lana sale del tejar se encoge y apelmaza de forma que el tejido de lana floja forma un tejido cerrado y apretado. En la mayoría de las plantas en el proceso de batanar se utiliza jabón mezclado con sosa y un agente antiespumante, el exceso de la solución de batanar se habrá de eliminar de la lana mediante lavado a presión. El carbonizado es un proceso que utiliza ácidos calientes y concentrados para convertir la materia vegetal que contenga la lana, en partículas sueltas y carbonizadas, las cuales se sacuden después de la lana con el fin de desprendan del tejido. Adicional a los procesos anteriores puede llevarse a cabo también otras operaciones, como el tintado y el blanqueo en pieza y un nuevo bataneo, pero esto ya no se aplica a todo el volumen de tejido tratado sino a una selección.

El contenido real de fibra de lana en la “lana sucia” (tal como viene de la oveja), es sólo un 40%, ya que el 60% restante se constituye de impurezas naturales, tales como arena, grasa, churre (sudor de la oveja), y motas o brozas. Por lo mismo cuando se descrudan 2.5 kg de lana sucia, solo se obtiene 1 kg de lana.

Tabla 2. 15 Contaminantes del Agua Residual de la Industria Textil

INDICADOR	CANTIDAD
pH	9 a 10.5
DBO	900 mg/l
Sólidos Totales	3,000 mg/l
Alcalinidad Total	600 ppm
Cromo Total	4 mg/l
Sólidos en Suspensión	100 mg/l
Color	Marrón
Naturaleza	Coloidal

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

Las características del agua de la industria textil de lana compone un efluente con un pH entre 9 a 10.5 y que contiene 900 mg/l de DBO, 3,000 mg/l de sólidos totales, 600 ppm de alcalinidad total, 4 mg/l de cromo total y 100 mg/l de sólidos en suspensión. El color de este

residuo es marrón y su naturaleza es principalmente coloidal. La mayor fuente de DBO es la grasa y el churre de la lana que se quitaron en el descruado, y el jabón utilizado en el bataneo y el lavado. El 24% de la DBO de los vertidos de una fábrica de lana se origina en el proceso del tintado, el 75% en el lavado que sigue al batan y solo 1% en la neutralización que sigue al carbonizado. (Ver Tabla 2.15)

Se requieren 584,000 litros de agua para el tratamiento de 1,000 kg de lana, es decir 584 litros por kilogramo de lana.

2.4.3 CARACTERISTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN INDUSTRIA DE CURTIDURÍA

Los vertidos de estos procesos se originan en la zona de adobar y en la tenería. En la zona de adobar se realizan las operaciones de curado, descarnado, lavado, remojo, eliminación del pelo, corte a la cal, maceración, piclaje y desengrasado. En la zona de tenería se prepara la piel final por varios procesos, incluido el curtido vegetal o con cromo, el raspado y el acabado. La operación de acabado incluye la decoloración, el relleno, la impregnación con grasa y el teñido.

Tabla 2. 16 Contaminantes del Agua Residual de la Industria de Curtiduría

INDICADOR	CANTIDAD
Sólidos Totales	6,000 a 8,000 mg/l
DBO	900 mg/l
Dureza Total	1,600 mg/l
Sulfuro	120 mg/l
Proteínas	1,000 mg/l
Cromo	30 a 70 mg/l

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

El vertido tiene unas 6,000 a 8,000 mg/l de sólidos totales, de los que aproximadamente la mitad son NaCl, contiene aproximadamente 900 mg/l de DBO, 1,600 mg/l de dureza total, 120 mg/l de sulfuro, 1,000 mg/l de proteínas y de 30 a 70 mg/l de cromo. Resaltando la gran importancia del alto contenido de DBO, dureza, sulfuro, cromo y lodos. Se producen aproximadamente 8 litros de estos vertidos por kilogramo de piel recibida por la curtiduría. (Ver Tabla 2.16)

Las proteínas y otras materias extraídas de las pieles se estima que producen de un 50% a un 70% de la carga de DBO y los productos químicos empleados en el proceso de un 30% a un 50%.

2.4.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE CONSERVAS

La industria de las conservas alimenticias es una de las importantes pues utiliza grandes cantidades de agua. Se clasifican los vertidos de las fábricas de conservas según el producto que elaboren, la temporada a la que corresponde su cultivo, y su situación geográfica.

Los vertidos de estas fábricas son principalmente orgánicos y proceden de las operaciones de limpieza, extracción del jugo, calentamiento preliminar y pasteurización de las materias primas, limpieza de la maquinaria para la elaboración y la congelación del producto terminado.

Tabla 2. 17 Características de las Aguas Residuales en la Industria de las Conservas

PRODUCTO	DBO mg/l	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN mg/l
Tomates	616-1,870	550-925
Maiz	885-2,936	530-2,325
Judias verdes	93	93
Judias verdes y maíz	270	270
Verduras mezcladas	750	750
Peras	218-468	238-468
Melocotón	1,070	1,070
Manzanas	1,600	1,600
Cerezas	800	800

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales*.⁽⁹⁾ (adaptado)

Puesto que la preparación difiere con cada tipo de verdura, hay que estudiar los métodos por separado, aunque hay poca diferencia entre procedimientos y por lo tanto el origen de los vertidos de todas las verduras (los guisantes, la remolacha, las zanahorias, el maíz, el calabacín, las calabazas y las judías) es parecido. Los vertidos del proceso suelen consistir en: agua de lavado, sólidos de la clasificación y de las operaciones de mondar y quitar las pipas; derrame de

las maquinas que llenan y precintan las latas; y agua de lavado de suelos, mesas, paredes, cintas, etc. (Ver Tabla 2.17)

Entre las frutas (la elaboración de melocotones, tomates, cerezas, manzanas, peras y uvas) se presenta los problemas de vertido de estas industrias. Los vertidos pueden proceder del pelado con lejía, lavado por aspersión, clasificación, troceo, relleno de latas, eliminación del condensado, refrigeración de las latas y limpieza de las fábricas.

Tabla 2. 18 Características de los Vertidos de la Industria de Conserva de Agrios

PRODUCTO	DBO mg/1	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN mg/1
Agua de refrigeración	100	765
Vertidos con pectina	2,720	1,790
Líquido de la presa de pulpa	9,850	780
Vertidos de la planta de proceso	3,230	3,400
Lavados de suelos	970	685
Vertido Compuesto	2,100	7,200

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

Los 3 agrios más importantes (naranjas, limones y toronjas) se elaboran normalmente en la misma fábrica, que produce zumo de agrios en latas, zumos concentrados, aceites de agrios, harina de agrios, melaza y otros sucedáneos. Las aguas residuales cítricas comprenden aguas de refrigeración, vertidos de la fábrica de elaboración y agua de lavado de suelos. Los productos de vertido contienen mezclas de cortezas, pipas de fruta, jugo sobrante del lavado y fruta estropeada. Una fábrica de conservas de cítricos que elabore al día 700 toneladas de naranjas, limones y toronjas, produce un gasto diario de 1,650 m³, que contiene 6 toneladas de DBO. (Ver Tabla 2.18)

2.4.5 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA LÁCTEA

La industria de la leche relaciona a 5 productores; de queso de granja; de mantequilla; de queso; helados y postres helados; leche condensada y en polvo. Las áreas más importantes en esta industria son: recepción, embotellado, fábrica de queso, fábrica de mantequilla, fábricas de leche condensada y plantas de leche en polvo y helados.

Las operaciones que producen vertido dentro la estación receptora son el lavado y la esterilización de los depósitos, tanques, equipos de enfriamiento y suelos. Así mismo la planta de embotellado origina sus vertidos por el lavado de botellas, depósitos, equipos de procesos y suelos.

Esta agua residual está constituida en mayor parte por diferentes diluciones de leche cruda, leche tratada, mantequilla y suero de derrames obligados o accidentales; restos de lavados que contienen productos químicos, alcalinos y otros, utilizados para limpiar de leche los recipientes, lo mismos que restos parcialmente caramelizados de depósitos, botellas, tanques, utensilios, bombas, conducciones, zonas calientes, sistemas de evaporación, depósitos, suelos y agua de lavado de los procesos de la mantequilla, queso, caseína y otros productos. (Ver Tabla 2.19)

Tabla 2. 19 Composición de los Residuos en la Industria de Lácteos
(Leche, subproductos y vertidos de la fabricación del queso)

CARACTERÍSTICAS	RESIDUOS mg/l
SÓLIDOS TOTALES	4,516
SÓLIDOS ORGÁNICOS	2,698
SÓLIDOS INORGÁNICOS	1,818
SÓLIDOS SOLUBLES	3,956
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	560
NITRÓGENO ORGÁNICO TOTAL	73.2
AMONIACO LIBRE	6.0
Na	807
Ca	112.5
Hg	25
K	116
P	59
DBO ₅	1,890

Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾ (adaptado)

Las aguas residuales de las lecherías por lo general son neutras o un poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche transformándose en ácido lácteo. Los vertidos de las lecherías puede pasar a ácido cuando los cursos de agua estén sin oxígeno y el bajo pH resultante puede causar la precipitación de la caseína. Los vertidos de las plantas de producción de queso son especialmente ácidos a causa de la presencia del suero. Las aguas residuales del proceso de la leche contienen muy poca materia en suspensión (excepto el cuajo encontrado en las aguas residuales de la fabricación del queso), y sus efectos contaminantes son casi completamente debidos a la demanda de oxígeno que le imponen a la corriente receptora.

2.4.6 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LAS INDUSTRIAS DE LA CERVEZA, DESTILERÍAS Y FARMACÉUTICOS

Las industrias de fermentación comprenden las fábricas de cervezas, destilerías, fábricas de alcohol, ciertos compuestos químicos orgánicos y parte de la industria farmacéutica, como la producción de antibióticos (Ver Tabla 2.20). Se ha definido a la fermentación como la descomposición de las sustancias orgánicas complejas en materias nitrogenadas llamadas fermentos. La transformación del jugo de uva en vino, la obtención del alcohol de las melazas y la utilización de la levadura en la masa del pan para hacer éste, son ejemplos comunes de fermentaciones.

Tabla 2. 20 Características Medias de Aguas Residuales de Procesos de Fermentación

CARACTERÍSTICA	CONCENTRACIÓN
DBO mg/l	4,500
pH	6-7
Sólidos totales mg/l	10,000

Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾ (adaptado)

Para la producción de alcohol o productos alcohólicos se utilizan principalmente materias del tipo de almidón como la cebada, avena, centeno, trigo, maíz, arroz y patatas, y otras que contienen azúcares, como frutas, mezclas con alto contenido en azúcar y azúcar de remolacha. El proceso para convertir estas sustancias en alcohol varía como varía el material usado y el producto alcohólico que se desea obtener.

La fabricación de la cerveza tiene dos etapas, malteado de la cebada y la fermentación de la cerveza de esta malta. El proceso de malteado produce principalmente dos clases de aguas residuales, del tanque de fermentación (allí se estimula el crecimiento de las enzimas que se utilizan como inóculum) y del tanque de germinación (allí se permite que el grano germine) después que se ha eliminado la malta verde (cuando se remoja en agua para eliminar el color del grano). También se utiliza una gran cantidad de agua para el enfriamiento en el proceso en donde se utiliza agua caliente para mezclar la malta (cebada germinada artificialmente y tostada).

Los sólidos son principalmente orgánicos, con alto contenido en nitrógenos, indicando un considerable material proteínico. La porción más importante de los sólidos está en solución por ello el poco contenido de sólidos en suspensión.

Tabla 2. 21 Aguas Residuales de Procesos de Fermentación

PROCESO DE FERMENTACIÓN	SÓLIDOS %	DBO mg/l
Licor de cervecería	3	10-25,000
Planta de levadura	1-3	7-14,000
Alcohol industrial	5	22,000
Licores de destilerías	4.5-6	15-20,000

Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾ (adaptado)

Las aguas residuales de la fabricación de la cerveza (Tabla 2.21) se componen mayormente de líquido del exprimido del grano húmedo, líquidos de recuperación de levaduras y agua de lavado de varios departamentos. Después del proceso de destilación del alcohol aparece un residuo que se conoce como “residuo de destilación o precipitados”.

Las aguas residuales de la destilería (Tabla 2.21) proceden de diferentes fuentes. Del residuo del condensador del evaporador, residuos de destilación en menor proporción y las del lavado de equipo. Las aguas residuales de la fabricación de la levadura (Tabla 2.21) presada consiste en residuos de filtros que resultan de la preparación de soluciones de nutrientes, nutrientes agotados, aguas de lavado, vertidos provenientes del efluente del filtro prensa y aguas de

enfriamiento y condensación. Esta agua presentan un color marón, los sólidos están enteramente disueltos y en forma coloidal.

Tabla 2. 22 Características Promedio del Agua Residual de la Industria Farmacéutica

CARACTERÍSTICA	RAMAS DE PRODUCCIÓN
	ÁCIDOS, BASES Y SALES
pH	7.8
Temperatura (°C)	22.8
Sólidos Sedimentables (ml/l)	6.3
Grasas y Aceites (mg/l)	20
Sólidos Totales (mg/l)	1,028
Sólidos Volátiles (mg/l)	420
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	463
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l)	180
DBO (mg/l)	562
DQO (mg/l)	1,052
Nitrógeno Total (mg/l)	11
Fosfato Total (mg/l)	16

Fuente: *Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria Química.* ⁽²¹⁾ (adaptado)

Las aguas residuales de las industrias farmacéuticas se originan de los líquidos agotados en el proceso de fermentación, agua de lavado de los suelos y aguas residuales sanitarias de los laboratorios. Los vertidos de las plantas farmacéuticas que producen antibióticos y productos biológicos se clasifican como líquidos fermentados de fuerte concentración, sólidos inorgánicos como tierra de diatónicas que utilizan como pretratamiento en un proceso de filtración, lavado de suelos y materiales, residuos químicos, agua de condensación de la evaporación. (Ver Tabla 2.22)

2.4.7 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

La azúcar es obtenida de la planta de remolacha (Tabla 2.23) y de la caña (Tabla 2.24). En la fábrica de azúcar de remolacha se originan aguas residuales del agua empleada para lavar y para transportar las remolachas hacia el proceso, el agua residual proveniente del proceso mismo y de los residuos de cal y lodo con cal, provenientes del proceso de carbonización, el agua de

condensación de los evaporadores de efecto múltiple y sistemas de vacío (utilizados para concentrar la solución de azúcar).

Tabla 2. 23 Características Promedio del Aguas Residuales de la Fabricación del Azúcar de Remolacha

CARACTERÍSTICA	CONCENTRACIÓN
DBO mg/l	445
Sólidos Totales mg/l	6,470
Sólidos en suspensión mg/l	4,920
pH	7.9
Alcalinidad mg/l	250

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.*⁽⁹⁾ (adaptado)

Tabla 2. 24 Características Promedio del Agua Residual de la Fabricación del Azúcar de Caña

CARACTERÍSTICA	TIPO DE AZÚCAR		
	Crudo	Estándar	Refinado
pH	7	7	7
Temperatura (°C)	31	37	36
Sólidos Sedimentables (ml/l)	5	3	3
Materia Flotante (g/l)	1	1	3
Grasas y Aceites (mg/l)	36	66	147
Sólidos Totales (mg/l)	428	917	1,802
Sólidos Totales Volátiles (mg/l)	205	456	757
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	65	418	610
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l)	59	335	305
DBO (mg/l)	149	714	1,091
DQO (mg/l)	153	1,091	1,170
Nitrógeno Total (mg/l)	1	14	5
Fosfato Totales (mg/l)	7	21	

Fuente: *Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria del Azúcar.*⁽¹⁸⁾ (adaptado)

Las aguas de lavado varían considerablemente en cuanto al contenido de tierra, piedras, hojas de remolacha, raíces y sólidos disueltos. El agua que se exprime de la pulpa contiene materias orgánicas y sólidos en suspensión, como sucede con el lodo de cal. El agua de los condensadores puede contener materia orgánica arrastrada con los vapores de último efecto. El proceso de tratamiento de la remolacha en el que se producen las aguas residuales antes citadas (Tabla 2.23) consiste en diluir las melazas hasta una concentración específica y tratarlas

con suficiente cal en polvo para precipitar el sucrato cálcico, el cual puede eliminarse del líquido mediante filtrado, recuperándose azúcar por un tratamiento con bióxido de carbono, el cual recibe el nombre de proceso Steffen.

En la producción de azúcar de caña (Tabla 2.24) las principales fuentes de agua residual son el lavado de la caña, agua de condensación de las columnas barométrica y agua de lavado de equipo, tuberías y pisos.

Tabla 2. 25 Características Promedio del Efluente de las Destilerías

CARACTERÍSTICA	CONCENTRACIÓN
pH	4.6
DBO (mg/l)	91,520
DQO (mg/l)	22,000
Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	
Nitrógeno Orgánico (mg/l)	446
Grasas y Aceites (mg/l)	2.8
Sólidos Totales (mg/l)	97,222
Sólidos Totales Fijos (mg/l)	27,226
Sólidos Totales Volátiles (mg/l)	69,996
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	33,400
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1.0
Sólidos Disueltos (mg/l)	63,822
Fosfatos Totales (mg/l)	1,250

Fuente: Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria del Azúcar. ⁽¹⁸⁾ (adaptado)

Debe quedar claro que el efluente de las destilerías (Tabla 2.25) constituye la corriente más contaminante como resultado de las fermentaciones llevadas a cabo durante la destilación, que originan una concentración muy alta de sólidos, DBO y DQO.

2.4.8 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

Los vertidos procedentes de la preparación de alimentos tales como café, arroz, pescado, conservas, bebidas, pastas, dulces y aguas para beber, producen aguas residuales provenientes de los procesos.

En los molinos de café los principales usos del agua son para transportar el fruto a los trituradores, para trasportar la fruta, para transportar los granos a los depósitos de fermentación, para lavar los granos fermentados, para transportar los granos fermentados a los patios de secado, otros usos diversos como para interceptar las piedras y como método de separación por flotación, para clasificación hidráulica de semillas y como agua para calderas.

Tabla 2. 26 Características Promedio del Agua Residual del Beneficio del Cafe

CARACTERÍSTICA	DESPULPE	LAVADO
Sólidos Totales mg/l	6293.80	5917.10
DBO mg/l	1658.80	1634.90
DQO mg/l	8124.4	8348.20
Sólidos Disueltos mg/l	5448.18	3970.03
Nitrógeno Total	84.29	94.50
Fosfatos Totales	21.61	22.35

Fuente: *Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria del Beneficio del Café.* ⁽¹⁶⁾ (adaptado)

Los cuatro principales elementos residuales del proceso del café son la pulpa, los desechos de despulpado, el agua de lavado de fermentación, y el tejido. La pulpa es el residuo que puede presentar más problemas, pero generalmente se recupera y se utiliza como combustible o como fertilizante.

El agua de la trituración en el proceso del café contiene una cantidad relativamente grande de sólidos sedimentables, y puesto que contiene azúcar y otras materias solubles es altamente contaminante. Los vertidos de fermentación contienen muchos geles coloidales de pectina y otros productos. (Ver Tabla 2.26)

La producción de aceite, harina, substancias solubles y otras materias a base del pescado constituyen un área importante de la industria. Los vertidos de estos provienen de las bodegas de almacenamiento de los barcos cuando el pescado se saca de los compartimientos correspondientes.

El agua empleada para transportar el pescado se conserva en tanques que se vacían directamente. Las impurezas de esta agua residuales consisten principalmente en sangre,

partículas de pescado, escamas y espuma aceitosa. Los residuos de las cajas de pescado fresco se producen cuando los líquidos escapan por las grietas debido al peso del pescado, estos líquidos tienen una gran cantidad de sangre y sólidos disueltos. Los residuos del lavado se producen por la limpieza de las prensas, pisos, tanques, centrifugas y otros equipos. (Ver Tabla 2.27)

Tabla 2. 27 Características de las Aguas Residuales de la Preparación de Pescado

AGUAS RESIDUALES	DBO mg/l	SÓLIDOS TOTALES mg/l	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES mg/l	GRASAS mg/l
Bodegas de almacenamiento de los barco	42 a 265	15,576 a 20,606	2,489 a 3,394	
Agua empleada para transportar el pescado	3,050 a 67,205	18,421 a 64,857	5,912 a 46,907	1,314 a 17,234
Líquidos filtrantes del almacén y transporte del pescado	30,500 a 32,500	46,741 a 61,760	29,533 a 46,247	10,655
Riego en los hornos para quitar malos olores	120 a 300	14,171 a 18,949	1,906 a 7,957	45
Líquido de Centrifugadoras	56,333 a 112,500	33,597 a 79,200	12,609 a 66,406	4,226 a 24,387
Derrames de los Tanques de almacén de agua a tratar	47,063	52,998	45,483	18,157
Lavado de los Evaporadores	200 a 8,043	13,756 a 16,260	1,695 a 12,389	16 a 329

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales.* ⁽⁹⁾ (adaptado)

En la preparación del arroz comestible se producen grandes cantidades de vertidos por los procesos de remojo, cocción y lavado. Las características de sus vertidos compuestos, se muestran en la Tabla 2.28.

Tabla 2. 28 Características de las Aguas Residuales Compuestas de la Preparación del Arroz

CARACTERÍSTICAS	CONCENTRACIÓN
pH	4.2 a 7
Sólidos Totales mg/l	1,460
Cenizas	20.5%
Sólidos en Suspensión mg/l	610
Cenizas en Sólidos en Suspensión	10.8%
Nitrógeno Total mg/l	30
Fosfato mg/l	30
DBO mg/l	1,065
Almidón mg/l	1,200
Azúcares Reductores mg/l	70

Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales*.⁽⁹⁾ (adaptado)

2.4.9 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Esta industria abarca fábricas o instalaciones relativamente pequeñas, que se dedican a la elaboración de productos químicos básicos o materias primas que utilizan otros fabricantes.

Los productos de características químicas anormales los producen las plantas que fabrican ácidos, bases, detergentes, almidón de maíz, pólvora y explosivos, insecticidas y fungicidas, fertilizantes, siliconas, plásticos, resinas, productos sintéticos y otras sustancias que con frecuencia se utilizan como materias primas para fabricaciones posteriores.

En los vertidos químicos aparecen ácidos, bases, materias tóxicas, DBO y DQO, color e inflamabilidad (fosforo) y un bajo contenido de sólidos en suspensión.

Las ramas de la producción de ácidos, bases y sales, así como la rama de la producción de resina y hule sintético, son ramas elegidas debido a sus cifras de operaciones comerciales y en base a una estimación de los volúmenes de aguas manejados, así como la calidad de sus descargas al medio ambiente y los problemas de contaminación que originan.

La producción de compuestos ácidos, bases y sales, es denominada también como la rama de los productos químicos inorgánicos básicos o “pesados”, sus productos son materia prima en una amplia gama de actividades. Los ácidos principales elaborados (a escala verdaderamente industrial) en México son seis: sulfúrico, fosfórico, nítrico, clorhídrico, crómico y fluorhídrico.

La sosa cáustica es la única base o álcali a escala industrial elaborado en México, además pequeñas cantidades de potasa e hidróxido de amonio. Las sales industriales se enfocan a la producción masiva de carbonato y bicarbonato de sodio. (Ver Tabla 2.29)

La demanda de hule sintético es satisfecha con la elaboración de productos básicos derivados del látex. La producción de resinas es cubierta por aproximadamente 30 resinas de formulación básica y sus variantes. (Ver Tabla 2.29)

Tabla 2. 29 Características Promedio del Agua Residual de 2 Principales Ramas de la Industria Química

CARACTERÍSTICA	RAMAS DE PRODUCCIÓN	
	ÁCIDOS, BASES Y SALES	RESINAS Y HULE SINTÉTICO
pH	3.6	7.9
Temperatura (°C)	31.5	30.3
Sólidos Sedimentables (ml/l)	7.5	12.9
Grasas y Aceites (mg/l)	31.9	167
Sólidos Totales (mg/l)	21,249	3,592
Sólidos Volátiles (mg/l)	2,863	752
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	1,452	896
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l)	90	222
DBO (mg/l)	13	428
DQO (mg/l)	307	1,615
Nitrógeno Total (mg/l)	134	36
Fosfato Total (mg/l)	436	23

Fuente: *Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria Química.* ⁽²¹⁾ (adaptado)

El origen de las aguas residuales de la industria química de acuerdo a los usos más importantes del agua dentro de ésta son tres: en operaciones de enfriamiento sin contacto, en los procesos (incluyendo principalmente las operaciones de enfriamiento o calentamiento por contacto con materias primas, reactivos, productos intermedios, finales o de desecho, operaciones de lavado, transporte e incorporación como diluyente) y en servicios auxiliares.

Hay agua de enfriamiento sin contacto que puede ser factible de recirculación una vez que su temperatura es abatida (torres de enfriamiento o lagunas de aspersion). Otra categoría del agua de enfriamiento es la de un solo paso, tomada de ríos, lagunas o estuarios y al final de sus

funciones es retornada a esos cuerpos naturales. En ambos casos la fuente de contaminación son los agentes químicos (alumbre, soda hidratada e iones de metales alcalinos; sodio o potasio) utilizados en el tratamiento o acondicionamiento del agua. En el caso del agua de enfriamiento recirculada otro factor de contaminación es la purga de los lodos acumulados en las torres de enfriamiento (pueden contener fosfatos, nitratos, nitritos, sulfatos y cromatos).

El agua de lavado se usa para remover partículas finas de algunas materias primas (procesos de acondicionamiento de filtros de vacío, limpieza de productos vaporizados insolubles y en procesos de absorción; donde el agua reacciona con materiales gaseosos para producir una solución acuosa). Los efluentes de lavado contienen gran variedad de contaminantes, esencialmente sólidos en suspensión y productos químicos atrapados en forma de vapores, condensados y precipitados eventualmente.

El agua también se emplea como medio de transporte de reactivos o productos, como soluciones, suspensiones o jarabes. Los desechos de esta actividad son soluciones diluidas o suspensiones, que pueden ser reutilizadas según su concentración. En el caso en que el agua transporta un producto sólido, este es separado por filtración o evaporización y la descarga arrastra productos disueltos, reactivos e impurezas.

En el agua auxiliar de procesos se considera los caudales destinados a operaciones tales como regeneración de intercambiadores iónicos, reposición de descargas y evaporación en torres de enfriamiento o calderas y lavado de tanques de almacenamiento. Los efluentes de estas operaciones auxiliares son bajas en materiales de desecho, destacándose los de carácter ácido por su corrosividad. ⁽²¹⁾

2.4.10 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA

Cada uno de los procesos que forman parte de una refinería de petróleo se consideran fuente potencial de emisión de contaminantes, dado que siempre existen derrames involuntarios.

Tabla 2. 30 Principales Contaminantes del Agua Residual de la Industria de la Petroquímica

CONTAMINANTES
Petróleo crudo
Productos elaborados
Sólidos suspendidos
Amoniaco
Fenoles
Sulfuros
Mercaptanos
pH alto
DBO alta
DQO alta

Fuente: *Uso del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria Petrolera.*
(20) (adaptado)

Tabla 2. 31 Características Promedio del Agua Residual de la Industria del Petróleo (Tabla CNA3)

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
Gasto medio (m ³ /D)	4,508.55
Coliformes Fecales (nmp/100 ml)	7.99E+05
GVA (mg/l)	99.19
Sólidos Sedimentables (ml/l)	NR
Sólidos Sedimentables Totales (mg/l)	9,499.06
DBO ₅ (mg/l)	2,955
Hidrogeno Total (mg/l)	32
Fosforo Total (mg/l)	1.3
Arsénico Toral (mg/l)	0.0032
Cadmio Total (mg/l)	0.0083
Cianuro (mg/l)	0.0074
Cobre Total (mg/l)	0.0987
Cromo Total (mg/l)	0.0487
Mercurio Total (mg/l)	0.001
Níquel Total (mg/l)	0.06
Plomo Total (mg/l)	0.087
Zinc Total (mg/l)	0.39

nmp; numero mas probable

Fuente: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/327/v.html> ⁽¹⁵⁾ (Adaptado)

Las aguas residuales de esta industria generadas en operaciones de separación física contienen principalmente emulsiones, sulfuros, fenoles, amoníaco, presencia de sólidos suspendidos y petróleo mismo, generándose altas DBO y DQO. (Ver Tabla 2.30)

El Cracking catalítico es la operación química que genera mayores contaminantes ácidos y fenólicos, junto con petróleo, sulfuros, cianuros y amoníacos, generan también altas DQO y DBO. Las demás operaciones químicas generan sulfuros, mercaptanos, amoníaco, alcalinidad, sólidos disueltos y sólidos suspendidos. (Ver Tabla 2.31)

Capítulo 3

OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS UTILIZADOS

EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Los métodos usados para el tratamiento de aguas residuales se denominan operaciones y procesos unitarios. Las operaciones unitarias incluyen remoción de contaminantes por fuerzas físicas. Los procesos unitarios consisten en el empleo de reacciones biológicas y reacciones químicas.

3.1 OPERACIONES UNITARIAS DE TRATAMIENTO

Clasificación que reciben los métodos empleados en el tratamiento de las aguas residuales que se valen de fuerzas físicas para lograr la remoción de ciertos contaminantes presentes en las diferentes etapas de tratamiento.

Las operaciones unitarias más comúnmente empleadas en el tratamiento de aguas residuales incluyen desbaste (pasar el influente por cribas o rejillas para eliminar detritus), desarenador, homogenización de caudales, medidor de flujo, sedimentación, flotación, filtración en medio granular y transferencia de gases, entre otros. ⁽³³⁾

3.1.1 OPERACIONES UNITARIAS EMPLEADAS EN TRATAMIENTO PRELIMINAR

El tratamiento preliminar se vale de métodos fundamentales para quitar detritus (desechos; materiales sólidos de tamaño no pequeños, trozos de madera, trapos y todos los textiles, plásticos y basuras en general) y arena (material inorgánico cuyas dimensiones estén comprendidas entre 0.1 mm de diámetro y más de 1 cm³ de volumen) de las aguas residuales. También algunas gravas son retiradas empleando operaciones unitarias.

El tratamiento preliminar resulta esencial debido a la basura de toda índole que entra en las alcantarillas, arena y otras partículas inorgánicas originadas por erosión de tubos y sus uniones.

En el tratamiento preliminar se utilizan medios físicos para eliminar mezclas de agua y aceite, petróleo y sus derivados.

3.1.2 CRIBAS O REJILLAS

Las cribas y rejillas retienen sólidos en suspensión y flotantes mayores que sus aberturas. ⁽³⁰⁾

Las cribas o rejas para eliminar detritus varían desde las abiertas (con más de 50 mm entre barras), hasta las cerradas o finas (entre 1 y 2 mm). Pueden ser manuales y mecánicas. ⁽¹⁰⁾

Se consideran cribas de rejas de funcionamiento mecánico si las aguas residuales arrastran con mucha frecuencia trapos y objetos grandes, por la necesidad continua de limpieza.

La carga hidráulica y la pérdida de presión a través de las cribas, son factores que no pueden dejarse de considerar en el tratamiento preliminar. El desempeño en una instalación depuradora, depende de manera crítica, de la instalación y la operación correcta y del mantenimiento de rejillas. Una gran cantidad de problemas pueden surgir si falta la atención debida a estos dispositivos, como por ejemplo el desgaste excesivo y las averías en las bombas, el bloqueo y la erosión de tuberías, y el aumento de las necesidades de mantenimiento en la totalidad de la planta. ⁽¹⁰⁾

La acumulación de detritus disminuye la eficiencia del tratamiento biológico, ocupando en los depósitos un espacio que se necesita para el proceso. Además disminuye las velocidades de sedimentación y de digestión de lodos. Los desechos acumulados en las compuertas ocasionan medidas de flujo erróneas y esto ocasiona dosificación incorrecta de los acondicionadores químicos y se alteran las proporciones de recirculación.

3.1.3 DESARENADORES O SEDIMENTADORES DE PARTÍCULAS DISCRETAS

Las partículas discretas mantienen su individualidad, es decir no se someten a procesos de coalescencia con otras partículas. Las propiedades físicas (tamaño, forma y peso específico) de las partículas discretas (como arena) no cambian durante el proceso. ⁽³⁵⁾

La arena es altamente abrasiva; su eliminación se basa en sedimentación por gravedad al reducir la velocidad del flujo.

La arena no eliminada, se acumula en los tanques de digestión y de aireación de lodos y reduce su capacidad efectiva; además abate el tiempo de circulación, el tiempo de retención de lodos, la calidad de los lodos y líquidos producidos. Lo anterior afecta el funcionamiento de toda la estación, provoca el incremento de los costos de mantenimiento de los mezcladores y de las bombas por el excesivo desgaste de cierres, rodamientos, soldaduras y juntas.

La velocidad de sedimentación de una partícula discreta es función, principalmente de tres factores:

- 1.- el tamaño;
- 2.- la diferencia de densidad entre la fase líquida y sólida;
- 3.- la viscosidad del líquido.

Factores que la ley de Stokes relaciona:

$$U = \frac{gD^2(d_1 - d_2)}{18\mu}$$

Donde:

U; velocidad final de la partícula en su caída

g; aceleración de la gravedad

D; diámetro de la partícula

d₁; densidad de la partícula

d₂; densidad del fluido

μ; viscosidad del fluido

Tenemos en consecuencia, que la velocidad de sedimentación varía directamente con el cuadrado del diámetro de la partícula. Esta ley se aplica a partículas discretas, regulares, esféricas (no a fibras).

3.1.4 HOMOGENEIZACIÓN DE CAUDALES

Esta operación se emplea para resolver el problema de las variaciones del caudal, lograr un agua residual con concentraciones de contaminantes homogéneas y un volumen de flujo constante. ⁽³⁴⁾

En las aguas residuales de ciertas industrias es indispensable la homogenización, ya que los vertidos son puntuales y las aguas residuales homogenizadas serán de más fácil tratamiento, produciendo una mayor eficiencia en los tratamientos posteriores.

Las aplicaciones principales de la igualación son: regular el flujo de gastos pequeños así como grandes (gasto estable), combinar diferentes vertidos (originados en los diferentes procesos industriales, aguas de lluvia, aguas de servicios sanitarios, etc.)

La ubicación de los homogenizadores depende del tipo de planta, pero por lo general se encuentra entre el desarenador y el tratamiento primario. En algunos casos puede resultar mejor ubicarlo entre el tratamiento primario y el secundario. ⁽³⁴⁾

3.1.5 MEDIDORES DE FLUJO

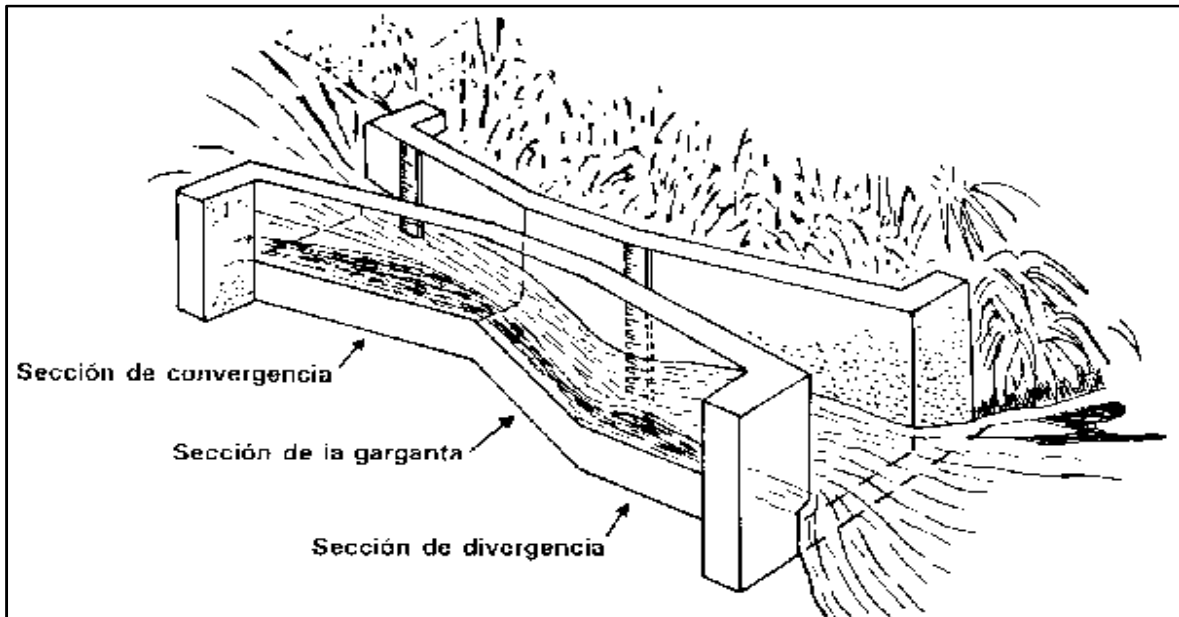
La correcta aplicación, selección y operación del dispositivo medidor de flujo es crítica para la operación de plantas de tratamiento. ⁽³³⁾

Diferentes dispositivos pueden ser usados en canales abiertos o en conductos cerrados. En canales abiertos o conductos parcialmente llenos se busca generar una obstrucción tal como una sección crítica o con el empleo de canales (por ejemplo el canal Parshall, posiblemente el más usado. Figura 3.1).

Los medidores Parshall también podrían emplearse para la dosificación de productos químicos para agregar a las aguas en proporción directa a su gasto. ⁽¹¹⁾

La principal ventaja del canal Parshall se debe a su forma, la cual no permite acumulación de sólidos en ninguna parte del canal. ⁽¹¹⁾

Figura 3.1 Canal Parshall (dispositivo de aforo)



Fuente: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s18.gif>

Otra opción utilizable es la medición de gastos con vertedores triangulares, consiste en determinar el tirante de agua sobre la arista antes del vertedor. ⁽¹¹⁾

3.1.6 OPERACIONES UNITARIAS EMPLEADAS EN TRATAMIENTO PRIMARIO

En este nivel de tratamiento una porción de sólidos suspendidos y materia orgánica es removida. ⁽³³⁾ Usualmente esta remoción se realiza con operaciones físicas como la sedimentación.

El efluente del tratamiento primario contendrá comúnmente una cantidad considerable de materia orgánica y tendrá alta DBO. La principal función del tratamiento primario es: ser el precursor de un tratamiento secundario, solo en raros casos el tratamiento primario sería usado como único método de tratamiento.

3.1.7 SEDIMENTACIÓN PRIMARIA

Operación utilizada para permitir la remoción de sólidos por sedimentación, reduciendo la potencia de arrastre y deslave del flujo, hasta que las partículas suspendidas sedimentan por gravedad al fondo de los tanques de retención, y no son suspendidos por arrastre. ⁽³⁰⁾

El sedimentador (clarificador primario) se diseña con condiciones de velocidad de flujo baja y tiempo de retención suficiente, lo que permite que las partículas sólidas se aglomeren sufriendo cambios de densidad, caigan por gravedad y se depositen como lodo primario en el fondo del sedimentador. La capa líquida clarificada en la parte superior, rebosa como efluente para descarga; para recibir un tratamiento posterior.

Para el diseño de tanques de sedimentación debe considerarse fundamental la carga superficial, la carga máxima de sólidos y el tiempo de retención.⁽¹⁰⁾

La carga superficial es de suma importancia ya que las partículas sólidas gravitan hacia abajo en contra del flujo de un líquido que sube, se define en metros sobre horas y es el cociente de la velocidad del efluente entre el área superficial del tanque.

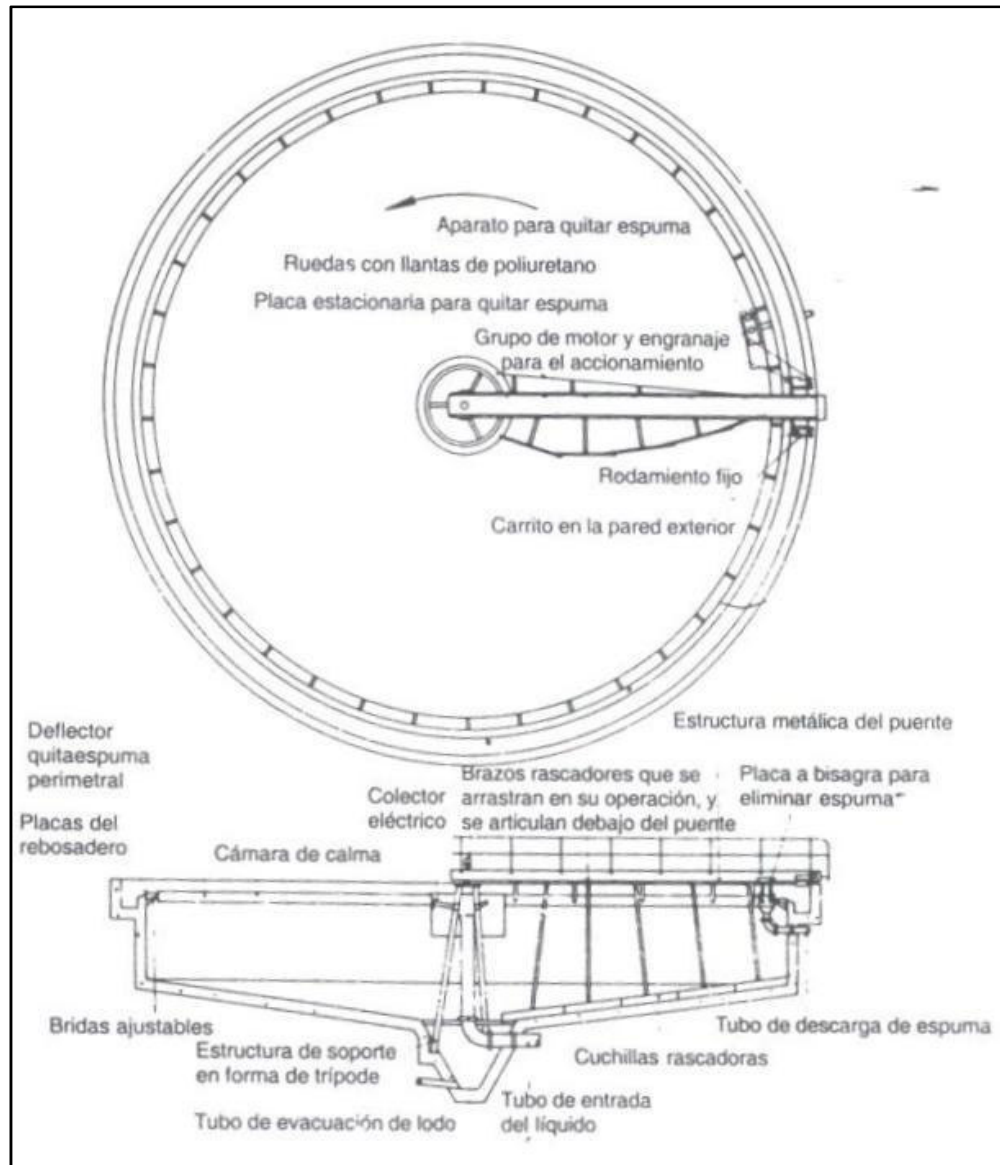
Debe proporcionarse al efluente el tiempo de retención suficiente para que las partículas lleguen al fondo del depósito, este parámetro es determinado por el cociente del volumen del depósito sobre el gasto de alimentación del influente. El tiempo de retención en la práctica llega a tomar valores mínimos de hasta 2 horas.

Los depósitos de sedimentación rectangulares, se ven frecuentemente en industrias en las que no tiene mucha importancia quitar el lodo del depósito de forma periódica. Entre las ventajas encontramos la constructiva que resulta más fácil que los depósitos circulares. En la actualidad se construyen en una proporción entre anchura y longitud de 1:2 y 1:4, con un deflector en la entrada y el suelo en ligera pendiente hacia el extremo de descarga del influente, para facilitar el flujo del lodo a un transportador, o hasta un pozo.

En los depósitos de sedimentación se pueden instalar clarificadores de flujo ascensional, formado por una malla metálica que se sumerge en el dispositivo de sedimentación a unos 250 mm por debajo del espejo de agua, actúa como filtro fino y el grado de sedimentación puede mejorarse, ya que provoca la igualación de la carga hidráulica a través del depósito, lo que da mejor asentamiento de las partículas grandes e irregulares. Las partículas pequeñas donde la velocidad de sedimentación es casi igual que la velocidad de flujo ascensional o menor que ésta,

serán atrapadas y tendrán tendencia a coagular dentro de la malla, formando un colchón, que por sí solo es ya un filtro. La aplicación de este panel puede lograr eliminación de sólidos de 95% en efluentes industriales que contienen material fibroso.

Figura 3. 2 Esquema de un Depósito de Sedimentación



Fuente: John Arundel, *Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales*.⁽¹⁰⁾

Los tanques de sedimentación circulares (Ver Figura 3.2) son de uso normal en las plantas de tratamiento. Se fabrican de concreto, la planta del tanque es circular y la proporción diámetro-profundidad cubre el intervalo 3:1 a 8:1. En la base del depósito se crea una pendiente, de la

periferia al centro, hasta de 30° , para facilitar que fluya el lodo a una tolva colectora central, desde la cual se puede extraer con bomba, o con diferencia de presión hidrostática. La mayoría de estos depósitos se dotan de un conjunto mecánico que desempeña dicha función. El efluente ingresa, a través de un tubo central, a una cámara de calma que se logra gracias a la presencia de una mampara colocada al centro y en la parte superior del sedimentador, desde donde fluye primeramente hacia abajo y hacia arriba, hasta llegar a descargar en un canal dispuesto alrededor del borde del tanque.

Las técnicas empleadas en un tren de tratamiento para la eliminación de sólidos suspendidos son sedimentación o floculación, siendo la primera la más común ya que no necesita mucho equipo mecánico y es el tratamiento más estable. La floculación resulta opción en la separación de grasas y proteínas del efluente de la industria alimenticia; o en la remoción de partículas inorgánicas finas producidas en la minería.

3.1.8 SEPARADORES API

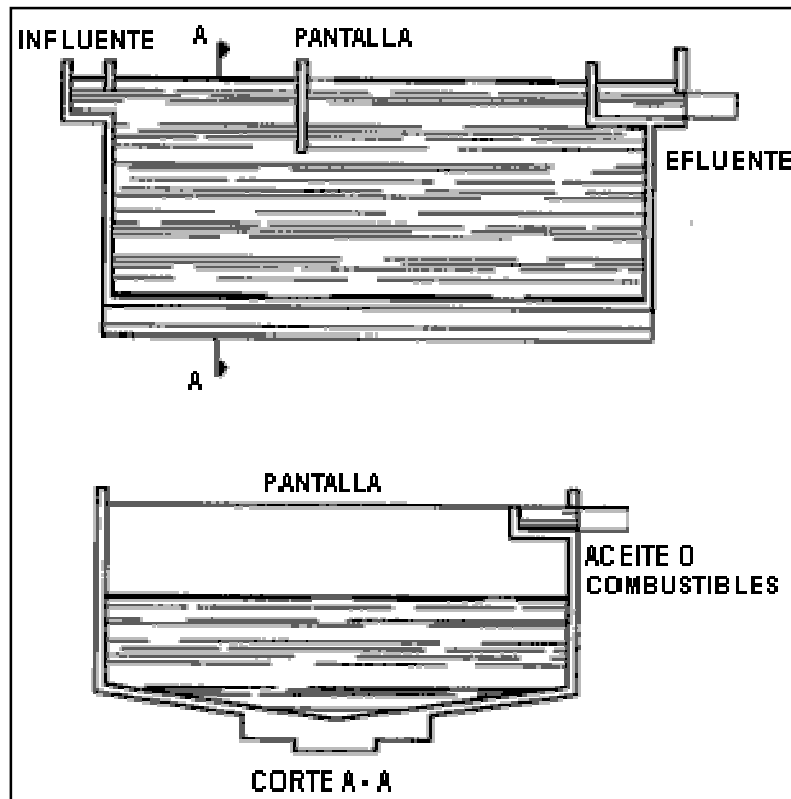
El agua que puede estar contaminada con aceite, se almacena en tanques de concreto de amplia superficie, llamadas separadores API. ⁽³⁶⁾

Los separadores API son una unidad rectangular para remover por diferencia de gravedades específicas, el aceite y los sólidos sedimentables. Los separadores API no rompen emulsiones ni remueven sustancias solubles.

Como se mencionó consiste en un tanque, a través del cual el agua aceitosa fluye en forma muy lenta, tan lenta como para lograr que las gotas de aceite asciendan a la superficie y formen una película de aceite que puede ser retirada por un desnatador. ⁽³⁷⁾

El sistema de separación API cuenta también con un sistema de remoción de sólidos que pudieran sedimentarse en el separador. (Ver Figura 3.3)

Figura 3.3 Separador API Convencional



Fuente: http://www1.minambiente.gov.co/prensa/publicaciones/guias_ambientales/2_sector_energetico/Guia%20ambiental%20para%20proyectos%20carboel%E9ctricos/contenid/medidas2.htm ⁽³⁷⁾

En la refinación de petróleo el aceite decantado de los separadores API se bombea a los depósitos de productos sucios y se reprocesa. El agua procedente de los separadores API se somete a flotación empleando una mezcla de hidróxido férrico y de aluminio, se forma una nata que flota en la superficie del agua. La espuma se retira y se sedimenta. Los lodos resultantes se incineran. ⁽³⁶⁾ El agua de los tanques de flotación se oxigena y se pasa a los tanques de digestión, ahí son consumidas las cantidades residuales de aceite o compuestos fenólicos, por bacterias. El efluente se dirige a filtros de arena. Luego es reutilizada en la refinación o aireada y vertida.

3.1.9 OPERACIONES UNITARIAS EMPLEADAS EN TRATAMIENTO SECUNDARIO

Este nivel de tratamiento consiste en la separación de sólidos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos. Se forma de un tratamiento biológico (un proceso) seguido de una sedimentación de partículas no discretas (frecuentemente necesita adición de productos

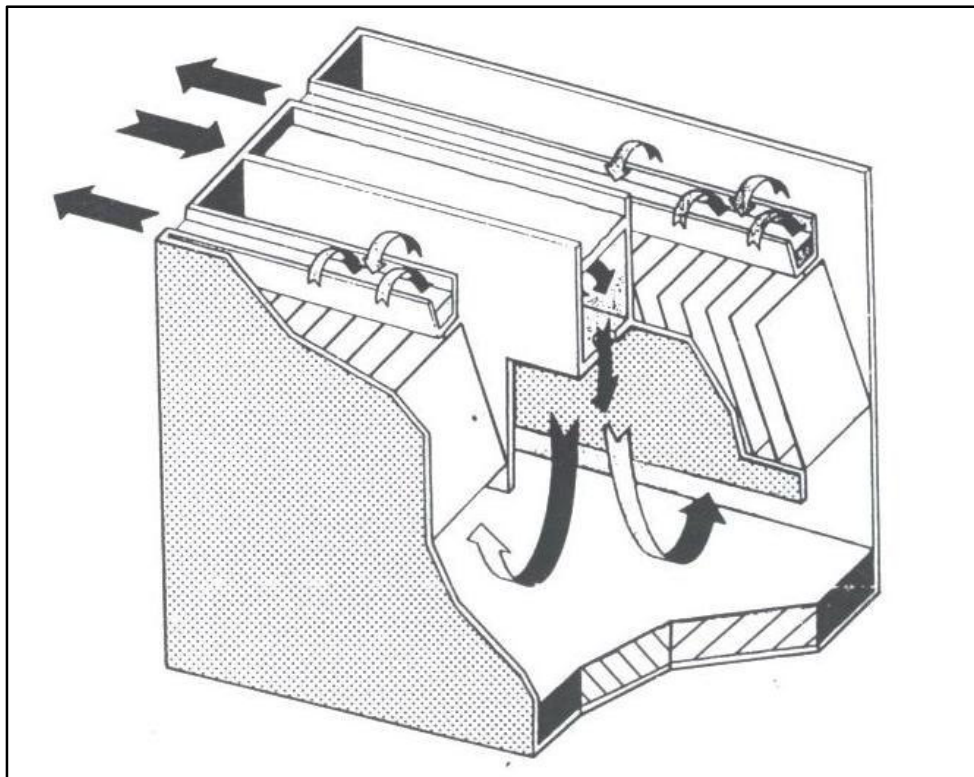
químicos coagulantes; proceso), se han desarrollado unidades de sedimentación y en algunos casos se ha logrado realizar la sedimentación secundaria con eficiencia aceptable, sin adición de químicos.

3.1.10 SEPARADORES FORMADOS POR LAMINILLAS

Este método nace de la necesidad de incrementar el grado de eliminación de sólidos de una instalación sin recurrir a más tanques de sedimentación.

Este separador consiste en conjuntos de laminillas o lamas de acero inoxidable, onduladas, cada una forma un ángulo inclinado (45° a 60° sobre un plano horizontal). El flujo del líquido a separar entra de un lado y del otro, pasa por arriba y sale por orificios de distribución para formar el efluente que se descarga a la masa de una corriente de agua. Los sólidos tras su contacto con las lamas inclinadas, caen a contracorriente del líquido que sube; se recogen en la base se retiran.

Figura 3. 4 Separador de Laminillas



Fuente: John Arundel, Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales. ⁽¹⁰⁾

La velocidad de flujo ascensional es de 5 a 25 m/h. No será necesario adición de productos químicos coagulantes (cloruro o sulfato férrico 15 a 40 mg/l) y floculantes (polímero de 0.5 a 1 mg/l) si la velocidad es menor de 8 m/h. Se logra la eliminación de 40 a 75% de sólidos suspendidos y DBO, eliminación de fosforo entre 50-60%.

3.1.11 OPERACIONES UNITARIAS EMPLEADAS EN TRATAMIENTO TERCIARIO

La remoción de 90 a 95% de los sólidos en suspensión, la DBO y la DQO de los vertidos residuales, no se considera suficiente para reúso por el hombre. Debido a que la demanda de agua de las municipalidades, industrias y agricultura está superando el suministro de las aguas naturales (de las aguas del ciclo hidrológico), se ha estimulado la investigación para descubrir formas y medios que permitan una purificación más completa de todas las aguas que han completado su ciclo de uso en servicio del hombre.

Bajo estas circunstancias resultaría conveniente añadir a las operaciones y procesos convencionales de tratamiento otros no convencionales, como la adición de una etapa terciaria al tratamiento primario y secundario de las aguas residuales.

Por ejemplo las operaciones frecuentemente usadas son: la filtración; el carbón activado para la adsorción de materias tóxicas, olores y sabores; la ósmosis inversa para reducir sólidos disueltos. En menor medida: la inyección intencional de agentes espumantes (como pequeñas burbujas de aire) en una amplia variedad con el fin de hacer ascender solutos y suspensiones indeseables; la aplicación de electrodiálisis; entre otros.⁽³⁰⁾

La desinfección (destrucción de patógenos híbridos) no se logra a través de medios biológicos, sino físicos y químicos (procesos descritos en el apartado 3.2.15).

3.1.12 ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

La adsorción es la operación por la cual los iones o moléculas son retenidos sobre la superficie de un sólido. El sólido recibe el nombre de adsorbente y la sustancia que es adsorbida se nombra adsorbato.⁽³⁴⁾

El carbón activo es usado comúnmente para la operación de adsorción. Su utilización se basa en la refinación de las aguas tratadas por procesos químicos y/o biológicos. Esta refinación se busca con la absorción de materia orgánica residual disuelta y la eliminación de la materia particulada.

3.1.13 ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa se emplea para la eliminación de iones disueltos y para obtener una mejor eliminación (relativa a otros métodos) de la materia orgánica disuelta. ⁽³⁴⁾

Esta operación consiste en separar el agua de las sales disueltas, filtrándola a través de una membrana semipermeable a una presión mayor que la osmótica (presión causada por las sales disueltas en el agua).

Es un tratamiento enfocado a la reutilización de las aguas residuales tratadas. Un problema en su implementación son los altos costos y que este sistema requiere un influente sin sólidos en suspensión, con bajo contenido en hierro y manganeso, así como un pH entre 4 y 7.5.

3.1.14 FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR

La filtración del agua residual se lleva a cabo para eliminar los flóculos biológicos residuales presentes en efluentes sedimentados del tratamiento secundario, antes del vertido. ⁽³²⁾

La filtración también se emplea para la eliminación de precipitados residuales procedentes de la precipitación de fosfatos con sales metálicas o con cal, y se utiliza como operación de pretratamiento antes de la alimentación de las aguas residuales tratadas a las columnas de carbón activo. Es en situaciones de reutilización cuando métodos como la filtración del agua residual tratada se vuelve más importante.

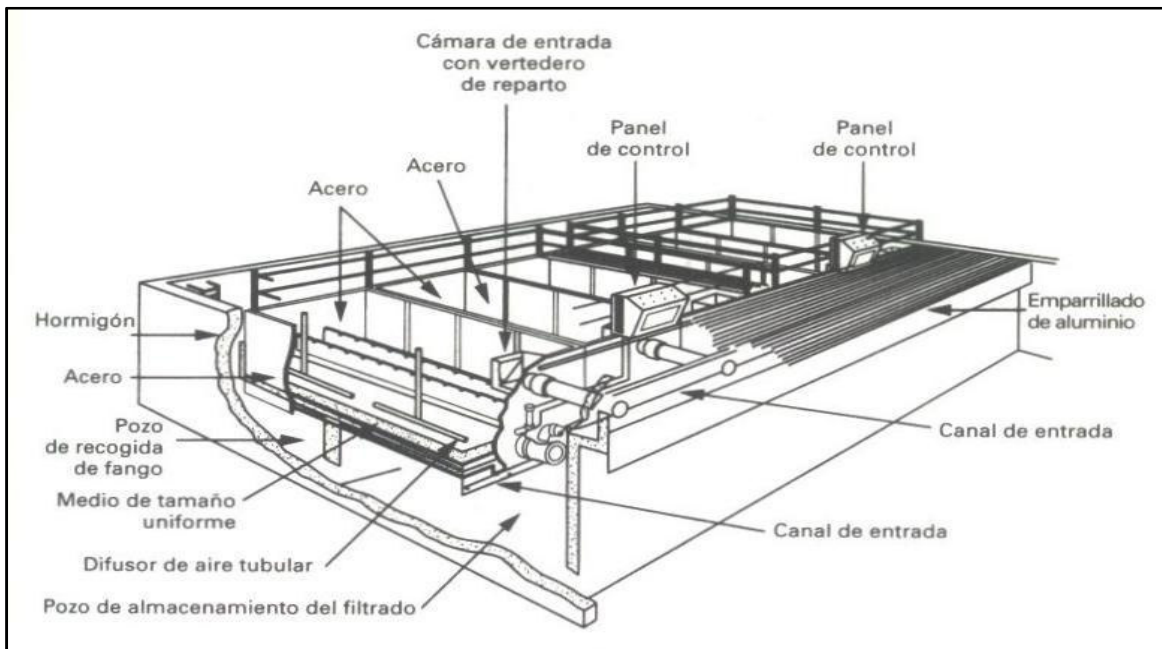
Según el sistema de funcionamiento los filtros se pueden clasificar en filtros continuos o semicontinuos, dentro de cada clase existen diferentes tipos de filtros en función de la profundidad del lecho filtrante (de lecho poco profundo o profundo), del tipo de medio filtrante empleado (medio único, doble o múltiple), en función si el medio filtrante esta o no

estratificado, del sistema de funcionamiento (flujo ascendente o descendente) y en función del método empleado para la manipulación de los sólidos (almacenamiento interno o de superficie). Los filtros semicontinuos de medio único o doble admiten una clasificación más detallada en función de la fuerza motriz del sistema (presión o gravedad).⁽³²⁾

Los lechos filtrantes se estratifican si el procedimiento empleado de lavado a contracorriente de un medio filtrante único se realiza con agua, la estratificación del filtro se realiza cuando las partículas de menor tamaño se colocan en la superficie. Si en el lavado de un medio filtrante único se emplea un procedimiento de lavado mixto con agua y aire (al mismo tiempo), el mezclado de las partículas finas y las más gruesas, resultará en un filtro no estratificado.

En filtros de medio doble o múltiple el procedimiento de lavado mixto requiere aplicar únicamente agua al final del ciclo de lavado para conseguir una estratificación del medio.

Figura 3. 5 Filtro de Lecho Pulsante

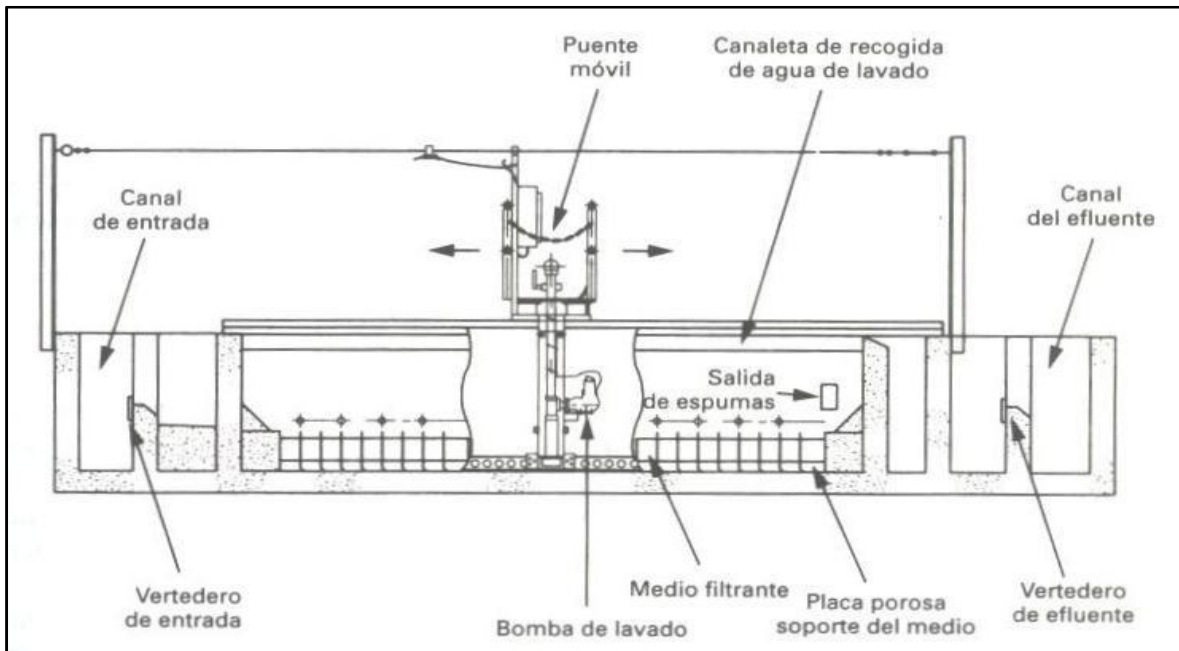


Fuente: Metcalf y Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, Vertido y Reutilización.⁽³²⁾

Los medios filtrantes pocos profundos (profundidades menores a 30cm) son muy usados en aguas residuales. Principalmente dos tipos: el filtro de lecho pulsante y el de puente móvil.⁽³²⁾

El filtro de lecho pulsante (Ver Figura 3.5) incorpora un medio de arena fina de poca profundidad del estratificado. Los sólidos se mantienen en suspensión en la zona superior del lecho filtrante gracias a un difusor de aire situado justo por encima de la superficie. Cuando se ha alcanzado la máxima pérdida de carga admisible, el filtro se lava a contracorriente a través del sistema de drenaje inferior. El sistema de drenaje inferior del filtro de lecho filtrante esta en conexión libre a la atmósfera.

Figura 3. 6 Filtro de Puente Movil



Fuente: Metcalf y Eddy, *Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, Vertido y Reutilización*.⁽³²⁾

El segundo tipo de filtro “puente móvil” (Ver Figura 3.6) es de poca profundidad, incorpora un medio filtrante de arena de 0.28 metros, constituido por una serie de pequeñas celdas filtrantes. El lavado de cada celda se realiza con un sistema a contracorriente montado en un puente móvil que recorre continuamente toda la longitud del filtro. Debido a este sistema la totalidad del filtro nunca necesita estar fuera de servicio, reduce la pérdida de carga en el filtro (a pérdidas de 15 – 25 cm) y reduce el gasto del agua de lavado, por lo que elimina la necesidad de disponer de un sistema de recogida del agua de lavado y de un depósito de regulación.

En plantas de tratamiento la decisión sobre el tipo de sistema de filtración a instalar se basa en variables relacionadas con la planta, tales como el espacio disponible, la duración del periodo de filtración, el plazo disponible para la construcción y los costos.

3.1.15 FILTRACIÓN A TRAVÉS DE MEMBRANA

La ultrafiltración es una operación empleada para tratamiento y reutilización de aguas residuales industriales, puede ser usada con o sin tratamiento previo.

Básicamente el agua a tratar se hace circular a presión, a lo largo de una membrana, con poros de diámetros suficiente, para que se filtren las moléculas de agua y no puedan filtrarse las moléculas de otros productos; así después de la ultrafiltración se consigue un permeato con poca contaminación (agua y moléculas de menor o igual tamaño), un concentrado con sustancias contaminantes de mayor tamaño y un concentrado con sustancias contaminantes de mayor tamaño molecular que el agua. ⁽³⁴⁾

El uso de membranas para la separación selectiva de materiales orgánicos hace posible la recuperación de productos valiosos, tanto en el nivel de laboratorio como en el de producción.

Los materiales de construcción de casi todas las membranas comerciales son fibras polisulfónicas o polipropilénicas, con las que se forman tubos. Estas fibras son químicamente inertes y resistentes a la temperatura. Las membranas para ultrafiltración tienen poros de menos de 0.01 μm y trabajan a alta presión. Las membranas para microfiltración tienen poros de más de 0.05 μm y operan a presiones mucho más bajas, de 30 a 70 kPa.

Las instalaciones comerciales de filtración son modulares, y cada unidad del módulo tiene una superficie de membrana mayor de 50 m^2 .

3.1.16 FLOTACIÓN

Los agentes de flotación incluyen burbujas pequeñas de aire o compuestos químicos (agentes de flotación; sustancias más ligeras que el agua o que se vuelven más ligeras que ella), que ascienden a la superficie del agua, rompiendo el poder de suspensión de las partículas transportadas en el agua, mismas que se retiran por desnatado.

Los compuestos químicos, ya sea solos o en combinación y las pequeñas burbujas de aire, son con frecuencia agentes humectantes y espumantes hidrofóbicos. ⁽³⁰⁾

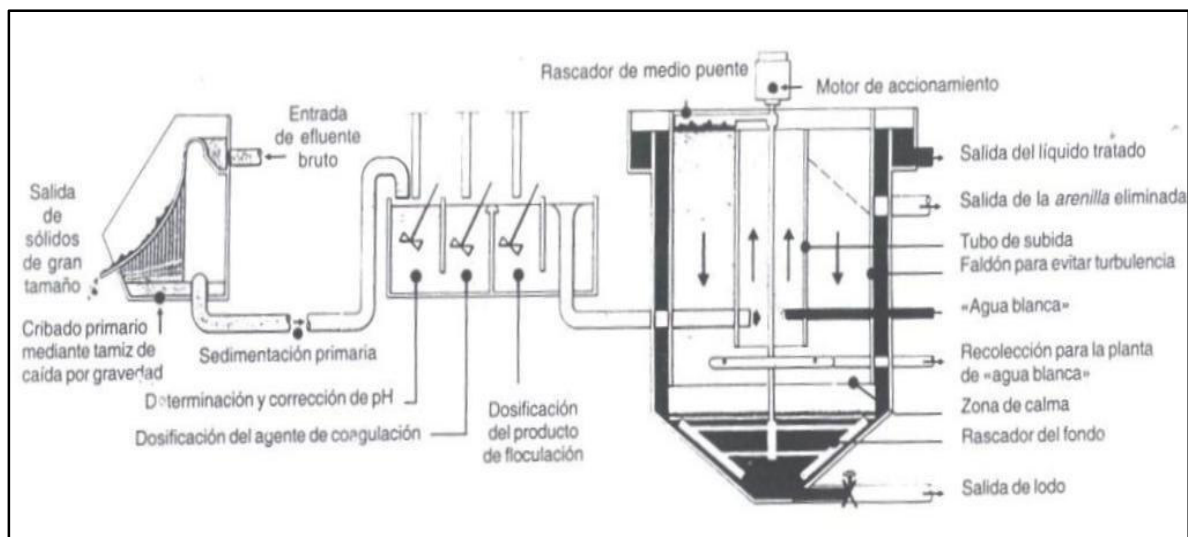
Este fenómeno favorece también a la flotación de líquidos de menor densidad que el agua. Lo métodos más usuales son: flotación por aire disuelto, aireación a presión atmosférica y flotación por vacío. ⁽³⁴⁾

La flotación por aire es el procedimiento para eliminar sólidos, donde la diferencia de densidades entre estos y el agua es muy pequeña, o si contienen grasas o aceites. Este procedimiento se puede realizar introduciendo aire a través de medios porosos (o por medio de un impulsor), generando burbujas grandes de aire ($1000\mu\text{m}$ de diámetro). Esta primera técnica es muy utilizada en minería, para concentrar particulados inorgánicos. ⁽¹⁰⁾

Otra opción es la de flotación en aire disuelto (DAF; el método más común, Ver Figura 3.7), consiste en unir microburbujas gaseosas a los sólidos del influente, con lo cual la densidad aparente disminuye a un valor inferior de la densidad del agua. En este segundo procedimiento se forman nubes de micro burbujas de 70 a 90 μm de diámetro que se juntan a los sólidos favoreciendo la coalescencia y dan lugar a que estos suban rápidamente a la superficie.

Los tanques tienen por lo común de 2 a 4 metros de altura y el diseño de las boquillas de inyección de aire es importante, ya que deben controlar la velocidad de flujo sin causar una turbulencia que pudiese cortar los flóculos de sólido.

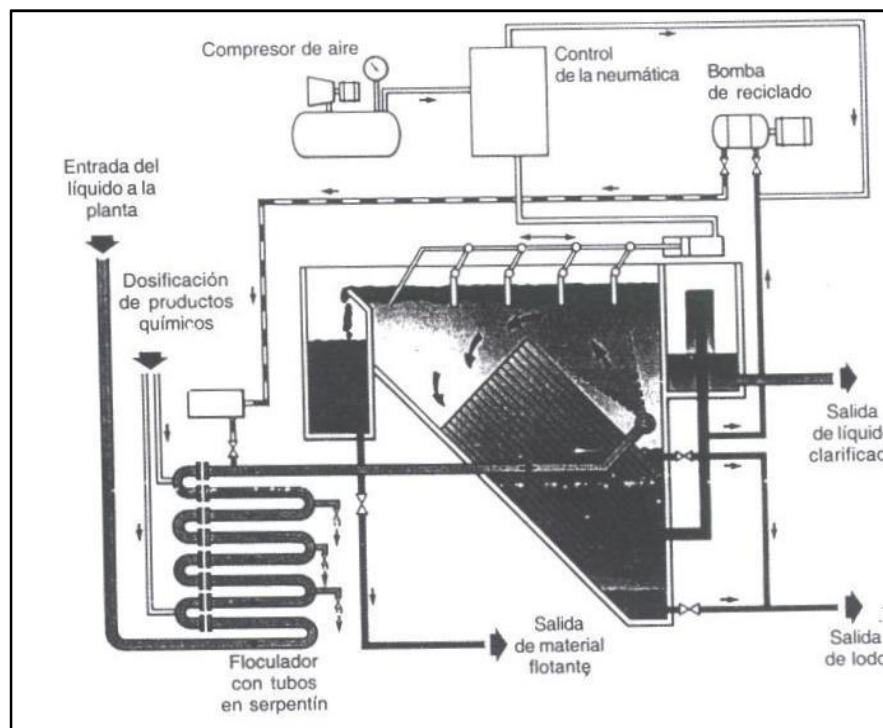
Figura 3. 7 Diagrama de un sistema de Flotación por Aire Disuelto



Fuente: John Arundel, Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales. ⁽¹⁰⁾

La flotación ayuda a la recuperación rápida de materias primas valiosas y deja un producto flotante consistente y limpio. En la industria de derivados lácteos, ha constituido un éxito en el tratamiento de aguas de lavado que contienen cantidades elevadas de grasas y proteínas. La aplicación de aire disuelto (DAF), puede tener numerosas aplicaciones en el tratamiento de efluentes industriales del enlatado de frutas, verduras y otros productos vegetales, en la polimerización de goma sintética y de polietileno, así como en la obtención de carbono en polvo, metales en estado coloidal e hidróxidos metálicos, muchas otras posibilidades de uso.

Figura 3. 8 Planta Separadora de Emulsiones



Fuente: John Arundel, Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales. ⁽¹⁰⁾

Las industrias del hierro y del acero utilizan DAF para capturar aceite y escamas de laminación. La industria del petróleo también le utilizan, para separar emulsiones (Ver Figura 3.8) y agua contaminada con productos petrolíferos (añadiendo polielectrolito y agente floculante y ajustando el pH).

En la industria del beneficio del carbón y de piritas, la flotación puede emplearse (reemplazando los estanques de asentamiento en las plantas de lavado de carbón) para separar partículas finas de los esquistos inyectando dióxido de carbono gaseoso.

3.1.17 MÉTODOS ELECTROLITICOS

Se usan para recuperar metales a partir de soluciones. El metal recubre electrolíticamente el cátodo en condiciones de pureza muy grande y se le retira periódicamente. Estas unidades se usan generalmente para controlar el contenido de metales del enjuagado estático que se aplica inmediatamente después del baño de recubrimiento. Estas unidades (células electrolíticas) tienen un costo elevado, y un gasto alto de energía utilizada durante la operación, sus ventajas radican en la recuperación de metales valiosos, no producen lodos hidróxidos venenosos, no utilizan sustancias químicas, y en la destrucción en el ánodo de cianuros y de agentes formadores de complejos.

Las células más usadas tienen una dos características comunes: un electrodo zonal de rendimiento elevado (gasa de metal expandido) y perlas de vidrio fluido (para distribuir el flujo y alcanzar una transferencia eficaz de masa).

3.1.18 RADIACIÓN CON RAYOS ULTRAVIOLETA

La fuente de luz ultravioleta es una lámpara de vapor de mercurio construida con cuarzo o vidrio especial igualmente transparente a la luz intensa, destructiva e invisible de 2537 Å (10^{-8} cm) emitida por el arco de vapor de mercurio. ⁽³⁰⁾

Esta técnica de desinfección reduce el número de bacterias y virus viables, es utilizada en aguas negras como alternativa del uso de productos químicos (cloro en particular). La luz ultravioleta de 253.7 nm es absorbida fácilmente por los ácidos nucleicos de los microorganismos, cuya máxima absorción de luz, casualmente se sitúa entre 255 y 260 nm. La exposición de la información genética de las células las deja inactivas y mueren. ⁽¹⁰⁾

Una instalación típica comprende cierto número de lámparas arregladas en bancadas suspendidas sobre canales de descarga construidos de acero inoxidable, con rebosaderos para mantener constante la profundidad de inmersión. Las lámparas son tubos de descarga de mercurio a baja presión que emiten luz UV a 253.7 nm.

3.2 PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

Clasificación que reciben los métodos empleados en el tratamiento de las aguas residuales que se valen de reacciones biológicas y/o químicas.

En el tratamiento biológico los microorganismos (generalmente microorganismos de diversos tipos) usan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual como fuente de alimento y los convierten en células biológicas denominadas biomasa, misma que será eliminada posteriormente del agua residual para completar así el tratamiento. ⁽¹¹⁾

El tratamiento biológico usualmente se emplea para remover sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) en el agua residual. Básicamente estas sustancias son convertidas en gases que pueden escapar a la atmósfera y biomasa que puede ser removida. También los tratamientos biológicos pueden ser empleados para remover nutrientes como nitrógeno y fósforo del agua residual. El tratamiento biológico requiere de un control ambiental propio para que el sistema opere eficientemente. ⁽³³⁾

Los tratamientos químicos suelen tener costos operativos y/o de inversiones mayores, lo cual provoca que no sean siempre la primera opción, sin embargo ciertos procesos contaminantes del agua en la industria provocan que su empleo en ocasiones sea indispensable (precipitación, coagulación, oxidación química, absorción con carbono, etc.).

3.2.1 PROCESOS UNITARIOS EMPLEADOS EN EL TRATAMIENTO PRELIMINAR

Como se indicó en el apartado 3.1.1, el tratamiento preliminar se emplea para la remoción de constituyentes que pueden causar problemas de mantenimiento y/u operación en las operaciones y procesos de tratamiento, así como en sistemas auxiliares de tratamiento. ⁽³³⁾

En el tratamiento preliminar algunas veces también se requiere implementar procesos unitarios, tal es el caso de los efluentes industriales que llevan emulsiones de aceite, pues necesitan tratamientos más especializados como rompimiento de emulsión con ácido, o extracción con disolventes. ⁽¹⁰⁾

3.2.2 PRECIPITACIÓN QUÍMICA

Se puede usar como un tratamiento anterior al proceso biológico (dentro del tratamiento primario), añadiéndose en el tratamiento de sedimentación primaria donde exista una gran concentración de sólidos disueltos y en suspensión. ⁽³⁴⁾

En la precipitación química se separan las sustancias disueltas de la solución. Los productos químicos son solubles y los iones liberados reaccionan con los iones existentes en el agua residual para formar precipitados. Se logra por adición de cal (para el agua que contiene hierro), adición de oxígeno (para el agua que contiene hierro y manganeso) provocando oxidación, entre otras. ⁽³⁰⁾

Método empleado para la eliminación o reducción de contenido metálico en los diversos efluentes de la industria de recubrimientos metálicos, ya que las sales de metales como níquel, zinc, cobre, cadmio, entre otros, son muy tóxicas. Los cianuros en disolución y el HCN (ácido cianhídrico) gaseoso que se desprende en condiciones ácidas, son venenosos. ⁽¹⁰⁾

Para efluentes que contengan Zn, Ni, Cu y Cd (sin cianuros, ni cromo) se practica la adición de lechada de cal (óxido de calcio apagado con agua; hidratado), soluciones de hidróxido sódico o carbonato de sodio, con el propósito de obtener que el pH se sitúe en el intervalo de 8.5 a 9.5. Los metales precipitarán en forma de hidróxido (lodo ligero y mullido) que se asentará en condiciones de quietud, normalmente sin necesidad de polielectrolitos.

Los efluentes con cromo presentan este elemento en forma de ácido crómico o de cromatos, debiéndose reducir al estado trivalente, antes que nada. Se hace intervenir por lo general, como agente reductor, al ácido sulfuroso o al sulfato ferroso. El ácido sulfuroso se agrega como dióxido de azufre gaseoso o metabisulfito de sodio en solución, con motivo de reducir el pH a 2 o 2.5. A continuación de haberse reducido el cromo, se mezcla el efluente con una solución de cal, de carbonato de sodio o de hidróxido de sodio (sosa cáustica) para subir el pH a 8 u 8.5, con lo que precipita el cromo trivalente.

Los productos químicos más utilizados como agentes precipitantes son: sulfato de aluminio hidratado, sulfato ferroso hidratado y sales férricas (cloruro y sulfato). ⁽³⁴⁾

En los efluentes con cianuros, los cianuros se deben separar de los líquidos que contengan cobre y níquel. El método más común es agregar cloro gaseoso o hipoclorito de cloro en solución, la cloración se efectúa en condiciones alcalinas formándose en primera instancia cloruro de cianógeno (producto intermedio de oxidación), se ajusta el pH con hidróxido de sodio y se mantiene por encima de 10, se produce una hidrólisis rápida que da lugar al cianato, el cual se convierte lentamente en carbono amónico, en presencia de exceso de cloro, el cloruro de cianógeno y el cianato se descomponen en nitrógeno gaseoso y carbonato.

3.2.3 PROCESOS UNITARIOS EMPLEADOS EN TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario es dirigido principalmente a la remoción de sólidos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos. ⁽³³⁾También usualmente se define como una combinación de procesos habitualmente usados para remover estos constituyentes y incluye tratamiento biológico (como lodos activados, reactores de película fija, sistemas de laguna y sedimentación de partículas no discretas).

Hay dos factores que influyen significativamente sobre la operación de los sistemas de tratamiento secundario, estos no se pueden controlar o puede ejercerse solo un control pequeño. Un primer factor es el clima, que tiende a conducir las reacciones a velocidades variables. El segundo factor es la composición del agua residual o el efluente industrial que entra al sistema.

Métodos de tratamientos biológicos: Estos métodos llevan por objetivo eliminar la mayor parte de la carga de contaminación orgánica en las aguas residuales, lo que se busca es aplicar un proceso de oxidación que lleve consigo la aireación del líquido. Los microorganismos que efectúan la oxidación biológica, trabajan a un intervalo óptimo de pH entre 7 y 8.5, y con un equilibrio de nutrientes en la proporción DBO:N:P de 100:5:1, por consiguiente, algunos efluentes industriales necesitarán que se les añadan productos nutritivos y se les ajuste el pH, otros nutrientes limitantes son K, S, Ca, Mg, Na y Fe, entre los micronutrientes se encuentran Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu y Ni.⁽¹⁰⁾ Como todos los sistemas biológicos, éstos procuran mantener un estado fijo, pero es relativamente frágil y si los parámetros se apartan mucho de las proporciones descritas, llegan súbitamente cargas de choque o reciben materiales tóxicos, la

operación se deteriora rápidamente y para volver a su estado anterior necesita un tiempo prolongado, hasta que la biomasa pase por determinado número de generaciones (o edades), para recuperar población y llegar a las cifras originales.

La remoción o control de nutrientes en el tratamiento del agua residual resulta importante, por ejemplo cuando las descargas en cuerpos confinados de agua provocan eutrofización acelerada; en riachuelos donde la nitrificación golpea las concentraciones de oxígeno favoreciendo el florecimiento de las plantas acuáticas con raíces; en recargas de acuíferos donde pueden ser usadas indirectamente para el suministro de agua pública.

Los nutrientes que nos concierne principalmente son el nitrógeno y el fósforo, mismos que pueden ser removidos dentro del nivel de tratamiento secundario (algunas veces), mediante procesos biológicos, químicos o sus combinaciones. ⁽³³⁾ Por ejemplo, sales de metal pueden añadirse al tanque de aireación de licor mezclado para lograr la precipitación de fósforo en el tanque de sedimentación secundaria, o al efluente de los lodos activados (efluente nitrificado) puede aplicársele una desnitrificación biológica. ⁽³³⁾

3.2.4 BIOFILTROS O FILTROS PERCOLADORES

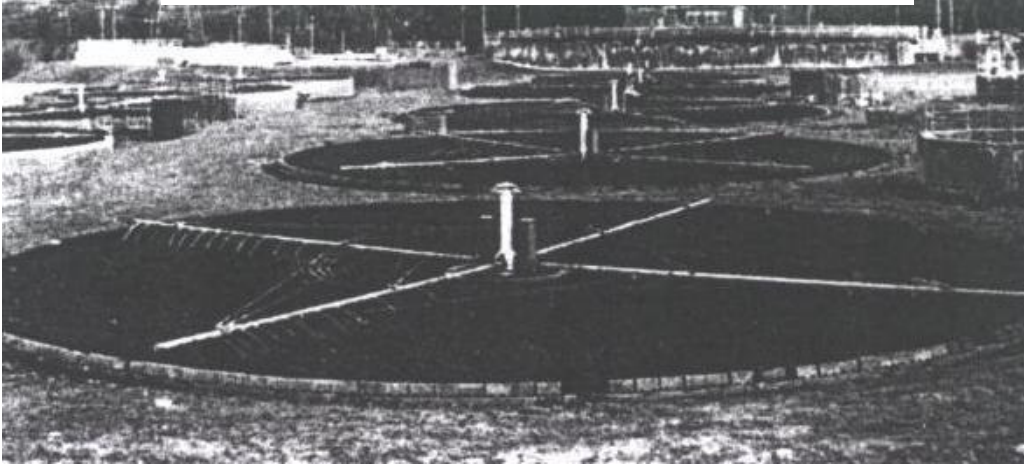
El agua residual escurre por gravedad a través de un medio filtrante que tiene una gran superficie en relación con su volumen y soporta en ella una biomasa, mientras esta también en contacto con el aire. ⁽¹⁰⁾ La operación correcta de este sistema depende de alimentar la biomasa que habita en él y de mantenerla en condiciones de humedad. El medio de filtración puede ser un medio rocoso y/o trozos de plástico de diferentes formas dispuestos al azar.

El espesor del medio filtrante varía entre 0.9 y 2.4 metros (1.8 metros en promedio), aunque existen medios de material plástico con espesores de 9 a 12 metros. La forma del filtro es generalmente circular (Ver Figura 3.9) y el agua a tratar se rocía por encima (empleando un distribuidor rotatorio). ⁽³⁴⁾

Los microorganismos que se pueden encontrar en este tipo de filtros son: bacterias aerobias, anaerobias y facultativas, hongos, algas y protozoos.

Los biofiltros siempre serán alimentados con efluentes de la primera sedimentación, para evitar que se atasque el medio filtrante debido a una carga demasiado grande de sólidos y detritus que no hayan sido retirados por el tratamiento preliminar, ya que estos pueden obturar los brazos distribuidores del filtro. ⁽¹⁰⁾

Figura 3. 9 Conjunto de Biofiltro Circulares



Fuente: John Arundel, *Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales*. ⁽¹⁰⁾

Los biofiltros son capaces de llegar a velocidades verdaderamente altas de oxidación de amonio, pero son muy sensibles a la temperatura y provocan un olor más particular. ⁽¹⁰⁾

3.2.5 LODOS ACTIVADOS

En el sistema de lodos activados se suministra el aire y el oxígeno necesario, ya sea por difusores sumergidos que reciben aire impulsado por mezcladores mecánicos o difusores. Se mantiene alrededor de 20% de saturación de oxígeno para soportar el metabolismo de una biomasa suspendida (que se denomina lodo activado), el cual utiliza el carbono y el nitrógeno contenido en el agua residual como fuente de alimento.

Para aguas residuales extraordinariamente fuertes (como las provenientes de las industrias cerveceras y alimentaria) puede inyectarse oxígeno puro o confinar el proceso dentro de una atmósfera rica en oxígeno. ⁽¹⁰⁾

Una variante es un sistema de aireación extendida y retención (estanques de oxidación) es aplicable para obtener un efluente bajo en nitrógeno total, el tratamiento incluye el paso por varias zonas anóxicas en las que ocurre la desnitrificación.

El lodo activado normalmente oxida el amonio a nitrato con un poco más de eficiencia, dado que es menos sensible a la temperatura.

El tiempo de retención varía de 6 a 8 horas ya concentración de sólidos está comprendida entre 2000 y 3000 mg/L. ⁽³⁵⁾

3.2.6 AIREACIÓN EXTENDIDA

La aireación extendida o estanque de oxidación es un desarrollo del sistema original de lodo activado. El tiempo de retención en el tanque es típicamente 24 hrs. y varios días en algunos usos en la agricultura y la industria. La capacidad del tanque es mayor que en lodos activados (unidades de 7,000 m³). Los tanques de oxidación toleran mejor las descargas súbitas y las tóxicas, puesto que la dilución es mayor y también lo es la capacidad de amortiguación. Los niveles de demanda de oxígeno son más bajos (15% de saturación en el punto de aireación, alrededor de 1 mg/L a 20°C), la aireación se ejecuta únicamente por rotores mecánicos superficiales o esferas de aireación. Más del 75% del tanque puede ser anóxico.

En este proceso de tratamiento el lodo tiende a sedimentarse bien a causa de que los organismos filamentosos no encuentran condiciones adecuadas para vivir en las zonas anóxicas y debido a que el efluente tiene bajo contenido de nitrato, no hay desnitrificación en los depósitos de sedimentación y por esto puede retenerse el lodo durante intervalos mayores de tiempo, generando un colchón de lodo de unos 15,000 mg/l de sólidos. Un inconveniente es la extraordinaria producción de lodo, 50 a 60% más de lo que correspondería a la carga de sólidos que ingresa. Por cada kilogramo de DBO eliminada se genera un kilogramo de lodo.

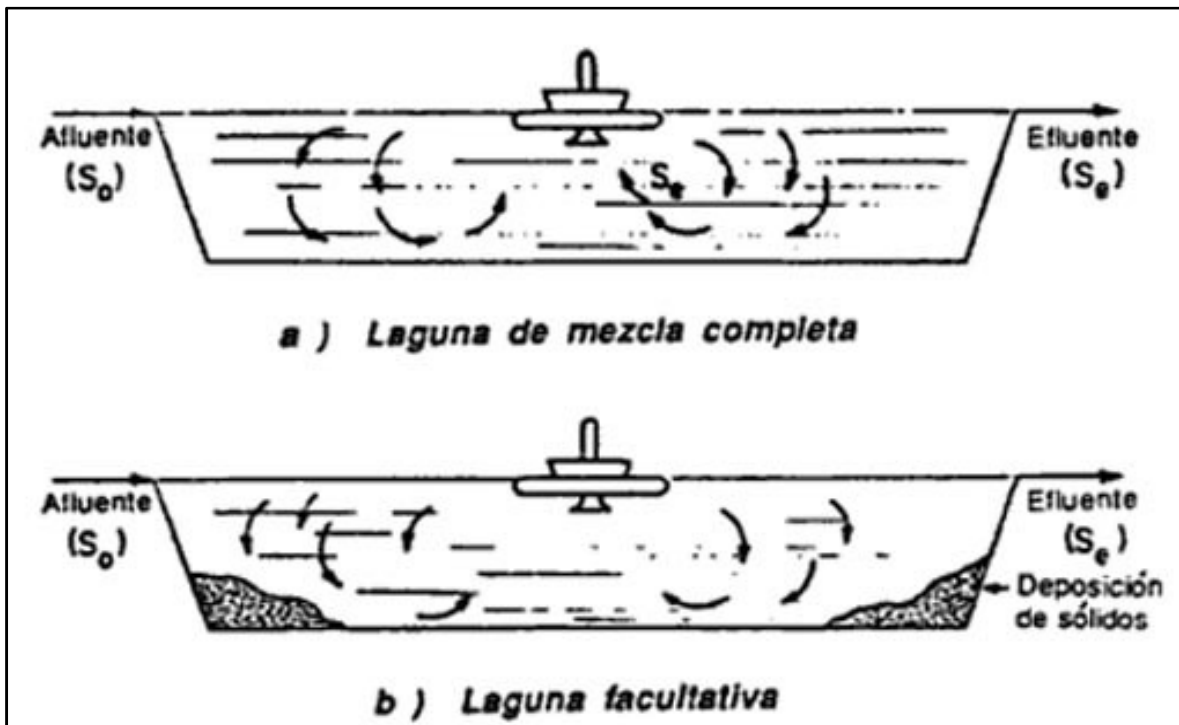
3.2.7 LAGUNAS

La forma más primitiva de depósito de sedimentación son las lagunas, si en una instalación industrial se puede contar con suficiente terreno, esta opción debe ser considerada, aunque son factores limitantes las condiciones del subsuelo, la naturaleza del efluente, el lodo y los olores indeseables relacionados con él. ⁽¹⁰⁾ La mayoría de estas lagunas son someras y con una superficie considerable de espejo líquido. Se han usado con éxito en las industrias del papel y del cemento para recoger sólidos inorgánicos. Así como en explotaciones agrícolas y ganaderas

(cuando son aceptados los malos olores desprendidos en la descomposición del lodo orgánico). Las lagunas o balsas actúan como eficientes digestores lentos.

Las lagunas aeradas son balsas de profundidad entre 1 y 4 metros en la que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación (superficiales, turbinas o difusores) ⁽³⁵⁾. Son sistemas sin reciclado de lodos y la concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia (concentración de sólidos entre 80 y 200 mg/l).

Figura 3. 10 Regímenes de Mezcla de las Lagunas Aireadas



Fuente: R. S. Ramalho, Tratamiento de Aguas Residuales. ⁽³⁵⁾

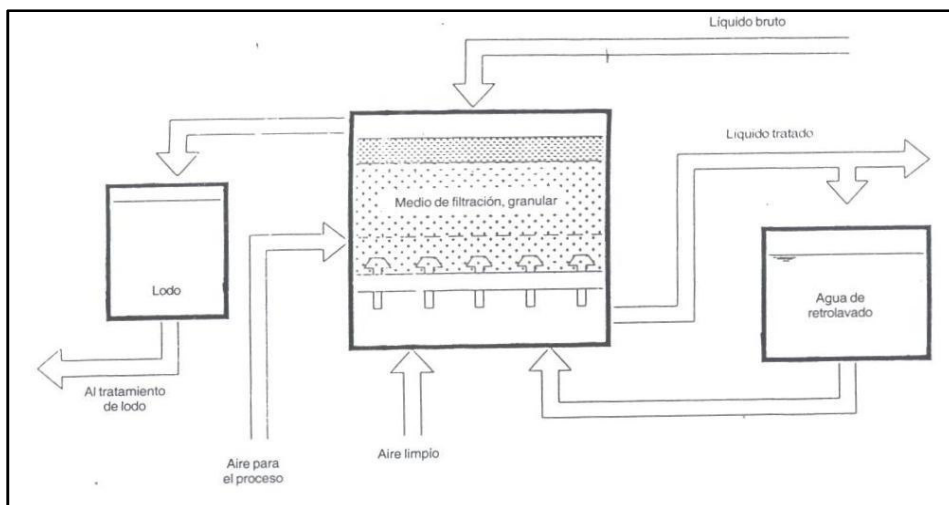
Las lagunas aeradas se clasifican por el nivel de turbulencia en: lagunas de mezcla completa y lagunas facultativas. ⁽³⁵⁾ Las de mezcla completa (Figura 3.10 a) logra mantener los sólidos en suspensión, proporcionando oxígeno disuelto en todo el volumen del líquido (tiempos de residencia < 3 días). En las lagunas facultativas (Figura 3.10 b) parte de los sólidos reposan en el fondo de la laguna donde sufren descomposición anaerobia, aquí el nivel de turbulencia alcanza para suministrar oxígeno a el volumen líquido.

3.2.8 FILTROS SUMERGIDOS AIREADOS

En este sistema tiene lugar la combinación de tratamiento biológico y filtración física; las aguas negras sedimentadas se filtran a alta velocidad por un lecho fijo de material granular en partículas de 2 a 6 mm, que es normalmente pizarra expandida, que se produce quemando la materia natural. Se suministra aire en el reactor contra corriente a través de una rejilla de tubos y difusores, colocados entre 20 y 30 cm encima de la base del medio filtrante.

El medio filtrante lleva acabo la filtración de los sólidos suspendidos, de manera que el efluente sale atravesándole y es conducido con una tubería que asciende a un tanque de almacenamiento de agua de lavado (antes de descargarlo)

Figura 3. 11 Sistema Bicarbone



Fuente: John Arundel, Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales. ⁽¹⁰⁾

En este sistema es frecuente la introducción de agua de retrolavado (agua de lavado en contracorriente), cada 24 horas, para retirar el exceso de biomasa. El sistema Biocarbone (de la Biwater-OTV Ltd. Figura 3.11) aprovecha la gravedad para filtrar, una variante de este sistema es Biostyr (de la Biwater-OTV Ltd) que trabaja en flujo ascendente y utiliza para filtrar unas esferas de Poliestireno expandido de 3 mm, retenidas en la parte superior por boquillas. Estos sistemas ofrecen desnitrificación y eliminación parcial del fósforo. El aire se introduce por la parte superior, creándose una zona anóxica en la base. Este último sistema es usado por algunas estaciones de tratamiento de aguas negras en Francia, alcanzando un efluente con

cantidades menores de 20 mg/l de DBO, menos de 15 mg/l de sólidos sedimentables, concentración inferior a 2 mg/l de fósforo y entre 5 a 10 mg/l de nitrógeno total.

Biobead (de la Brightwater Engineering Co) es otro proceso de tratamiento que utiliza el sistema de filtros sumergidos aireados, aquí el medio filtrante es un material plástico granular, que flota y es retenido por una malla de acero inoxidable (este medio filtrante posea la eficiencia de transferencia de oxígeno más alta, reduciendo a una tercera parte la necesidad de aire). El flujo de lodo sedimentado se dirige hacia arriba y atraviesa el medio filtrante en la misma dirección que lo hace el aire.

3.2.9 PROCESOS ANAEROBIOS

El tratamiento anaerobio se utiliza para las aguas residuales como para la digestión de lodos. Los productos finales de la digestión anaerobia son gases, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono, en pequeñas cantidades sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptano (RSH) e hidrógeno (H_2). El proceso comprende la etapa de fermentación ácida y metánica.⁽³⁵⁾

En la fermentación ácida los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas e hidratos de carbono) se hidrolizan para producir unidades moleculares menores que son sometidas a biooxidación, convirtiéndose principalmente en ácidos orgánicos de cadena corta (ácido acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$, propiónico $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ y butílico $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$), estas reacciones (hidrólisis y oxidación) son realizadas por una población heterogénea de bacterias facultativas y anaerobias.⁽³⁵⁾ En esta etapa no se produce una reducción importante de DQO, ya que lo principal es la conversión de moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta, mismos que generan también una demanda de oxígeno.

En la fermentación metánica los microorganismos metanogénicos (que son estrictamente anaerobios) convierten los ácidos de cadenas más largas en metano, dióxido de carbono y también en ácidos orgánicos de cadenas más cortas. Las moléculas ácidas se rompen repentinamente dando lugar finalmente a ácido acético que se convierte en CO_2 y CH_4 .⁽³⁵⁾

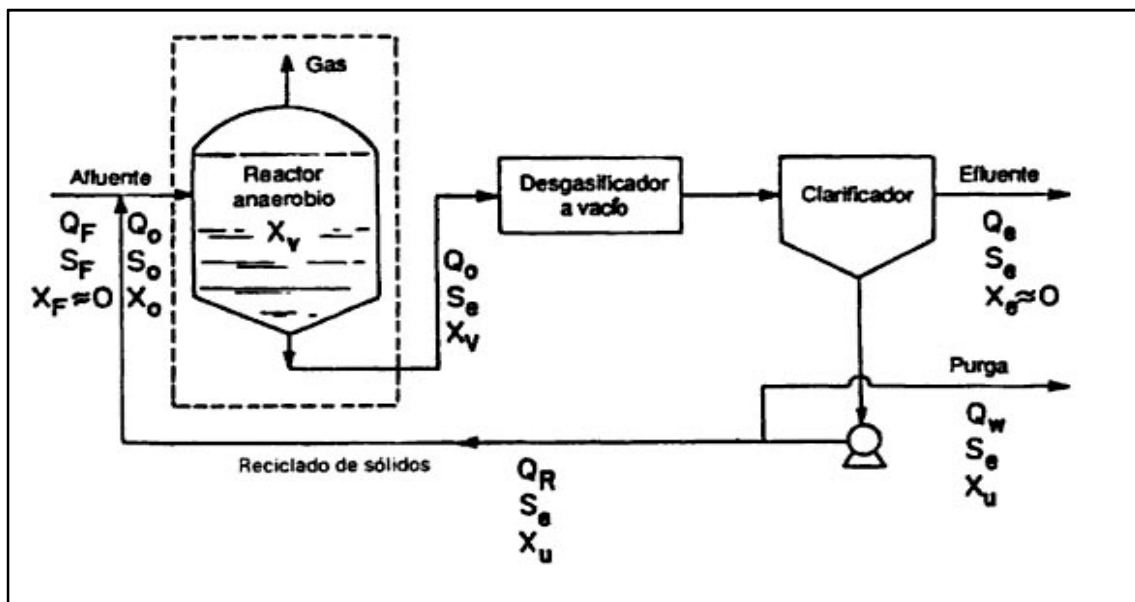
Las bacterias facultativas y anaerobias de la fermentación ácida, crecen más rápidamente que las metanogénicas de la etapa de fermentación metánica.⁽³⁵⁾ Esto hace de la fermentación ácida

una etapa rápida por lo que la etapa de fermentación metánica es la que controla la velocidad de los procesos anaerobios. El nivel óptimo de pH es de 6.8 a 7.4. El tiempo de residencia para los microorganismos metánicos debe ser el adecuado (de 2 a 20 días), para que no sean eliminados del sistema.

Alguna de las ventajas del tratamiento anaerobio se deben al no uso de equipo de aireación, la producción de biomasa por unidad de reducción de sustrato es mucho menor que para los sistemas aerobios (por ende requiere menos nutriente; nitrógeno y fosforo), es posible operar a cargas orgánicas superiores y la producción de metano puede ser una ventaja debido a su valor como combustible.

La necesidad de tiempos de residencias mayores, los malos olores, la necesidad de mantener temperaturas más altas (alrededor de 35°C), el incremento en los costos para la clarificación y la sensibilidad del proceso a las cargas de choque pueden significar ciertas desventajas ⁽³⁵⁾

Figura 3. 12 Diagrama de Flujo del Proceso Anaerobio de Contacto



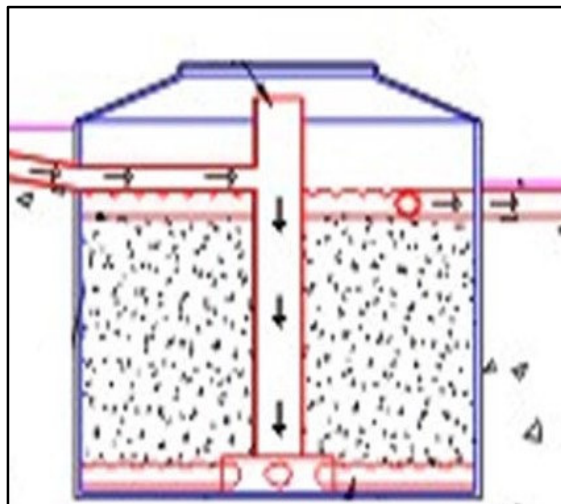
Fuente: R. S. Ramalho, Tratamiento de Aguas Residuales. ⁽³⁵⁾

El principal proceso de tratamiento anaerobio es el de contacto (Ver Figura 3.12), corresponde a un tipo de proceso de crecimiento en suspensión. ⁽³⁵⁾ (La concentración de MLVSS, X_v son de 3000-4000 mg/l)

El proceso anaerobio de contacto se puede utilizar para aguas residuales industriales con alta carga de DBO. ⁽³⁴⁾ El agua residual se mezcla con el lodo recirculado que se digiere en un reactor anaerobio, se realiza el mezclado completo en el reactor y se separan los lodos en un clarificador o unidad de flotación al vacío. El sobrenadante se vierte como efluente y los lodos sedimentados se recirculan (el exceso de lodos es pequeño).

El filtro anaerobio “es similar a un filtro percolador aerobio”, aquí la alimentación del agua residual se realiza por el fondo de la unidad y la abandona por la parte superior (Ver Figura 3.13), como consecuencia el material de relleno está completamente sumergido en el agua residual y por ello no hay aire dentro del sistema. Puede emplearse grava o relleno sintético. ⁽³⁵⁾

Figura 3.13 Dibujo de filtro Anaerobio



http://www.ecologyglass.com/imagenes/prod_fotos/prod_foto_5.jpg (Modificado)

El proceso de filtro anaerobio se realiza en una columna rellena de diversos soportes en los que se fijan y desarrollan las bacterias anaerobias. Este proceso se emplea para tratar materia orgánica carbonosa; el agua residual a tratar fluye en sentido ascendente, y como las bacterias están fijadas a los soportes se pueden tener tiempos de retención celular elevados. ⁽³⁴⁾

Es posible operar los filtros anaerobios a temperaturas menores que en el proceso de contacto debido a la concentración elevada de biomasa en el filtro. ⁽³⁵⁾ Resulta un sistema eficaz para el tratamiento de las aguas residuales solubles.

En general el tratamiento anaerobio se aplica a las aguas residuales de la industrias de conservas de carne, mataderos, cerveza y conservas de pescado, ya que el agua a tratar en el proceso anaerobio contiene una concentración elevada de sólidos en suspensión (a los que puede adherirse la biomasa), lo que ayuda a conseguir buenas condiciones de sedimentación de la biomasa anaerobia en el clarificador secundario. ⁽³⁵⁾

3.2.10 SISTEMA DE COLCHÓN DE LODO EN FLUJO ASCENSIONAL ANAEROBIO

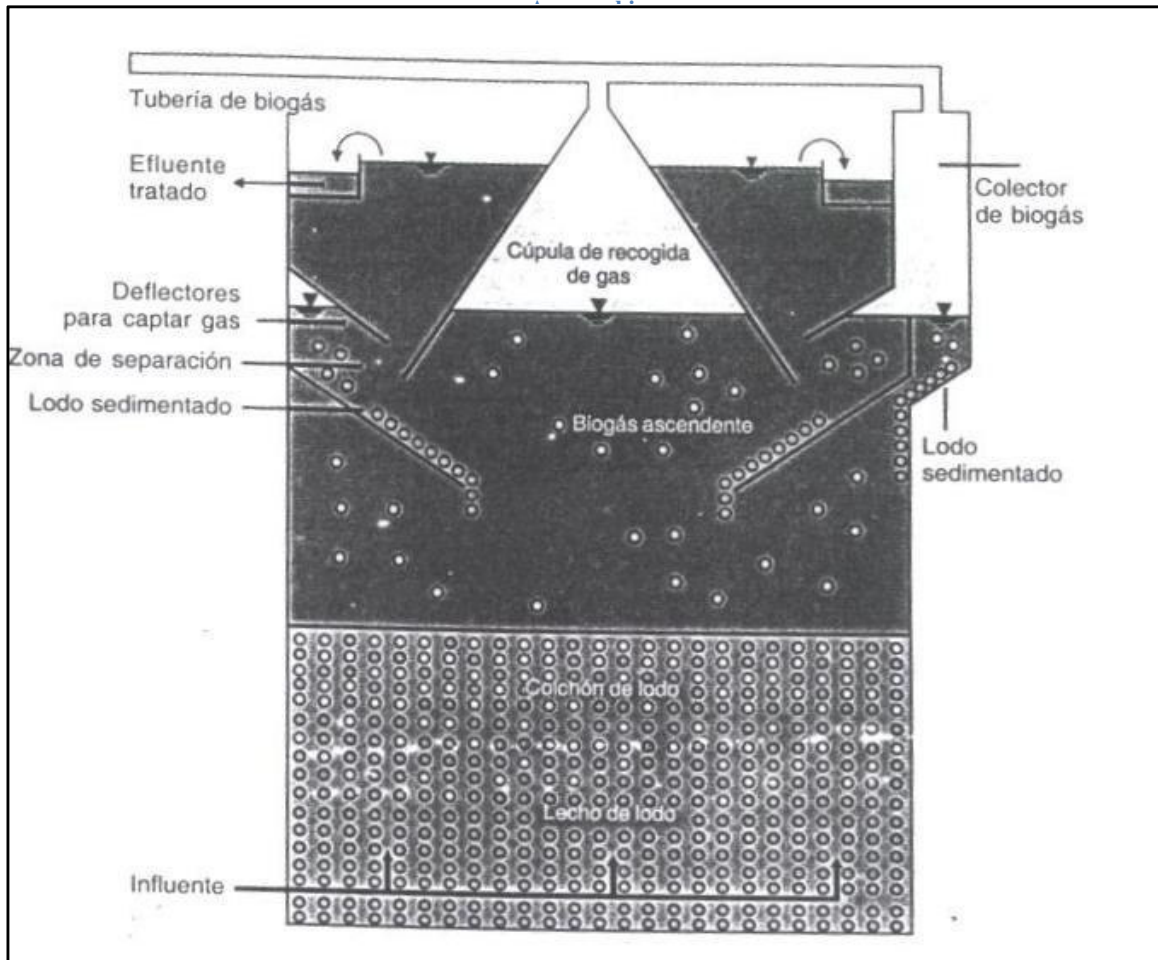
Es un proceso compacto desarrollado en un reactor anaerobio con flujo ascendente y manta de lodo (o colchón) ⁽³⁵⁾, fue diseñado en los 70's para la industria azucarera principalmente. Este sistema necesita etapas de pre-tratamiento y post-tratamiento. ⁽¹⁰⁾ En este sistema mediante digestión anaerobia se consigue la oxidación carbonácea de aguas residuales. Requiere agua residual a temperaturas mayores que el ambiente, alta DQO (más de 1,000 mg/L) y pH controlado (entre 6.8 y 7.5).

El pre-tratamiento básico consiste en calentar entre 30° y 35° (utilizando el biogás producido por el reactor) y se añaden elementos inorgánicos necesarios como Fe, Ni, Se, Mo, Cu, Mn, Cr y Co. Todo este entorno beneficia a las bacterias acidificantes para que conviertan los azúcares en ácidos grasos volátiles (acético, propiónico y butírico).

El agua residual llega a la parte inferior del reactor y es trasportada a la parte superior por canales con muescas en V, separando el CH₄ (metano) y del CO₂ (Dióxido de Carbono) gaseoso producidos por la digestión anaerobia, también es separado del lodo granular. El lecho de lodo del fondo tiene un espesor aproximado de 2 metros (de material espeso).

Las bacterias acetogénicas generan los ácidos volátiles producidos en el tanque de acidificación y las bacterias metanogénicas producen el dióxido de carbono, metano y agua. Como el efluente es anaerobio es necesario un post-tratamiento en un tanque de aireación, aquí se elimina el sulfuro de hidrógeno, este gas es quemado usualmente para calentar el influente. Los gases odoríferos remanentes se extraen y hacen pasar por un filtro con lecho de turba. ⁽¹⁰⁾ Este sistema se llama Biothane (de la Biothane Systems International). (Ver Figura 3.14)

Figura 3. 14 Reactor Sistema de Colchon de Lodo en Flujo Ascensional



Fuente: John Arundel, Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales. ⁽¹⁰⁾

Entre las ventajas principales esta la resistencia del sistema a la presencia de sustancias tóxicas y fluctuaciones de carga, debido a que la concentración de biomasa es alta.

Se ha utilizado en industrias de productos alimentarios, plantas azucareras, cervecerías, fábricas de conservas alimenticias, industrias de celulosa y papel, entre otras. ⁽³⁵⁾

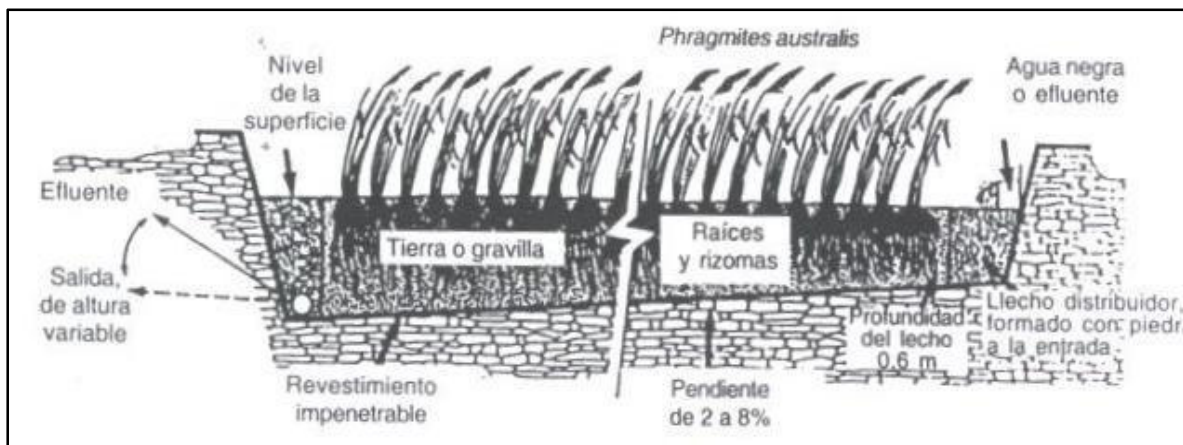
3.2.11 HUMEDALES DE CARRIZOS

Método de depuración de aguas negras con raíces de vegetales vivos en humedades. En casi todos los diseños se comienza por cribar y eliminar la arenilla de las aguas negras y después se

lleva al humedal. Es apropiado para tratar agua desparramada por el suelo en aeropuertos y zonas industriales, siempre que haya suficiente terreno.

El agua es depurada al fluir por encima de tierra, cenizas de horno o grava, donde se han plantado *Phragmites australis* (carrizo o cañota) u otras plantas helófitas (vegetal capaz de arraigar en suelo anegado o encharcado, con una parte sumergida y otra aérea). Los rizomas (tallo como el del lirio común) huecos de la *Phragmites* se desarrollan tanto en sentido horizontal como en trayectoria vertical, a través de nudos de crecimiento, formando una complicada trayectoria hidráulica para el agua en que están sumergidos, y tratando el líquido por la actividad de bacterias que envuelven a los rizomas en una película. El oxígeno pasa de las hojas y tallos a la rizosfera (región del suelo cerca de la raíz de la planta) para promover el tratamiento aerobio y continúa por los rizomas, hasta salir por los extremos de las raíces. El tratamiento se lleva a cabo a profundidades de 30 a 60 cm. (Ver Figura 3.15)

Figura 3.15 Corte transversal de un Humedal de Carrizos



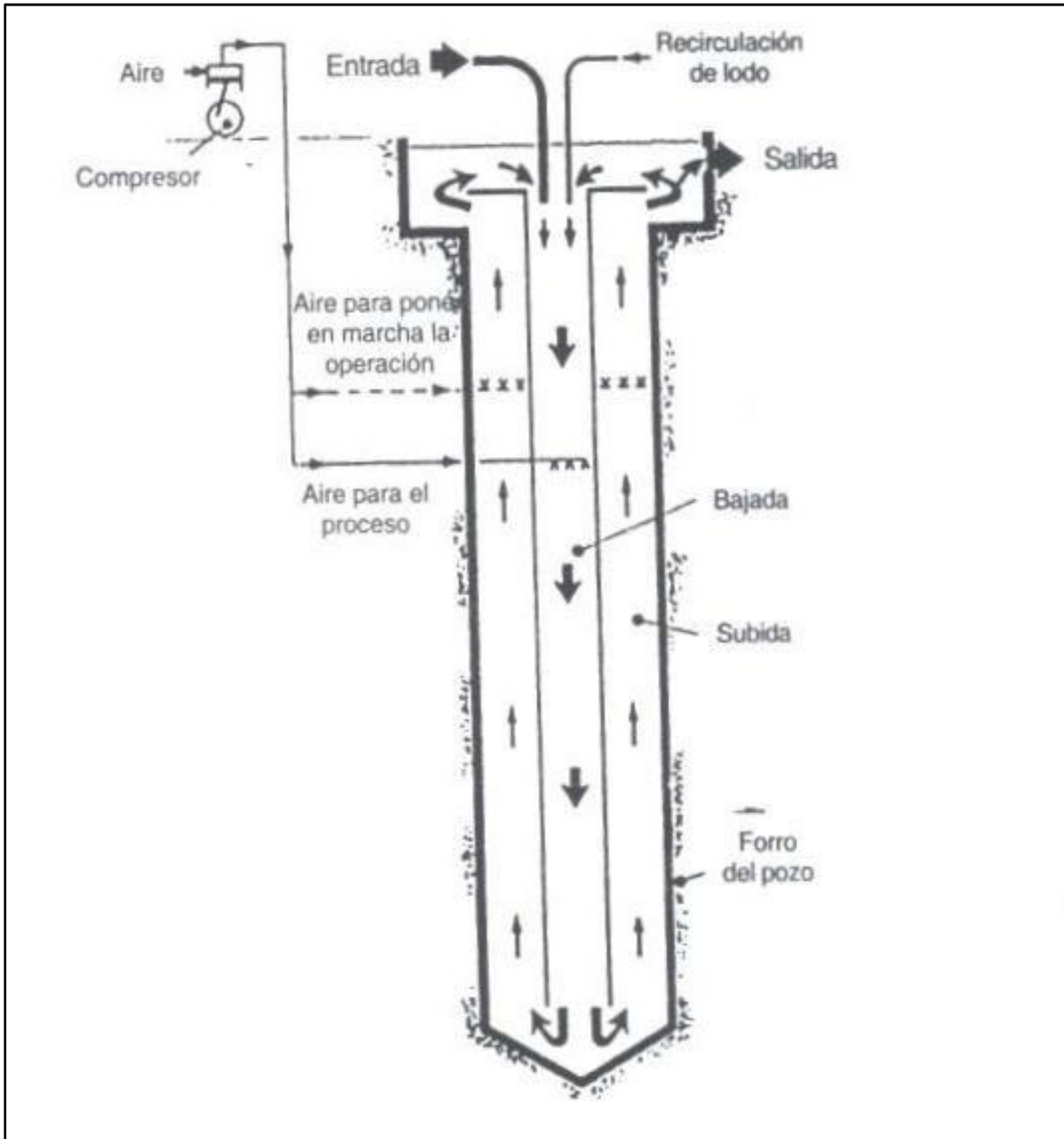
Fuente: John Arundel, *Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales*.⁽¹⁰⁾

3.2.12 POZO PROFUNDO

Es básicamente una planta de lodo activado modificada en un pozo de 50 a 150 metros de profundidad y 5 a 6 metros de ancho (Ver Figura 3.16). Se alimenta de agua negra bruta, cribada. En este sistema se inyecta aire por numerosos puntos tanto en el tubo de bajada como en el de subida para airear y para mantener el flujo alrededor del pozo. A las elevadas presiones hidrostáticas que reinan en la mitad inferior del pozo, las cantidades de oxígeno intercambiado

son elevadas y el tiempo de retención es casi siempre menor de tres horas. Las “edades del lodo” nunca duran lo suficiente para permitir el desarrollo de bacterias nitrificantes. ⁽¹⁰⁾

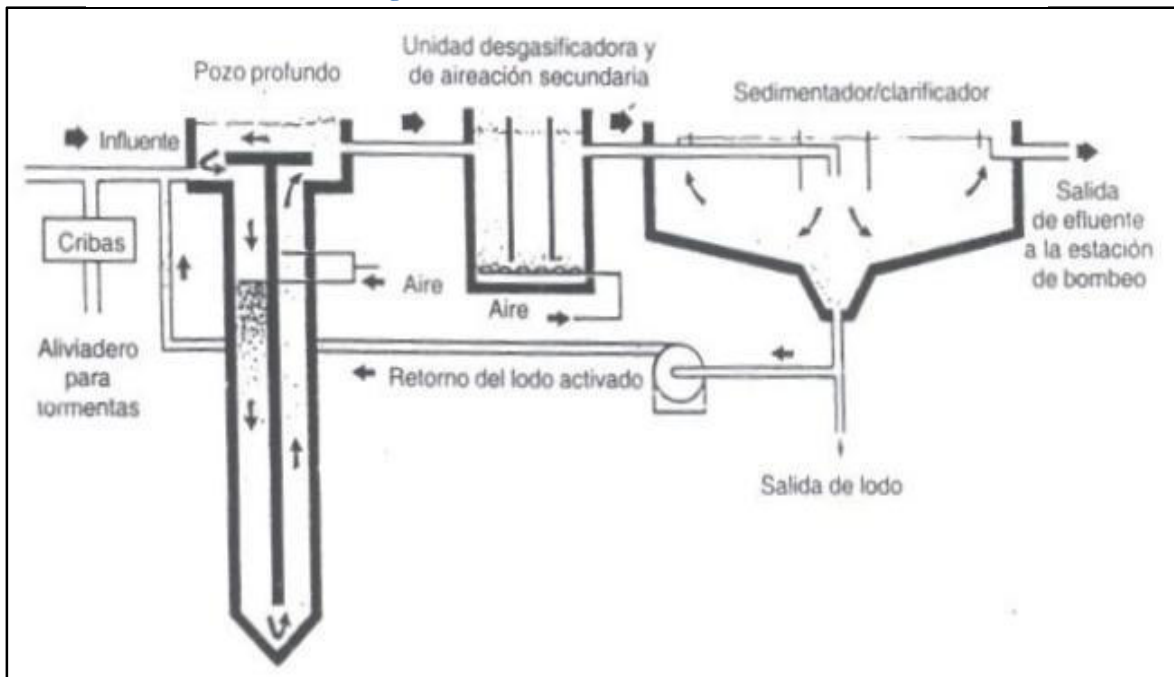
Figura 3. 16 Pozo Profundo



Fuente: John Arundel, *Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales*. ⁽¹⁰⁾

En el tren de tratamiento donde se emplea un proceso de pozo profundo es necesario una unidad desgasificadora que comprenda canales y sedimentación por gravedad para eliminar N_2 y CO_2 , esto antes de enviar el lodo a la recirculación. (Ver Figura 3.17)

Figura 3. 17 Sistema de Pozo Profundo



Fuente: John Arundel, *Tratamiento de Aguas Negras y Efluentes Industriales*.⁽¹⁰⁾

Este sistema logra la eliminación del 90% de DBO y de Sólidos Suspendedos, eliminación de amonio inferior al 40%, la edad promedio del lodo es de 4 días. Requiere de una superficie extremadamente pequeña, con el mínimo de equipo periférico, poco desprendimiento de olor fétido y con la posibilidad de automatizar totalmente la operación.

3.2.13 SEDIMENTACIÓN SECUNDARIA

Los tanques secundarios de sedimentación se proyectan normalmente para un tiempo de retención de 4 a 5 horas.

La cantidad de sólidos suspendidos en el influente al depósito, es utilizada para calcular la carga máxima de sólidos (MSL), es decir, la masa de sólidos por tiempo unitario y por superficie unitaria, que se puede llevar a ese tanque sin que los sólidos se desplacen hacia arriba y lleguen al canal, junto con el líquido efluente. Este parámetro se obtiene trazando un gráfico de carga de sólidos en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ contra concentración de sólidos en g/l .

3.2.14 PROCESOS UNITARIOS EMPLEADOS EN TRATAMIENTO TERCIARIO

El tratamiento terciario (tratamiento avanzado) es el nivel de tratamiento requerido después del nivel de tratamiento secundario para remover constituyentes como nutrientes, tóxicos, compuestos, y cantidades incrementadas de materia orgánica y sólidos suspendidos.

Los procesos empleados en el tratamiento terciario son: coagulación química, floculación; el proceso menos usados es intercambio iónico (para remover iones específicos).⁽³³⁾

La utilización de una gama amplia de oxidantes como el ozono se podría implementar para la destrucción de olores, sabores y colores.

La desinfección (destrucción de patógenos híbridos) no se logra a través de medios biológicos, sino físicos y químicos.

La desinfección química ofrece mayores posibilidades de éxitos que la desinfección física. La exposición del agua tratada, durante un lapso suficiente, a productos químicos, en concentraciones adecuadas, permitirá la desinfección.⁽³⁰⁾

Se aplican productos químicos oxidantes como el ozono y halógenos (cloro, bromo y yodo), además de otros oxidantes (permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno). También los iones metálicos (iones de plata) resultan bactericidas (no viricidas, ni quisticidas) en concentraciones aceptables (son costoso a dichas concentraciones), y a concentraciones bajas (15 µg/l) la desinfección se vuelve lenta. Se puede implementar álcalis y ácidos (como la cal cáustica), ya que las bacterias patógenas no prevalecen por lapsos largos en aguas fuertemente alcalinas (pH>11) o ácidas (pH<3).⁽³⁰⁾

La desinfección de las aguas residuales se enfoca a la destrucción de gérmenes unicelulares pero se ha vuelto de gran importancia la exterminación de las cercarías de los esquistosomas y de los gusanos de guinea adultos.

3.2.15 MÉTODOS DE BIOSORCIÓN DE IONES METÁLICOS POR MOHOS MICROSCÓPICOS

Son numerosos los hongos microscópicos que contienen quitina y quitosano como componentes estructurales de las paredes de sus células. El quitosano (polisacárido basado en glucosamina) tiene la propiedad de ligar iones metálicos. Esto da la posibilidad de crear un filtro de hebras enmarañadas para separar iones de metales venenosos.

Estudios que se realizan en la actualidad determinan que las especies *Mucor mucedo* y *Rhizomucor miehe* son capaces de separar una gama amplia de iones metálicos (Ag, Au, Cd, Zn, Ni, Cu y Cr). Los iones metálicos se sueltan lavando con ácido sulfúrico diluido y después de realizar un ajuste en el pH los hongos se vuelven a usar.

Los sistemas futuros para el tratamiento de efluentes con metales deberán cumplir límites de descargas verdaderamente bajos e incorporarán en su etapa final de tratamiento una de tratamiento biológico de este tipo.

3.2.16 COAGULACIÓN QUÍMICA

Para efectuar coagulación química se agregan al agua residual productos químicos formadores de flóculos (coagulantes), con el propósito de que se combinen con sólidos que no son sedimentables fácilmente (o que sedimentan muy lentamente) y con coloides, formando flóculos que sí logran sedimentar (rápidamente). Los coagulantes trabajan por transferencia de iones, son sustancias solubles pero al ceder sus iones también se precipitan. ⁽³⁰⁾

Los coagulantes más comunes son las sales de hierro (cloruro férrico), y aluminio (sulfato de aluminio). Los iones precipitantes los proporciona la alcalinidad natural presente o la alcalinidad desprendida por los aditivos químicos, como el carbonato de sodio. ⁽³⁰⁾

3.2.17 FLOCULACIÓN

Es necesario valerse de un producto floculante como polielectrolitos, sulfato ferroso y sulfato de aluminio. Los sólidos se acumulan en la superficie del agua, de donde son retirados

continuamente por medio de una barra giratoria y conducidos a una artesa que tienen un borde ligeramente levantado (tratándose de depósitos circulares).

El uso de clarificador es muy importante en la industria papelera por la recuperación de fibra. El sulfato de aluminio, los polielectrolitos y el carbón activado en forma granular son aditivos potenciales que ayudan a la floculación. El lodo suspendido se recoge por medio de conos suspendidos bajo el agua a la posición superior. Se pueden encontrar colchones estables de 0.3 a 0.9m, con velocidades ascensionales de 3 a 5 m/h.

3.2.18 OZONIFICACIÓN

El ozono en el tratamiento de aguas residuales tiene la función de desinfección y eliminación de materia orgánica refractaria.

El ozono es un elemento oxidante con propiedades bactericidas. Al añadir ozono al agua se convierte rápidamente en oxígeno y como consecuencia no se obtiene en el efluente tratado ningún compuesto químico residual, no produce sólidos en disolución, no reacciona con el amoníaco y no depende del pH; por otra parte introduce oxígeno en el agua residual tratada. ⁽³⁴⁾

Puede funcionar como una alternativa a la cloración, sin embargo sus costos son relativamente más elevados. El ozono no deja una desinfección residual como el caso de desinfección con cloro (cloro residual libre).

Capítulo 4

PROPUESTA DE TRENES DE TRATAMIENTO
PARA DIFERENTES PROCESOS INDUSTRIALES

Los trenes o sistemas de tratamientos están compuestos por una combinación de operaciones unitarias y/o procesos unitarios diseñados para reducir ciertos constituyentes del agua residual a un nivel aceptable. Se pueden hacer muchas combinaciones de operaciones y procesos unitarios. No obstante que prácticamente todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales son únicos en algunos aspectos, a través de los años ha evolucionado un agrupamiento general de operaciones y procesos unitarios de acuerdo con los contaminantes que constituyen “el blanco” de tratamiento. ⁽¹⁾

Algunos vertidos industriales solo requieren una neutralización. La salinidad remanente no constituye en la mayoría de los casos un problema fundamental para los cauces receptores del efluente. ⁽⁵⁾

Para la mayoría de las aguas residuales no tóxicas, es suficiente un proceso que incluya tratamiento primario y secundario. En otros casos es preciso añadir un tratamiento terciario que mejore aún más la calidad general del agua, logrando eliminar algún contaminante remanente.

En los vertidos industriales que contienen compuestos tóxicos es preciso un pre-tratamiento específico antes de pasar el agua al proceso convencional en una planta colectiva, que no esté preparada para recibir estos compuestos.

Las aguas residuales de la industria que contienen metales pesados y pesticidas, entre otras sustancias que podrían atravesar fácilmente el tratamiento primario e inhibir el tratamiento biológico, necesitan de tratamientos específicos. También es el caso de efluentes concentrados de materia no degradable, pero que manejan gastos menores.

El objetivo de cualquier tratamiento es eliminar los componentes definidos como contaminantes que resultan dañinos para el medio ambiente, logrando ajustar la calidad del agua vertida a las especificaciones legales. La Tabla 4.1 muestra los factores a considerar en el tratamiento del agua residual industrial.

Tabla 4.1 Factores Importantes para el Tratamiento del Agua Residual Industrial

FACTORES EN EL A.R.I.
Caudal.
Composición.
Concentración.
Calidad requerida del efluente.
Abundancia del agua.
Posibilidades de reutilización.
Posibilidad de vertido a una depuradora municipal.
Tasas de vertido, etc.

Fuente: adaptado de Tratamiento de Aguas Industriales. ⁽⁵⁾

4.1 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE ACABADOS TEXTILES

Los trenes de tratamiento comúnmente empleados para el tratamiento de los vertidos textiles, requieren:

- 1.- Separación de corrientes
- 2.- Pretratamiento
- 3.- Tratamiento físico (Sedimentación)
- 4.- Tratamientos fisicoquímicos
- 5.- Filtros biológicos
- 6.- Lodos activados
- 7.- Aireación extendida
- 8.- Lagunas

La separación de corrientes se aplica en la industria de acabados textiles (principalmente acabados de algodón y lana) ya que dentro de sus procesos se originan dos corrientes que

pueden ser muy bien definidas. La primera de ellas se caracteriza porque no genera en su constitución material tóxico (se origina en procesos de blanqueo, descruce, lavado, mercerizado, etc) y es enviada a un tratamiento biológico. La segunda contiene contaminantes tóxicos originados principalmente por tintes, por lo que requiere un tratamiento fisicoquímico.

Se debe incluir un pretratamiento de rejas o cribas de barra, así como una neutralización antes de someter el agua residual a los procesos principales de tratamiento. Las rejas o cribas son barras espaciadas desde 2 a 15 cm, verticales o formando 45 a 60° con la vertical (de limpieza manual o mecánica). La neutralización se lleva a cabo con el fin de cortar la acción de los ácidos y/o álcalis, que podrían dañar los equipos de tratamientos consecuentes y para realizar el tratamiento biológico de los residuos textiles alcalinos es necesaria una neutralización. Dos métodos muy eficaces son la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o la neutralización por gas comprimido de bióxido de carbono (CO_2). Los gases de combustión que normalmente contienen 12 a 14% de bióxido de carbono, pueden utilizarse para rebajar el pH, esto resulta viable económicamente en contraste de las dos primeras opciones.

Otro componente de tratamiento es la sedimentación, donde se efectúa una reducción considerable de sólidos. Esta operación es un tratamiento físico que utiliza el fenómeno de gravedad para lograr la separación de sólidos de las aguas residuales, el equipo de tratamiento recibe el nombre de tanque sedimentador.

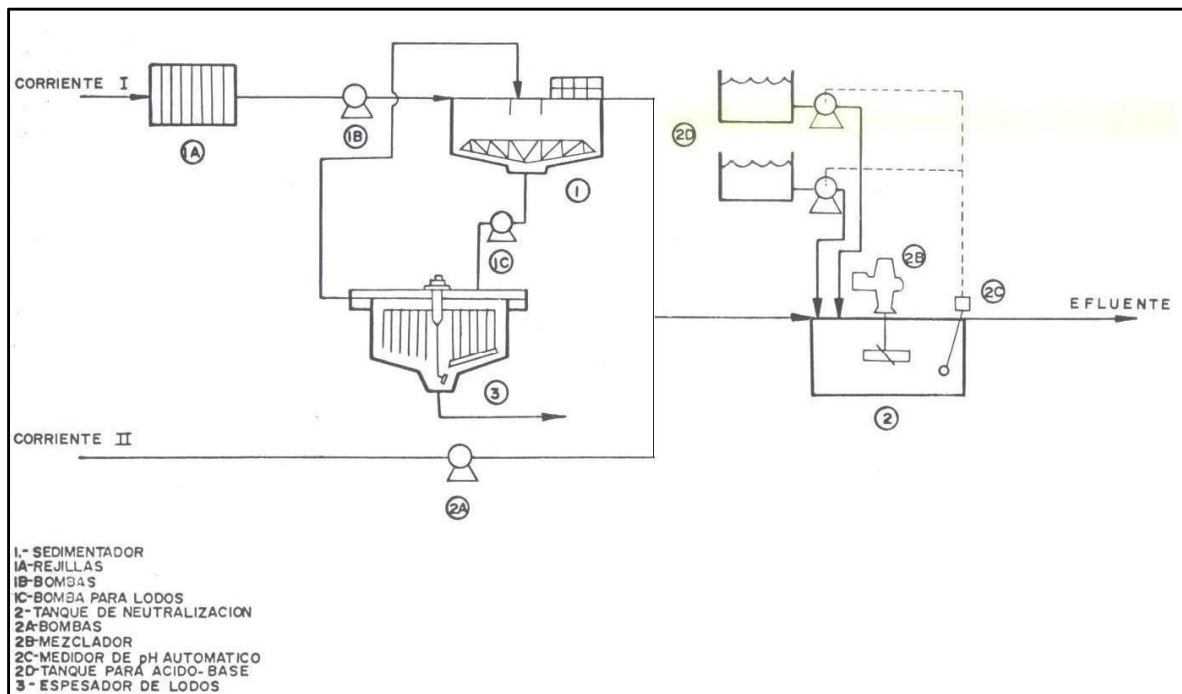
Se incluye un tratamiento fisicoquímico que tiene la finalidad de generar flóculos (que sedimenten por su propio peso) mediante la adición de compuestos químicos coagulantes (como alumbre, sulfato ferroso, entre otros). Este proceso se lleva a cabo en floculadores, consta de un motor integrado y un reductor de velocidad con biela para producir un movimiento de ida y regreso. Estos equipos operan con la adición de reactivos (generalmente costosos), por lo que debe hacerse trabajar con alta eficiencia.

Se emplea precipitación química para los residuos del tintado o se puede sustituir mediante la utilización de cloro en forma de cloruro cuproso ($CuCl$) para oxidar los tintes orgánicos y para eliminar la DBO de los tintes de azufre. También se puede agregar cloro al mismo tiempo que las materias químicas, para ayudar a la coagulación y a la eliminación del cloro.

También se debe instalar un tratamiento biológico, este puede ser filtros biológicos (elimina 60-90% de DBO), lodos activados, aireación extendida (elimina 90-95% de DBO) y laguna de mezcla completa mecánicamente aireada (elimina 85-95% de DBO).

La primera opción de tren de tratamiento para una planta mediana o grande de algodón se encuentra conformada en dos niveles de tratamiento. Para la corriente I (no tóxica) inicia con rejillas y tanque de sedimentación, como se muestra en la figura 4.1. El efluente de este tratamiento espera a la corriente II (tóxica), que será tratada para unirse en el tanque de neutralización.

Figura 4. 1 Tren Planta Grande de Algodón (nivel 1)

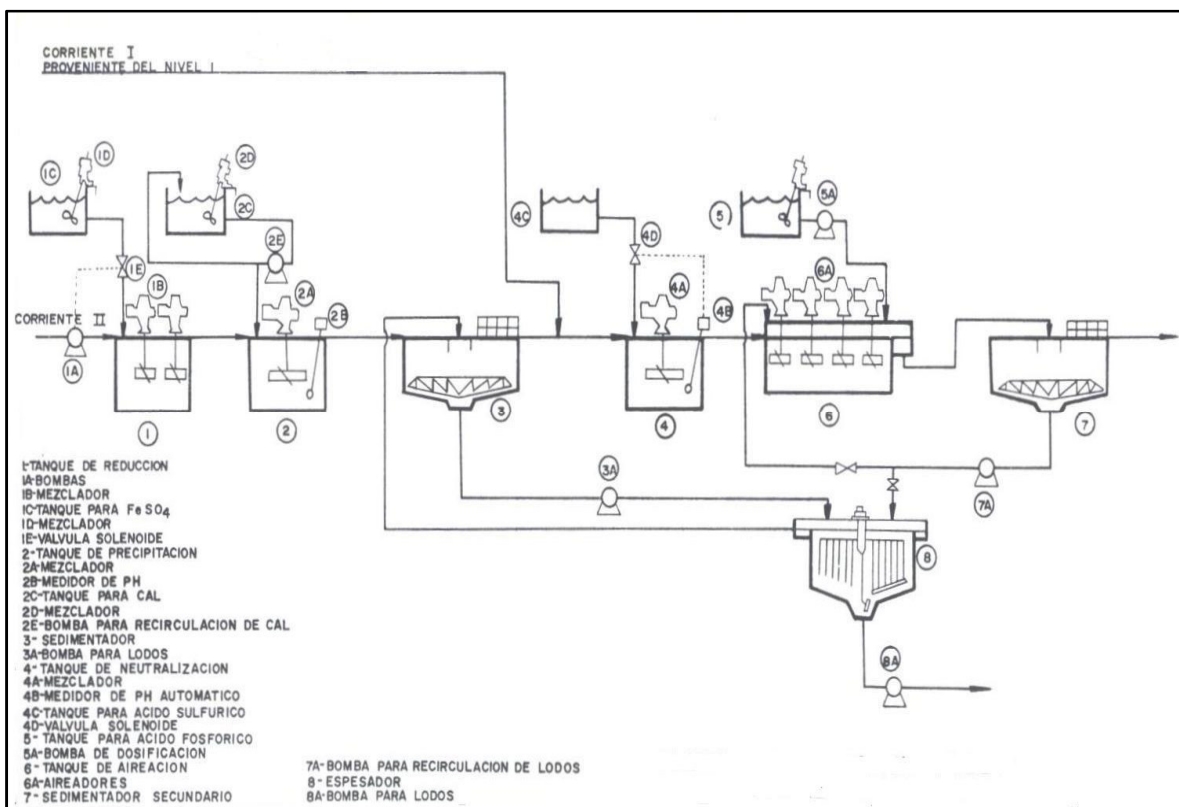


Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Textiles. ⁽²³⁾

Dentro del mismo tren la corriente II (con componentes tóxicos) se dirige a un tanque de reducción (donde se le añade sulfato ferroso). Como las aguas residuales de los textiles provenientes de la corriente II contienen cromo (en forma de ácido crómico o de cromatos, ambos altamente tóxicos), es necesario realizar la reducción con sulfato ferroso (FeSO_4) con el

fin de obtener cromo en estado trivalente (estado del cromo menos tóxico), con esto se lleva el pH a 2 o 2.5 unidades. A continuación se conduce a un tanque de precipitación con adición de cal, llevando el pH a 8 o 8.5 unidades y provocándose así la precipitación del cromo reducido, así como del residuo de hierro agregado. Luego el efluente de la corriente II pasa a la sedimentación primaria para lograr una reducción considerable de sólidos, para después reunirse con el efluente de la corriente I (que ya pasó por tratamiento primario independiente del de la corriente II, mostrado en la figura 4.1) en el tanque de neutralización. En el tanque de neutralización se mezclan las dos corrientes I y II, resultando una mezcla alcalina, y allí se hace la adición de ácido sulfúrico (ver Figura 4.2) para neutralizar la alcalinidad de ambos influentes. El efluente se dirige ahora al tanque de aireación para su tratamiento biológico, luego es necesario un tanque de sedimentación secundaria para culminar el tren de tratamiento de una planta grande de algodón.

Figura 4. 2 Tren Planta Grande Algodón (nivel 2)

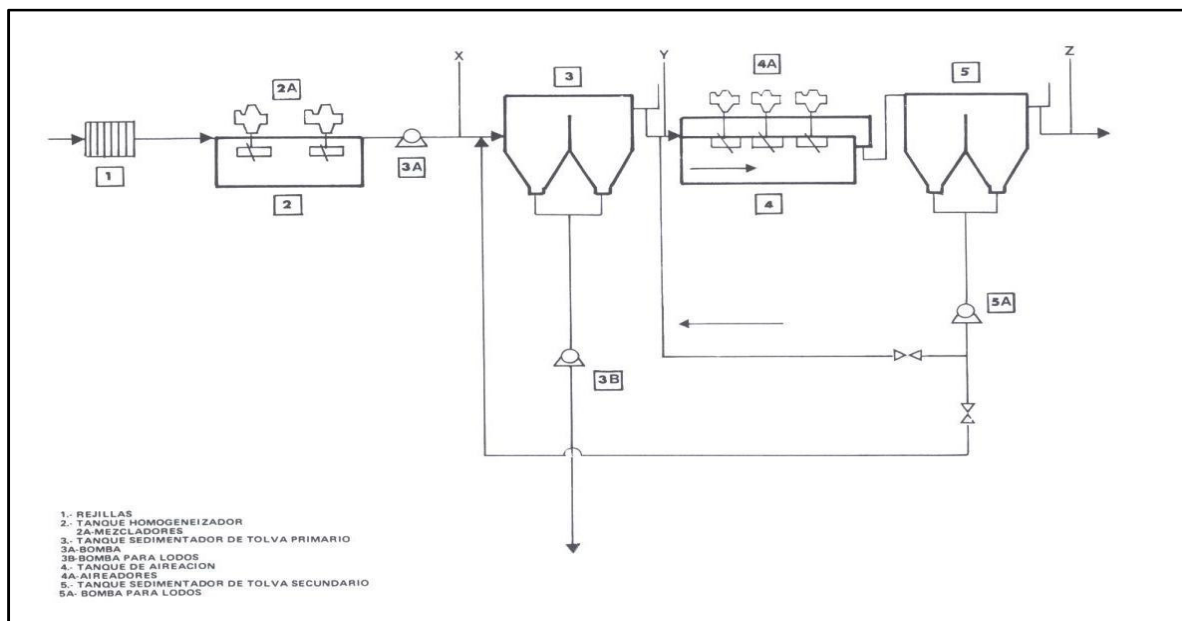


Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Textiles. ⁽²³⁾

4.2 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE LA CURTIDURÍA

El tratamiento de los vertidos se limita en la mayoría de los casos a su igualación, sedimentación, luego se efectúa precipitación química y digestión de lodos. La igualación es necesaria para minimizar las grandes fluctuaciones en la composición de los vertidos causadas por descargas intermitentes de líquidos fuertes. La concentración de 30 a 70 mg/l de cromo presente como cromatos (cromo en estado hexavalente; altamente tóxico y muy soluble a cualquier valor de pH) debe ser reducido a un estado trivalente (hidróxido de cromo) añadiendo ácido sulfuroso o sulfato ferroso, el hidróxido de cromo alcanza su poca solubilidad a un pH de 8.5 por lo que se añade un álcali para provocar la precipitación (como cal común o sosa cáustica). Para el tratamiento secundario pueden usarse filtros percoladores y sistemas de lodos activados (cuando el pH=8.0 y la dureza a 200 mg/l), logrando una reducción de la DBO del 85 al 95%. Para el tratamiento se recomienda realizar la igualación, sedimentación y precipitación química, seguido de filtros percoladores y sedimentación secundaria. Dadas las características de los desechos se ha considerado un tratamiento preliminar, seguido de un tratamiento primario y luego un tratamiento secundario (o biológico).

Figura 4. 3 Planta Grande de Curtido al Cromo, Tanques de Sedimentación de Tolva

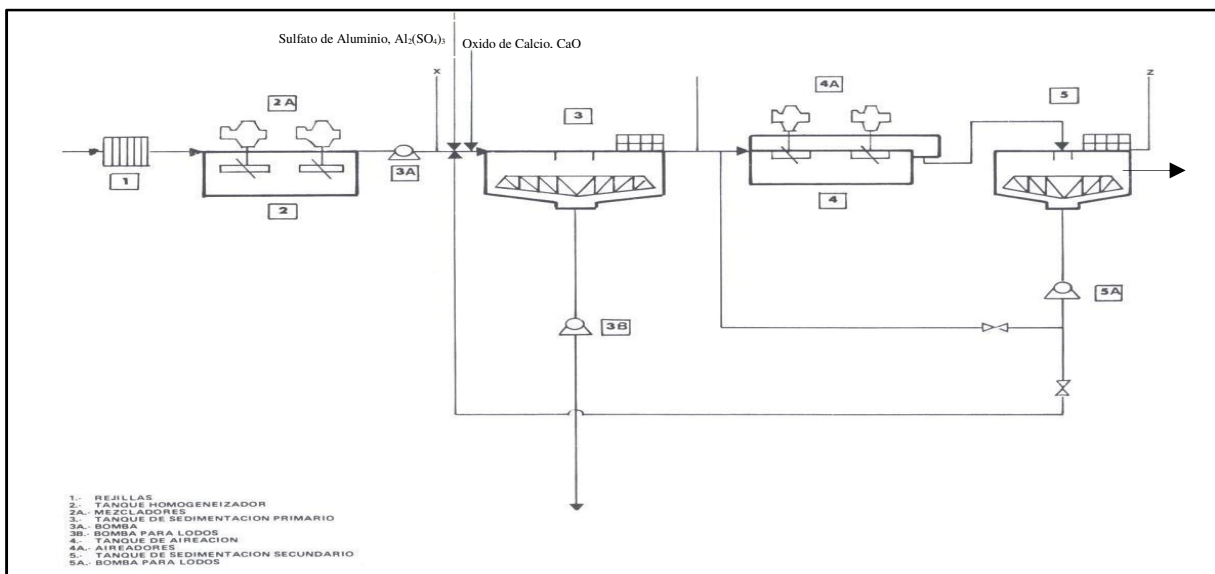


Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Curtiduría. (17 y 24)

Una alternativa de tren de tratamiento para una planta grande de curtido al cromo se conforma por rejillas, tanque homogeneizador (aquí también se lleva a cabo la reducción de los cromatos a hidróxido de cromo), entre la homogenización y la sedimentación primaria se debe incluir un tanque de precipitación (se añade sosa cáustica o cal) para retirar el cromo, luego un tanque de sedimentación de tolva primario, tanque de aireación y tanque de sedimentación de tolva secundario. (Ver Figura 4.3)

Otra opción para tren de tratamiento de una planta grande de curtido al cromo se conforma de las rejillas, tanque homogeneizador (con reducción; adición de sulfato ferroso), un tanque de precipitación (con adición de cal o sosa cáustica), un tanque de sedimentación primario, tanque de aireación y tanque de sedimentación secundario con adición de floculante. (Ver Figura 4.4)

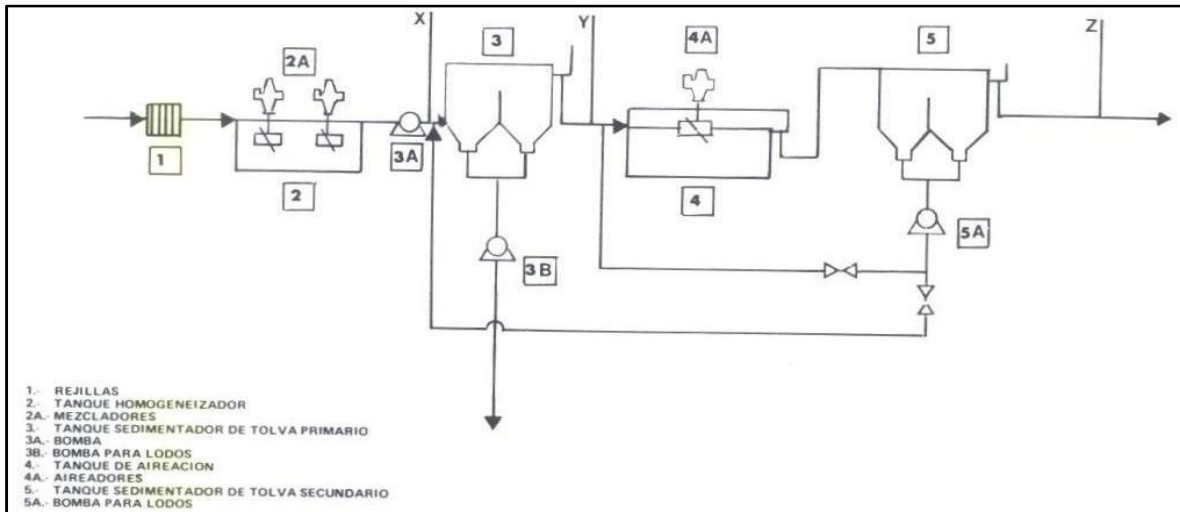
Figura 4. 4 Planta Grande de Curtido al Cromo, Sedimentación con Adición de Floculante.



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Curtiduría. ⁽¹⁷⁾

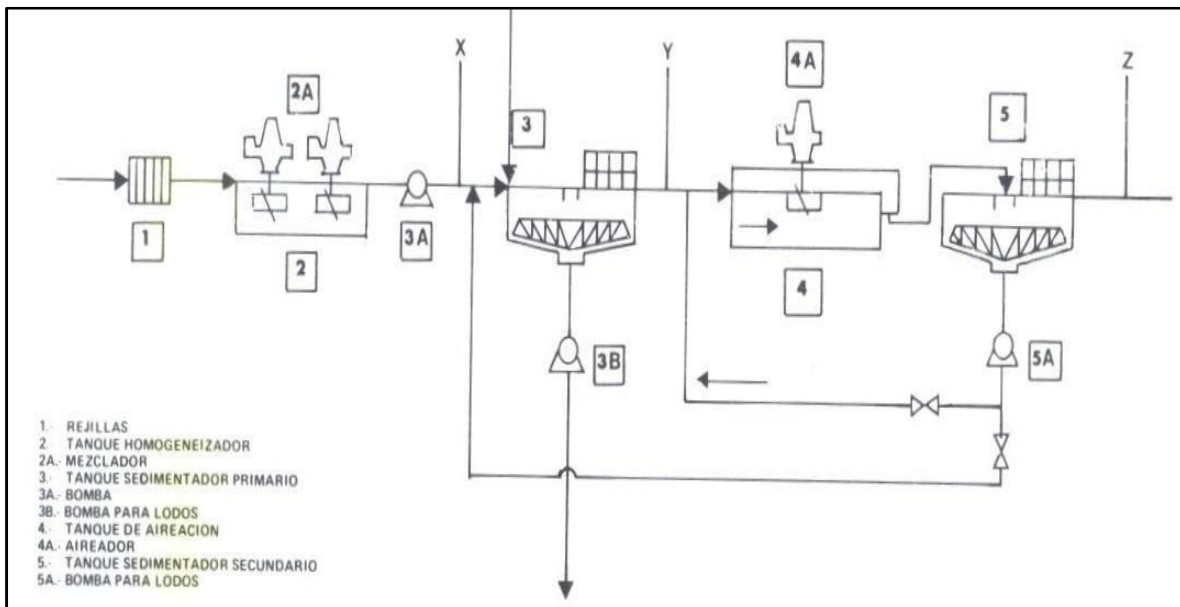
Una opción de tren de tratamiento (Figura 4.5) para una planta mediana de curtido al cromo esta conformada por rejillas, tanque homogeneizador, un tanque de sedimentación de tolva primario, tanque de aireación y tanque de sedimentación de tolva secundario. También es necesario incorporar a este tren precipitación química para remoción del cromo toxico, de forma que pueda llevarse acabo el tratamiento biológico.

Figura 4. 5 Tren de Tratamiento, Planta Mediana de Curtido al Cromo, Tanques de Sedimentación de Tolva



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Curtiduría. ⁽¹⁷⁾

Figura 4. 6 Tren de Tratamiento, Planta Mediana de Curtido al Cromo, Sedimentación con Adición de Floculante.



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Curtiduría. ⁽¹⁷⁾

Otra opción de tren de tratamiento (Figura 4.6) para una planta mediana de curtido al cromo se conforma por rejillas, tanque homogeneizador, un tanque de sedimentación primario, tanque de aireación y tanque de sedimentación secundario con adición de floculantes. Es necesario incluir precipitación química para logra la remoción principalmente de cromo.

Todos estos sistemas de tratamiento tienen como finalidad disminuir los contaminantes presentes en los efluentes de la curtiduría, representados por los parámetros de DBO, DQO, SST, ST, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno total, sulfuros, cromatos, pH, grasas, aceites y color.

4.3 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DEL AZÚCAR

En los ingenios las dos principales corrientes que pudieran recibir tratamiento por separado, son el efluente proveniente del lavado de la caña y el efluente de condensados.

La secuencia recomendada para el efluente que proviene del lavado de la caña consta de un tratamiento preliminar que está constituido por una malla con remoción mecánica (preferiblemente) y un sistema de decantación para separar los sólidos sedimentables. Después es necesario enviar el agua a una unidad de aereación (extendida o convencional) o bien a una laguna de estabilización que deberá tener un tiempo de retención de 30 a 70 días, con una profundidad no mayor a 2 metros (se puede usar un sistema de aereación para acelerar el tiempo de oxidación y disminuir el área de la laguna).

Para el tratamiento del efluente de condensados se considera la instalación de separadores de arrastre y es necesario realizar un tratamiento complementario mediante lagunas de estabilización.

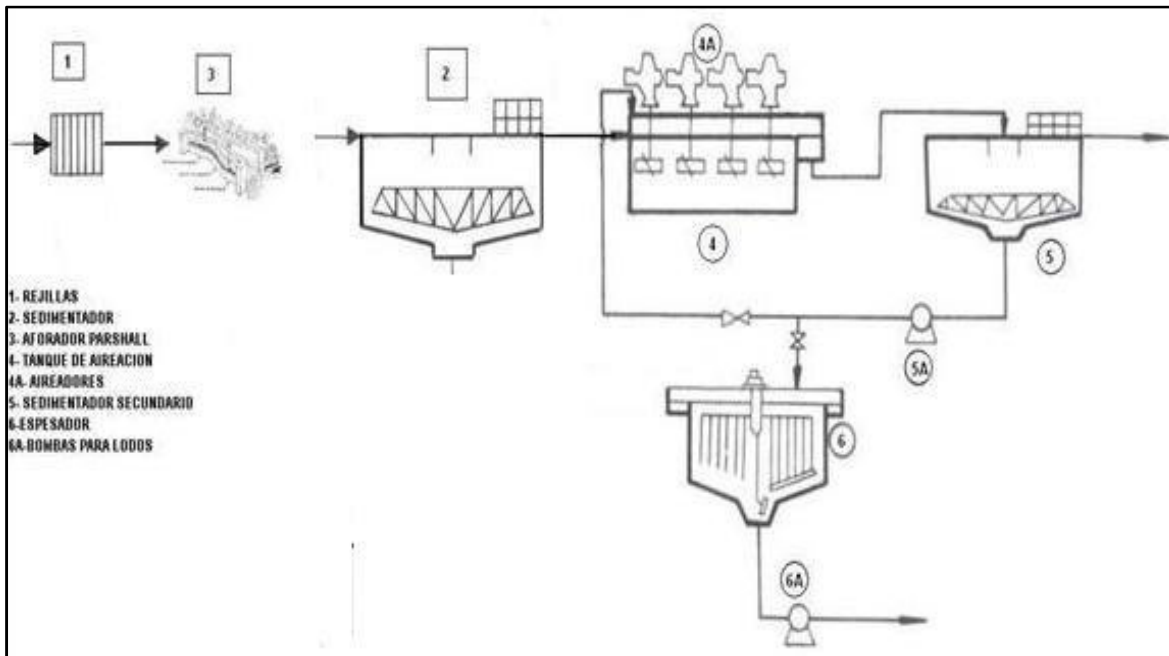
Sin embargo, existe la conveniencia de realizar un tratamiento combinado utilizando los diferentes efluentes, esto dependerá de estudios de factibilidad tanto técnica como económica, ya que cada caso presentara variantes muy distintas.

Dos factores predominantes en la mayoría de los casos son los principales influyentes en la selección de métodos de tratamiento. Estos factores son: la disposición de amplias extensiones de terreno y la característica de la biodegradabilidad de las descargas de los ingenios azucareros. Seleccionando a criterio, Lagunas de estabilización de dos pasos, Lagunas aereadas mecánicamente y Lodos activados convencionales.

Una opción de tren de tratamiento con Lagunas de estabilización de dos pasos incluye: rejilla, aforador Parshall, sedimentador, lagunas de estabilización de dos pasos, secado de lodos y relleno sanitario o uso como fertilizante.

Otra opción más de tren de tratamiento con Lagunas aeradas mecánicamente se constituye de la siguiente forma: rejillas, aforador Parshall, sedimentador, lagunas aeradas mecánicamente y sedimentación secundaria (laguna de sedimentación).

Figura 4. 7 Tren Planta de Tratamiento con Lodos Activados para la Azúcar



Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria del Azúcar. (18)

Un tren de tratamiento con lodos activados convencionales: rejillas, aforador Parshall, sedimentador, tanque de aireación y tanque de sedimentación secundaria. (Ver Figura 4.7)

4.4 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE ACABADOS METÁLICOS

Por la composición de las aguas residuales en la industria de acabados metálicos se proponen los siguientes tratamientos:

- 1.- Tratamiento de cianuros.
- 2.- Tratamiento de cromatos.
- 3.- Tratamiento para los desechos ácidos y alcalinos.
- 4.- Tratamiento de metales pesados.

Frecuentemente las aguas descargadas de esta industria requieren por lo menos 3 o los 4 tipos de tratamientos antes citados. Es indispensable llevar a cabo los tratamientos por separado (los desechos ácidos no se pueden juntar con los desechos que contienen cianuros ya que se

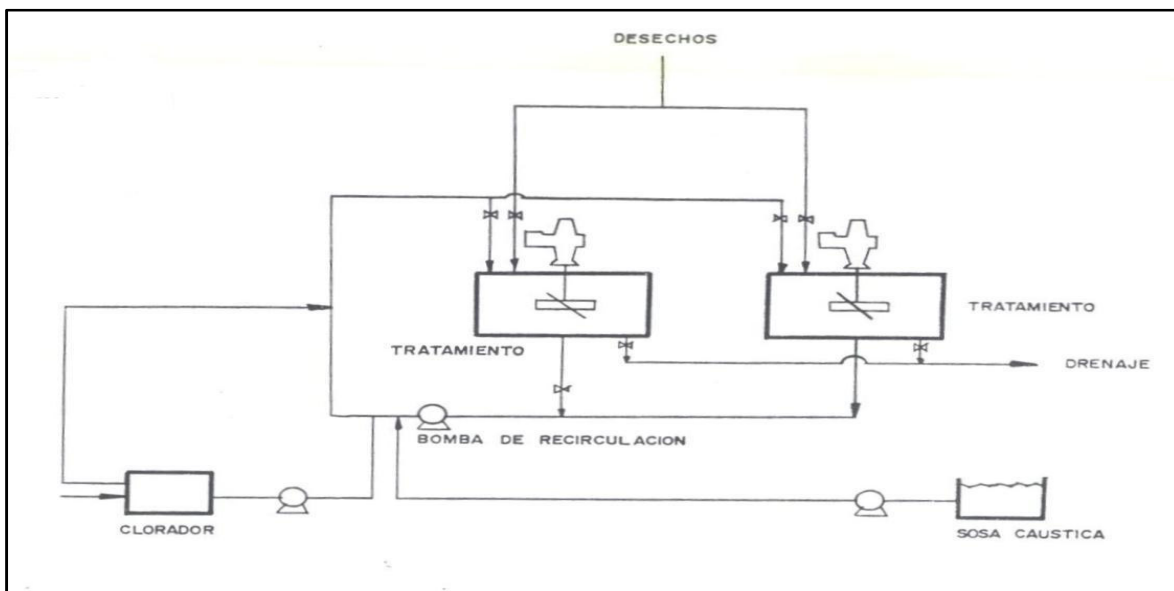
generaría ácido cianhídrico (HCN, el cual es altamente tóxico), ello dependerá de la necesidad del sistema.

4.4.1 TREN DE TRATAMIENTO PARA CIANUROS

El método más común de tratamiento de cianuros es la cloración alcalina, que convierte el cianuro por oxidación a compuestos no tóxicos. Esta se puede implantar mediante un sistema de tratamiento intermitente, continuo y/o tratamiento integrado, todos estos tanto para pequeñas y grandes escalas de tratamiento.

La destrucción del cianuro es realizada en tres procesos o reacciones. En un primer paso se oxida el cianuro obteniéndose cianógeno (reacción instantánea, llevada a cabo a cualquier pH). Un segundo paso es la transformación de cloruro de cianógeno a cianato, la velocidad de reacción se favorece con un $\text{pH} \geq 10.5$ (un $\text{pH} < 10$ significa velocidad de reacción muy lenta, esto debe ser evitado debido a la toxicidad del cloruro de cianógeno). En un tercer paso se realiza la oxidación del cianato a nitrógeno y dióxido de carbono (la reacción depende del pH, acelerándose a menor pH. Un intervalo de $7.5 \leq \text{pH} \leq 8 = 10-15$ minutos o $9 > \text{pH} > 9.5 =$ media hora).

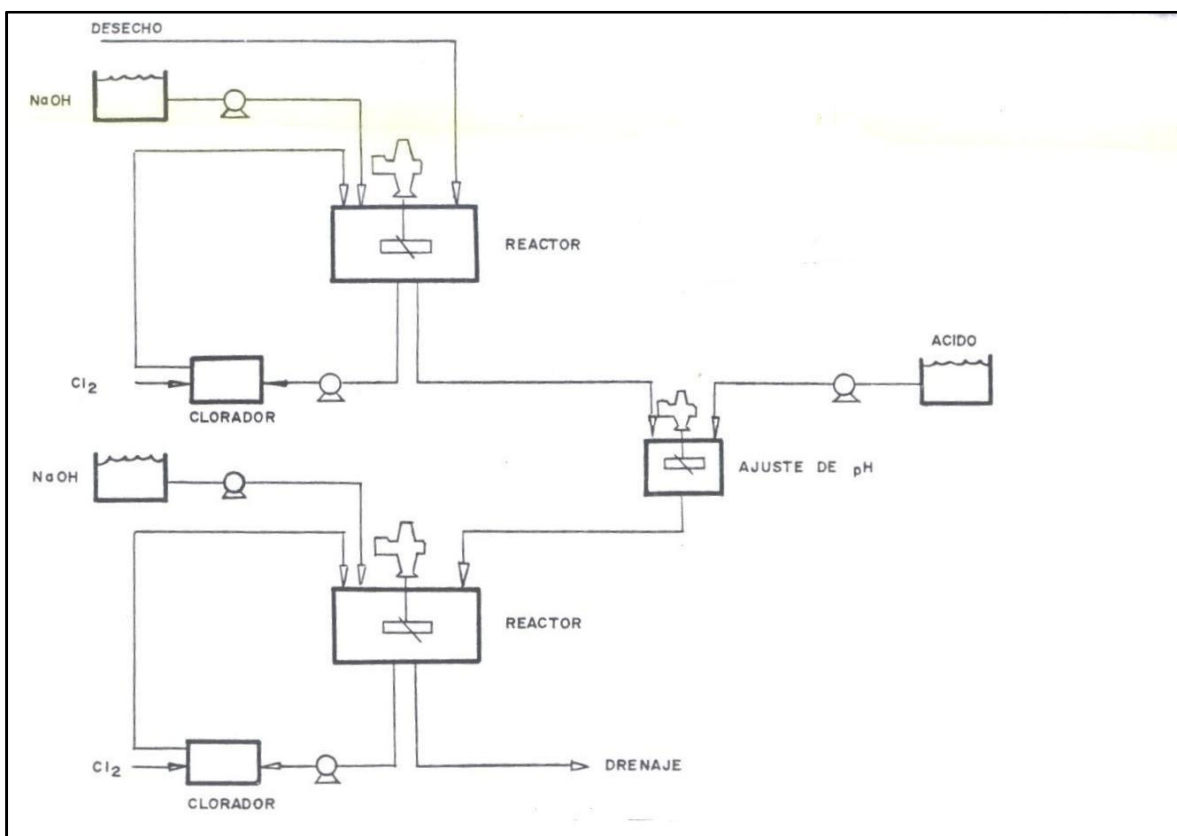
Figura 4. 8 Tren de Tratamiento Intermitente de Cianuro



Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

Un tren de tratamiento intermitente de cianuros (Figura 4.8) se emplea en plantas de tamaño pequeño y mediano. Se pueden usar dos tanques, uno de colecta y otro donde se lleva a cabo el tratamiento, estos son usados alternativamente para la colección y tratamiento, es necesario contar con un tercer tanque para la solución desbordada y una bomba para recircular los derrames. Los desechos diluidos de cianuro se recirculan durante todas las etapas del tratamiento para obtener un mezclado perfecto y rápidamente con los reactivos. Cuando un tanque se encuentra lleno, el flujo se desborda al otro tanque, el desecho concentrado del tanque se deberá pasar al tanque de desecho diluido por medio de bomba. El tratamiento consiste en elevación del pH por adición simultánea de cáusticos y de cloro y también sosa cáustica.

Figura 4. 9 Tren de Tratamiento Continuo de Cianuro



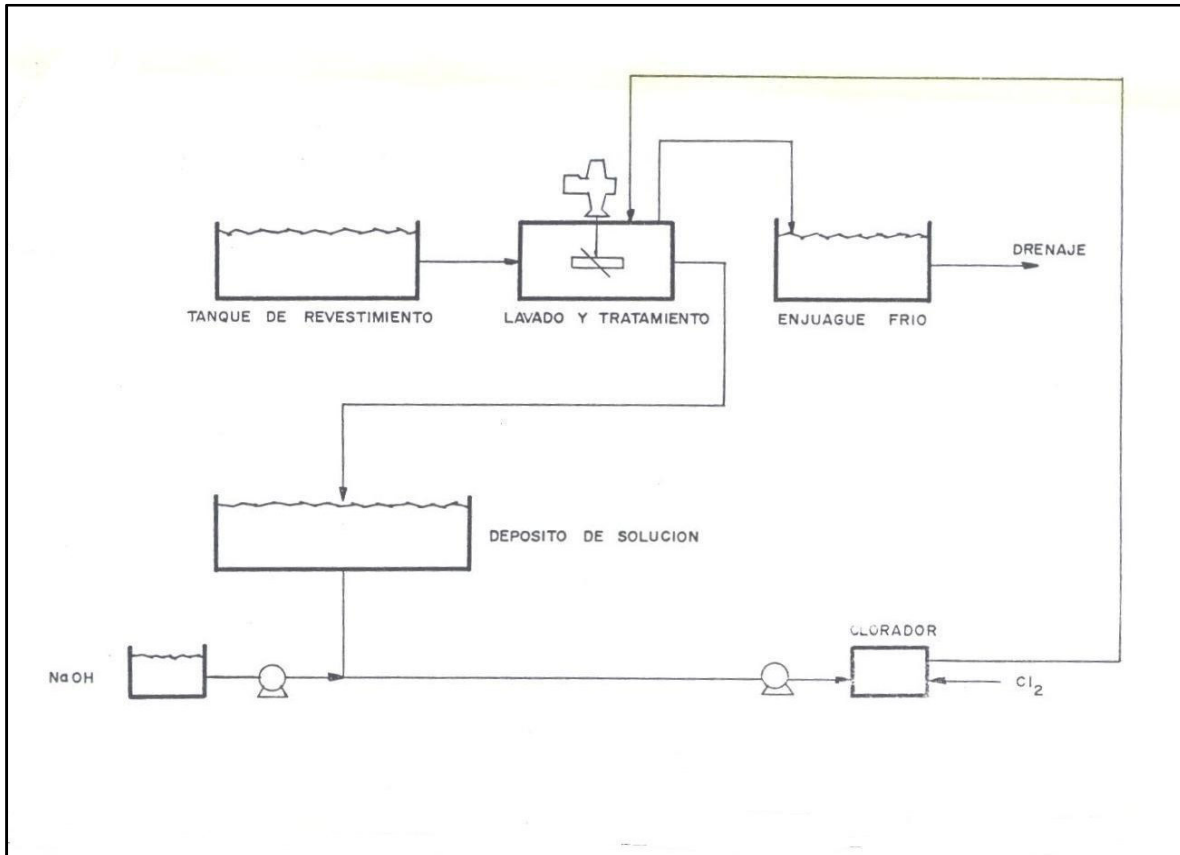
Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

Un tren de tratamiento continuo de cianuros (Figura 4.9) se enfoca a plantas que manejan grandes cantidades de desechos licuados y relativamente bajas concentraciones de contaminantes. En este sistema se lleva a cabo una etapa para cada reacción, esto permite que

cada reacción tenga un pH óptimo al cual la velocidad de reacción sea fácilmente controlada en tanques pequeños.

El tratamiento integrado de cianuros, como su nombre indica consiste en integrar dentro de la secuencia de procesos el tratamiento de desechos.

Figura 4. 10 Tren de Tratamiento Integrado de Cianuro



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

4.4.2 TREN DE TRATAMIENTO PARA CROMO

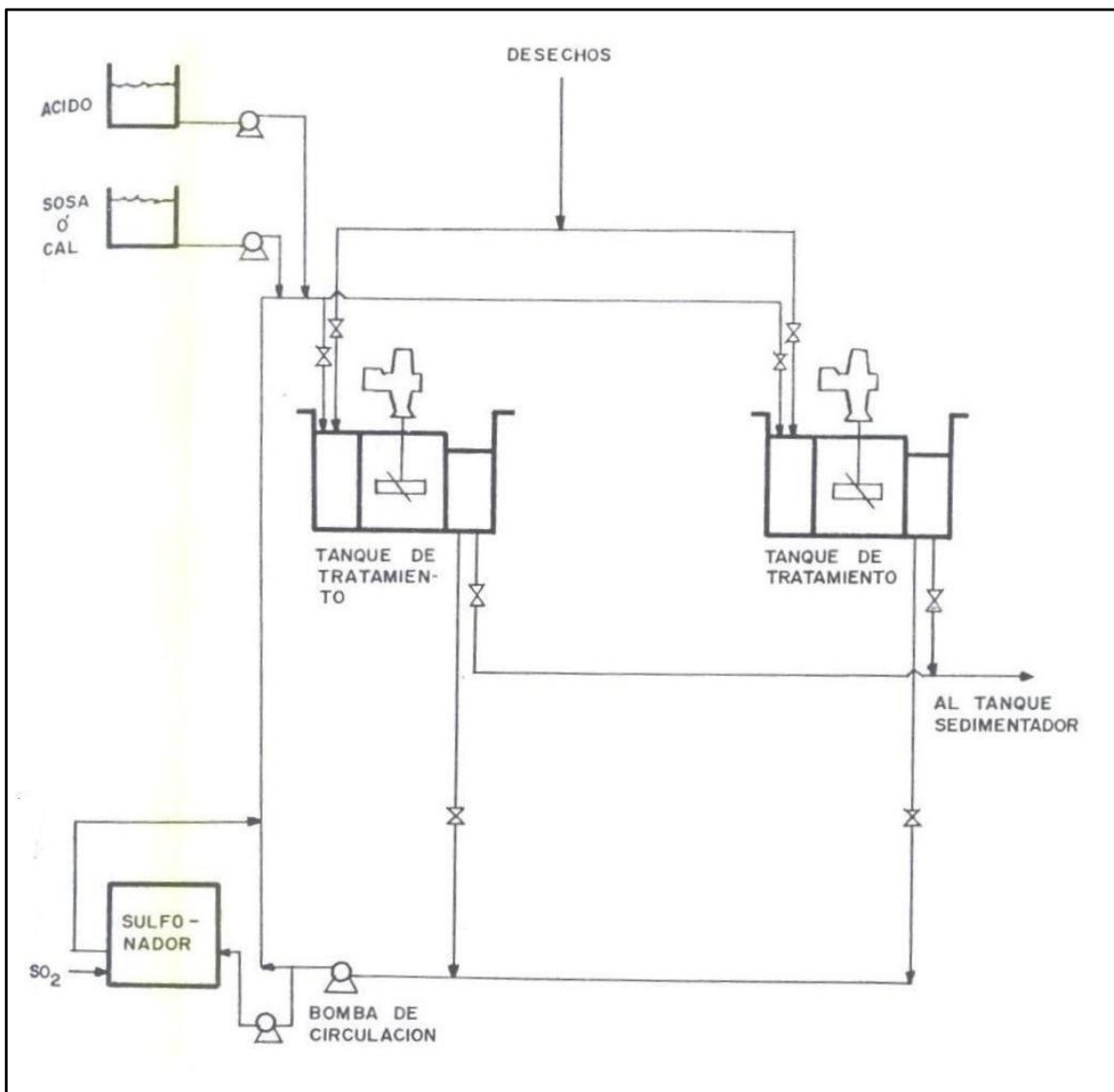
El dióxido de azufre (SO_2) se usa como agente reductor. Cuando el cromo está presente en pequeñas cantidades se puede usar bisulfito de sodio (a un pH ácido).

La cal y la sosa cáustica (ambos alcalinos) son usados para la neutralización de la acidez y para lograr la precipitación de las sales de cromo (después de la reducción). Este tratamiento usa

hidrosulfito de sodio para reducir cromo al estado trivalente y carbonato de sodio para precipitación del hidróxido.

Un tratamiento intermitente de cromatos (Figura 4.11) consiste en bajar el pH por adición de ácido, después agregar el dióxido de sulfuro o bisulfito de sodio para reducir el cromo hexavalente, luego se eleva el pH por adición de sosa cáustica para precipitar el cromo trivalente.

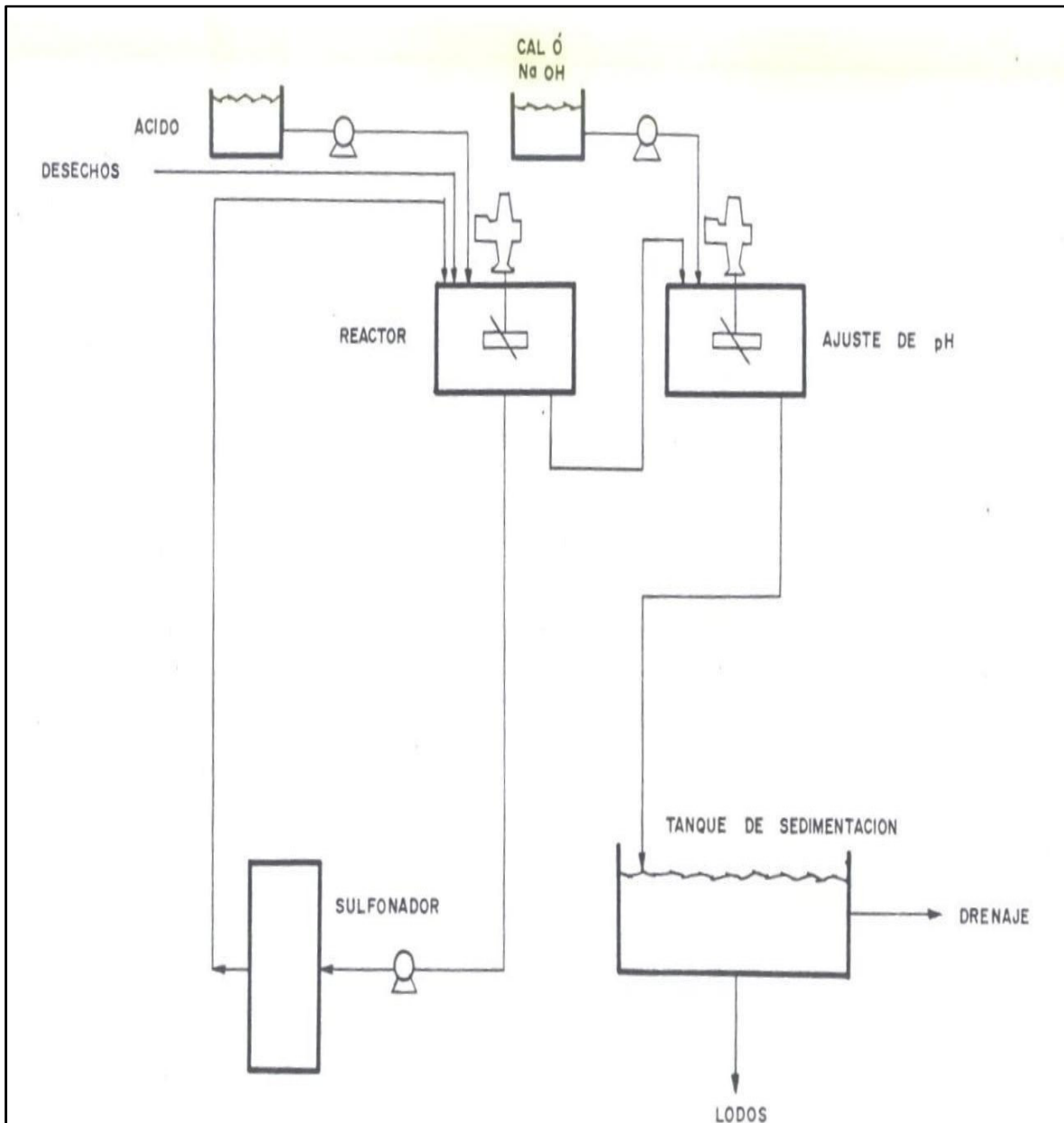
Figura 4. 11 Tren de Tratamiento Intermitente de Cromatos



Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

En el tratamiento continuo de cromatos (Figura 4.12) el cromo hexavalente se convierte al estado trivalente en el tanque de reacción por adición de dióxido de azufre (reacción instantánea a un $\text{pH} \leq 3$).

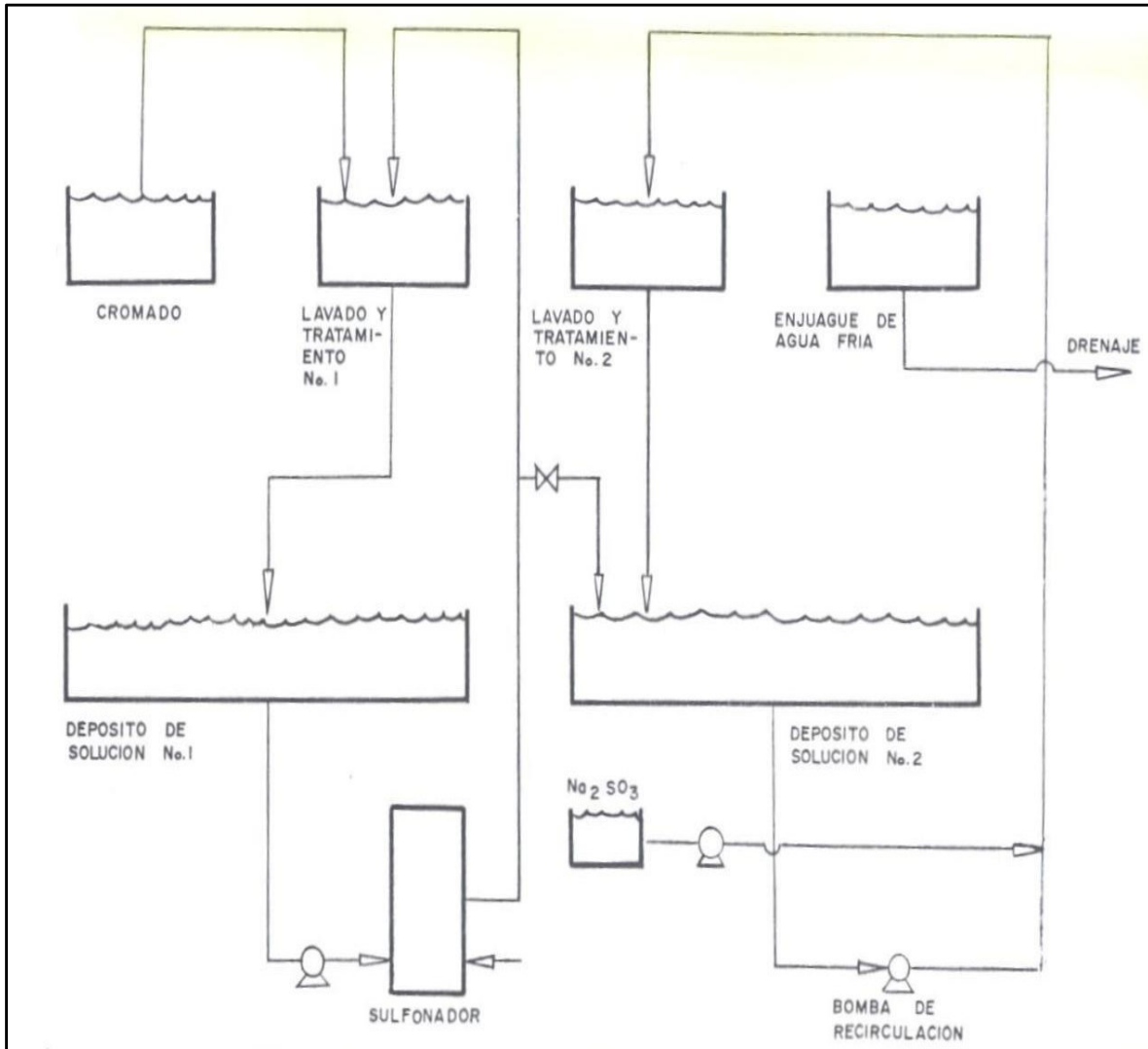
Figura 4. 12 Tren de Tratamiento Continuo de Cromatos



Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

En el sistema integrado (Figura 4.13) los dos tanques de tratamiento y lavado están integrados a la línea del proceso y enseguida esta un tanque de enjuague final.

Figura 4.13 Tren de Tratamiento Integrado de Cromatos



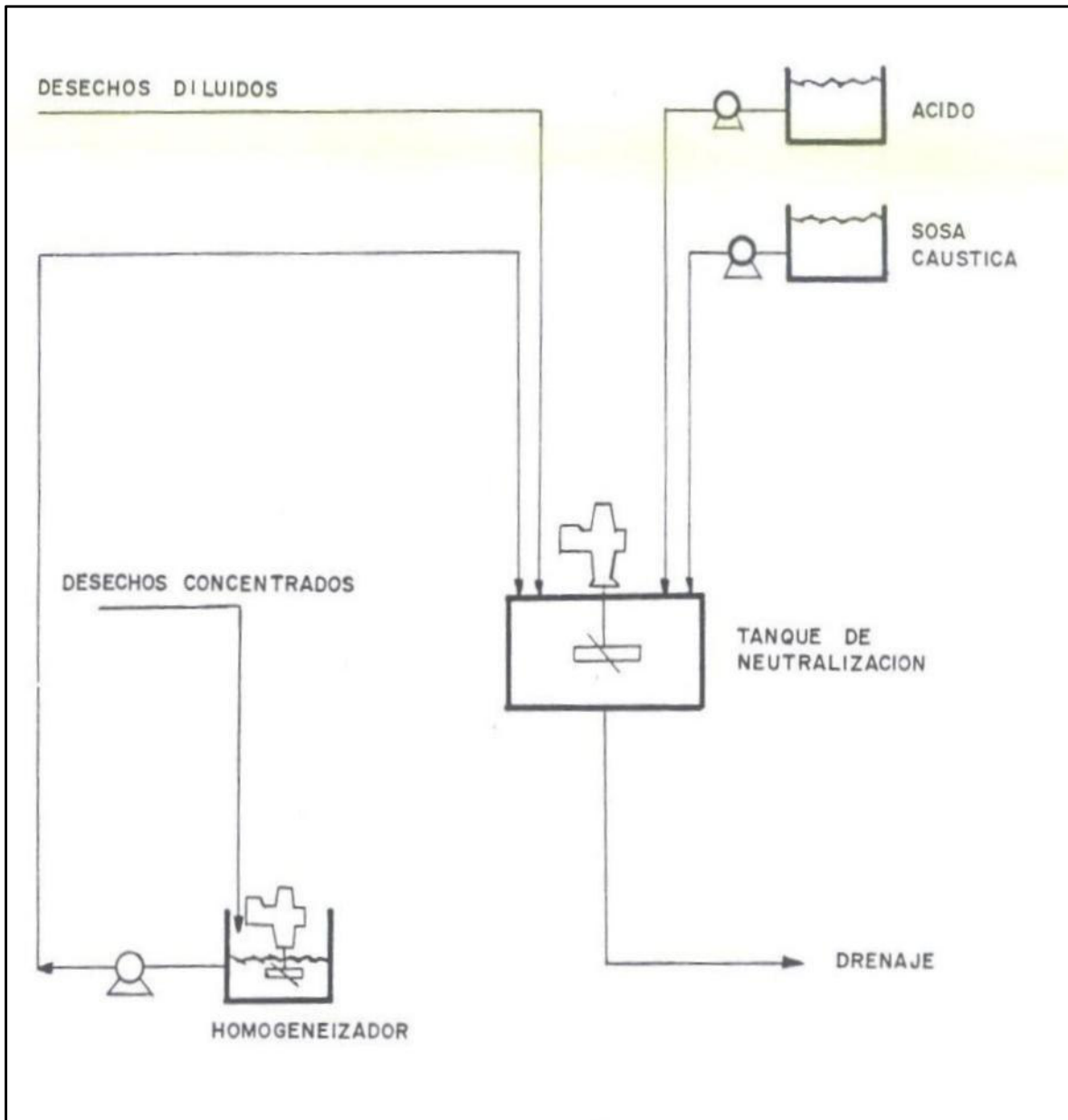
Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

4.4.3 TREN DE TRATAMIENTO PARA ÁCIDOS Y ÁLCALIS

Es necesario neutralizar cualquier exceso de acidez o alcalinidad en el efluente de la planta. Los desechos ácidos son tratados mediante la adición de materiales alcalinos, de manera que los desechos alcalinos son usados para neutralizar los desechos ácidos, si estos no son suficientes para lograr la neutralización se debe completar con materiales de compra, tales como cal

hidratada, sosa cáustica o soda ash. Cualquier desecho alcalino no usado en la neutralización de desechos ácidos puede requerir tratamiento de ácidos minerales. (Ver Figura 4.14)

Figura 4. 14 Tren de Tratamiento para Ácidos y Álcalis



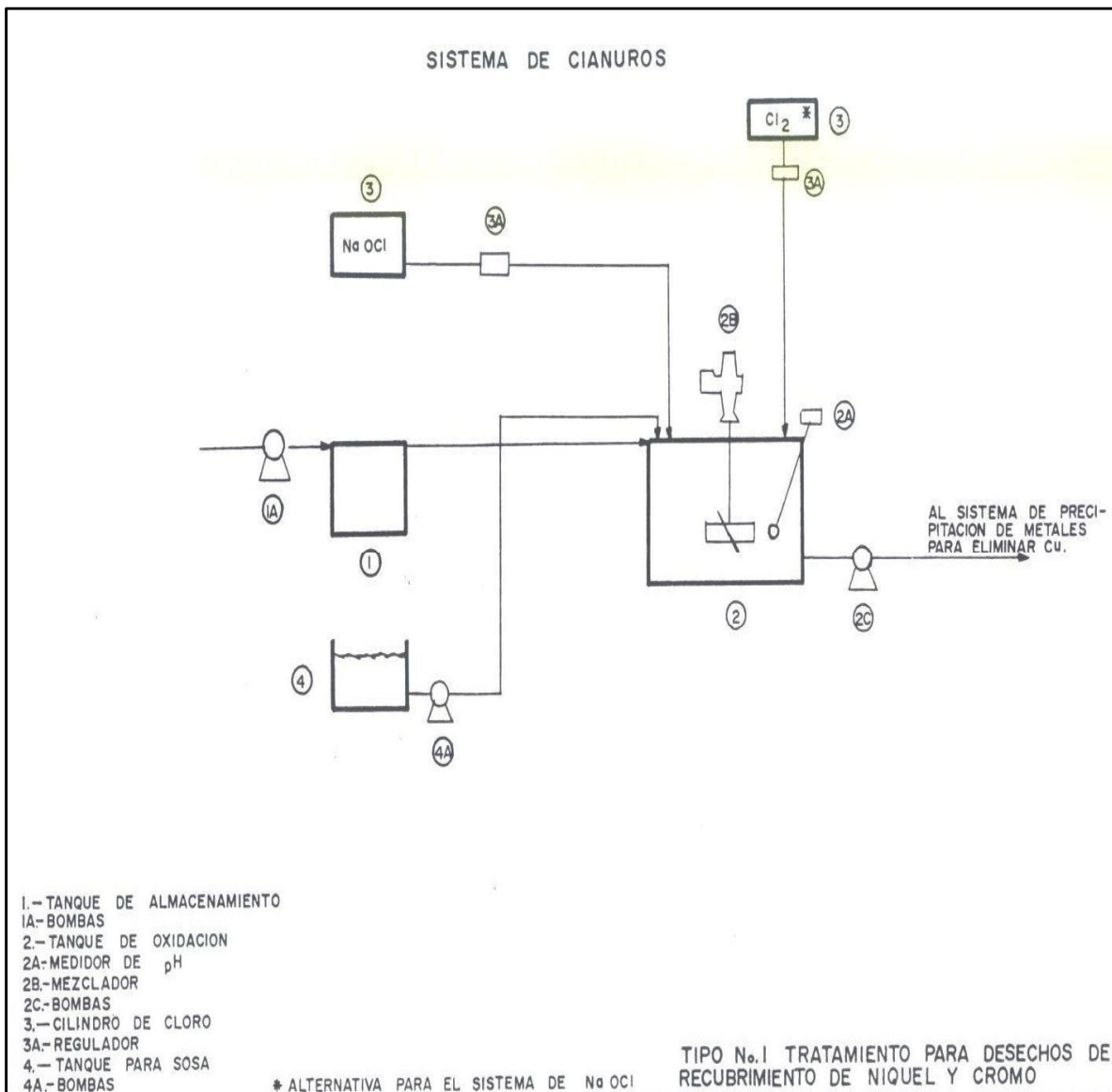
Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

En la neutralización los desechos son llevados a $8 < \text{pH} < 9$, punto en el que la mayoría de los metales presentes en la solución precipitan. El precipitado se separa de la solución.

4.4.4 TREN DE TRATAMIENTO PARA METALES PESADOS

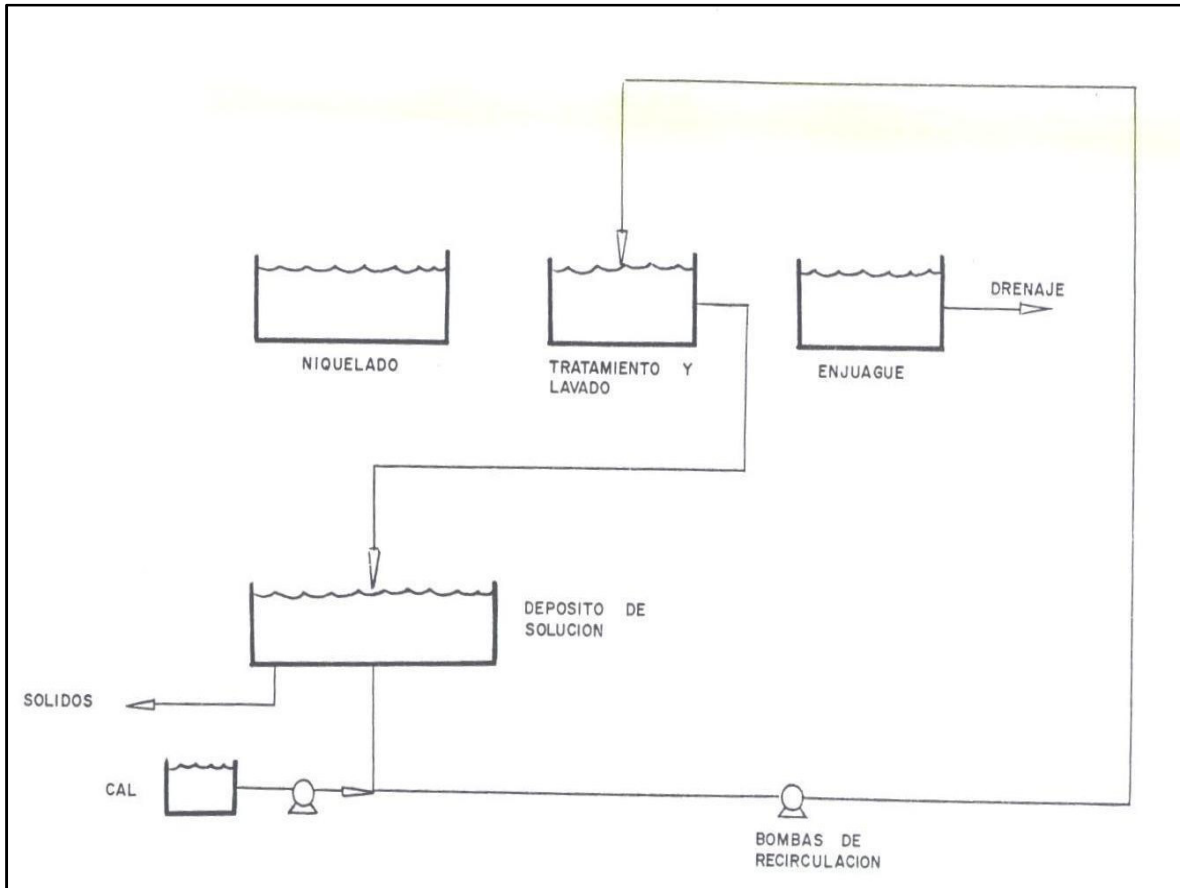
La solución a tratar son escurrimientos ácidos, en el zincado y ácido cúprico en las soluciones de recubrimiento. La solución del tratamiento se mantienen en $7.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$ por la adición de cal. (Ver Figura 4.15 y 4.16)

Figura 4. 15 Tren de Tratamiento para Recubrimientos de Níquel y Cromo



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

Figura 4. 16 Tren de Tratamiento Integrado de Níquel



Fuente: Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio Sobre Usos del Agua, Métodos y Costos Para el Control de la Contaminación del Agua Residual en la Industria de Acabados Metálicos. ⁽²⁵⁾

4.5 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE MINERALES NO METÁLICOS

La industria de los acabados no metálicos incluye, mármoles, mosaicos, asbestos y productos abrasivos. ⁽¹⁹⁾

Los industriales del mármol efectúan el proceso de fabricación en tres etapas principales: laminación, cortado y pulido. El agua es utilizada por enfriamiento en las operaciones de laminación, cortado y pulido. Estas industrias cuentan con sistemas de recirculación de agua, aplicándole procesos previos de sedimentación de sólidos. Debido a esto la única descarga es originada por servicios sanitarios, ya que las pérdidas de agua en sus procesos se dan por evaporación y esta no es tan importante.

Los industriales de la fabricación de mosaicos efectúan sus procesos de fabricación en tres etapas: cortado, planchado y pulido. Debido a la misma razón este sector no presenta descarga de aguas residuales industriales.

La industria del asbesto (diversos silicatos minerales fibrosos, que son incombustibles y que pueden separarse en filamentos). Este sector perteneciente a la industria de minerales no metálicos presenta descargas residuales alcalinas con presencia de grasas y aceites (2.5 mg/L), y descargas a 23°C. Cuentan con una laguna de sedimentación con objeto de recuperar la mayor cantidad posible de sólidos, que son aprovechados nuevamente como materia prima.

La industria de la fabricación de productos abrasivos como el cuarzo, esmeril, crocus, granate, óxido de aluminio y carburo de silicio. Estos materiales generalmente llevan de soporte otro material que puede ser papel, tela, fibra vulcanizada o una combinación de estos.

A los productos defectuosos se les incinera para la recuperación del material abrasivo, esta operación se realiza en tinas de recuperación utilizando para ello agua y contribuyendo así a la cantidad de sólidos sedimentables. Las características son sólidos sedimentables (4ml/L), grasas y aceites (27.8 mg/L), temperatura de 24°C y pH de 7 a 9.

4.6 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA PETROLERA

El tren de tratamiento de las aguas de desecho de las instalaciones de refinería implican la remoción de diversos contaminantes, con mayor atención a la remoción orgánica. La remoción de grasas y aceites, utilizando las operaciones de separación física, dado el alto potencial de reutilización de estos subproductos. El tratamiento biológico y filtración son procesos comúnmente usados en la remoción de constituyentes orgánicos suspendidos y disueltos, requiriéndose de tratamiento químico para neutralización, rompimiento de emulsiones y precipitación química.

Las unidades que conforman un tratamiento primario, son: separadores API, filtración para remoción de aceite, neutralización y flotación por aire disuelto.⁽²⁰⁾

Los separadores API efectúan la separación (por gravedad) de hidrocarburos que van mezclados en los residuos líquidos de los procesos industriales, liberando sus efluentes del alto contenido de aceite y facilitando el proceso de descontaminación en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Los separadores reciben corrientes de las plantas, por escapes en bombas de procesos, drenajes de tanques de almacenamiento de productos, aguas de lluvia y desechos en general de las plantas de procesos. A los separadores llegan también residuos catalíticos, formados por una gran variedad de compuestos de Azufre y Aromáticos pesados, residuos alcalinos y ácidos. ⁽²⁸⁾

Las unidades que conforman un tratamiento secundario, son: filtros biológicos, lagunas aeradas mecánicamente y lagunas de estabilización. ⁽²⁰⁾

En términos generales, las refinerías manejan 5 sistemas de drenajes: drenaje aceitoso (sistema de separadores API), drenaje químico, drenaje sanitario, drenaje para manejo de aguas de enfriamiento y drenaje pluvial.

Las alternativas de tren de tratamiento están conformadas de la siguiente manera; pretratamiento (formado por rejillas, neutralización y homogenización); tratamiento primario (separadores API y un sistema de flotación por aire disuelto; ambas operaciones unitarias). El tratamiento primario puede también estar constituido por los separadores API y un sistema de lagunas aeradas mecánicamente (proceso unitario). A continuación se aplica un tratamiento secundario.

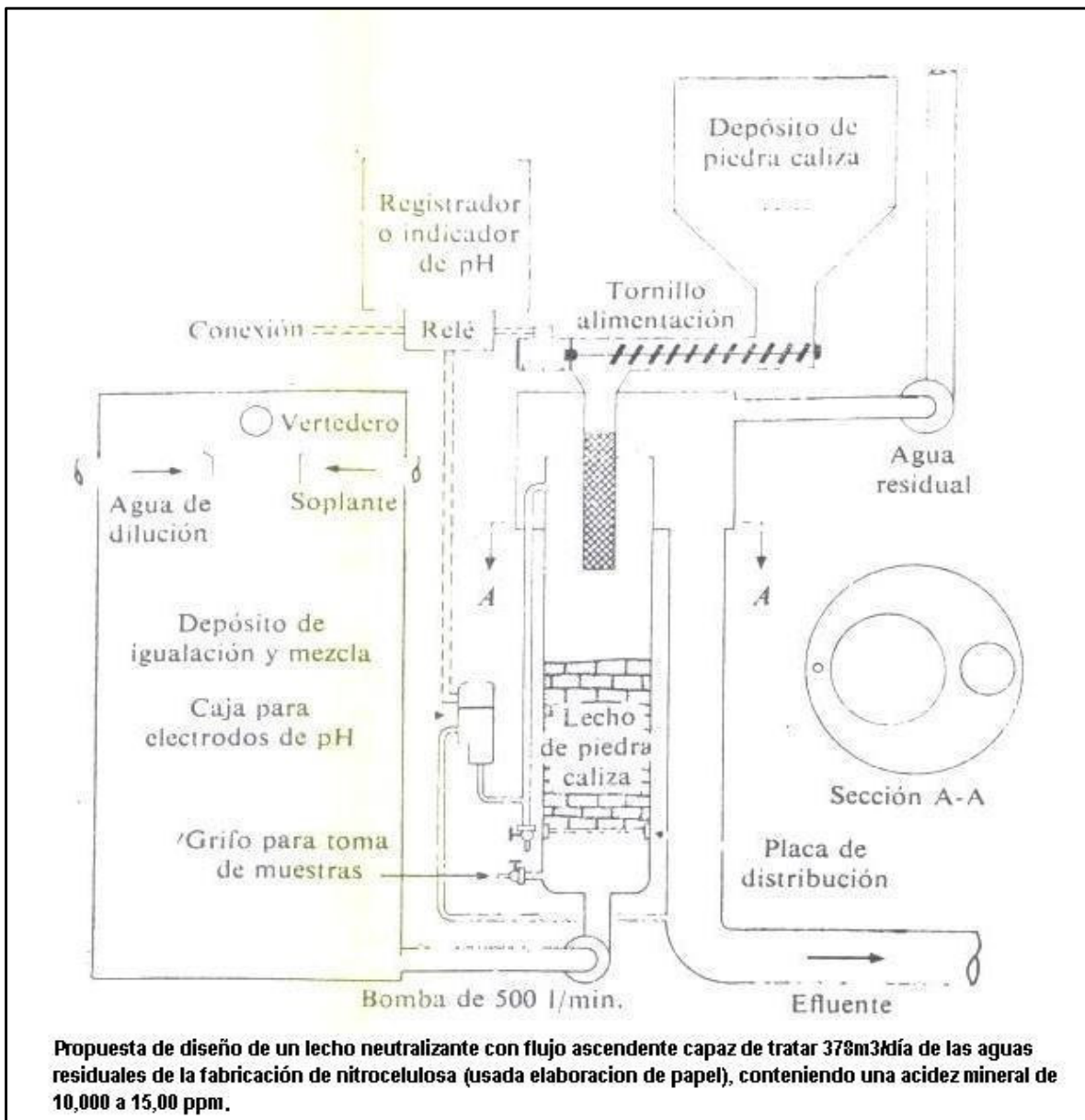
4.7 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA

En los vertidos químicos normalmente aparecen ácidos, bases, materias tóxicas y gran DBO, color e inflamabilidad (fósforo) y un bajo contenido de sólidos en suspensión. Estos necesitan neutralización (vertidos de la fabricación de siliconas, pólvora, TNT, insecticida y herbicidas, que son de carácter ácido), la mayoría también requiere oxidación biológica por filtros biológicos, lodos activados o lagunas, también es a veces necesario realizar una coagulación (vertidos con fósforo).

4.7.1 TREN DE TRATAMIENTO PARA VERTIDOS ACIDOS

Los más importantes residuos diluidos son los procedentes de los ácidos clorhídrico, sulfúrico y en pocas ocasiones ácido nítrico. Estos son vertidos ácidos son los más importantes y provienen de las industrias de productos químicos que fabrican materias primas (tintes, explosivos, productos farmacéuticos y resinas de silicona).

Figura 4. 17 Tren Propuesto, Lecho Neutralizante.

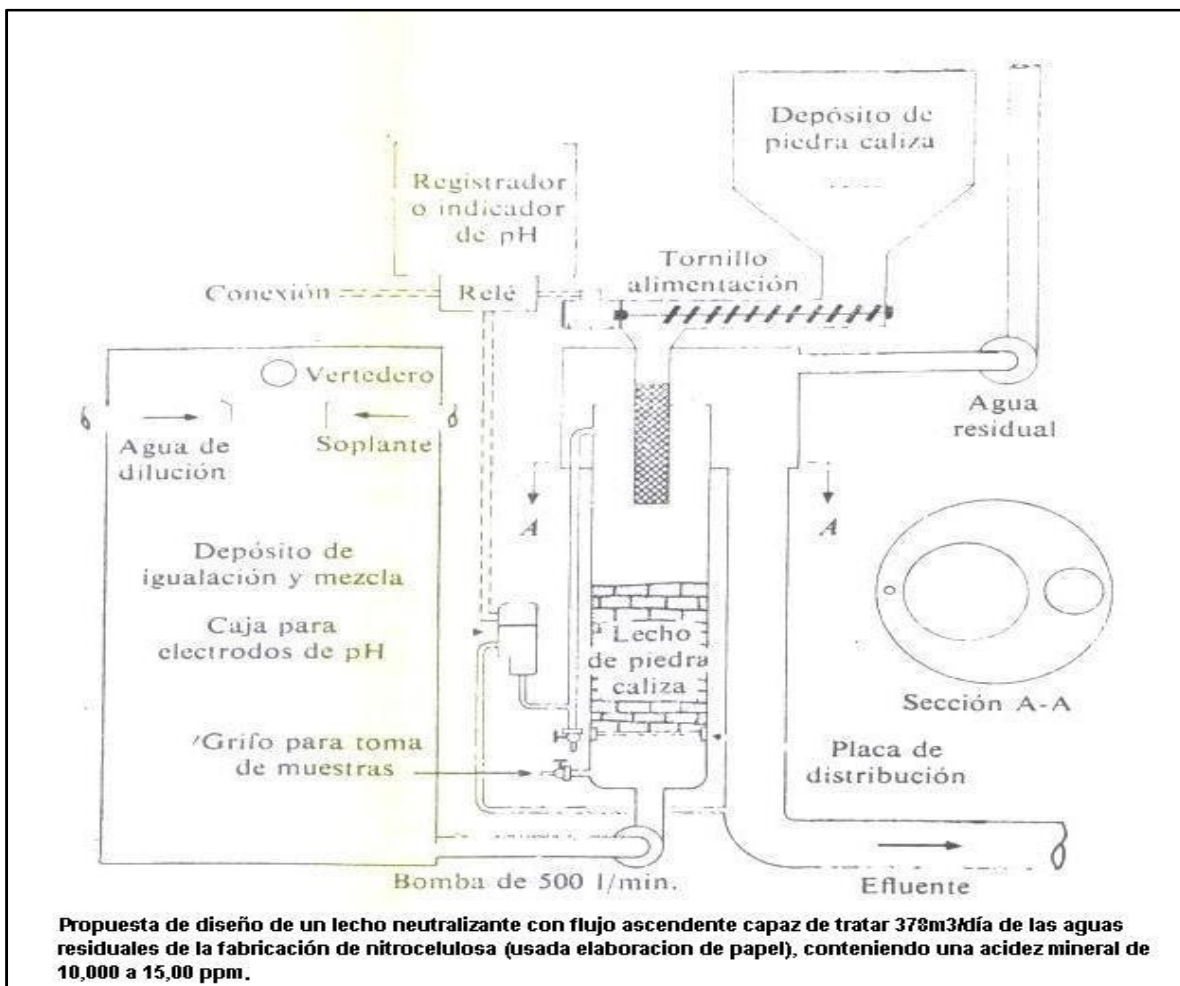


Fuente: Nelson L. Nemerow. Aguas Residuales Industriales. ⁽⁹⁾

El principal método de tratamiento consiste en la neutralización. En este procedimiento se puede usar cal para neutralizar, para el control se emplea un electrodo de pH marca Beckman, en la Figura 4.17 se muestra un dispositivo similar.

También se ha implantado la neutralización con cal de los vertidos provenientes de una fábrica de nitrocelulosa, el cual contiene ácido nítrico y ácido sulfúrico. El proceso se realiza en una cámara de reacción de unidades múltiples, se realiza la adición de lechada de cal dolomítica concentrada en dos puntos.

Figura 4. 18 Tren de Neutralización por Ácido

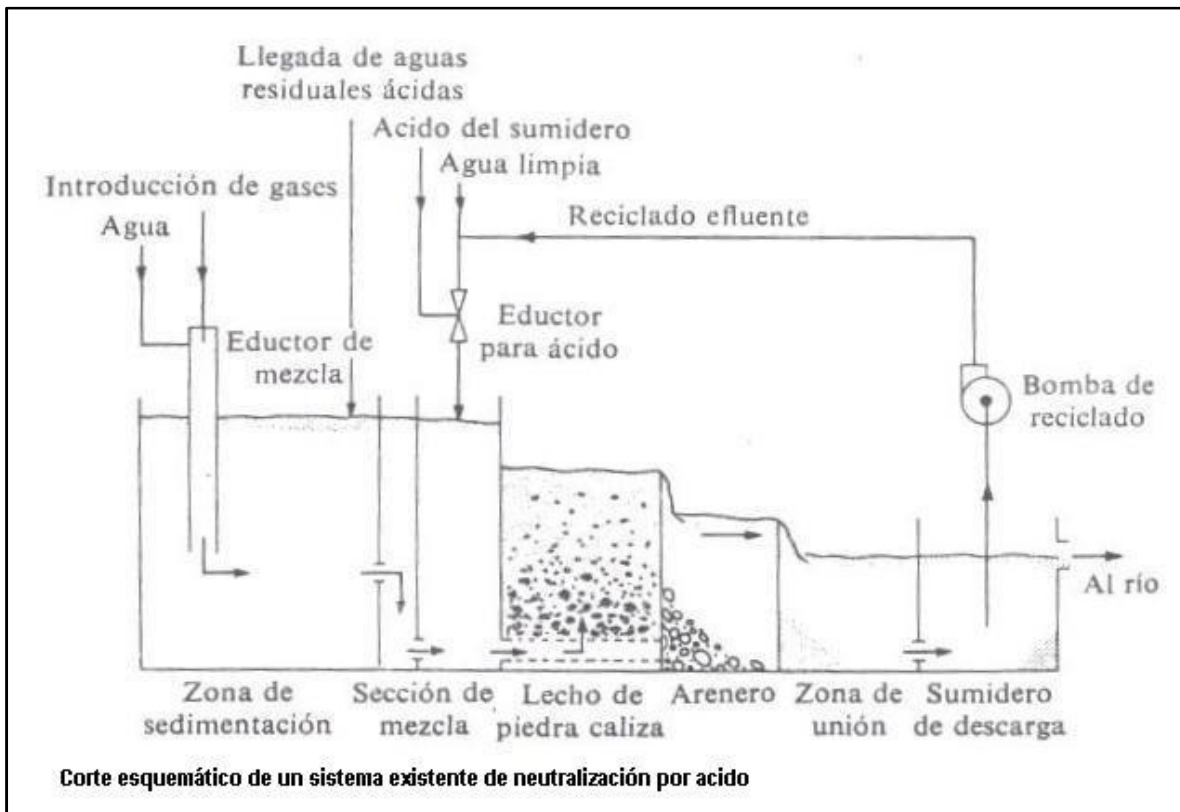


Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales*.⁽⁹⁾

La figura 4.18 y 4.19 describe otro proceso de neutralización con cal, para un vertido procedente de la fabricación de determinadas resinas, que contiene ácido clorhídrico y ácido

sulfúrico en concentraciones variables. Los vertidos se diluyen hasta alcanzar una concentración menor del 1%, luego se hace pasar en sentido ascendente por un lecho de piedra caliza a un metro a unos 800-1200 l/m/m², el efluente tiene un pH promedio de 4.6, esta instalación se ilustra en la figura 4.17 y 4.18.

Figura 4. 19 Tren de Neutralización por Ácido.



Fuente: Nelson L. Nemerow. *Aguas Residuales Industriales*.⁽⁹⁾

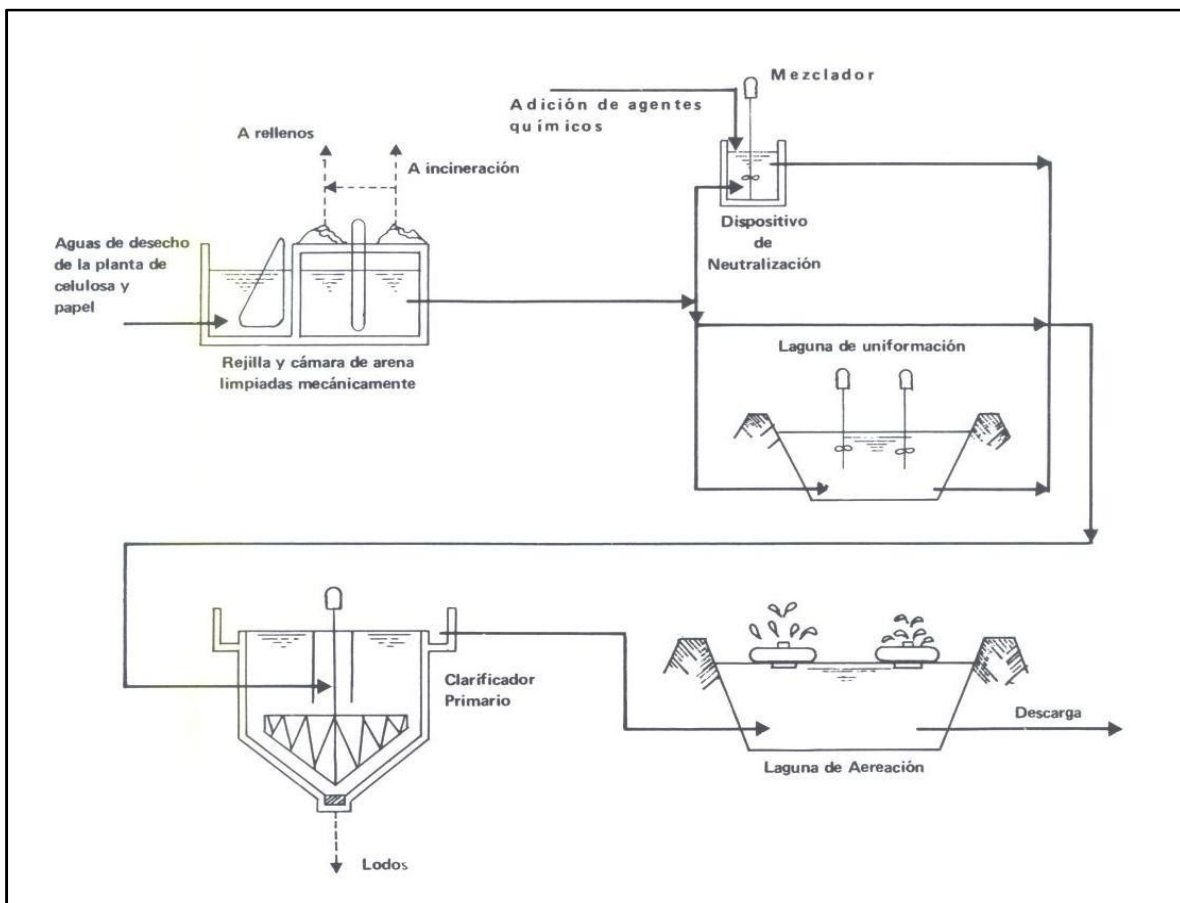
4.8 TREN DE TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y EL PAPEL

La producción de celulosa y papel requiere del manejo de grandes volúmenes de agua que se destina al transporte de fibra de un proceso a otro, al lavado y la remoción de impurezas que se generan al transformar la madera a fibra, en la dilución de fibra en la producción mediante trituración de papel de desperdicio y alimentación a calderas de recuperación de licor y calderas de fuerza. Los parámetros contaminantes que son objeto de mayor control en los efluentes industriales de esta actividad productiva, son los sólidos suspendidos sedimentables, la DBO y el color.

Un efluente que generalmente es segregado es el que acarrea desechos ácidos de las secuencias de blanqueo y procesos ácidos misceláneos; es necesaria la utilización de ductos anticorrosivos para estas circunstancias.

El tratamiento primario recomendado para reducir la concentración de sólidos sedimentables, consiste básicamente de una unidad de rejillas, un desarenador, seguido de un sedimentador que puede requerir de ayudas químicas en el proceso. ⁽²²⁾

Figura 4. 20 Tren de Tratamiento, Celulosa y Papel por Lagunas de Aereación.



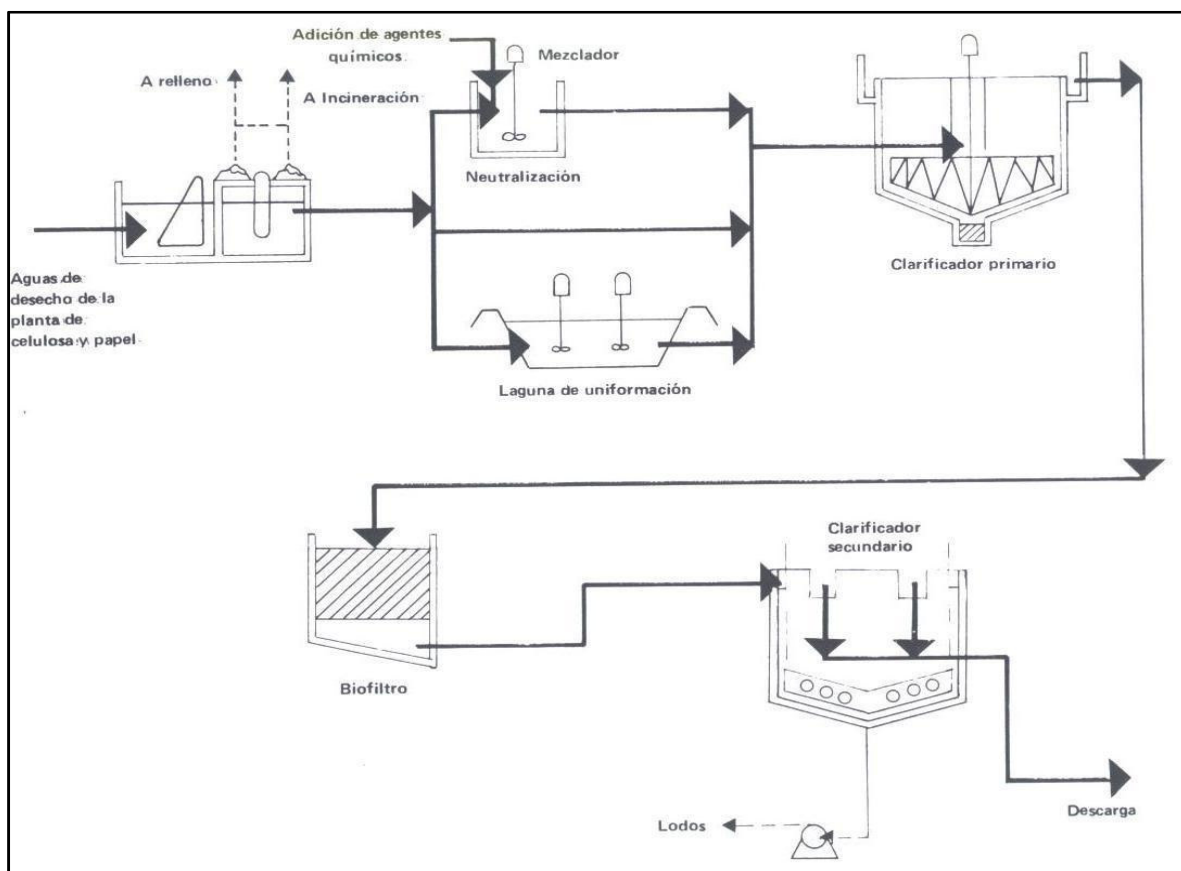
Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Celulosa y el Papel. ⁽²²⁾

Un tren de tratamiento (Figura 4.20) formado por la instalación de rejillas y cribas finas, además de una neutralización y uniformización de caudales en el pretratamiento; en el tratamiento primario se sugiere clarificadores primarios que tienen una eficiencia de remoción

de DBO de 10-40%, DQO de 10-30% y sólidos suspendidos de 60-90%, considerando el paso del efluente de los sedimentadores a lagunas de aereación, que pueden remover del 40-85% de la DBO y de 30-60% de la DQO presentes. ⁽²²⁾

Dado que los mayores contaminantes son: temperatura, DBO, DQO, color, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y bacterias coliformes, se pueden elegir varias alternativas para los efluentes industriales, en función de los ámbitos de masas contaminantes descargadas y la eficiencia de los sistemas empleados. La figura 4.21 propone otra solución para tren de tratamiento de este sector.

Figura 4. 21 Tren de Tratamiento, Celulosa y Papel por Biofiltros.



Fuente: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Usos del Agua y Manejo del Agua Residual en la Industria de la Celulosa y el Papel. ⁽²²⁾

Como segunda sugerencia (Figura 4.21) en el tren de tratamiento es la instalación de dispositivos de pretratamiento y clarificadores primarios similares a la secuencia del tren de

tratamiento anterior; la variante radica que el efluente de los sedimentadores pasará a biofiltros capaces de remover de 30-70% de la DBO y de 20-50% de la DQO, el efluente de los biofiltros pasará posteriormente a sedimentadores secundarios, donde se podrá remover del 70-90% de los sólidos suspendidos.

Los efluentes deberán recibir tratamiento primario y un tratamiento secundario para refinar más la calidad del agua.

Capítulo 5

CASO DE ESTUDIO NACIONAL

“TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA
INDUSTRIA TEXTIL CON SISTEMA DE RECUPERACION”

Proyecto realizado para Textiles Rivera S.A. de C.V., ubicado en la colonia Nueva Industrial Vallejo (Zona Norte del Distrito Federal). Desarrollado del reporte de titulación por experiencia profesional del I.Q. Martínez Ireneo Fernando. ⁽²⁹⁾

Textiles Rivera S..A. de C.V. (empresa textil) requirió de un estudio de ingeniería (a cargo de una consultora que se dedica al diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales) para realizar el tratamiento de sus efluentes industriales e implantar la reutilización del agua residual tratada en sus procesos, con el fin de reducir los costos debidos a la compra de agua abastecida por medio de pipas (consumo promedio de agua, 1,100 m³/día).

El 95% del agua es utilizada en el área de teñido y el restante en los servicios sanitarios. Los efluentes de esta fábrica descargaban directamente al río de los Remedios, presentando los parámetros propios de este ramo industrial (color, sólidos disueltos, DBO y pH). Las áreas de producción desarrolladas en esta empresa son: tratamiento de la materia prima, elaboración de tela de algodón, poliéster y sus combinaciones, teñido de tela, acabado de tela, empaquetado y distribución.

El objetivo del tratamiento es cumplir con la norma NOM-001-SEMARNAT, así como recuperar un 30% del agua residual tratada (330 m³/día) y posteriormente aumentar a un 60%.

Se realizó el muestreo que dependió de los tiempos de jornada en la fábrica, con el fin de obtener una muestra compuesta representativa, necesaria para su análisis en laboratorio y así obtener la caracterización del efluente. (Ver Tabla 5.1)

Tabla 5.1 Caracterización del Agua Residual de Textiles Riviera

PARÁMETROS	CONDICIONES DE PROCESO TEXTILES RIVIERA
Temperatura	50-60 °C
Color	1800 a 2400 unidades en la escala platino cobalto
Turbidez	Debido a las altas concentraciones de químicos.
Conductividad y Resistencia	Debida a los sólidos presentes
pH	5.5 a 10
Sólidos disueltos	Presente
Sólidos en suspensión	100 a 300 mg/l
Sólidos sedimentables	2 a 10 ml/l
Sólidos totales	100-200 mg/l
Cloruros	500 mg/l
Sulfatos	1000 a 1500 mg/l
Nitrógeno y Nitrato	2.5 mg/l
Fosfato	30 a 40 mg/l
Sales de sodio y potasio. Calcio y magnesio.	No se marca un rango específico
Hierro y Manganeso	no hay presencia representativa
Metales tóxicos (Plomo, Níquel, Mercurio, Cromo, Cobre, Cianuro, Arsénico)	Variable, en ocasiones nula e indetectable
DBO	600 a 900 mg/l
DQO	2000 a 2500 mg/l

Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾ (modificado)

Para el tratamiento de este tipo de efluentes se requiere la homogenización, para alcanzar un proceso estable y poder realizar siempre un análisis representativo del efluente. También la neutralización química de efluentes textiles es siempre necesaria. Para realizar el tratamiento se puede implantar un tipo físico-químico o biológico, el primero resulta frecuentemente relativamente caro en comparación a un proceso biológico.

Tabla 5. 2 Parámetros Físicos, Químicos y Biológicos de la descarga de Maquinas de Teñido, Muestra Compuesta.

PARÁMETROS	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO
TEMPERATURA °C	55	60	55	55	60
GRASAS Y ACEITES _(mg/l)	trazas	ausente	ausente	ausente	trazas
MATERIA FLOTANTE _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
pH	9.5	9.5	8.9	10.5	10.0
D.B.O ₅ _(mg/l)	650	600	670	6640	600
D.Q.O _(mg/l)	2800	2500	2300	2700	2600
COLOR _{UPTICO}	2500	2500	2000-	3000	4200
DETERGENTES _(mg/l)	20	25	25	22	23
CLORUROS _(mg/l)	500	450	500	550	550
NITRATOS _(mg/l)	2.5	2.5	2.0	2.6	2.3
SULFATOS _(mg/l)	1500	1300	1100	1000	1300
SULFITOS _(mg/l)	90	100	100	110	120
SÓLIDOS SEDIMENTABLES _(ml/l)	2.5	3.0	3.5	3.5	2.5
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES _(mg/l)	150	150	100	150	175
NITRÓGENO TOTAL _(mg/l)	Restos	Restos	Restos	Restos	Restos
FÓSFORO TOTAL _(mg/l)	20	18	17	26	21
ARSÉNICO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CADMIO _(mg/l)	0.01	0.04	0.01	0.05	0.01
CIANUROS _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
COBRE _(mg/l)	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
CROMO _(mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
PLOMO _(mg/l)	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
ZINC _(mg/l)	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas
MERCURIO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
NIQUEL _(mg/l)	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas

Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾

Se obtuvieron muestras compuestas por los vertidos del proceso de teñido (4 litros por muestra, tomadas cada 4 horas) provenientes de las mezclas de los enjuagues realizados por las máquinas. La composición y concentración de las muestras depende directamente del color utilizado, ya que del color empleado dependerá la cantidad de agua necesaria para la eliminación del excedente de color. ⁽²⁹⁾

A partir del análisis realizado se obtuvo la Tabla 5.2, en ella se muestran los parámetros necesarios para la selección del tren de tratamiento. El caudal máximo diario de 1100 m³/d y el caudal medio horario 45.8 m³/h. Estos resultados se obtuvieron de una medición en un lapso

de 5 meses. Para la solución de tren de tratamiento se planteó una solución de tratamiento tipo físico-químico y una biológica.

Tabla 5. 3 Parámetros de Planta Piloto Tipo Tratamiento Físico-Químico. (promedio mensual)

PARÁMETROS	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO
TEMPERATURA °C	28	25	25	20	25
GRASAS Y ACEITES _(mg/l)	Ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
MATERIA FLOTANTE _(mg/l)	Ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
pH	8.0	8.5	8.3	8.2	8.6
D.B.O ₅ _(mg/l)	410	450	490	510	440
D.Q.O _(mg/l)	1900	1800	1950	1500	1700
COLOR U _{PUCO}	1400	1500	1500	1800	1500
DETERGENTES _(mg/l)	12	12	15	11	13
CLORUROS _(mg/l)	500	450	500	550	550
NITRATOS _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
SULFATOS _(mg/l)	800	900	700	800	900
SULFITOS _(mg/l)	50	58	59	75	65
SÓLIDOS SEDIMENTABLES _(m/l)	0.8	0.4	0.4	1	0.8
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES _(mg/l)	110	120	90	100	120
NITRÓGENO TOTAL _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
FOSFORO TOTAL _(mg/l)	30	35	30	35	25
ARSÉNICO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CADMIO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CIANUROS _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
COBRE _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CROMO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
PLOMO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
ZINC _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
MERCURIO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
NIQUEL _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente

Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾

En la opción de tratamiento tipo físico-químico el tren de tratamiento incluía una homogenización de los vertidos de la máquina de teñido, seguida de una neutralización adicionando ácido sulfúrico o fosfórico (con el fin de reducir el pH y mantenerlo entre 6.5 y 8.5), posterior a la neutralización se incluye una coagulación-floculación con polímero decolorante, seguido de una sedimentación con decantación y se conduce a un filtro de antracita. Este tren propuesto se experimentó en planta piloto logrando una eficiencia total de

39%, por lo que no logró la depuración requerida y el color obtenido en el efluente del tren de tratamiento no cumplía con las exigencias de reúso, con un valor de 1,800 unidades en la escala platino/cobalto. (Ver Tabla 5.3)

Tabla 5. 4 Parámetros de Planta Piloto Tipo Tratamiento Biológico. (promedio mensual)

PARAMETROS	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO
TEMPERATURA °C	30	30	35	30	30
GRASAS Y ACEITES _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
MATERIA FLOTANTE _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
pH	7.8	8.2	8.2	8.3	8.2
D.B.O ₅ _(mg/l)	250	260	260	250	240
D.Q.O _(mg/l)	1100	1400	1500	1300	1400
COLOR _{U Pt/Co}	450	300	320	200	180
DETERGENTES _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CLORUROS _(mg/l)	500	500	500	500	500
NITRATOS _(mg/l)	2.5	2.5	2.0	2.6	2.3
SULFATOS _(mg/l)	800	900	700	800	900
SULFITOS _(mg/l)	50	58	59	75	65
SÓLIDOS SEDIMENTABLES _(m/l)	0.8	0.4	0.4	1	0.8
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES _(mg/l)	110	120	90	100	120
NITRÓGENO TOTAL _(mg/l)	25	30	30	30	30
FOSFORO TOTAL _(mg/l)	30	35	30	35	25
ARSENICO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CADMIO _(mg/l)	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas
CIANUROS _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
COBRE _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
CROMO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
PLOMO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
ZINC _(mg/l)	trazas	trazas	trazas	trazas	trazas
MERCURIO _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
NIQUEL _(mg/l)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente

Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾

En la segunda opción de tratamiento tipo biológico el tren consistía en homogenización, neutralización con ácido sulfúrico o fosfórico, también se adicionaba fósforo como nutriente biológico (ya que el sistema biológico depende de parámetros como pH, temperatura, nutrientes y oxígeno para mantener un crecimiento óptimo de la biomasa), luego se conduce a un reactor anaerobio (primera depuración biológica) para continuar a un segundo reactor

aerobio de lodos activados, luego se le envía a un tanque de contacto donde se le agrega un polímero decolorante realizando una coagulación-floculación y se pasa a un sedimentador secundario que cuenta con dos líneas, una de reducción de lodos y la otra a un filtro de antracita. Para este tren también se realizó una planta piloto de donde el efluente final obtuvo un grado de depuración de 65 a 75%. (Ver Tabla 5.4)

De los estudios se observó que las plantas piloto sufrieron modificaciones constantes debido a la inestabilidad en las condiciones de operación. Lo anterior llevo a la conclusión para la selección del tren de tratamiento. Se observó que era indispensable combinar la parte físico-química y la biológica. Ya no fue necesario incluir la parte anaerobia debido al espacio restringido y se optó por incluir relleno plástico en el reactor biológico para aumentar el área y el volumen de contacto.

Tabla 5.5 Parámetros de Operación de la Planta de Tratamiento de la Industria Riviera.

PARÁMETROS	UNIDAD MEDIDA	Influyente	Efluente
pH	-	6.5 – 10	6.5-7.5
Temperatura	°C	35-65	< 35
D.Q.O.	mg/l	1800	< 200
D.B.O. ₅	mg/l	800	< 40
TKN	mg/l	Restos	4 – 8
P total	mg/l	20	3 – 5
Sólidos suspendidos	mg/l	150	30 – 50
Sólidos sedimentables	ml/l	2.5	Restos
Detergentes	mg/l	25	1 – 2
Cloruros	mg/l	500	100
Nitratos	mg/l	2.5	trazas-
Sulfitos	mg/l	50 – 120	trazas-
Sulfatos	mg/l	800 – 1500	200-400
Aceites y grasas	mg/l	< 40	< 5
Color	U Pt / Co	2500-4000	80-40
Metales pesados	mg/l	ausencia	ausencia

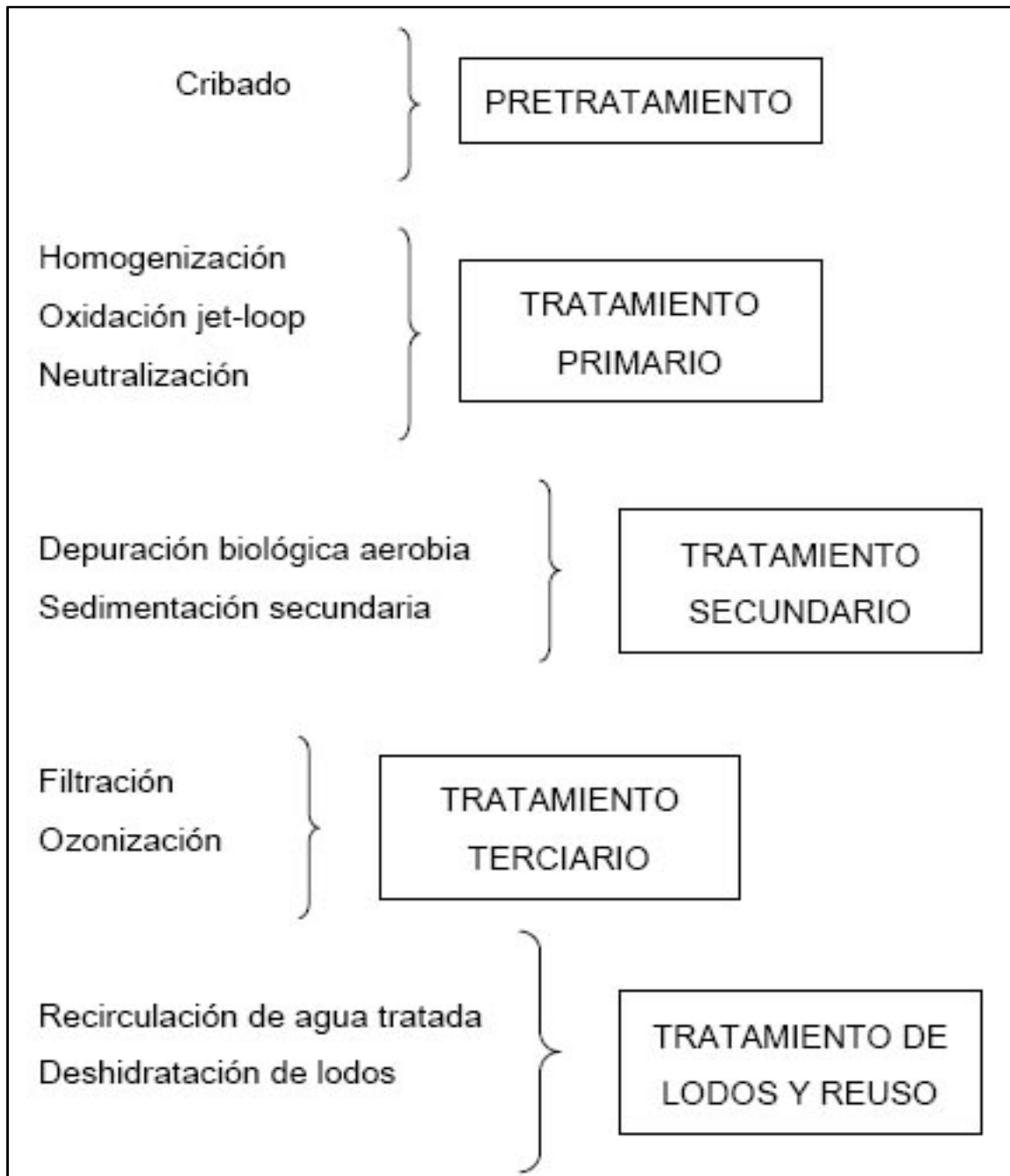
Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾

En la tabla 5.5 se muestran los parámetros del influente y efluente de operación de la planta de tratamiento de aguas industriales de la textilera Riviera (Ver Tabla 5.5).

Las operaciones y procesos empleados en el tren de tratamiento fueron seleccionadas de la necesidad de combinar el tipo de tratamiento físico-químico y biológico, de la que se obtendrá el 60% de recuperación de agua para reúso en los procesos de enjuague y teñido de telas.

El sistema se conforma por un pretratamiento (cribado), tratamiento primario (homogenización, oxidación jet-loop y neutralización), tratamiento secundario (depuración biológica aerobia y sedimentación secundaria), tratamiento terciario (filtración y ozonificación) y por último tratamiento de lodos. El tratamiento terciario es necesario debido a que se requiere una calidad mayor del agua para el empleo en operaciones de teñido (para su reúso), en la figura 5.1 se muestran los niveles de tratamiento que conforman el tren de tratamiento para la industria textilera Riviera S.A. de C.V.

Figura 5.1 Operaciones y Procesos que Conforman el Tren de Tratamiento



Fuente: Martínez Ireneo Fernando. Implementación de Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Textil con Sistema de Recuperación. ⁽²⁹⁾

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tratamiento de las aguas residuales industriales es un punto fundamental en el desarrollo sustentable de todas las naciones. México debe realizar cambios normativos en materia de saneamiento de las aguas residuales municipales e industriales, que regulen de manera correcta y eficaz la disposición final que se tenga de las mismas (sus descargas y sus reúsos). También se deben realizar revisiones, mantenimiento y modernización en las instalaciones de tratamiento (como son plantas municipales e industriales). Con esto lograr que las plantas de tratamiento municipales empleen la capacidad instalada para la cual fueron diseñadas y dejen de trabajar con eficiencias menores de tratamiento (es necesario destinar los recursos económicos para lograrlo); crear nuevas instalaciones aumentando la cobertura en saneamiento actual del país; ampliar la capacidad instalada en las plantas que así lo ameriten; evaluar con periodicidad el funcionamiento de las plantas de tratamiento; exigir a las industrias la modernización de sus instalaciones de tratamiento (es necesario dar incentivos fiscales de forma que la industria pueda canalizar los recursos); motivar la construcción necesaria de infraestructura para la distribución de agua tratada, logrando crear una red que permita su comercialización con tarifas inferiores al agua potable.

Llevar a cabo un registro detallado del sector económico industrial, que contemple las condiciones ambientales de su entorno y los efectos que le causa. Incluir en los registros censales de la industria datos de tratamiento. Homologar el sistema de clasificación económico de tal forma que el sector industria pueda ser comparado para su estudio con la situación de este sector en otros países. Así poder promover acciones que mejoren la situación ambiental.

La aplicación de un sistema de tratamiento cuya eficiencia fuera tal que removiera al máximo todas las características contaminantes de las aguas residuales generadas por la industria sería llegar a un caso extremo y no costeable para ninguna actividad industrial. Se debe buscar un punto óptimo de aplicación, donde logremos mantener en buenas condiciones nuestro entorno y nuestras industrias.

Por otra parte la industria obtiene beneficios de implantar o mejorar el tratamiento en sus vertidos, algunos principales como la recuperación de subproductos, disminución en los costos de captación, conducción y tratamiento de las aguas de primer uso, así como disminución en costos de tratamiento y disposición final de sus aguas residuales.

Dentro de los sistemas biológicos que mayor éxito han tenido para el tratamiento de los textiles están los filtros bacterianos o biológicos, lodos activados, y la aireación en sistemas coloidales (Lodos activados, aireación extendida y lagunas de mezcla completa mecánicamente aireada). Se pueden lograr remociones de hasta 90 o 95% de DBO, dependiendo que sistema se elija (de menor a mayor remoción filtros, lagunas aireadas y lodos activados).

En la industria de la curtiduría también se pueden lograr remociones de 95% de DBO con el empleo de filtros biológicos o sistemas de lodos activados, con previa remoción de tóxicos.

En el sector Azucarero, uno de los más importantes ya que posiblemente se está hablando del sector industrial más perjudicial para la calidad de cuerpos de agua, por tres razones principales, una que debido a la características de sus procesos requiere la cercanía de cuerpos de agua (abastecimiento), dos y como consecuencia de lo anterior es la industria que presenta el mayor caudal de descarga y tres presenta carga orgánica elevada, comparándola con los demás sectores de la industria.

En el sector de la industria para acabados de metales se requiere tener tratamiento de cianuros, cromatos, desechos ácidos, básicos y tratamiento para metales pesados.

El sector industrial de los minerales no metálicos es quizá la que menos interfiere con el medio ambiente. Casi siempre con la necesidad de implementar un tratamiento se busca la recuperación de material, este proceso se realiza en lagunas de sedimentación. Dentro de esta industria la de mayor cuidado resulta la rama de fabricación de asbesto, por sus descargas alcalinas, con presencia de grasas y aceites e igual resulta importante la recuperación de material que resulta reutilizable.

El volumen de descarga de esta industria no resulta considerable, ya que cuentan con sistemas de recirculación. Generalmente el agua se utiliza en actividades de cortado, pulido o como sistema de enfriamiento, las pérdidas que se presentan son por evaporación y no resulta importante, debido a ello la descarga originada se debe a los servicios sanitarios, lo que no representa un sistema de cuidado para esta industria.

Las aguas de la industria petrolera representan un serio problema debido a la contaminación que causan a los cuerpos de aguas. Estos vertidos problemáticos deben ser tratados generalmente empleando operaciones de separación física dado el alto grado de reutilización. Para la remoción orgánica se emplea tratamiento biológico y filtración. Esta industria también presenta alta carga orgánica como al azucarera, pero el caudal de descarga es menor.

Los efluentes de la industria química resultan delicados y de atención, son ácidos o básicos, tóxicos, con alta DBO, con color, flamables.

La industria de la celulosa y papel maneja grandes volúmenes de aguas, sobre todo para transporte. Sus vertidos presentan temperatura, DBO, DQO, color, sólidos disueltos y sólidos suspendidos y bacterias coliformes. Se pueden elegir varias alternativas de tratamiento en función de la carga contaminante.

En el caso de estudio podemos observar la necesidad de la industria moderna por mejorar sus procesos de producción, poniendo mayor atención a los que puedan ser mejorados con el objetivo de reducir la concentración de contaminantes en las aguas, o sustituir insumos de los procesos de producción por aquellos menos dañinos al ambiente, para después buscar la opción de tratamiento que le permita tratar sus aguas de desecho, con opciones técnicamente viables y económicas.

REFERENCIAS

- (1) Presidencia de la República, Gobierno Federal. México. **PROGRAMA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA 2006-2012.**
- (2) Comisión Nacional del Agua. 2008. **PROGRAMA NACIONAL HÍDRICO 2007-2012.**
- (3) Comisión Nacional del Agua. 2007. **ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO.**
- (4) Comisión Nacional del Agua. 2007. **SITUACIÓN DEL SUBSECTOR AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.**
- (5) Miguel Rigola Iapeña. 1989. **TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES: Aguas de proceso y residuales.** Marcombo BOIXAREU EDITORES.
- (6) SEDESOL e Instituto Nacional de Ecología. Serie Monográfica No. 6 **"BASES PARA UNA ESTRATEGIA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA EN MÉXICO: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE CINCO RAMAS INDUSTRIALES.**
- (7) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). **ACTIVIDADES DE PRODUCCIÓN DE BIENES. Censos económicos 1999. Minería y Extracción de Petróleo. Manufacturas. Electricidad. Captación, Tratamiento y Suministro de Agua.**
- (8) David Romo Murillo, Omar Romero Hernández y Ricardo Samaniego Breach. **INDUSTRIA Y MEDIO AMBIENTE EN MÉXICO.** ITAM. Miguel Ángel PORRUA.
- (9) Nelson L. Nemerow. 1977. **AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES: TEORÍAS, APLICACIONES Y TRATAMIENTO.** Primera edición. Hermann Blume Ediciones.
- (10) John Arundel. 2000. **TRATAMIENTOS DE AGUAS NEGRAS Y EFLUENTES INDUSTRIALES.** Editorial ACIBIA, S.A. ZARAGOZA (España)

- (11) Enrique Cesar Valdez y Alba B. Vázquez González. 2003. **INGENIERÍA DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES**. Fundación ICA, A. C.
- (12) Secretaria del Medio Ambiente (SEMARNAT). 2005. **INDICADORES BÁSICOS DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE MÉXICO**.
- (13) SEMARNAT> Sistema Nacional de Indicadores Ambientales> Calidad del Agua> Indicadores de Presión> 2.2-2 Descargas de Aguas Residuales no Municipales> **Descarga de aguas residuales industriales por giroIC 2.2-2A**. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=plantilla_01&IDINDICADOR=2.2-2&IBIC_user=dgeia_mia&IBIC_pass=dgeia_mia
- (14) SEMARNAT> Sistema Nacional de Indicadores Ambientales> Calidad del Agua> Indicadores de Presión> 2.2-2 Descargas de Aguas Residuales no Municipales> **Materia Orgánica Descargada en Aguas Residuales industrialesIC 2.2-2B**. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=plantilla_01&IDINDICADOR=2.2-2&IBIC_user=dgeia_mia&IBIC_pass=dgeia_mia
- (15) Instituto Nacional de Ecología. **EMISIONES ATMOSFERICAS, DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES, GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO**. <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/327/v.html>
- (16) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL BENEFICIO DEL CAFÉ**. Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (17) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CURTIDURÍA**. Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (18) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DEL AZUCAR**. Secretaría de Recursos Hidráulicos.

-
- (19) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE MINERALES NO METÁLICOS.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (20) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA PETROLERA.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (21) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA QUÍMICA.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (22) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **USOS DEL AGUA Y MANEJO DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y EL PAPEL.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (23) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **ESTUDIO SOBRE USOS DEL AGUA, MÉTODOS Y COSTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE ACABADOS TEXTILES.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (24) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **ESTUDIO SOBRE USOS DEL AGUA, MÉTODOS Y COSTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA CURTIDURÍA.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (25) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **ESTUDIO SOBRE USOS DEL AGUA, MÉTODOS Y COSTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE ACABADOS METÁLICOS.** Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- (26) Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. **ESTUDIO SOBRE USOS DEL AGUA, MÉTODOS Y COSTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA DE LA PREPARACIÓN,**

CONSERVACIÓN, EMPACADO Y ENVASE DE FRUTAS Y LEGUMBRES. Secretaría de Recursos Hidráulicos.

- (27) <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/36/cap3.html>
- (28) <http://www.col.ops-oms.org/saludambiente/SOIP/4a53inspecciones.htm>
- (29) Martínez Ireneo Fernando. 2006. **IMPLEMENTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL CON SISTEMA DE RECUPERACIÓN.** FES Zaragoza, UNAM.
- (30) Gordon Maskew Fair, John Charles Geyer y Daniel Alexander Okun. 1996. **PURIFICACIÓN DE AGUAS Y TRATAMIENTO Y REMOCIÓN DE AGUAS RESIDUALES, 2 Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales.** Limusa Noriega Editores
- (31) Walter J. Weber, JR. 1979. **CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA, PROCESOS FISICOQUÍMICOS.** Editorial Reverte, S.A.
- (32) Metcalf y Eddy. 1996. **INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES, TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACIÓN, TOMO 2.** Mc Graw Hill.
- (33) Metcalf and Eddy. 1991. **WASTEWATER ENGINEERING; Treatment, disposal and reuse.** McGraw Hill, Third Edition
- (34) Ramon Sans Fonfría, Joan de Pablo Ribas. 1989. **INGENIERÍA AMBIENTAL: CONTAMINACIÓN Y TRATAMIENTOS.** Marcombo Editores.
- (35) Rubens Sette Ramalho, Domingo Jiménez Beltrán, Federico de Lora. 1996. **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.** Editorial Reverté, S.A.
- (36) James H. Gary, Glenn E. Handwerk. 1980. **REFINO DE PETRÓLEO: TECNOLOGÍA Y ECONOMÍA.** Editorial Reverté, S.A.
- (37) http://www1.minambiente.gov.co/prensa/publicaciones/guias_ambientales/2_sector_energetico/Guia%20ambiental%20para%20proyectos%20carboel%E9ctricos/contenid/medidas2.htm