

29
Rej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**SEPARACION DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES
PROVENIENTES DE LA REGENERACION DE RESINAS DE
INTERCAMBIO IONICO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTAN:

**OJEDA ROBLES SILVIA
SARMIENTO BARRIOS DANIEL**

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

Area específica del proyecto: Tratamiento de aguas residuales

Director: Ing. Andres Aquino Canchiola.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

CONTENIDO

PAGINA

INTRODUCCION

CAPITULO I. GENERALIDADES

1

1.1. PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES (PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS)

- 1.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS
- 1.1.2 CARACTERISTICAS QUIMICAS

1.2. METALES TOXICOS

1.3. CONTAMINANTES DEL AGUA

1.4. METODOS DE PURIFICACION DE AGUA

CAPITULO II. IMPACTO ECOLOGICO DE LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

14

2.1. EFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

2.2. CARACTERISTICAS TOXICOLOGICAS DE ALGUNOS METALES

2.3. MECANISMO DE IMPACTO ECOLOGICO DE LOS EFLUENTES DE LA REGENERACION DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.

2.3.1. RUTA DEL EFLUENTE

A) EFLUENTE CON DIRECCION HACIA UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO

B) EFLUENTE DESCARGADO DIRECTAMENTE A CUERPOS
RECEPTORES

CAPITULO III. CARACTERIZACION DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE LA REGENERACION DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.

27

3.1. MECANISMOS DE INTERCAMBIO IONICO

3.1.1. RESINAS CATIONICAS

3.1.2. RESINAS ANIONICAS

3.2. PROPIEDADES FISICAS

3.2.1. COMPONENTES DEL EFLUENTE DE REGENERACION

- a) LECHO DE RESINA CATIONICA.
- b) LECHO DE RESINA ANIONICA.
- c) LECHO MIXTO.

CAPITULO IV. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

40

4.1. REMOCION DE METALES PESADOS

4.2. DESCRIPCION DE PROCESOS

4.2.1. PRECIPITACION QUIMICA

4.2.2. COAGULACION QUIMICA

4.2.2.1. SELECCION DE COAGULANTES QUIMICOS

4.2.2.2. COAGULANTES INORGANICOS.

4.2.2.3 COAGULANTES ORGANICOS

4.2.3. FLOCULACION

4.2.3.1. TIPOS DE FLOCULACION

4.2.4. EVAPORACION

4.2.5. BURBUJAS DE ADSORCION

4.2.6. REMOCION DE METALES POR MEDIO DE BURBUJAS DE ADSORCION

4.2.7. OSMOSIS INVERSA

CAPITULO V. CRITERIOS DE SELECCION DE PROCESO

75

5.1. PARAMETROS DE SELECCION DEL PROCESO

- A) ORIGEN DEL EFLUENTE
- B) USO O DESTINO FINAL DEL EFLUENTE A TRATAR.
- C) DISPONIBILIDAD DE METODOS EXISTENTES.

APLICABLES A LA NECESIDAD PARTICULAR O EN CUESTION.

5.2. CARACTERISTICAS DEL EFLUENTE A TRATAR

- I) TIPO DE EFLUENTE A TRATAR
- II) CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS
- III) USO FINAL O DESTINO DEL EFLUENTE
- IV) ASPECTOS TECNICO-ECONOMICOS

5.3. CARACTERISTICAS REQUERIDAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

- 1.- MAXIMA ELIMINACION DE LOS METALES PESADOS
- 2.- CUMPLIR CON LOS ASPECTOS DE CONTROL AMBIENTAL INHIERENTES AL CASO DE ESTUDIO
- 3.- CONDICIONES OPERATIVAS (COSTOS)

5.4. EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO.

- A) OSMOSIS INVERSA.
- B) INTERCAMBIO IONICO.
- C) EVAPORACION.
- D) FLOTACION POR BURBUJAS DE ADSORCION.
- E) PRECIPITACION QUIMICA.

CAPITULO VI. DESCRIPCION DEL SISTEMA SELECCIONADO.

86

6.1. PRINCIPIO DE OPERACION

- 6.1.1. TIPOS DE SEPARACION.

6.2. TEORIA DE SEPARACION

- 6.2.1. PAPEL DE LA DINAMICA DE FLUIDOS
- 6.2.2. FUERZAS VISCOSAS DE ARRASTRE:
- 6.2.3. SECCION TRANSVERSAL DE COLISION.
- 6.2.4. MODELO MATEMATICO.

6.3. PROPUESTA DE PROCESO

- 6.3.1. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA

COLUMNA DE BURBUJE

6.3.2. ESCALAMIENTO.

6.3.3. PLANTEAMIENTO DEL PROCESO.

6.3.4. COMPONENTES DEL PROCESO.

CONCLUSIONES

**ANEXO A. LEGISLACION AMBIENTAL REFERENTE A LAS
DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES**

CONSTITUCION DE 1917

LEYES

TRATADOS INTERNACIONALES

**MECANISMOS DE TUTELA JURIDICA CON RELACION AL MEDIO
AMBIENTE**

**NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE ECOLOGIA
REFERENTE A LA CALIDAD DEL AGUA**

NOM-031-ECOL/1993

CONSIDERANDOS

ACUERDO

BIBLIOGRAFIA

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO ETERNAMENTE A DIOS POR HABER PERMITIDO MI EXISTENCIA, POR TENER A LA GENTE QUE QUIERO, POR HABER TERMINADO MI CARRERA.

**** Primero que a nadie , dedico el presente trabajo a la memoria de mi hermano Juan. Donde quiera que te encuentres siempre estarás presente en el triunfo y en la derrota; porque se que hubieses disfrutado tanto como yo el fruto de mi esfuerzo y porque de alguna manera tú siempre serás el reflejo de una nueva oportunidad para volver a empezar, y del deber de demostrar a los seres queridos todo el amor y el respeto que nos infunden.**

Con todo mi cariño, respeto y admiración que siempre debí demostrarte, hasta siempre querido hermano.

Juan S. B.

**** A tí Madre por las noches de desvelo y preocupación, por toda el valor y el coraje con que nos sacaste adelante; por todo el amor y los sacrificios de cada día; por esto y por mucho más...GRACIAS.**

A tí Padre, porque a pesar de tus propias carencias siempre me has brindado tú amor apoyo y comprensión; por que no siempre los buenos actos sirven de ejemplo, sino que también me enseñaste que de los errores se aprende mucho más; GRACIAS.

Daniel Sandoval B

**** A Elisa, por todos los momentos compartidos, por lo bueno y por lo malo, por que contigo aprendí el valor de la vida; y principalmente por todo el amor, cariño respeto y admiración que siempre me has infundido.**

Daniel Soto

** Con cariño y admiración, a todos y cada uno de mis profesores, porque gracias a sus conocimientos he logrado concluir mi carrera profesional.

** A mi facultad, porque además de que en ella me forme técnicamente, también aprendí a defender mis principios y mis metas; por todos los momentos dulces y amargos experimentados a lo largo de mi formación.

** Con admiración a la memoria Oscar, que no solamente fue mi profesor sino que siempre supo ser un buen compañero y un amigo de verdad.

** A la memoria de la Profesora Lourdes García.

** Con todo el cariño que se pueda manifestar a mis mejores amigos: Alfredo, Agustín, Miguel Angel, José Juan, Juan, José Alberto, Rúben, Aslán, Abednego y Luis Manuel. Por lo gratos momentos compartidos, por la ayuda y lealtad manifestada en los momentos difíciles, por todo los triunfos y derrotas compartidas; Gracias Muchachos.

Daniel Soto PB

Agradecemos a nuestro asesor:

ANDRES AQUINO CANCHOLA

Por su apoyo y tiempo dedicado a la realización de este trabajo

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

A nuestra escuela le damos las gracias por habernos dado la oportunidad de realizar nuestros estudios profesionales y a todos los profesores que colaboran en ella y que de alguna forma nos apoyaron a lo largo de nuestra formación.

**SILVIA OJEDA
DANIEL SARMIENTO**

RESUMEN

En la actualidad los procesos de manufactura requieren estándares de calidad más estrictos, en sus materias primas, operaciones y producto terminado; sin embargo en nuestro país recientemente se ha comenzado a dar seguimiento real a las restricciones correspondientes a la generación, manejo y descarga de las aguas residuales. Un caso particular se muestra en la industria de alimentos, fármacos y en general a todos aquellos procesos que generan productos de consumo humano. En este sector una materia prima de vital importancia es el agua, la cual debe cumplir con estrictas especificaciones de pureza para servir como agua de proceso, ya que esta formará parte directa del producto terminado; por tanto se requiere aplicar una serie de operaciones de purificación dependiendo del suministro y del uso final. Estos procesos de purificación extraen las impurezas del agua, acumulándolos para posteriormente liberarlos en alguna otra forma química o física. El caso más común es la aplicación de equipos de desionización que en la mayoría de los procesos de purificación de agua existentes en la industria nacional se presenta como una de las etapas principales. Esta operación implica el ciclo de extracción-concentración-liberación de impurezas (lavado-regeneración de resinas) lo que representa un foco de contaminación al sistema donde sean liberados los contaminantes; esto se debe a que gran parte de las impurezas extraídas del agua son metales como el Cobre, Plomo, fierro, zinc etc; los cuales son elementos acumulables en los ecosistemas y representan un grado importante de toxicidad para todo ser vivo. Estos se mezclan con el agua desde el origen mismo del suministro ó bien con el contacto en tuberías y redes de distribución en general. Este ciclo representa la problemática en cuestión del presente trabajo. La mayoría de los procesos de separación de metales no aplica directamente al efluente generado en el ciclo de la desionización, ya que requieren grandes inversiones en la implantación, costos elevados de operación y principalmente generan un nuevo efluente o material en una fase que no permite su adecuado manejo y/o disposición final. Revisando y analizando las diversas técnicas de separación de metales pesados se llega a la conclusión que la mejor opción para obtener una eficiente separación, bajo las condiciones específicas del efluente, es la separación por burbujas de adsorción; sin embargo esta técnica genera lodos que se requieren procesar, para lo cual se propone un proceso que involucra las etapas inherentes a la separación por burbujas de adsorción y las etapas requeridas para el espesamiento de los lodos y su posterior secado lo que al final provee por un lado agua tratada con calidad adecuada para ser reusada y por otra parte de una mezcla sólida con los metales y algunas sales, lo que permite un mejor manejo y/o disposición final, ya que los contaminantes se extraen sin ser devueltos a sistemas de alcantarillado o cuerpos receptores como ríos, lagos etc. evitando finalmente la incipiente contaminación de los mismos.

INTRODUCCION

INTRODUCCION

Todas las naciones del mundo se esfuerzan por el continuo incremento en el nivel de vida de los ciudadanos. El desarrollo mediante la industrialización ha sido uno de los principales mecanismos para alcanzar dicho objetivo. Este desarrollo implica el incremento en las necesidades de generación y explotación de diversos recursos; lo que genera efectos perjudiciales para el medio ambiente.

El agua limpia, en particular, se ha convertido en un elemento escaso; aunque un tratamiento adecuado puede volver utilizable el agua de ríos y otros cuerpos receptores contaminados. Sin embargo, lo más razonable es impedir que éstos se contaminen. De esta manera se protege un valioso recurso natural capaz de proveer de agua limpia para múltiples aplicaciones industriales y agrícolas. El costo de protegerlas es relativamente menor con el de los tratamientos requeridos para depurarla. Por tanto, es necesario una planificación que permita mantener lo más pura posible el agua de cada país, además de considerar que al plantear las necesidades de uso inmediato, como es la purificación del agua residual evitando la contaminación de cuerpos receptores (ríos y lagos), se plantee la necesidad y la posibilidad de optimizar dicho recurso mediante el reuso, el cual se fundamenta en sistemas adecuados de tratamiento.

Para lograr una clara comprensión de los diferentes procedimientos aplicables al tratamiento de las aguas residuales, es necesario conocer de antemano ciertas características cualitativas tanto de las aguas residuales como de los cuerpos receptores en los que se vierten.

En México, el sector industrial es uno de los principales generadores de aguas residuales, cuyas características varían dependiendo del tipo de industria que las genere. La diversidad industrial es tan amplia y compleja que los efluentes acuosos que se generan requieren de parámetros diferentes para su caracterización y en consecuencia para su tratamiento; por lo que es necesario la aplicación de una normatividad específica para cada sector industrial.

Uno de los sectores industriales que más consume y genera agua en diversas calidades, es el productor de bienes de consumo humano y animal, tal como la industria alimenticia y farmacéutica. Este ramo consume agua tanto en sus procesos como en sus servicios auxiliares, por lo tanto también genera agua contaminada.

En la mayoría de los procesos productivos de este sector industrial se requiere de agua con cierto grado de pureza y con calidad superior a la potable, por lo que es necesario la implantación de sistemas de purificación, tales como la filtración, desionización, ultrafiltración, absorción, ósmosis inversa, etc. dependiente del uso final que se desee dar al agua. En el caso de la desionización las impurezas extraídas del agua son concentradas y posteriormente liberadas cuando se regenera el medio desionizante. Esta liberación de impurezas representa un grave problema de contaminación para el agua que es descargada

después de la regeneración. Esta agua generalmente es liberada o descargada al drenaje municipal.

Los principales contaminantes contenidos son iones metálicos de calcio, magnesio, plomo, cromo, fierro, zinc, etc. Los cuales representan grandes índices de toxicidad, por lo tanto es indispensable implementar un proceso de tratamiento que pueda eliminar eficientemente estas sales metálicas, para de este modo evitar la contaminación de los medios receptores y aprovechar de la mejor manera posible este recurso natural.

Existe una gran variedad de procesos de tratamiento de aguas residuales como son: precipitación química, osmosis inversa, evaporación, intercambio iónico, floculación, coagulación, flotación por burbujas de absorción, etc., de entre los cuales se elige el proceso o combinación de procesos acorde a los contaminantes que se deseen eliminar de un efluente contaminado. Esta selección depende del origen del efluente, tipo de contaminantes, tipo de industria, destino final del efluente tratado, factibilidad técnica y económica.

Además de que el tratamiento recibido permita obtener un efluente que cumpla con las normas específicas preestablecidas en cuestión de calidad de agua, ya sea para descarga a cuerpos receptores como son alcantarillado y drenaje municipal o para reuso en sistemas de riego, sistemas de enfriamiento, etc; permitiendo atacar gran parte de la problemática planteada.

CAPITULO I GENERALIDADES

GENERALIDADES

Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son:

- 1) Aguas domésticas o urbanas.
- 2) Aguas residuales industriales.
- 3) Esguimientos de uso agrícola.
- 4) Pluviales.

Estudiar cada uno de estos grupos resultaría excesivamente complejo. En virtud de que el medio ambiente se ve afectado principalmente por las aguas contaminadas de origen industrial y siendo este sector demasiado extenso, el presente trabajo se abocará solamente al caso de los metales pesados contenidos en aguas residuales provenientes de la regeneración de resinas de intercambio iónico; aunque inicialmente se plantee un panorama general sobre aguas residuales.

1.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES (PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS)

Hasta hace algunas décadas el hombre se conformaba con caracterizaciones de tipo general sobre la calidad del agua. Si se apreciaba limpia y transparente al sentido de la vista, se consideraba como una agua buena. Naturalmente, había excepciones importantes en el área de la salud pública, una vez que se conocían las relaciones entre el agua y las enfermedades. No obstante, la procuración de la calidad podía resolverse mediante otras alternativas distintas a la de su administración, como por ejemplo, recurrir a otras fuentes de tratamiento.

El conocimiento de la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es esencial en el diseño y operación de los sistemas de captación, tratamiento y disposición; así como de la administración de la calidad del medio ambiente.

1.1.1. CARACTERÍSTICAS FISICAS

Las características físicas más importantes en el agua residual son: Contenido Total de Sólidos (materia flotante, materia en suspensión y materia coloidal), Temperatura, Color y Olor.

Sólidos Totales:

Los sólidos totales son la materia que queda como residuo después de evaporar y secar una muestra de agua a 103-105 °C.

La materia que tiene una presión de vapor significativa a esta temperatura se evaporará y, por lo tanto no se considera como sólido. La determinación es sencilla si se emplean métodos gravimétricos. Los sólidos totales pueden clasificarse como suspendidos o filtrables pasando un volumen conocido a través de un filtro. Los sólidos filtrables se dividen en coloidales y disueltos; la fracción coloidal consiste de aquellas partículas con un diámetro aproximado de 1 μ -1 μ . Los sólidos disueltos están constituidos por moléculas orgánicas e inorgánicas y de iones presentes en solución acuosa.

Temperatura:

La temperatura del agua es un parámetro importante debido a su efecto sobre la vida acuática, en las reacciones químicas y en las tasas de reacción; así como de la capacidad de uso del agua. Por otro lado la solubilidad del oxígeno disminuye con el incremento de la temperatura, además de que las tasas de las reacciones bioquímicas se incrementan.

Color:

Anteriormente, se utilizaba este término como condición para describir el estado de las aguas residuales. Este término se refiere a la edad de las aguas, la cual se determinaba cualitativamente por su color y olor. La mayoría de las aguas residuales tiene un color grisáceo o pardo; dependiendo de su origen; en cuanto las bacterias "simplifican" a los compuestos orgánicos, el contenido de oxígeno disuelto disminuye hasta cero y el color cambia a negro. En estas condiciones se dice que las aguas residuales están en estado séptico. Es importante considerar que las aguas residuales provenientes de la industria se mezclan con las domésticas lo que provoca un color y olor característico.

Olor:

Esta característica, generalmente se debe a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. Las aguas residuales domésticas tienen un olor característico ligeramente desagradable pero mucho menor que el de las aguas sépticas. Estas despiden un olor a sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaerobios al reducir los sulfatos a sulfuros. Las aguas industriales muchas veces contienen compuestos que producen olores específicos desde los mismos procesos productivos que las generan.

Turbidez:

Esta puede ser causada por una amplia variedad de materiales suspendidos, con un ámbito de tamaño desde el coloidal hasta las partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia.

La unidad patrón de turbiedad, fue definida como la obstrucción óptica de la luz, causada por una ppm de sílice insoluble en agua destilada, de donde:

1 ppm de SiO_2 = 1 unidad de turbiedad.

1.1.2. CARACTERISTICAS QUIMICAS

Materia orgánica:

En las aguas municipales, los principales compuestos orgánicos presentes son:

Proteínas	40-60%
Carbohidratos	25-50%
Grasas y Aceites	10%

La urea es otro compuesto orgánico importante en las aguas residuales; además de cantidades pequeñas de sustancias sintéticas, que varían desde estructuras simples a muy complejas, como son: fenoles, detergentes, insecticidas, etc. El incremento de estas sustancias es cada vez mayor lo que constituye un grave problema de contaminación a los medios de descarga y por lo tanto al ambiente.

Proteínas:

Las proteínas son los principales constituyentes del organismo animal. La mayoría de los alimentos crudos, animales o vegetales contienen proteínas. La química de la formación de estas involucra la combinación de un gran número de aminoácidos. Todas las proteínas contienen carbono, oxígeno e hidrógeno; además como característica distintiva contienen una cantidad elevada y constante de nitrógeno, 16%. Las proteínas junto con la urea son las causantes de la presencia de nitrógeno en las aguas residuales municipales. Las aguas residuales industriales con un alto contenido de proteínas son las provenientes del ramo alimenticio y farmacéutico.

Carbohidratos:

Incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibras de madera. Principalmente contienen carbono, oxígeno y nitrógeno algunos son solubles en el agua mientras que otros como el almidón no lo son.

Grasas y Aceites:

El término grasa se aplica a una gran variedad de sustancias orgánicas (hidrocarburos principalmente). Los sebos y aceites son compuestos de alcohol con ácidos grasos, los que son líquidos a temperatura ambiente se denominan aceites, mientras que los que son sólidos se denominan grasas. Estos componentes presentes en las aguas residuales provienen generalmente de alimentos y de aceites o hidrocarburos que se utilizan en servicios auxiliares de los procesos industriales.

La presencia de las grasas y aceites obstaculizan la fluidez de las aguas residuales; además de que son sustancias muy difíciles de degradar. Su presencia en cuerpos receptores afecta la permeabilidad del terreno y en consecuencia provoca desequilibrios sobre el medio ambiente.

Detergentes:

Los detergentes son compuestos tensoactivos, los cuales están constituidos por grandes moléculas orgánicas que son ligeramente solubles en agua y causan la formación de espuma. Inicialmente eran fabricados a base de sulfonato de alquil-benceno, que es sumamente resistente a la degradación biológica. Actualmente la mayoría de los detergentes están hechos a base de sulfonatos lineales de alquilo, que son biodegradables.

Fenoles:

Son compuestos aromáticos muy estables, provienen principalmente de procesos industriales, implican un cierto grado de toxicidad para los microorganismos que degradan los otros compuestos.

Determinación del Contenido Orgánico:

Los métodos de aplicación común para determinar el contenido de materia orgánica en las aguas residuales son los siguientes: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbón Orgánico Total (COT).

Demanda Bioquímica de Oxígeno:

D.B.O.- Es el parámetro de calidad del agua más ampliamente utilizado para describir la contaminación orgánica. Es aplicable tanto a aguas residuales como superficiales.

El DBO es la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar la materia orgánica biodegradable del agua residual, por una población heterogénea de microorganismos, principalmente bacterias, en condiciones aeróbicas.

La medición de la DBO es de especial significado en el tratamiento de las aguas residuales y en la administración de la calidad del agua, ya que se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente en el efluente.

Demanda Química de Oxígeno:

Esta prueba se efectúa para determinar la capacidad de polución de las aguas negras, tanto municipales como industriales. Se fundamenta en el hecho de que prácticamente todos los compuestos orgánicos se oxidan para producir CO_2 y H_2O por la acción de oxidantes fuertes y, bajo condiciones ácidas. La mayoría de los compuestos orgánicos son susceptibles de oxidarse a excepción de los compuestos aromáticos y la piridina. También hay que considerar que la demanda química de oxígeno involucra la oxidación de algunos compuestos inorgánicos.

En general la DQO es mayor que la DBO, ya que existe una mayor cantidad de compuestos que pueden ser químicamente oxidados que compuestos que puedan oxidarse biológicamente.

Oxígeno Disuelto Total (ODT):

Las sustancias orgánicas, y en cierta medida las inorgánicas, se transforman a productos finales estables en una cámara de combustión que contiene un catalizador de platino. El ODT se determina registrando el contenido de oxígeno en el gas transportador, que en este caso es el nitrógeno.

Materia Inorgánica:

Debido a que algunos constituyentes inorgánicos afectan el uso y rehuso benéfico del agua, es conveniente examinar la naturaleza de los mismos, y particularmente aquellos que se adicionan durante el ciclo de su utilización.

Concentración de Iones Hidrógeno:

Es un parámetro de calidad importante, tanto en aguas naturales como en las residuales. El límite de concentración para permitir la existencia de la mayoría de la vida acuática es bastante reducido y crítico.

El término de PH, se utiliza universalmente para expresar la condición del efluente en términos de acidez o de alcalinidad. existen valores característicos dependiendo del origen del efluente.

Alcalinidad:

Se debe a la presencia de iones hidróxilo, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio, o bien, a la presencia de amonio. La concentración de la alcalinidad en las aguas residuales es importante cuando se desea emplear un tratamiento de tipo químico.

Nitrógeno y Fósforo:

Estos elementos son esenciales para el crecimiento de microorganismos y se conocen como bioestimulantes. Por lo tanto es importante conocer las concentraciones presentes en las aguas residuales para evaluar su tratabilidad. Si el contenido es insuficiente, a veces se requiere de la adición de alguno de estos para que las aguas puedan ser tratadas por métodos biológicos.

Azufre:

El ion sulfato se presenta en forma natural en la mayoría de los abastecimientos de agua, y consecuentemente también se encuentra en las aguas residuales. El azufre se requiere en la síntesis de proteínas, liberándose cuando estas se degradan. Los sulfatos se reducen a sulfuros y a sulfuro de hidrógeno por medio de bacterias en condiciones anaerobias. El sulfuro de hidrógeno puede entonces oxidarse a ácido sulfúrico que es corrosivo para los sistemas de drenaje.

Compuestos Tóxicos:

El Cobre, el Plomo, la Plata, el Cadmio, el Cromo, el Arsénico, el Boro; etc. son componentes tóxicos para la mayoría de los microorganismos, los cuales implican un alto impacto sobre la biota presente en los cuerpos receptores y el medio ambiente en general.

Metales Pesados:

Rastros de Niquel, Manganeso, Plomo, Cromo, Cadmio, Zinc, Cobre, Hierro y Mercurio son componentes naturales de la mayoría de las aguas. Algunos de estos metales son esenciales para el crecimiento del complejo biológico, la ausencia de cantidades adecuadas de estos metales limitaría su crecimiento. Por otra parte, cantidades excesivas interfieren con el uso benéfico de las aguas debido a que estos elementos implican cierta toxicidad; por lo tanto es importante medir y controlar la concentración de estas sustancias.

Además la mayoría de los procesos de tratamiento de agua residual no logran separar completamente a este tipo de componentes, siendo el área de los metales pesados la que requiere de mayor atención en el ramo.

Gases:

Los gases que se encuentran comúnmente en las aguas residuales municipales son: Nitrógeno, Oxígeno, Bióxido de Carbono, Sulfuro de Hidrógeno, Amonio y Metano. En el caso de las aguas residuales industriales, la gama de gases presentes en solución es tan grande que sería muy difícil realizar una caracterización genérica.

Oxígeno Disuelto:

La prueba de Oxígeno Disuelto (OD) determina si los cambios biológicos en las aguas naturales y residuales se lleva a cabo por organismos aeróbios o anaerobios. Los primeros utilizan el oxígeno libre para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente; los segundos logran la oxidación mediante la reducción de ciertas sales inorgánicas como los sulfatos, en este caso los productos obtenidos producen olores muy desagradables.

Una forma genérica de caracterizar a las aguas residuales se ilustra en la tabla (1.1), la cual nos muestra los tipos de desechos generados, tanto físicos como químicos y biológicos y el tipo de industria del que provienen, ya sea en estado líquido, sólido y gaseoso.

TABLA I.1
CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS, Y BIOLOGICAS DE LAS AGUAS
RESIDUALES

PARAMETROS	FUENTE
FISICOS	
Sólidos	Municipal e Industrial.
Temperatura	Municipal e Industrial.
Color	Municipal e Industrial.
Olor	Alcantarillado, Industrial.
QUIMICOS	
ORGANICOS:	
Proteínas	Municipales, Comerciales e industriales
Carbohidratos	Municipales, Comerciales e industriales.
Grasas y Aceites	Municipales, Comerciales e Industriales.
Detergentes	Municipales e Industriales.
Fenoles	Industriales.
Insecticidas	Agrícolas.
INORGANICOS:	
PH	Industriales.
Cloruros	Municipales, Infiltración.
Alcalinidad	Municipales e Infiltración.
Nitrógeno	Municipales y Agrícolas.
Fósforo	Municipales, Industriales y Naturales.
Azulfre	Industriales e Infiltración.
Metales Pesados	Industriales.
GASES:	
Oxígeno	Infiltración Superficial.
Sulfuro de Hidrógeno	Descomposición de Desechos Municipales.
Metano	Descomposición de Desechos Municipales.
BIOLOGICOS	
Protista	Municipales, Plantas de Tratamiento.
Virus	Municipales.
Plamas	Cuerpos de Agua, Plamas de Tratamiento.

Fuente (11): "Depuración de Aguas Residuales"

1.2. METALES TOXICOS

La razón de definir a un metal como elemento tóxico es por demás complicado, ya que existe una gran variedad de criterios para establecer el grupo de metales que pueden considerarse como tóxicos. La tabla (1.2) muestra los criterios de algunas instituciones involucradas en estos aspectos. La Council for Environmental Quality (CEQ) muestra en la primera columna una lista de "metales que pueden tener efectos adversos sobre los seres humanos". En la segunda columna, la Oficina de Substancias Tóxicas de la U.S. Environmental Protection Agency, muestra una lista diferente en la que incluye solamente a los metales de los cuales ha recibido reportes. La tercera columna muestra algunos metales de interés para la EPA, bajo el criterio de "agua para beber". Mientras que la cuarta columna provee del criterio considerado por la OSHA.

TABLA 1.2

METAL	CEQ "Toxic Substances" (1971)	EPA Office the Toxic Substances	1975 EPA Drinking Water Criteria	OSHA Concerns
Antimonio	--	*	--	--
Arsénico	*	--	*	*
Bario	*	--	*	--
Berilio	*	--	--	*
Boro	--	*	--	--
Cadmio	*	--	*	--
Cromo	*	--	*	--
Cobre	*	--	--	--
Indio	--	*	--	*
Plomo	*	--	*	*
Manganeso	*	--	--	--
Mercurio	*	--	*	*
Molibdeno	--	--	--	--
Niquel	*	*	*	--
Selenio	*	*	*	--
Plata	*	--	*	--
Titanio	--	*	--	--
Vanadio	*	*	--	--
Zinc	*	--	--	--

* Metales considerados como tóxicos

FUENTE (25): "Toxicity of Industrial Metal"

Aunque en la actualidad todavía no se cuenta con un criterio específico para definir a los metales tóxicos, las diversas instituciones ecologistas privadas y gubernamentales han logrado incidir sobre la tecnología; por ejemplo, se han desarrollado combustibles libres de metales, además de los dispositivos catalíticos requeridos para el uso de los mismos.

Además de la categorización de tóxico o no tóxico a algunos de los metales también se les ha denominado como metales pesados, concepto que tampoco tiene una definición específica; aunque algunos científicos de renombre han utilizado el término de metal tóxico y metal pesado indistintamente.

La definición clásica de metal pesado se muestra en la primer columna de la tabla (1.3) y que esta integrada por todos los metales precipitables en una solución ácida de sulfuro de hidrógeno. Sin embargo la Environmental Engineers Handbook, provee una lista diferente la cual incluye al aluminio. En 1973 la EPA publicó una lista específica para la industria del cemento.

TABLA 1.3

METAL	DEFINICIÓN CLÁSICA	ENVIROMENTAL ENGINEERS HANDBOOK	DEFINICION DE LA EPA
Aluminio	-	x	-
Antimonio	x	-	-
Arsénico	x	-	-
Bismuto	x	-	-
Cadmio	x	-	x
Cromo	-	x	x
Cobre	x	x	x
Oro	x	-	-
Hierro	-	x	-
Plomo	x	-	x
Mercurio	x	-	x
Níquel	-	-	x
Plata	x	-	-
Titanio	x	-	-
Zinc	-	x	-

FUENTE (25): "Toxicity of Industrial Metal"

El punto de discusión consiste en aceptar o no el concepto actual de metal pesado, puesto que no necesariamente un metal pesado es sinónimo de metal tóxico.

1.3. CONTAMINANTES DEL AGUA

El agua es un excelente disolvente y es esencial en el funcionamiento de toda forma de vida, además de ser un soporte para el crecimiento microbiano y susceptible de contaminarse con cualquier elemento que entre en contacto con ella.

Existen cinco grupos básicos de contaminantes en el agua:

Sólidos y gases ionizados disueltos.

Sólidos y gases no ionizados disueltos.

Materia particulada.

Carga microbiana.

Pirógenos.

Las impurezas ionizadas resultan de la exposición del agua a rocas y minerales que se encuentran en la tierra, incluyendo algunos compuestos como cloruro de sodio y carbonato de calcio. Estos contaminantes son de particular importancia porque afecta la dureza y la alcalinidad del agua. Esto, sin embargo, es fácil de monitorear a través de la conductividad o resistividad eléctrica del agua.

Las sustancias orgánicas son la clase más amplia de los sólidos no ionizados. Estos son derivados de la exposición de agua a contaminantes naturales como hojas, peces y otros organismos, los cuales presentan dificultades para ser removidos de suspensiones coloidales.

El principal gas no ionizado es el oxígeno. Dentro del material particulado se encuentran, las partículas de arena, residuos de óxido, y lodo existente en todas las tuberías de suministro de agua, que usualmente son visibles, pero existen algunas partículas que son microscópicas y por lo tanto invisibles al ojo humano.

Las impurezas microbianas, incluyendo protozoarios, bacteria y virus, son usualmente encontradas en todas las superficies de aguas sin tratar. Los procesos de purificación municipal disminuyen el contenido microbiológico (mediante el uso del cloro). A los subproductos de la degradación de algunas bacteria se les da el nombre de sustancias pirógenas.

Esta serie de factores mencionados anteriormente; además del uso que se desee dar a la misma, constituyen una de las principales plataformas en la que se fundamentan los diseños de métodos de purificación de agua. Las concentraciones de cada uno de los diversos contaminantes del agua dependen del origen o suministro de la misma.

Para el caso de la industria de proceso de bienes de consumo humano (Alimentos, Farmacéutica, etc.), generalmente el suministro proviene de la red municipal de agua potable, la cual al denominarse potable debe de cumplir con ciertos parámetros de concentración de algunos de los contaminantes mencionados anteriormente (Tabla 1.4).

1.4. METODOS DE PURIFICACION DE AGUA

Dependiendo del grado o calidad del agua que requieren para sus procesos o productos, este tipo de industrias, utilizan diversos métodos de purificación del agua, y que pueden ser:

- a) Destilación
- b) Desionización
- c) Filtración
- d) Ultra-filtración
- e) UV oxidación
- f) Ozonización

Estos métodos pueden ser empleados en conjunto, en secuencias lógicas o independientemente; de tal forma que se pueda obtener agua con un determinado grado de pureza y calidad.

De estas metodologías una de las más eficientes y frecuentes en nuestro país, es el proceso de intercambio iónico que produce agua con un grado de calidad aceptable y que requiere de pocos tratamientos posteriores para obtener un alto grado de pureza. Sin embargo, existe un inconveniente, ya que este proceso implica regenerar los medios o lechos de intercambio iónico, los cuales concentran a un gran número de impurezas contenidas en el agua. Al decir regenerar implica que es necesario "renovar" al medio de intercambio iónico con la consecuente liberación de los contaminantes mencionados, y de los cuales los metales pesados representan un grave problema de contaminación ambiental por su alta toxicidad, además de encontrarse altamente concentrados; dependiendo del tipo de lecho que se haya utilizado.

En este punto radica la problemática de la regeneración de los medios de intercambio iónico, puesto que se purifica agua para luego liberar un efluente contaminado, relativamente a elevadas concentraciones.

En la actualidad se ha descubierto la presencia de metales como Pb^{+2} , Cr^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} y Ni , además del Ca^{+2} y Mg^{+2} que por naturaleza se encuentran presentes en la mayoría de las aguas de suministro. Si bien se presentan en condiciones de baja concentración, al tiempo de ingresar a un sistema de purificación por desionización, este último se encarga de retenerlos entre las resinas permitiendo que se acumulen y concentren. De esta manera el fenómeno perjudicial se presenta en el momento de regenerar el lecho y liberar los metales acumulados en el mismo.

TABLA I.4
CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE DE IONES Y OTRAS SUBSTANCIAS EN
AGUA POTABLE

SUBSTANCIA	CONCENTRACION MAXIMA PERMISIBLE mgr/lt de agua
ALCALINIDAD TOTAL EXPRESADA COMO CaCO ₃	400
ALUMINIO	0.2
ARSENICO	0.05
BARIO	1
CADMIO	0.005
CIANURO (EXPRESADO COMO ION CN ⁻)	0.05
COBRE	1.5
COLORO LIBRE	EN AGUA CLORADA : 0.2 EN AGUA SOBRECLOREADA: 1
CROMO HEXAVALENTE	0.05
DUREZA DE CALCIO COMO CaCO ₃	300
FENOLES O COMPUESTOS FENOLICOS	0.001
FIERRO	0.3
FLUORUROS EXPRESADOS COMO ELEMENTO	1.5
MAGNESIO	125
MANGANESO	0.15
MERCURIO	0.001
NITRATOS EXPRESADOS COMO NITROGENO	5
NITRITOS EXPRESADOS COMO NITROGENO	0.05
NITROGENO PROTEICO	0.1
OXIGENO CONSUMIDO EN MEDIO ACIDO	3
PLOMO	0.05
SELENIO	0.05
SULFATOS EXPRESADOS COMO ION	250
ZINC	5
SAAM	0.5
ECC	0.3
ECA	1.5

SAAM: SUBSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO.
FUENTE: Ley General de Salud

Considerando que existe la posibilidad de encontrar a cualquiera de los metales en solución en el agua de suministro (potable) de los lechos de intercambio iónico, tenemos que la concentración máxima de sales metálicas en la entrada de alimentación es la que se muestra en la tabla I.4. Esta concentración se incrementa dentro del lecho de intercambio una vez que se han separado de un cierto volumen de agua de alimentación y que posteriormente se liberan al ser regenerado el lecho.

CAPITULO II
IMPACTO ECOLOGICO

IMPACTO ECOLOGICO DE LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

El impacto del ser humano sobre el medio ambiente ha tenido efectos extensos y a veces catastróficos. La descarga sin criterios de desechos industriales y de aguas servidas domésticas contaminan considerablemente los recursos en agua, mientras la industrialización y la urbanización crean demandas cada vez mayores de agua limpia. Los recursos limitados del agua dulce obligan a la comunidad a volver a usar las aguas residuales tratadas en todo momento en que sea posible como fuente alternativa de agua. Aunque las técnicas de reutilización estén ganando cada vez más importancia, existen problemas que no se pueden ignorar de toxicidad asociada con la reutilización del agua.

El agua se considera como contaminada o polucionada, cuando la composición o el estado de esta son directa o indirectamente modificadas por la actividad del hombre, en una medida tal, que disminuye la facilidad de utilización para todos aquellos fines, a los que podrían servir en estado natural.

El crecimiento progresivo de los núcleos de poblaciones, el aumento de la densidad en sus actividades industriales, artesanales y ganaderas, el cultivo intensivo de la tierra para satisfacer las demandas y el desarrollo industrial son las causas principales de la aportación de residuos que contaminan las aguas subterráneas, los ríos, lagos y mares, destruyendo o modificando la fauna y la flora, rompiendo el equilibrio del ecosistema, así como la armonía entre el hombre y su medio.

De acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías:

- 1) Aguas superficiales (ríos, océanos, lagos).
- 2) Aguas subterráneas.
- 3) Aguas meteorológicas.

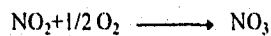
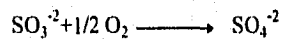
De la misma manera los principales contaminantes del agua se clasifican en:

- 1) Químicos.
- 2) Físicos.
- 3) Biológicos.

Los contaminantes químicos comprenden productos químicos, orgánicos e inorgánicos. El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno disuelto, como resultado de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. La disminución del oxígeno disuelto tiene como consecuencia perturbaciones indeseables de la biota allí asentada, por que la cantidad de oxígeno disuelto en un efluente representa un límite normativo en nuestro país.

En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos el resultado más importante es su posible efecto tóxico; sin embargo, existen casos en los que los compuestos inorgánicos presentan una determinada demanda del oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo, lo cual aunado a los compuestos orgánicos incrementan grandemente los efectos nocivos sobre la biota.

Los sulfitos y nitritos, por ejemplo, toman oxígeno para oxidarse a sulfatos y nitratos respectivamente:



2.1. EFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

La preocupación por la contaminación de las aguas puede sintetizarse en algunos efectos producidos tales como:

- ◊ Destrucción de los limitados recursos hidráulicos.
- ◊ Disminución de la calidad del agua para abastecimiento de población, o uso para riegos o industria.
- ◊ Supresión del poder autodepurador de los cauces receptores con destrucción de su fauna y flora, imposibilitando o dificultando su utilización.
- ◊ Afecta a los asentamientos urbanos e industriales.
- ◊ Representa un potencial peligro, que atañe directamente a la salud pública influyendo sobre la economía de la sociedad o sobre su recreo y esparcimiento.

◊ Exige un control riguroso y un tratamiento adecuado la utilización de agua con un cierto grado de contaminación

Los efectos de los distintos tipos de contaminación pueden resumirse en la siguiente tabla:

TABLA II.1

Principales categorías de contaminación		Categorías generales de efectos enusados			
		Daños a los recursos vivos	Peligros para la salud humana	Impedimentos para riego e industria	Reducción de los lugares de distracción
Desagüe de aguas residuales domésticas (Incluyendo los desperdicios de la elaboración de alimentos)	Microbiana directa		**		*
	Microbiana indirecta		**	*	
	Eutrofización y procesos afines	**	*	*	**
Productos de desechos industriales	Metales pesados	*	**	*	
	Petroquímicos		*	*	
	Aceites, etc.			*	**
	Desperdicios de la fabricación de pasta y papel	**			*
	Plaguicidas	*	**		
	Detergentes	*			*
	Sustancias radiactivas		**	*	
	Calor	*		*	
	Objetos Sólidos			*	*
Materias extraídas en el dragado	*		*		
Actividad agrícola	Abonos	*	*		
	Pesticidas	*	**		

* Categoría general de efectos más frecuentemente asociados con esta clase de contaminación.

** La categoría más importante de los efectos del tipo concreto de contaminante.

FUENTE: Aquatic Toxicology and Water Quality Management

Existen una gran variedad de compuestos que pueden ser clasificados con el nombre genérico de residuos tóxicos y peligrosos.

Uno de los grupos más importantes por su latente toxicidad para los seres vivos son los iones de metales pesados. Se presentan en las aguas residuales industriales, como resultado de las operaciones de purificación de agua (para proceso, producto y servicio), la cual requiere estar libre de dichos metales. Este tipo de contaminante incluye: Mercurio,

Arsénico, Cobre, Zinc, Níquel, Cromo, Plomo y Cadmio. Su presencia, aún en pequeñas cantidades (concentraciones mínimas detectables), pueden causar serios problemas de salud al ser humano; así como desequilibrios ecológicos en general.

Los efectos producidos al ser humano, por algunos de los metales pesados se pueden resumir a continuación:

TABLA II.2
EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS METALES EN LOS SERES VIVOS.

METAL	EFEECTO
Arsénico	Causa dermatitis y posiblemente cáncer en la piel. Genera alteraciones renales y sanguíneas. Fatal en concentraciones relativamente bajas.
Bario	Sus compuestos solubles son estimulantes del corazón.
Boro	En forma ácida es altamente tóxico, puede ser letal.
Cadmio	Precursor de alteraciones óseas. Produce alteraciones en las concentraciones normales de calcio y proteínas. La inhalación produce enfisema pulmonar, seguida de bronquitis crónica. Daños renales como proteinuria. Alteraciones cardíacas, como arteriosclerosis. Perturbaciones hepáticas. Potencialmente cancerígeno.
Cromo	Irritación del tracto respiratorio. Dermatitis crónica. Potencialmente tóxico y cancerígeno.
Cobre	Tóxico para la vida marina y vegetal. Produce dermatitis crónica. Genera alteraciones óseas.
Plomo	El envenenamiento acumulativo, causa efectos sobre la sangre, la piel, sistema nerviosos y respiratorio. Produce Nefritis histiocítica. Anemia. Psicosis y la muerte. Potencialmente cancerígeno.
Mercurio	Altamente tóxico para la sangre, causa desequilibrios, cerebrales y pulmonares. Daños cerebrales y la muerte. Esta asociado con cierto tipo de epilepsia.
Níquel	Puede producir cáncer especialmente en sus formas orgánicas.
Zinc	Por inhalación de cantidades relativamente altas puede resultar fatal. Mezclado con otros metales se genera un medio altamente tóxico y puede ser cancerígeno.

2.2. CARACTERISTICAS TOXICOLOGICAS DE ALGUNOS METALES

CADMIO.- Investigaciones recientes han demostrado que existe cierta relación entre la presencia de diversas enfermedades y la concentración de cadmio en la sangre (aún a muy bajas concentraciones). Los principales trastornos presentados por la intoxicación con cadmio se manifiestan en: deformaciones óseas que producen deficiencias mecánicas en la estructura y por lo tanto se incrementan los riesgos de fracturas. Además se presentan fenómenos como la disminución de las concentraciones normales de calcio y proteínas, las cuales se presentan conforme se incrementa la concentración de cadmio en la sangre.

El cadmio y sus compuestos son tóxicos en todas sus formas de administración, produciendo trastornos agudos y crónicos, que varían de intensidad, desde una simple irritación hasta la muerte. El cadmio es tóxico en casi todos los sistemas y funciones corporales. La inhalación produce enfisema pulmonar, seguida de bronquitis crónica. Exposiciones muy prolongadas genera daños al riñón y en consecuencia proteinuria; así concentraciones de 200 μ g/gr causa un daño definitivo al riñón el cual pierde por completo todas sus funciones. Además causa alteraciones de tipo hepáticas. Estudios de laboratorio han demostrado que el cadmio promueve el crecimiento de células cancerosas.

Científicos de U.S. han encontrado correlaciones entre los niveles de cadmio y la presencia de arteriosclerosis, y otras alteraciones como hipertensión arterial, y en consecuencia una disminución en las expectativas de vida.

El cadmio es excesivamente tóxico para los peces; concentraciones entre 0.008 y 0.01 mgr/gr pueden ser letales para algunas especies. Concentraciones de Cd(OAc)₂ entre 25 y 50 ppm generan una marcada osteoporosis. En rangos superiores se produce hiperplasia y necrosis del epitelio, debilitando las branquias. La muerte se produce probablemente por las interferencias presentes en el proceso de respiración. Aún en concentraciones muy bajas se presentan daños branquiales. Además se generan alteraciones morfológicas e histológicas en los órganos internos; así pues el corazón, bazo, músculo esquelético y aletas son degeneradas.

COBRE.- El cobre mezclado con el forraje causa anemia hemolítica y necrosis hepática en cerros y ganado vacuno. La gran toxicidad del cobre es la causa fundamental de la enfermedad de Wilson, éste puede ser reconocido fácilmente por el desorden que produce, siendo un ejemplo significativo de la toxicidad del cobre en el ser humano.

En ganado vacuno 60 ppm de cobre en peso seco provoca diarrea, problemas en los huesos, anemia y disturbios en la reproducción.

Las concentraciones de cobre en un rango de 0.01 a 1.7 ppm es tóxico para los peces y en concentraciones pequeñas de 0.027 ppm es tóxico para los insectos acuáticos. Los iones de cobre son muy tóxicos para la fotosíntesis de las algas verdes y las diatomeas, en concentraciones normales de cobre en aguas naturales.

La concentración máxima aceptable en el plano de los peces es entre 0.03 y 0.08. La supervivencia de los invertebrados decrece entre 12.9 y 6.2 ppb.

CROMO.- El cromo se considera como un metal esencial en el organismo cuando se encuentra a bajas concentraciones, al aumentar éstas, el cromo VI es muy tóxico por su solubilidad y fácil penetración al interior de las células, mientras que el cromo III es insoluble y de difícil ingreso.

La exposición a los compuestos de cromo, y ácidos crómicos produce irritación del tracto respiratorio y de la piel, perforación del septo respiratorio, ulceraciones y cáncer del tracto respiratorio.

Los compuestos de cromo hexavalente son mucho más tóxicos que los de cromo trivalente; la toxicidad es función de la solubilidad en el medio en que se encuentre.

Diversos autores han encontrado que el cromo es potencialmente cancerígeno, precursor del cáncer de pulmón, para los seres humanos y los animales. La toxicidad para los peces es parcialmente alta, concentraciones 1.2 a 5.0 ppm resulta fatal para muchas especies. Además en concentraciones relativamente bajas, también es tóxico para algunas especies de insectos acuáticos

MERCURIO.- Es un metal no esencial y muy tóxico para los seres vivos ya que aun en bajas concentraciones la forma elemental y los compuestos orgánicos e inorgánicos son altamente nocivos.

El envenenamiento agudo con mercurio puede resultar de la inhalación de mercurio inorgánico en concentraciones de $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los síntomas son sabor metálico, náuseas, dolor de estómago, vómito, diarrea, dolor de cabeza, salivación y alteraciones en el metabolismo del ácido urico. El contacto con mercurio elemental puede causar irritación pulmonar y daños cerebral, los síntomas son crónicos tal como son dolor muscular muy persistente en algunos casos. En casos extremos puede producir hemólisis, insomnio, delirio y finalmente la muerte por asfixia.

El envenenamiento crónico con mercurio es resultado de la inhalación de mercurio inorgánico en concentraciones menores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Anemia, hipotiroidismo y excitabilidad surgen como resultado del contacto continuo con pequeñas concentraciones como de 10 a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de mercurio elemental. En la industria el contacto con mercurio

elemental en concentraciones de 50 a 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ traen como consecuencia la pérdida de apetito y de peso. El envenenamiento crónico con mercurio inorgánico produce efectos primarios en el sistema nervioso.

Los efectos toxicológicos del mercurio en el hombre dependen del tiempo de contacto o de la cantidad ingerida. El cloruro de mercurio puede ser usado como medicamento como un purgante, diurético, antiséptico y antisifilítico. Se produce el envenenamiento cuando se ingiere en grandes cantidades.

Los compuestos orgánicos de mercurio pueden ser letales para el hombre.

El envenenamiento con alquimercurio puede causar daños cerebrales permanentes, desorden neuronal, tal como retardo mental y convulsión cerebral.

PLOMO.- Los haluros de plomo, los sulfatos, hidróxidos y fosfatos son compuestos muy insolubles; sin embargo el plomo se deposita en los huesos cuando se ingiere alguna de estas sales. El plomo está presente en los tejidos de algunos mamíferos aunque este no sea esencial en el proceso de nutrición.

Los compuestos orgánicos, como los tetraalquilados, son muy tóxicos. Estos compuestos son absorbidos en el tracto respiratorio, gastrointestinal, y la piel. Aunque una parte es metabolizada y liberada, la mayor parte se absorbe en el cerebro. Se ha encontrado que los compuestos orgánicos de plomo son cien veces más tóxicos que los inorgánicos. Además se sabe que los niños son mucho más sensibles que los adultos; estos desarrollan con más facilidad insuficiencias renales, hipertensión arterial, marcada retención de urea.

Los principales síntomas de intoxicación por plomo son: pérdida de apetito, sabor metálico, constipación nasal, anemia, malestares, debilidad, insomnio, irritabilidad, dolores de cabeza y cólicos. Las principales rutas de absorción del plomo en hombres y animales es la ingestión y la inhalación.

El plomo interfiere en la síntesis y desdoblamiento enzimático de algunos sistemas como el sanguíneo y renal. La anemia producida por plomo se asocia con la reticulosis y la alteración de la pared celular de las células sanguíneas, los síntomas de este padecimiento son: irritabilidad, fatiga y palidez. Las secuelas gastrointestinales incluyen cólicos, náuseas sin vómito y constipación, además de diarrea ocasional. El sistema nervioso central y periférico sufre daños severos, produciendo pérdida de capacidad motora, aunque no sensora. Los músculos de las manos y pies se ven afectados incluyendo la parálisis y gota. La encefalopatía puede presentarse en forma crónica. La ingestión de ciertas cantidades de plomo, rápidamente genera alteraciones nerviosas, coma y muerte por paro respiratorio. La absorción de compuestos alquilados produce psicosis y la muerte.

Es evidente que la característica de toxicidad o peligrosidad de estos residuos viene dada muchas veces por sólo determinados constituyentes, es por lo tanto importante clasificar estos constituyentes en función de su composición química y conocer los problemas que pueden surgir de su manipulación no controlada.

ZINC. - Los efectos más comunes de intoxicación por zinc en humanos no son fatales, la inhalación, absorción de ácidos por ingestión de alimentos elaborados en contenedores galvanizados con zinc. Los compuestos clorados con zinc solo son fatales en altas concentraciones por inhalación.

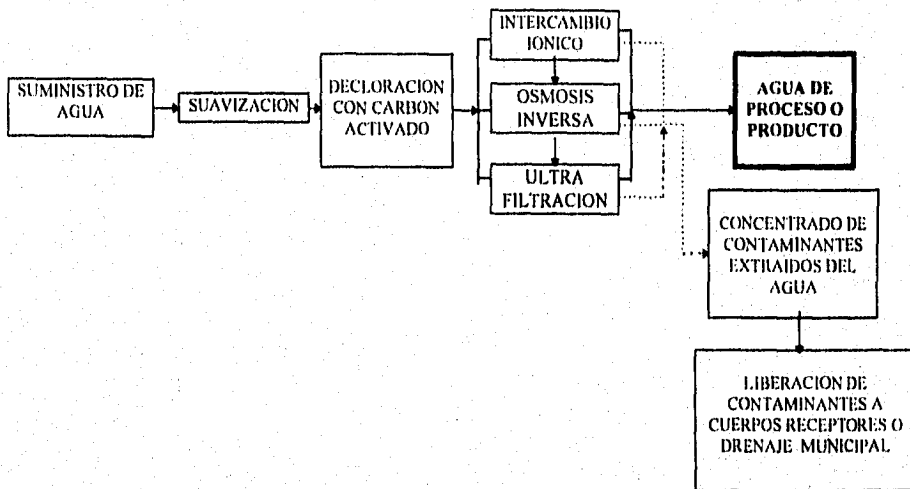
Se ha encontrado que posiblemente causa neumonitis, el contacto con sales de zinc produce dermatitis. Concentraciones de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es letal para algunos roedores, produciendo daños en los pulmones y en el hígado, concentraciones arriba de 1000000 de $\mu\text{g}/\text{día}$ produce alteraciones serias en otros animales domésticos. La toxicidad del zinc se incrementa cuando se mezcla con otros metales como el plomo y el cadmio.

2.3. MECANISMO DE IMPACTO ECOLOGICO DE LOS EFLUENTES DE LA REGENERACION DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.

Como se menciono anteriormente, la industria de procesos que genera bienes de consumo humano como alimentos y medicamentos, es una de la principales precursoras de la generación de este tipo de contaminantes. Lo anterior se observa claramente dentro del esquema general que siguen estas industrias para purificar el agua que utilizan en sus procesos y sus productos. (Fig. 11.1)

Considerando que este esquema aplica al sector alimentario y el farmacéutico, y además estos se encuentran en un constante desarrollo y expansión, tenemos que la problemática intrínseca a la generación de agua residual, se agudiza conforme estos sectores crecen y se desarrollan. Es claro que nuestro país tendrá que abordar tal problemática de manera integral; aunque solamente se esta haciendo mención de una parte de ella; ya que sería muy complejo el pretender abordarla en toda su extensión, abarcar todo el problema implicaría otro tipo de estudio e investigación más estratificada, por lo que se hace hincapié que el presente trabajo solamente pretende cubrir lo inherente a la contaminación del agua proveniente del proceso de intercambio iónico y específicamente al caso de los metales pesados.

Fig. II.1
 ESQUEMA GENERAL DE "PURIFICACION-CONTAMINACION" DE AGUA



2.3.1. RUTA DEL EFLUENTE

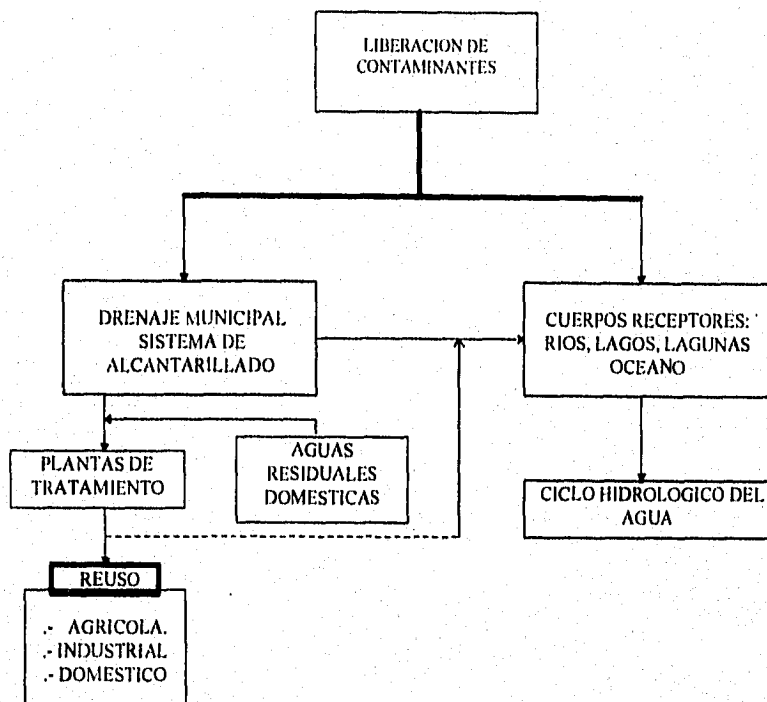
A la vez que son regenerados los lechos de intercambio iónico se genera un efluente de regeneración, el cual contiene a los iones liberados por las resinas (sales de aniones y/o cationes) en una mezcla, que puede ser ácida o alcalina dependiendo del tipo de lecho que ha sido regenerado. Posteriormente se revisará el proceso de regeneración, por lo que en esta parte solamente es importante tener en cuenta que el efluente que se está generando durante este proceso contiene a varios de los metales descritos con anterioridad.

En nuestro país este tipo de efluentes pueden seguir dos rutas genéricas que son:

- A) Descarga al sistema de alcantarillado municipal.
- B) Descarga a cuerpos receptores como ríos, lagos, presas o el océano.

Partiendo del esquema anterior, en la etapa donde se descargan los contaminantes liberados en la regeneración de las resinas, tendremos:

Fig. II.2



Como podemos observar ambas rutas finalmente se convierten en una sola; sin embargo el impacto que representa cada una es diferente.

En el caso en que la descarga se hace directamente al sistema de alcantarillado municipal, el efluente de interés se puede mezclar con otras aguas de tipo industrial o aguas residuales domésticas. El curso del sistema de alcantarillado también tiene dos opciones que son A) Dirigirlo a plantas de tratamiento B) Dirigirse a cuerpos receptores.

A) EFLUENTE CON DIRECCION HACIA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO

Los metales pesados se consideran como el vector de diseño del proceso de tratamiento solamente en el caso de manejar efluentes provenientes de la industria de galvanoplastia, recubrimientos metálicos, etc, por presentarse en altas concentraciones. Debido a que el objeto de estudio es un efluente proveniente de otro tipo de industria, el efluente de interés tendrá características diferentes a los de las industrias metal-mecánicas.

Cuando el efluente se dirige a una planta de tratamiento, el hecho de que se encuentre mezclado con otro tipo de efluentes determinará si los metales contenidos se tomarán como factor de peso para el tipo de tratamiento que se aplicará; esto es, si el efluente de interés ya se mezcló con otro tipo de aguas, es muy probable que el contaminante principal ya no solo sean los metales contenidos inicialmente, sino que existan otros en mayores concentraciones los cuales son los que se tomarán en cuenta para el tratamiento a implementar.

En virtud de que en esta fase del curso del efluente las concentraciones de metales ya son relativamente bajas, la mayoría de los procesos de tratamiento, existentes en nuestro país, no consideran a los metales como un elemento importante para su remoción por lo que no se han implementado procesos que eliminen en mayor proporción a estos componentes. Sin embargo, el que las concentraciones sean bajas no implica que la presencia de estos metales deje de ser un factor importante de contaminación.

Como se ha revisado, la "asimilación natural" de los metales es lenta y acumulativa, por lo que aún en bajas concentraciones la constante descarga de efluentes con estos elementos implicará la acumulación de los mismos en los sistemas naturales que los reciban. En el caso de una planta de tratamiento los metales pesados pueden afectar directamente a los procesos de tipo biológico que se tengan implementados para el tratamiento de efluentes en la misma; puesto que resultan tóxicos para algunos microorganismos encargados de degradar la materia orgánica presente en los efluentes. Además como ya se ha mencionado, al presentarse en bajas concentraciones, los metales generalmente no son removidos del efluente y por lo tanto quedan dentro del agua tratada la cual puede ser utilizada en servicios industriales, riego, recreación o sencillamente descargada en los cuerpos receptores correspondientes.

En esta etapa es donde se presentan riesgos a mediano y largo plazo, ya que tanto al reutilizar el agua en servicios de riego o recreación ó bien descargada a cuerpos receptores, invariablemente los metales contenidos en esta agua afectarán a todo sistema vivo además de acumularse en los sistemas naturales como el suelo y mantos acuíferos que a la larga es un factor más de contaminación.

B) EFLUENTE DESCARGADO DIRECTAMENTE A CUERPOS RECEPTORES

Cuando el efluente se descarga directamente a cuerpos receptores (independientemente del cumplimiento de la normatividad), el impacto a los sistemas naturales es más directo y a más corto plazo; puesto que al no ser tratado el efluente este lleva consigo otro tipo de alteraciones y contaminantes como ácidos o bases que fueron utilizados en la regeneración.

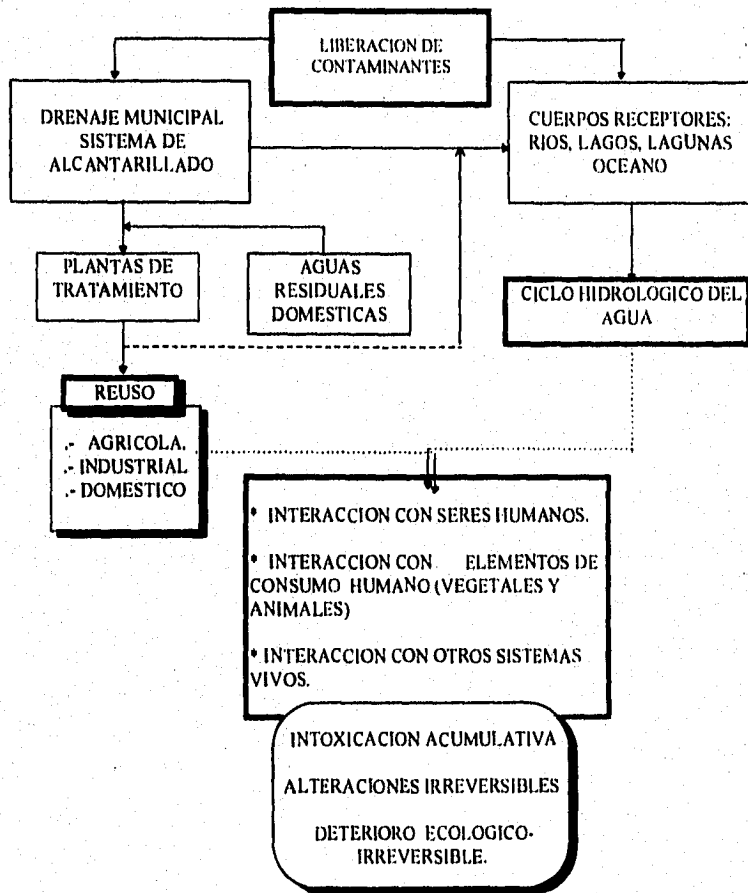
La consecuencia final es la misma que el caso anterior solo que es a un período de tiempo más corto. Así pues el cuerpo receptor recibirá directamente un efluente que contiene sales de metales los cuales se acumulan en el suelo y se absorben por los seres vivos generando las alteraciones que finalmente llevan a un deterioro global del ecosistema circundante. Además es importante señalar la posibilidad de que la acumulación de estos materiales en el suelo implica el subsecuente riesgo de contaminar mantos acuíferos que provean de agua para consumo humano y/o animal; lo que implica un riesgo más directo para la salud y bienestar de los seres humanos debido a los efectos negativos ya conocidos.

La interacción del efluente con el medio ambiente se observa en el diagrama representado por la Fig 11.3. Es fácil observar las posibles consecuencias que genera el descargar este tipo de efluentes al medio ambiente, por lo que se plantea la necesidad de establecer metodologías que permitan eliminar estos elementos tóxicos de las aguas residuales que provienen de la regeneración de lechos de intercambio iónico.

Los procesos ya existen; sin embargo, no se le ha dado el debida enfoque a la aplicación de los mismos, ya que en nuestro país se utilizan solamente para eliminar altas concentraciones de metales sin considerar que aún en bajas concentraciones estos resultan nocivos para el medio ambiente y el ser humano en general.

Así pues, el presente trabajo pretende hacer una revisión de los procesos o metodologías que permitan eliminar eficientemente los metales pesados en este tipo de efluentes.

Fig. 11.3



CAPITULO III
CARACTERIZACION DEL
EFLUENTE

CARACTERIZACION DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE LA REGENERACION DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.

El proceso general para purificar agua mediante el mecanismo de intercambio iónico, se puede resumir en las siguientes etapas:

- a) Almacenamiento de agua potable.
- b) Decoloración y eliminación de materia orgánica volátil de la corriente de agua mediante un filtro de carbón.
- c) Desionización, que puede ser en dos columnas con un lecho aniónico y otro catiónico respectivamente, o bien, una columna con lecho mixto que generalmente resulta ser más eficiente en términos de tiempo y costos de operación.
- d) Procesos de purificación como la Destilación, ultrafiltración o Ósmosis inversa, dependiendo del uso final que se le de al agua.
- e) Desinfección y despirogenización (ozono, filtros terminales etc.)

Es precisamente en la etapa de regeneración de lecho, donde se ve involucrada la generación de efluentes que contienen la mayoría de los contaminantes inorgánicos que se extrajeron al agua purificada.

En la actualidad los lechos de intercambio iónico consisten de resinas orgánicas, las cuales tienen la capacidad de intercambiar iones del agua que fluye a través de ella.

3.1. MECANISMOS DE INTERCAMBIO IONICO

Primeramente es necesario explicar el funcionamiento de las resinas de intercambio iónico: una resina de intercambio catiónico (en la cual se intercambian iones de hidrógeno por cationes tales como el calcio, níquel, etc.) consiste generalmente en un compuesto polimérico con iones hidrógeno que son fácilmente reemplazables por otros cationes, quedando entonces la resina con el ion metálico que se desea eliminar de la solución tratada. Por ejemplo, el catión Mg^{++} puede sustituirse en la resina por dos iones H^+ .

En una resina de intercambio aniónico, un ion con carga negativa tal, como el Cl^- puede reemplazar al anión OH^- que se encuentra débilmente ligado al polímero.

Así pues, la solución que contenga aniones y cationes puede pasarse a través de un lecho mixto (tanque con ambas resinas). Las resinas tienen una cierta capacidad para intercambiar cationes y aniones, cuando dicha capacidad se agota con el uso, la resina debe ser regenerada.

Una forma eficiente de regenerar la resina de intercambio catiónica, es pasar a través de ésta y en contra corriente un ácido fuerte, por ejemplo el HCl , entonces el ion H^+ pasará a formar parte de la resina y el catión que ésta tenía formará una sal con el anión del ácido.

La resina aniónica se regenera con un álcali fuerte, generalmente hidróxido de sodio, y de forma similar se reemplazan los iones OH^- .

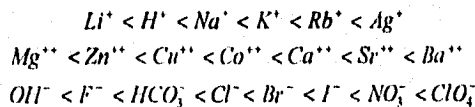
Las reacciones de separación se complementarán hasta un punto que depende del equilibrio que se establezca entre los iones en la fase acuosa y los de la fase sólida. Para la eliminación del sodio, este equilibrio viene definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{[H]X_{RH}}{[Na]X_{RNA}} = K_{H \rightarrow Na} \quad (3.1)$$

Donde:

- $K_{H \rightarrow Na}$ = Coeficiente de selectividad.
- [] = Concentración en la fase en solución.
- X_{RH} = Fracción molar de hidrógeno en la resina de intercambio.
- X_{RNA} = Fracción molar de sodio en la resina de intercambio.

El coeficiente de selectividad depende principalmente de la naturaleza y valencia del ion, del tipo de resina y de su saturación y de la concentración del ion en el agua residual. En realidad, para una serie dada de iones semejantes, se ha comparado que las resinas intercambiadoras exhiben un orden de selectividad o de afinidad por los iones. Se indican en seguida algunas series típicas de las resinas sintéticas de intercambio catiónico y aniónico:



En la práctica, los coeficientes de selectividad son determinados en laboratorio y solamente son válidos para las condiciones bajo las cuales se han medido. A bajas concentraciones, el valor del coeficiente de selectividad para intercambio de iones monovalentes por iones

divalentes es, en general, mayor que el intervalo de iones monovalentes por iones monovalentes. Este hecho ha limitado, en muchos casos, el uso de resinas sintéticas para eliminación de ciertas sustancias del agua residual, tales como amoníaco en forma de ion amonio. Sin embargo, existen ciertas zeolitas que intercambian NH_4^+ o Cu^{2+} .

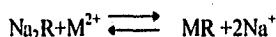
Las capacidades de las resinas de intercambio varían según el tipo y concentración del regenerante utilizado. Las capacidades de intercambio de las resinas suelen expresarse en kilogramos de carbonato de calcio por metro cúbico de resina (Kg/m^3) o equivalente-gramo por metro cúbico.

Aunque se dispone de resinas de intercambio iónico naturales y sintéticas, son estas últimas las más usadas en razón de su durabilidad.

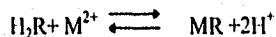
3.1.1. Resinas catiónicas

Las resinas de intercambio catiónico separan los cationes de una solución (agua en el presente caso), intercambiándolos por iones sodio (ciclo del sodio), o por iones hidrógeno (ciclo del hidrógeno). La separación se representa en la siguiente ecuación:

Para el ciclo de sodio:



Para el ciclo del hidrógeno:



Donde:

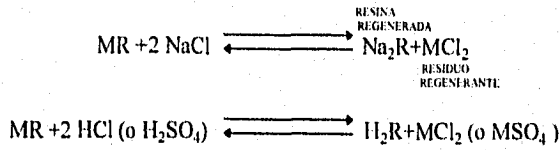
R: resina catiónica

M^{2+} : Cation

Generalmente en este caso los iones Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} quedan retenidos sobre la resina y se produce una corriente de agua "blanda", esta corriente contiene principalmente sales de sodio, si se emplea el ciclo de sodio, o bien ácido si se emplea el ciclo del hidrógeno.

Cuando la capacidad de intercambio de la resina se agota, esta debe regenerarse. Antes de la regeneración, el lecho se lava a contraflujo (retrolavado) para eliminar los depósitos sólidos. La regeneración consiste en hacer pasar una corriente de NaCl (para el ciclo de sodio) o de una solución ácida, normalmente H_2SO_4 o HCl (para el ciclo del hidrógeno).

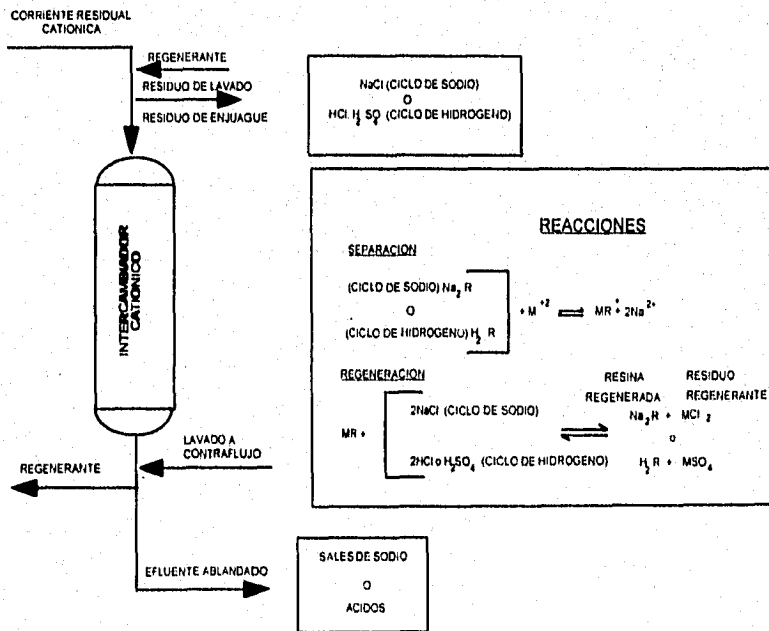
Las resinas de regeneración de los ciclos de sodio e hidrógeno respectivamente, son:

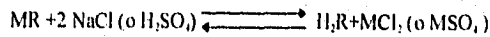


Las concentraciones típicas del regenerante son del 15% al 40% en peso con caudales de 40-80 l/min·m². Como puede observarse, el residuo regenerante está conformado por sales catiónicas. Esta corriente residual supone del 10-15% del volumen del efluente tratado antes de la ruptura. Esto es; por cada metro cúbico de agua desionizada generada se producen 0.15 metros cúbicos de residuo regenerante.

Las reacciones involucradas en los intercambiadores catiónicos; así como las direcciones del flujo de las respectivas corrientes, se ilustran en la figura III.1.

FIGURA III.1





Se observa que el residuo regenerante puede ser MCl_2 , o bien, MSO_4 ; dependiendo del ciclo utilizado (sodio o hidrógeno), y los cuales son sales de cualquiera de los cationes extraídos del agua que se purificó. De esta manera tenemos un efluente con los siguientes componentes:

TABLA III.2
COMPUESTO

Ciclo de sodio	Ciclo de hidrógeno
CuCl ₂	CuSO ₄
ZnCl ₂	ZnSO ₄
NiCl ₂	NiSO ₄
CaCl ₂	CaSO ₄
Pb Cl ₂	Pb SO ₄
Cd Cl ₂	Cd SO ₄
MgCl ₂	MgSO ₄

FUENTE: "Tratamiento de Aguas Residuales"; R.S.Ramalho

Todos estos componentes están acompañados por un exceso de salmuera o de ácido, según sea el caso. El volumen en que se contienen dependiendo del tipo de resina que se generó; como ya se mencionó, la cantidad de regenerante depende de la cantidad de resina y en consecuencia el volumen de efluente estará determinado por la cantidad de regenerante utilizado además del volumen de agua de lavado que se requiera. En consecuencia la concentración de cada uno de los componentes enlistados es función de la cantidad de resina presente en el lecho de intercambio iónico; mientras que la cantidad de resina requerida para el intercambio iónico es función de la cantidad de agua desionizada que se requiere manejar.

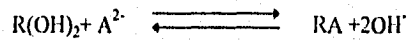
b) Lecho de resina aniónica.

De acuerdo a las siguientes ecuaciones:

3.1.2. Resinas aniónicas

Las resinas intercambiadoras aniónicas separan aniones de una solución, intercambiándolos por iones oxhidrilo.

La separación viene representada por:

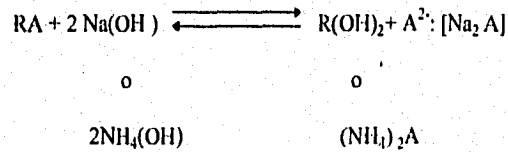


Donde:

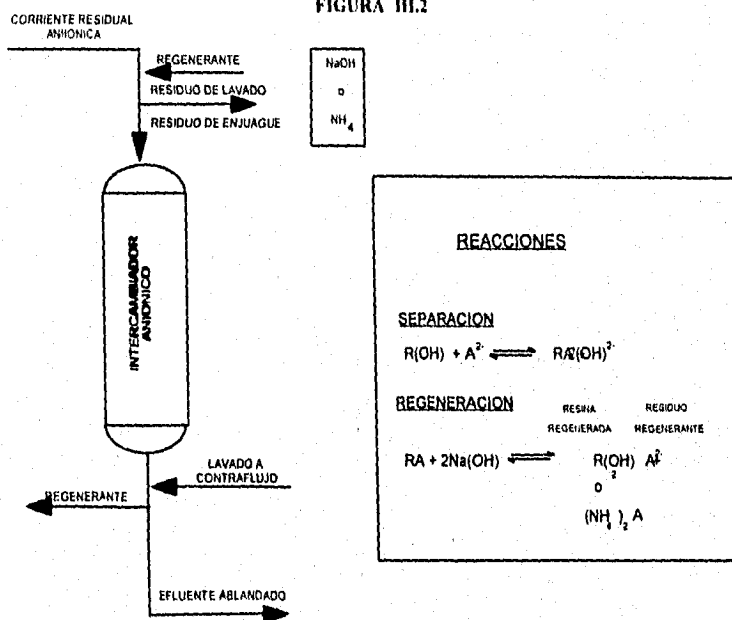
R: resina
A²⁻: Anión

De esta forma, aniones tales como SO₄²⁻, CrO₄²⁻, etc. se eliminan de la solución

La regeneración se efectúa después de la ruptura, normalmente precedida por el lavado a contracorriente para eliminar los depósitos de sólido. Los regenerantes usados son hidróxido de sodio y amonio. Las reacciones involucradas en la regeneración son:



Las concentraciones normales de regenerante son de 15-30% en peso. Las reacciones y direcciones de flujo involucradas en un intercambiador aniónico se muestran en la Fig III.2.



En un desionizador de lecho mixto, las resinas catiónicas y aniónicas son mezcladas perfectamente en una sola columna. El desionizador de lecho mixto conduce a una reacción de intercambio completo, removiendo todas las impurezas o contaminantes ionizados presentes en el agua.

Para el caso de un sistema de desionización con dos columnas, lecho aniónico y lecho catiónico separados en dos intercambiadores diferentes, tiene la ventaja de una gran capacidad de producción; sin embargo presenta baja calidad en el agua obtenida, comparada con un lecho mixto.

3.1.3. Consumo de regenerante

El consumo de regenerante se expresa en unidades de peso por unidad de volumen de resina (por ejemplo Kg de HCl/m³). El grado de capacidad teórica alcanzada (con respecto a la resina fresca) depende del peso del regenerante empleado. Las curvas de funcionamiento de los regenerantes (capacidad de intercambio de la resina regenerada en función del peso del

regenerante), son determinadas en estudios de laboratorio, y a veces son proporcionados por los fabricantes de las resinas.

Considerando que la capacidad de intercambio de la columna aumenta con el peso del regenerante, se puede intuir por lo tanto el consecuente incremento del efluente de regeneración y en consecuencia el desalojo de los contaminantes al drenaje. A su vez una columna requerirá regenerarse en función de la cantidad de agua desionizada que produce; a mayor capacidad de desionización, menor tiempo entre regeneración y regeneración, lo que a su vez implica una mayor liberación de los contaminantes concentrados en las resinas.

3.1.4. Consumo de agua de lavado

A continuación de la regeneración, el lecho del intercambiador se lava con agua para separar el regenerante residual. El consumo de agua de lavado, determinado también en estudios de laboratorio, se proporciona por el fabricante o proveedor de la resina. Este consumo se expresa en litros de agua/litros de resina. El intervalo normal es de 10-30 lts. de agua por cada litro de resina. Sin embargo este factor depende primordialmente del tipo de resina comercial que se utilice, además del arreglo operativo en el proceso.

El siguiente grupo de tablas muestran datos típicos de diversas propiedades para la familia de resinas AMBERLITE IR-## (MR):

CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS

(Ciclo forma de sodio o hidrógeno)

pH	1.0 a 14.0
Temperatura Máxima	121°C (250 ° F)
Altura mínima del lecho	61 cm (24 pg)
Flujo de retrolavado	Dependiendo del proceso.
Flujo de enjuague	2 gal/pie ³ /min 16*VR/hr

VR: volumen de la resina.

OPERACION DEL CICLO DE HIDROGENO

Concentración de regenerante:	1 a 5% para H ₂ SO ₄ 4 a 10% para HCl
Flujo de regenerante:	0.5 a 1.0 gal/pie ³ /min 4 a 8 VR/hr

Flujo de enjuague:	Inicialmente igual al flujo de regenerante, después puede aumentarse a 1.5 gal/pie ³ /min 12 VR/hr
Requerimientos de agua de enjuague:	25 a 75 gal/pie ³ (3.4 a 10.1 VR)

OPERACION CICLO DE SODIO

Concentración del regenerante:	10% NaCl
Flujo de regeneración:	1 gpm/pie ³ 8 VR/hr
Flujo de enjuague:	1 gpm/pie ³ inicial, después 1.5 gpm/pie ³ 12 VR/hr
Requerimientos de agua de enjuague:	25 a 75 gal/pie ³ 3.4 a 10.1 VR/hr

Fuente: Proveedor de Resinas Amberlite

3.2. PROPIEDADES FISICAS

FORMA FISICA. - Uniforme, resistente a la atrición, partículas esféricas empaquetadas en la forma salina cloruro, en condición húmeda.

PESO DE EMBARQUE. - 43 lbs, por pie cúbico (690 gr/lit).

CONTENIDO DE HUMEDAD. - 54%

TAMAÑO DE MALLA (HUMEDA). - 16 A 50 MALLAS (NORMA U.S. STANDAR SCREEN)

CONTENIDO DE FINOS. - 1% a través de malla 50 MALLAS (NORMA U.S. STANDAR SCREEN).

HINCHAMIENTO. - Máximo 22% sobre la conversión completa de la resina de la forma cloruro a la forma hidróxido.

TAMAÑO EFECTIVO: 0.50 mm.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD.- 1.5 "

NIVEL DE REGENERACION.- El nivel de regeneración empleado dependerá de la capacidad requerida en el ciclo de operación. La relación entre la capacidad de las resinas Amberlite IRA-### y varios ácidos como una función del nivel de regeneración se ilustra en la tabla de remoción de ácidos que se presenta a continuación:

TABLA III.1

Lbs. De NaOH/pla de resina	HCL	H ₂ SO ₄	H ₂ SiO ₃	H ₂ CO ₃	HNO ₃	H ₃ PO ₄	CH ₃ COO H
2	9.0	11.3	---	16.0	4.7	14.0	13.9
4	12.0	14.6	12.6	19.0	7.9	16.1	19.8
8	14.9	17.5	16.7	21.3	11.3	18.4	23.4
10	17.0	19.6	18.9	21.7	13.0	19.8	25.2
12	20.1	22.9	22.0	22.0	15.6	21.8	27.0

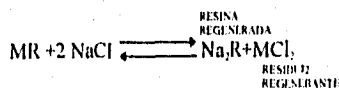
Fuente: Proveedor

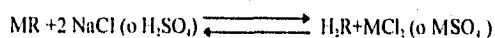
3.2.1. Componentes del efluente de regeneración

Una vez definidos los mecanismos presentes en un proceso de intercambio iónico, y a su vez el propio de una regeneración de lecho de intercambio iónico; podemos establecer un cuadro general de los componente del efluente de la regeneración, dependiendo del tipo de lecho que se utilice:

a) Lecho de resina catiónica.

De acuerdo a las ecuaciones:





Se observa que el residuo regenerante puede ser MCl_2 , o bien, MSO_4 ; dependiendo del ciclo utilizado (sodio o hidrógeno), y los cuales son sales de cualquiera de los cationes extraídos del agua que se purificó. De esta manera tenemos un efluente con los siguientes componentes:

TABLA III.2
COMPUESTO

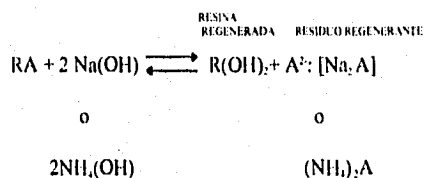
Ciclo de sodio	Ciclo de hidrógeno
$CuCl_2$	$CuSO_4$
$ZnCl_2$	$ZnSO_4$
$NiCl_2$	$NiSO_4$
$CaCl_2$	$CaSO_4$
$PbCl_2$	$PbSO_4$
$CdCl_2$	$CdSO_4$
$MgCl_2$	$MgSO_4$

FUENTE: "Tratamiento de Aguas Residuales"; R.S.Ramallo

Todos estos componentes están acompañados por un exceso de salmuera o de ácido, según sea el caso. El volumen en que se contienen dependiendo del tipo de resina que se generó; como ya se mencionó, la cantidad de regenerante depende de la cantidad de resina y en consecuencia el volumen de efluente estará determinado por la cantidad de regenerante utilizado además del volumen de agua de lavado que se requiera. En consecuencia la concentración de cada uno de los componentes enlistados es función de la cantidad de resina presente en el lecho de intercambio iónico; mientras que la cantidad de resina requerida para el intercambio iónico es función de la cantidad de agua desionizada que se requiere manejar.

b) Lecho de resina aniónica.

De acuerdo a las siguientes ecuaciones:



De manera similar al caso anterior, el residuo regenerante podrá ser: $[\text{Na}_2\text{A}]$; o bien, $(\text{NH}_4)_2\text{A}$. En donde A^- , pueden ser los aniones SO_4^- , CrO_4^- ; que combinados con el regenerante nos darían Na_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, y Na_2CrO_4 , o $(\text{NH}_4)_2\text{CrO}_4$.

En conclusión el efluente de la regeneración de un lecho aniónico, generalmente contendrá a cualquiera de estas dos sales más un exceso de regenerante, en un volumen y concentración de los mismos que dependen también de la resina que se regeneró.

c) Lecho mixto.

En este caso, en el que ambos tipos de resinas son mezcladas perfectamente en una sola columna, la regeneración se efectúa de forma similar a los dos casos anteriores, solamente que se estipula una secuencia; es decir, primeramente se separan las resinas por medio de fluidización y posteriormente se regenera la resina catiónica y después la resina aniónica, para luego efectuar lavados a contraflujo y volver a mezclar las resinas.

En consecuencia el efluente obtenido de esta regeneración, contendrá a todo el grupo de compuestos enlistados en la siguiente tabla y además un exceso de los dos tipos de fluido regenerante; lo cual nos da una mezcla final constituida por:

TABLA III.3

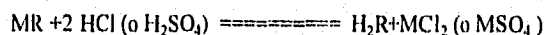
Ciclo de sodio	Ciclo de hidrógeno
CuCl_2	CuSO_4
ZnCl_2	ZnSO_4
NiCl_2	NiSO_4
CaCl_2	CaSO_4
PbCl_2	PbSO_4
CdCl_2	CdSO_4
MgCl_2	MgSO_4
Na_2SO_4	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Na_2CrO_4	$(\text{NH}_4)_2\text{CrO}_4$
más un exceso de:	
Na(OH)	$\text{NH}_4(\text{OH})$
NaCl	$\text{HCl (o H}_2\text{SO}_4)$

FUENTE: "Tratamiento de Aguas Residuales"; R.S.Ramalho

En la práctica generalmente se utiliza con mayor frecuencia el HCl y NaOH, para desionizar agua potable (generalmente un relativo bajo contenido de iones metálicos). Además de que, si bien se pueden regenerar por separado los lechos anionico y cationico, los efluentes separados se mezclan en un carcamo donde se acumulan para su posterior descarga al drenaje. También es muy importante considerar la formación de hidróxidos metálicos que se pueden formar por la presencia del exceso de OH's en el medio; además que las resinas siempre se fraccionan en pequeñas partículas debido a los esfuerzos durante la fricción generada en la fluidización continua de los lavados, teniendo por lo tanto una fracción de particulado de resinas, tanto anionicas como cationicas. De esta manera, para un caso general tendríamos los siguientes equilibrios:

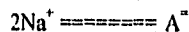
Particulado de resinas: $\text{H}_2\text{R, R(OH)}_2$



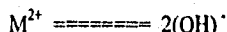
Residuo regenerante:



Residuo regenerante:



Exceso de hidróxidos:



La presencia de estos compuestos dependerá de la calidad de agua que fue desionizada inicialmente; es decir, los cationes y aniones (en el caso del cromo) metálicos presentes en el agua que se alimenta al lecho de intercambio iónico, también lo estarán en el efluente de la regeneración del lecho de intercambio.

Si bien la presencia de todos ellos no es común (para el presente caso de estudio), si es posible tener a dos o más de ellos en el agua que se desioniza y por lo tanto en el efluente de regeneración, además de considerar los grandes volúmenes de agua que se generan en este proceso.

Como puede observarse, se hace mención solamente de las posibles sales metálicas obtenidas en la regeneración, ya que estas son el mayor constituyente de este tipo de

efluentes. Esto debido a que los otros contaminantes se eliminan en etapas anteriores o posteriores a la desionización .

En conclusión, el efluente generalmente contendrá cualquiera de los grupos de sales mencionadas, además, de las características físico-químicas que son resultado de la presencia de estos compuestos, y estas son calor específico, conductividad, sólidos disueltos y un pH característico.

Estas características le proveen de las siguientes propiedades generales:

Color: turbia blanquecina.

Olor: el característico a la sosa caústica.

Temperatura: 19-25°C.

PH: >12

Consistencia: agua con la inminente presencia de sólidos suspendidos (hidróxidos insolubles)

Volumen: 15 m³ de efluente/ m³ de resina regenerada (valor promedio para lechos mixtos, aniónicos y/o catiónicos)

Como se pudo observar en el Capítulo II; el impacto ecológico que genera descargar (aún en bajas concentraciones); además de los grandes volúmenes que se generan (15 metros cúbicos por cada metro cúbico de agua desionizada obtenida), nos indica que el presente caso es un problema real de impacto ambiental como de costos de producción (el costo de la regeneración de las resinas de intercambio iónico se agrega al costo de producción de agua desionizada); por lo que se remarca la importancia de generar metodologías para aminorar la problemática inherente al caso.

**CAPITULO IV
DESCRIPCION DE
PROCESOS**

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es la remoción de sustancias contaminantes a fin de evitar efectos negativos en la calidad del agua de los cuerpos receptores.

Los contaminantes de las aguas residuales se eliminan mediante procesos físicos, químicos y biológicos, dependiendo de su origen y del uso que se dé al agua una vez tratada. Los métodos individuales comúnmente se clasifican como operaciones unitarias físicas y procesos unitarios químicos y biológicos.

Las operaciones unitarias físicas comprenden :

- ◊ Desbastado (cribado)
- ◊ Igualación.
- ◊ Absorción.
- ◊ Sedimentación.
- ◊ Flotación.
- ◊ Filtración.

Los Procesos químicos comunes son:

- ◊ Precipitación.
- ◊ Transferencia gaseosa.
- ◊ Floculación.
- ◊ Desinfección.

Los procesos biológicos emplean actividades del tipo bioquímico, mediante microorganismos capaces de oxidar a determinado grupo de contaminantes presentes en las aguas residuales.

En general, los tratamientos que emplean operaciones unitarias del tipo físico se le denomina Tratamiento Primario, si además incluyen la igualación y floculación se le llama primario Avanzado; mientras que a la utilización de procesos bioquímicos se le denomina Tratamiento Secundario. Cuando los efluentes utilizan algún tratamiento posterior a los mencionados se dice que se aplicó un Tratamiento Terciario. A su vez los procesos también se pueden clasificar en Físicos, Químicos, y Biológicos. En el sentido estricto de las aplicaciones, generalmente se utiliza una combinación de ellos.

La selección del tipo de tratamiento requerido es función del tipo de efluente a tratar; es decir, la eliminación de los contaminantes o componentes del agua residual serán los objetivos primordiales de estos tratamientos y como sus propiedades físicas y químicas son tan diversas requerirán de un método diferente y característico para ser removidos. Finalmente, el uso que se desee dar al agua tratada determinará si es necesario efectuar algún tratamiento posterior al efluente para de esta forma acondicionarlo a la calidad requerida.

En la actualidad existe una gran gama de metodologías para remover cierto tipo de contaminantes, lo cual restringe a unos o otros de manera distinta, como se muestra en la tabla IV.1. y IV.2

Como podemos observar, los principales métodos utilizados para la remoción de metales pesados se pueden clasificar como procesos con fundamento fisico-químico y se pueden resumir en:

1.- Precipitación química:

- a) Hidróxido de calcio.
- b) Sales de aluminio.
- c) Sales de hierro.

2.- Burbujas de Adsorción

3.- Osmosis Inversa

4.- Evaporación.

TABLA IV.1
RESUMEN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO QUIMICO PARA AGUAS RESIDUALES

PROCESO	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Precipitación Química	Metales y contaminantes inorgánicos	Remoción de contaminantes disueltos Bajo mantenimiento Remoción de metales Bajo costo de energía Fácil operación	Emisiones volátiles Dispone de lodos de desecho Remoción selectiva Requiere aditivos químicos
Remoción Electrolytica	Altas concentraciones de orgánicos, inorgánicos y metales	Remoción de contaminantes disueltos Remoción de metales Fácil operación No forma lodos	Alto capital y costos de operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a la suciedad
Intercambio Iónico	Bajas concentraciones de orgánicos, inorgánicos y metales	Remoción de contaminantes disueltos Remoción de metales Fácil operación El agua puede ser rehusada	Alto capital y costos de operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a la suciedad
Osmosis Inversa	Bajas concentraciones de orgánicos, inorgánicos y metales	Remoción de contaminantes disueltos Remoción de metales Fácil operación El agua puede ser rehusada	Alto capital y costos de operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a la suciedad
Oxidación-Reducción	Altas concentraciones de orgánicos y algunos inorgánicos	Remoción de contaminantes disueltos Alto grado de tratamiento	Alto capital y costos de operación Remoción selectiva Difícil mantenimiento Altos costos de energía Susceptible a la suciedad
Burbujas de Adsorción	Concentraciones considerables de sólidos disueltos	Bajo costo de operación y mantenimiento Remoción de metales Remoción de contaminantes disueltos	El material a retirar no debe ser ténsoactivo Se debe usar el colector y cantidad adecuados
Evaporación	Remueve cualquier soluto en solución	Genera residuos de poco volumen No requiere adición de sustancias químicas	Altos costos de operación y mantenimiento Problemas por incrustaciones

FUENTE (7): Anuario de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales; DGCOH.

TABLA IV.2 RESTRICCIONES FUNCIONALES DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO

NIVEL	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGÍA	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO		SENSIBILIDAD DEL PROCESO A VARIACIONES DE	
			MATERIAL	CAUDAL	MATERIAL	CAUDAL
PRELIMINAR	REMOCIÓN DE SÓLIDOS GRUESOS	1. CRIBADO	10	10	10	10
		2. DESARENACIÓN	10	10	10	10
	REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES	1. SEPARADOR DE PLACAS PARALELAS	20	20	20	30
		2. FLOTACIÓN CON AIRE DISUELT	40	30	20	60
PRIMARIO	REMOCIÓN DE SÓLIDOS SIN USO DE REACTIVOS	1. SEDIMENTACIÓN	10	10	10	20
		2. CRIBADO	30	20	30	20
	REMOCIÓN DE SÓLIDOS CON USO DE REACTIVOS	1. COAGULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN	10	30	10	20
		2. COAGULACIÓN Y FLOTACIÓN	10	30	10	30
SECUNDARIO	REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	1. AIREACIÓN EXTENDIDA	10	60	100	10
		2. AIREACIÓN CONVENCIONAL	10	30	30	30
		3. AIREACIÓN DE ALTA TASA	10	20	20	50
		4. AIREACIÓN MODIFICADA	10	20	20	100
		5. ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO	30	30	70	50
		6. ZANJA POR CONTACTO	40	10	10	10
		7. LAGUNA AIREADA MECANICAMENTE	10	20	20	20
		8. LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN	10	30	10	30
		9. LAGUNA CON PLANTAS ACUÁTICAS	20	100	40	80
		10. FILTRO ROCIADOR	40	30	20	60
		11. DISCO BIOLÓGICO	70	10	30	30
TERTARIO	REMOCIÓN DE NITRÓGENO POR MEDIOS BIOLÓGICOS	1. MEDIO SUSPENDIDO-FUENTE DE CARBÓN EXTERNA	60	20	30	20
		2. MEDIO SUSPENDIDO-FUENTE DE CARBÓN INTERNA	80	10	20	20
		3. MEDIO FIJO-FUENTE DE CARBÓN EXTERNA	60	30	30	30
	REMOCIÓN DE FÓSFORO POR MEDIOS BIOLÓGICOS	1. ABSORCIÓN EN MEDIO SUSPENDIDO	60	10	20	20
	REMOCIÓN DE FÓSFORO POR MEDIOS FÍSICO-QUÍMICOS	1. COAGULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN	10	10	10	30
		2. CARBÓN ACTIVADO	100	30	10	30
	REMOCIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS FINAS	1. FILTRACIÓN EN MEDIO MIXTO (ARENA-ANFRACTAJ)	10	40	10	30
		2. FILTRACIÓN MECÁNICA	40	20	10	20
	REMOCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS	1. CLORACIÓN CONVENCIONAL	10	60	20	30
		2. CLORACIÓN CON DIOXIDO DE CLORO	80	30	30	30
3. OZONIZACIÓN		60	100	30	70	
REMOCIÓN DE MATERIALES REFRACTARIOS, INCLUYE METALES PESADOS	1. INTERCAMBIO IÓNICO	20	10	10	100	
	2. OSMOSIS INVERSA	70	60	100	80	
	3. COAGULACIÓN-SEDIMENTACIÓN	10	30	10	30	
	4. CARBÓN ACTIVADO	100	50	10	40	

ESCALA: 10- CALIFICACION A PROCESOS QUE PRESENTAN POCAS RESTRICCIONES FUNCIONALES
100- CALIFICACION A PROCESOS QUE PRESENTAN CONDICIONES FUNCIONALES MUY RESTRINGIDAS

FUENTE(7): Anuario de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales; DGCOH.

4.1. REMOCION DE METALES PESADOS

Actualmente se aplican procesos diferentes a cada uno de los diversos metales existentes en el agua residual, y que por las características similares existentes entre ellos, algunos de estos procesos son aplicables de manera general para estos.

CADMIO

Los métodos de tratamiento para el cadmio contenido en agua residual son esencialmente aquellos usados para remover metales pesados de las aguas de desecho de procesos industriales. Estos métodos incluyen la precipitación (generalmente considerado como un tratamiento destructivo), y el intercambio iónico. Además de los procesos electrolíticos y la evaporación. Estas técnicas son muy útiles y eficaces para aguas de desecho con altas concentraciones de metal o después de concentrar por medio del intercambio iónico.

Los métodos de tratamiento para la remoción del cadmio de las aguas residuales de uso industrial son esencialmente:

- Precipitación química
- Intercambio iónico
- Evaporación
- Procesos electrolíticos

CROMO

Las diferentes técnicas que se utilizan para la eliminación del cromo de las aguas residuales son:

- Oxido-Reducción.- Reducción del cromo hexavalente, seguida de una precipitación del ion cromo trivalente.
- Intercambio iónico. Elimina cromatos y ácido crómico
- Evaporación
- Precipitación química
- Extracción con solventes
- Osmosis inversa
- Tratamientos biológicos

COBRE

Los métodos de remoción de cobre, son los más comunes en la remoción de metales pesados, estos son:

- Reducción
- Precipitación química
- Intercambio iónico
- Evaporación
- Electrodialisis

PLOMO

Los tratamientos usados para la eliminación del plomo son:

- Precipitación química
- Sedimentación
- Evaporación
- Intercambio iónico
- Floculación

ZINC

La remoción del zinc del agua residual se realiza por medio de:

- Precipitación química
- Intercambio iónico
- Evaporación
- Floculación

Actualmente se están desarrollando nuevas técnicas, que principalmente son de tipo biológico, para la remoción de este tipo de contaminantes, tales como:

- a) Absorción de metales en organismos vivos como lo son algas y lirios acuáticos.
- b) Quelación de metales con agentes quelantes de origen natural como la Quitosana, que es un polímero contenido en la cubierta protectora de algunos organismos como el camarón y langostino.
- c) Desarrollo de microorganismos estabilizadores de los lodos obtenidos en la precipitación de metales.

Este último bloque de metodologías se encuentran en plena fase de investigación y desarrollo por lo que sería muy difícil pretender describir técnicamente a cada uno de ellos y en consecuencia el pretender proponerlos como alternativas viables a corto plazo.

La aplicación de cualquier metodología dependerá de las características físico-químicas del effluente que contenga a los metales en cuestión; así como del grado de calidad que se desee obtener. En primera instancia cabe destacar que algunos de ellos presentan diversas restricciones de tipo técnico y/o económico por lo que se podrían descartar de inicio como una posible aplicación al presente caso de estudio.

De esta manera, a continuación se describen los más importantes y de mayor aplicación en la actualidad, aunque se podría decir que ningún tipo de industria en nuestro país le ha dado el presente enfoque a la cuestión de los metales pesados que con mucha frecuencia se encuentran presentes en los efluentes de la regeneración de lechos de intercambio iónico.

4.2. DESCRIPCION DE PROCESOS

4.2.1. PRECIPITACION QUIMICA

La precipitación química involucra la adición de reactivos químicos específicos para eliminar las sustancias disueltas en el agua con el fin de potabilizarla, o para separar los contaminantes de las aguas residuales.

En la precipitación química se separan las sustancias disueltas del agua o agua residual por medio de productos químicos solubles, los cuales al agregarse al agua, son liberados y sus iones reaccionan con los iones existentes en ella, formando precipitados. La eficiencia en la remoción de los contaminantes es función de estos; así como de los agentes químicos que se requieran adicionar para efectuar una buena separación. De manera general se puede decir que los porcentajes de remoción oscilan entre un 85 y un 95%.

La precipitación química es de gran interés debido a las aplicaciones siguientes:

- Se puede usar eficazmente para la remoción de fósforo de los efluentes de las plantas de tratamiento biológico de aguas residuales.
- Combinado con adsorción con carbón activado se logra un tratamiento completo, pudiéndose aplicar a los casos de aguas residuales que contengan compuestos orgánicos resistentes al tratamiento biológico.
- La floculación del hierro por medio de la cal añadida al agua o agua residual.

- La precipitación del hierro y manganeso por oxidación de oxígeno disuelto en el agua suministrado por aireación.
- La precipitación de fluoruros del agua por adición de fosfato tricalcico, o por la coprecipitación con los iones de magnesio en el ablandamiento de aguas.

Las sustancias precipitantes más comunes se presentan en la tabla IV.3

TABLA IV.3
PRODUCTOS QUIMICOS USADOS PARA LA PRECIPITACION
QUIMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

Producto químico	Formula química	Peso molecular
Sulfato de alumina	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$	666.7
Sulfato de hierro	$FeSO_4 \cdot 7 H_2O$	278.0
Acido sulfúrico	H_2SO_4	98.0
Anhidrido sulfuroso	SO_2	64.0
Cloruro férrico	$FeCl_3$	162.1
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	400.0
Cal (apagada)	$CaOH_2$	94.0
Cal (viva)	CaO	56.0

FUENTE(23): Tratamiento De Aguas Residuales; R.S. Ramalho

Los métodos de precipitación química están basados en los principios de coagulación - floculación-separación. Aplicando precipitación y coagulación es posible obtener un efluente claro, libre de materia en suspensión o en estado coloidal.

Los compuestos químicos utilizados en la precipitación y coagulación, deben cumplir las siguientes características:

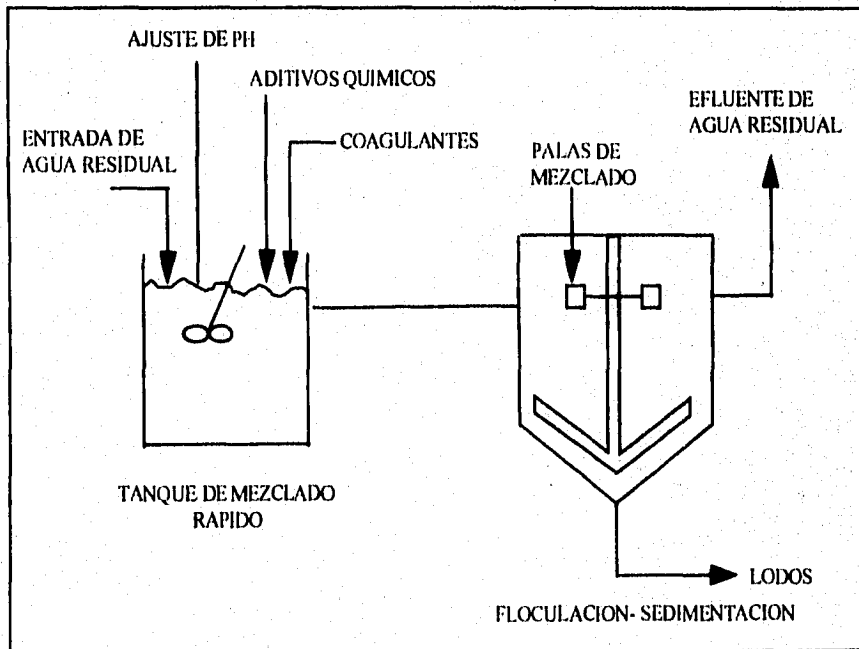
- Ser compuestos químicos que se encuentran normalmente en las aguas naturales, como por ejemplo, los hidróxidos y carbonatos.
- Tener cationes que formen compuestos insolubles, tales como el hierro y aluminio trivalentes.
- Ser material químico que no produzca residuos tóxicos.

En el proceso de precipitación química, además de los reactivos químicos empleados, son importantes y complementarias al proceso, las operaciones de dosificación, mezclado, floculación o agitación, y clarificación secundaria o filtración.

En el tratamiento químico se generan lodos residuales, compuestos por los flocúlos producidos por los reactivos químicos empleados y los sólidos (suspéndidos, sedimentables y disueltos) separados del agua residual.

Fig. IV.1

PRECIPITACION QUIMICA



4.2.2. COAGULACION QUIMICA

Los procesos mas comúnmente utilizadas en la purificación de aguas es la coagulación y la floculación, los cuales requieren de fenómenos físicos y químicos para producir la calidad del agua aceptable. Estos procesos se utilizan para eliminar partículas de diámetro pequeño, aproximadamente de 10 μm . La agregación de las parteculas finas por medio de los procesos de coagulación y floculación se realiza fácilmente a costos bajos.

El principio de la coagulación, es la formación del precipitado, en el cual se encuentran los iones metálicos que se desean remover. Esto ocurre por la adición de reactivos químicos, o bien, por el simple ajuste de pH. Esta etapa requiere de una agitación vigorosa para favorecer la adecuada dispersión del precipitado en el efluente ayudando a disminuir su actividad.

Las dos funciones principales de la coagulación química son la desestabilización de partículas y la resistencia de los floculos evitando su ruptura.

La coagulación se efectúa por tres mecanismos diferentes:

a) Reducción de cargas electrostáticas por absorción de iones de carga contraria.

Este mecanismo se basa en que los coloides generalmente presentan cargas negativas, por consiguiente, la adsorción de cationes a partir de sales metálicas, coagulantes, o de polímeros catiónicos, reducen o neutralizan su carga.

Los reactivos más comunes son:

TABLA IV.4

Cal	CaOH_2
Alumbre	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Cloruro férrico	FeCl_3
Sulfato ferroso	FeSO_4
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Aluminato de sodio	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$

Fuente (27): Wastewater Engineering treatment, Disposal, and Reuse"

b) Puentes de interpartículas por adsorción de grupos químicos específicos en cadenas de polímeros.

Algunos de los polímeros empleados como coagulantes, contienen grupos químicos específicos que pueden reaccionar sobre la superficie de partículas coloidales, ser adsorbidos y servir como puente entre las partículas. La coagulación por medio de polielectrolitos, depende de las condiciones existentes en el agua a tratar.

Los polímeros más comúnmente utilizados que presentan este mecanismo son:

- No iónicos (neutros). Se usan para acelerar el crecimiento del floculo aniónico, cuando la neutralización de las cargas no es un factor muy importante en la remoción de los sólidos suspendidos.
- Catiónicos. Se utilizan cuando el volumen del floculo causa problemas, tales como una sobrecarga, o cuando se necesita acortar el tiempo de filtrado. Los polímeros cationicos sustituyen su carga positiva por el complejo de alumbre, formando una estructura mayor.

c) Adsorción de sólidos finamente divididos, por medio de hidróxidos alcalinos en forma de geles.

La adsorción con hidróxidos alcalinos se lleva a cabo dependiendo del pH. Los hidróxidos de hierro, aluminio y de manganeso, forman productos gelatinosos hidrolizados, los cuales son extremadamente efectivos en el secuestro de partículas finas de otros materiales. Los hidróxidos son formados mediante la reacción de las sales metálicas con los iones OH^- , a pH elevado. Los polímeros orgánicos no forman productos hidrolizados de importancia para este mecanismo.

La adsorción de sólidos por medio de hidróxidos alcalinos es una técnica no usada muy comúnmente debido a los costos en que se incurre, ya que, si es un proceso de eliminación efectivo, también resulta muy costoso separar los sólidos del producto gelatinoso.

4.2.2.1. SELECCION DE COAGULANTES QUIMICOS

Para una adecuada selección de coagulantes se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- ⇒ Los tipos y cantidades de productos químicos que van a ser utilizados como coagulantes, floculantes y controladores de pH.

⇒ Su manejo y forma de alimentarse

La selección más adecuada del tipo de coagulante deberá estar basada en la prueba de jarras (determinación empírica) y en la medición de potencial Z (determinación teórica); ambas deben realizarse para optimizar el tratamiento.

Prueba de jarras

La prueba de jarras es el método más usado para determinar las dosificaciones de los coagulantes, simulando el proceso completo de coagulación- floculación.⁽²⁴⁾

El aparato para la prueba de jarras consiste en un sistema de agitación mecánica que se coloca en seis recipientes donde se pondrán las muestras de agua residual.

Los objetivos de la prueba son determinar el pH óptimo y la dosis mínima de reactivo con los cuales se logra la máxima eficiencia de remoción.

El procedimiento es el siguiente:

1. Seleccionar la longitud de onda apropiada en un colorímetro para evaluar el color del agua. Determinar el % de transmitancia. Determinar el DQO.
2. Determinar la dosis mínima aproximada con la cual se llegan a formar flóculos en el agua. Esto se calcula agitando lentamente 200 ml de agua cruda en un vaso de precipitado y adicionando el coagulante en dosis de 1 ml, hasta que se note la primera evidencia de flóculos (el pH no debe bajar de 6, se ajusta si es necesario).
3. Tomar seis muestras de un litro del agua que se va a tratar, ajustarles el pH a cada una con valores de 4, 5, 6, 7, 8 y 9; agregar la dosis aproximada de reactivo calculada en el paso anterior.
4. Mezclar las muestras rápidamente de 1 a 5 min. y luego se baja la velocidad de mezclado a menos de 20 r.p.m. durante 15 a 20 minutos o más. La agitación rápida asegura la dilución del coagulante, mientras que la agitación lenta permite la formación del flóculo. Anotar el tiempo de formación del flóculo visible en cada una de las muestras. Después de la floculación, se dejan sedimentar todas las muestras y se mide el pH final.
5. Determinar el color residual como % de transmitancia y la DQO contra el pH para seleccionar el pH óptimo.
6. Tomar nuevamente seis muestras de un litro de agua y ajustarlas al pH óptimo que se determinó en el punto anterior. La cantidad de coagulante que se va a adicionar a cada vaso varía del 25 al 200% de la dosis mínima aproximada del punto 2.

7. Mezclar las muestras rápidamente de 1 a 5 min. Y se baja la velocidad para propiciar la floculación durante 15 a 20 min.

8. Dejar sedimentar las muestras y medir el % de transmitancia y la DQO de la muestra más clarificada. Medir el pH final.

9. Elegir la dosis óptima.

10. Medir el nivel del lodo sedimentado.

11. Calcular la cantidad de reactivos necesarios por metro cúbico de agua a tratar; tanto para ajustar el pH como la dosis del coagulante.

NOTA: La prueba se repite para cada reactivo en particular.

Determinación del potencial Z

La medición de la carga eléctrica de la partícula es otro procedimiento que se emplea para controlar el proceso de coagulación. La carga está distribuida en dos capas acuosas adyacentes en la partícula: la capa interior del agua y los iones contenidos en ella, está fuertemente ligada a la partícula y se mueve con ella a través de la solución; la capa exterior, es parte de la fase acuosa total y se mueve independientemente de la partícula. Las cargas no son medibles en estos espesores.

La determinación del potencial Z se realiza de la forma siguiente:

Tomar una muestra de agua que contenga flóculos, vaciarla en una celda de plástico especial, y observarla al microscopio. Con la ayuda de un rectificador de corriente directa, las partículas cargadas eléctricamente emigrarán al electrodo que tenga la polaridad contraria. La velocidad de migración será proporcional a la carga de la partícula y al voltaje aplicado. La velocidad puede ser calculada observando el tiempo que toma a la partícula viajar una cierta distancia, la cual se mide a través de un micrómetro ocular. El punto de control es usualmente de 0 a 10 milivolts.

El potencial Z puede obtenerse de una gráfica, que combina la velocidad de la partícula con los parámetros medidos en los instrumentos.

Cuando se quiere controlar la coagulación por medio del potencial Z, las muestras de agua se dosifican con diferentes concentraciones de coagulantes, y se realizan las determinaciones del potencial Z. Los valores obtenidos se grafican para cada muestra. La dosificación y tipo de coagulante que produce el valor óptimo del potencial Z se aplica entonces a la planta de tratamiento. El valor óptimo de coagulación se determina para cada efluente en especial.

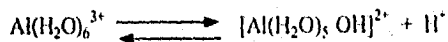
La dosificación y selección del coagulante se basa en el resultado de la prueba de jarras y en la determinación del potencial Z, para evitar un exceso de coagulantes y que se tengan efectos contrarios a los que se persiguen.

4.2.2.2. COAGULANTES INORGANICOS.

Los principales coagulantes inorgánicos usados en el tratamiento de aguas son las sales de aluminio y los iones férricos. Los cationes Hidrolizables disponibles son los sulfatos a sales cloradas en estado líquido o sólido. En Estados Unidos los coagulantes predominantes para el tratamiento de aguas son sulfato de aluminio o aluminio hidratado.

Las ecuaciones químicas de aluminio y iones férricos son esencialmente complicadas. Característicamente con cada uno de los cationes en agua, los iones reaccionan con varios ligamentos entre los cuales se encuentran (OH^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) formando productos solubles e insolubles, que mediante la calidad o dosis de coagulante, las partículas son desestabilizadas. El aluminio y los iones férricos pueden desarrollar una serie de reacciones con el ion hidróxilo (OH^-) formando especies monoméricas y polinucleares, los iones reaccionan con las partículas de la superficie u otros ligamentos. La dosis optima de un coagulante depende de la firmeza de la partícula y de los tipos de partículas que contiene el agua.

El desarrollo de la reacción estequiométrica es simplificado por el paso siguiente donde los cationes son adicionados al agua. El aluminio y los iones férricos se hidrolizan rápidamente. Por ejemplo la primera reacción hidrolítica del ion aluminio es:



Donde: $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ representa la especie actual en el agua.

Las reacciones de hidrólisis subsecuentes forman especies de aluminio monoméricas y polinucleares. La velocidad de reacción de hidrólisis depende del pH y de la concentración de aluminio. Los productos de la hidrólisis pueden reaccionar con partículas superficiales y otros líquidos existentes.

Entre las aplicaciones del tratamiento de agua se encuentra la remoción de la turbiedad y el color. Los rangos de pH para realizar la coagulación son entre 6 y 8, el límite de pH para acelerar la velocidad de reacción es de 6. En este rango de pH, la solubilidad de los productos de la hidrólisis que se forman primeramente al realizarse la desestabilización puede ser menor a la existente o del orden de microsegundos. Usando constantes de equilibrio estimadas para la reacción de hidrólisis, se pueden distribuir los productos de la hidrólisis en menos de una hora de reacción.

Cuando los iones férricos o de aluminio son adicionados al agua, la reacción ocurre paralela y secuencialmente, la velocidad de reacción depende de los parámetros de la solución, incluyendo el pH, las especies iónicas en el agua, temperatura, tipo y concentración de partículas, concentración del coagulante y las condiciones de la mezcla al adicionar el coagulante. Todos estos factores influyen en la cantidad de coagulante inorgánico y por lo tanto en la desestabilización de las partículas.

Los parámetros de la solución afectan la interacción coagulante-partícula, el pH de la solución juega un papel primordial en la velocidad de reacción.

4.2.2.3. COAGULANTES ORGANICOS

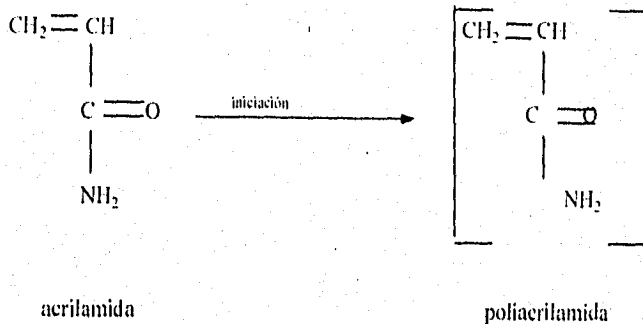
Los polímeros son usados como coagulantes en numerosos campos tecnológicos, notablemente en la industria minera, en la industria del papel, del agua y de tratamiento de agua. Las aplicaciones de los polímeros en el tratamiento de aguas son generalmente diseñados para la solución acuosa, el cual lo absorbe completamente o reacciona rápidamente con partículas contaminantes y la estructura química contaminada es sustituida.

Con el uso de polímeros como coagulantes primarios, en contraste con el aluminio o iones férricos, no producen grandes volúmenes de floculos. Este tipo de coagulantes tiene una especial ventaja en su aplicación donde son deseables los volúmenes pequeños, por ejemplo, con la utilización de filtros granulares se pueden eliminar partículas sólidas.

TIPO DE POLIMEROS.

Los polímeros son clasificados por su origen natural o sintético, son los tipos predominantes recientemente en el tratamiento de aguas. Algunos polímeros de origen natural, tal como, el sodio y la Quitosona son los mas usados como coagulantes, pero los costos en que se incurre son relativamente altos en comparación de los polímeros sintéticos.

Los polímeros orgánicos sintéticos, son hechos por homopolimeración de un monomero o por copolimerización de dos monomeros. En síntesis los polímeros pueden ser manipulados variando su tamaño, grupos de carga, número de grupos de carga por polimero y estructura. El ejemplo típico de la producción de policrilamida en que el monomero, acrilamida, homopolimeriza en condiciones apropiadas para formar un polimero tal como se desarrolla en la siguiente ecuación.



Los polímeros orgánicos tienen dos objetivos primordiales en el tratamiento de aguas, desestabilización de partículas y formación de flóculos más resistentes. La desestabilización ocurre principalmente con la neutralización de cargas. Las partículas cargadas negativamente tal como las suspensiones pueden ser desestabilizadas con cationes poliméricos.

4.2.3. FLOCULACION

En la generalidad de los casos, los productos hidrolizados formados por los coagulantes metálicos presentan una sedimentación lenta, en estos casos la adición de un coadyuvante, como son los polielectrolitos, aumentan la eficiencia de sedimentación notablemente.

La floculación es la operación unitaria aplicada a las aguas residuales, para que por medio de sustancias químicas (polielectrolitos) se aumente el contacto entre las partículas finas en la coagulación, para formar flóculos, los cuales sedimentan más fácilmente.

La floculación se ve favorecida por la agitación moderada del agua residual, por medio de paletas a baja velocidad. Si la agitación es demasiado rápida, los flóculos se rompen, por tal motivo, debe controlarse la velocidad dentro de un rango en el que se puedan formar los flóculos grandes para que sedimenten. Los compuestos utilizados para la floculación son polielectrolitos de origen natural o sintético. El funcionamiento de un polielectrolito es específico, dependiendo del tamaño, densidad y carga de las partículas a flocular, y de pH del polímero en solución. Para la correcta selección del polielectrolito se recomienda hacer la prueba de jarras, mencionado anteriormente en coagulación química. Las especies catiónicas generalmente se aplican en el espesamiento de lodos, en algunos casos se utilizan como coadyuvante, para mejorar la sedimentación de las sales metálicas en el tratamiento de las aguas residuales industriales.

4.2.3.1. TIPOS DE FLOCULACION

FLOCULACION NATURAL.

En este tipo de floculación actúan los procesos naturales de sedimentación, provocados por la agregación de partículas suspendidas para formar floculos capaces de precipitarse a causa de su volumen y aumento de masa.

Esta agregación de los coloides empezará inmediatamente después de la adición de los floculantes a causa del movimiento browniano en el líquido, conociéndose como una floculación pericinetica.

Este tipo de floculación requiere un tiempo de retención muy grande, pues no se controla el movimiento browniano y consecuentemente el tiempo de sedimentación, por lo cual no es recomendable su empleo.

FLOCULACION INDUCIDA.

En la floculación inducida u ortocinetica se propician las colisiones de las partículas por medios mecánicos o hidráulicos, para acelerar y controlar el proceso de sedimentación.

En la floculación inducida se usa la agitación para acelerar la agregación de partículas coloidales. Las partículas se mueven en el sentido de la rotación del agua, y debido a diferencias en su peso, viajan a diferentes velocidades, lo que provoca una colisión entre ellas y por consiguiente un aumento en su tamaño.

La agitación en los floculadores se puede lograr por medios hidráulicos o mecánicos:

a) La floculación hidráulica es el método más simple que se emplea para generar gradientes de velocidad por disipación de energía en un fluido mediante baffles o deflectores instalados en la trayectoria del fluido de alimentación al tanque de sedimentación.

b) La floculación mecánica se basa en la disponibilidad de agitadores mecánicos que ofrecen una mayor versatilidad en el diseño y operación de los equipos.

Tipos de floculantes.

Los floculantes pueden ser de origen natural o sintético, orgánicos e inorgánicos; entre los sintéticos orgánicos se tienen los polielectrolitos que pueden ser aniónicos, catiónicos o neutros.

4.2.4. EVAPORACION

La evaporación es el procedimiento utilizado para llevar las aguas residuales hasta su punto de ebullición y evaporar agua pura. El vapor se puede utilizar para la producción de energía o condensado para calefacción o simplemente se descarga a la atmósfera que lo rodee. Los compuestos inorgánicos del residuo pueden ser concentrados suficientemente hasta formar sólidos para ser utilizados en el ciclo de producción o eliminados por otros medios.

Este método de tratamiento se ha utilizado para aguas residuales radioactivas y en fábricas de papel para evaporar los licores de cocción de sulfato a un grado que pueden ser devueltos a los digestores de reutilización.

Los principales factores en la selección del método de evaporación son:

- 1) Económico: ¿el valor del residuo utilizable es mayor que el costo del combustible?
- 2) Sólidos iniciales disueltos: ¿hay suficientes sólidos en las aguas residuales o de naturaleza variable para permitir la evaporación? (Generalmente se requieren de 10.000 ppm)
- 3) Materias extrañas: ¿hay materias extrañas presentes que pueden producir incrustaciones o corrosiones o interferir en la transferencia de calor durante el proceso de evaporación?
- 4) Situación ecológica: ¿qué efecto producirán los compuestos minerales de la corriente receptora? Por ejemplo, la sosa produce la muerte de los peces, las sales de amonio dificultan el crecimiento de las algas y en algunos casos estimulan el crecimiento bacterial sobre la materia orgánica presente.

Actualmente, muchos evaporadores se calientan por condensación del vapor en tubos metálicos, a través de los cuales fluyen las aguas residuales para ser concentrados o evaporados. El vapor se encuentra a baja presión, generalmente a menos de 3.5 kg/cm^2 (absoluta). Muchos evaporadores trabajan con un pequeño sistema de vacío en la parte del vapor para así bajar el punto de ebullición e incrementar la velocidad de eliminación de vapor del evaporador.

Los sistemas de vacío son especialmente preferibles a los evaporadores atmosféricos cuando se tiene en cuenta la descomposición de materia orgánica. Sin embargo; se debe tener mucho cuidado para que el vacío no sea lo suficientemente grande para permitir el arrastre de agua residual con el vapor.

La evaporación de agua residual representa muchos problemas, como cambios de concentración durante la evaporación, formación de espumas, sensibilidad a la temperatura.

formación de incrustaciones y materiales utilizados en la construcción del evaporador. En la concentración de aguas residuales el mayor problema que representa es la formación de incrustaciones. Como las incrustaciones se depositan en la superficie de calefacción, el coeficiente de transferencia de calor disminuye, haciendo que el rendimiento baje hasta el grado de tener que cerrar y limpiar los tubos. (un problema grave cuando las incrustaciones son fuertes y resistentes).

Las aguas residuales ácidas de tratamientos superficiales con cromo, níquel y cobre del tanque de lavado pueden ser reutilizadas por evaporación en un equipo de vidrio u otros evaporadores apropiados y la solución concentrada puede ser devuelta al sistema de tratamiento. El costo inicial de los equipos es alto, por lo que la cantidad y el valor de los productos químicos que se recuperan, más el costo estimado de funcionamiento, son los criterios que justifican la compra del equipo.

El rendimiento de la evaporación está relacionado directamente con el porcentaje de transmisión de calor (expresado en Kcal/hora) a través de la superficie de calentamiento. La cantidad de calor es igual al producto de tres factores, el coeficiente de transmisión total, la superficie de calefacción y la diferencia de temperatura entre el agua residual y el vapor.

Se expresa matemáticamente como

$$Q = KA\Delta t \quad (4.1)$$

Donde: Q= Es la cantidad de calor transmitido (Kcal/h)
A= La superficie total de calefacción (m²)
ts= La temperatura de condensación del vapor (°C)
t= La temperatura de ebullición de las aguas residuales (°C)
(Δt)= ts-tw el cambio total de temperatura entre el vapor y las aguas residuales.

4.2.5. BURBUJAS DE ADSORCIÓN

La separación mediante burbujas de adsorción se basa en la adsorción selectiva o la adhesión de materiales en la superficie de burbujas de gas que pasan por una solución o suspensión. En la mayor parte de los métodos, las burbujas se elevan para formar una espuma que lleva el material hacia arriba, así, el material, deseable o indeseable, se retira del líquido y no viceversa.

Los métodos de espumación son particularmente adecuados para retirar cantidades pequeñas de material de volúmenes grandes de líquido.

Para cualquier método mediante burbujas de adsorción, si el material que se debe retirar (denominado coligado) no es tensoactivo, se puede agregar un surfatante adecuado (denominado colector) para unirse con él y adsorberlo en la superficie de la burbuja, con el fin de que se pueda retirar.

La unión entre el coligado y el colector se puede realizar mediante la quelación y se puede retirar un coligado cargado mediante su atracción hacia un colector de carga opuesta.

En la figura IV.2 se ilustran los métodos de separación por burbujas de adsorción.

Entre los métodos de separación de espumas, el fraccionamiento por espuma implica el retiro de materiales disueltos o coloidales. La espuma de sobre flujo, después de reducirse a desintegrarse, se denomina espumato (Fig.IV.3).

La flotación implica por lo común el retiro de materiales de partículas sólidas. La más importante en la última categoría es la flotación de minerales. Así mismo, en la categoría de flotación se debe encontrar la macro flotación, que es el retiro de partículas macroscópicas; la microflotación (que se denomina también flotación coloidal), que es el retiro de partículas microscópicas, sobre todo de coloides o microorganismos; la flotación molecular, que es el retiro de moléculas superficialmente inactivas, mediante un colector (surfactante) que da un producto insoluble, la flotación de iones, que es la eliminación de los iones superficialmente inactivos, mediante un colector que da un producto insoluble, sobre todo una nata retirable; la flotación coloidal adsorbente, que es el retiro de materiales disueltos en forma "a cuestras", mediante la adsorción en partículas coloidales y la flotación de precipitados, en donde se retira un precipitado mediante un colector que no es agente de precipitación.

En el fraccionamiento por burbujas, esto se logra simplemente al prolongar la poza de burbujas para formar una columna vertical. A continuación, las burbujas ascendentes depositan el material adherido o adsorbido en la parte superior de la poza, conforme salen. Esto da como resultado un gradiente de concentraciones que pueden servir como base para la separación. El fraccionamiento de burbujas puede funcionar ya sea por sí solo o como sección de refuerzo, por debajo de un fraccionador de espuma.

En la sorción en disolvente se pone un líquido no miscible sobre el líquido principal, para atrapar el material depositado por las burbujas, conforme salen. El líquido superior debe disolver o cuando menos humedecer el material. Con una selectividad apropiada, la separación lograda en esa forma puede ser a veces mucho mayor que con el fraccionamiento por burbujas por sí solo.

Fig. IV.2

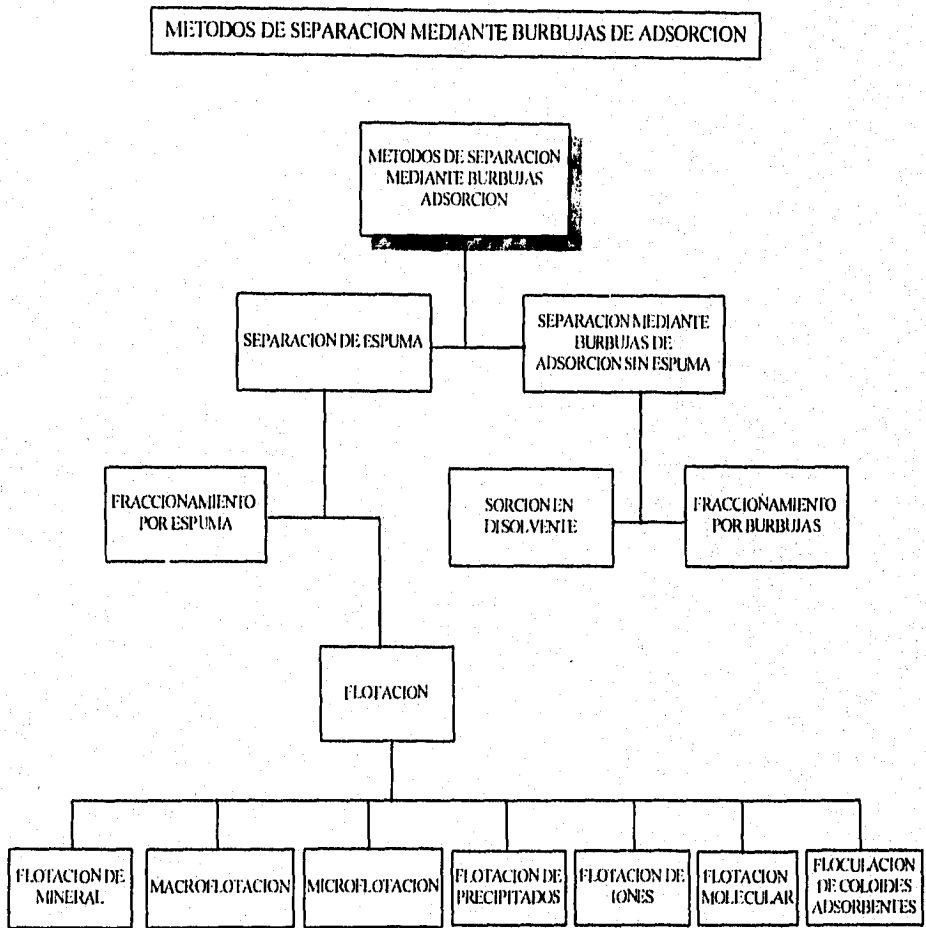
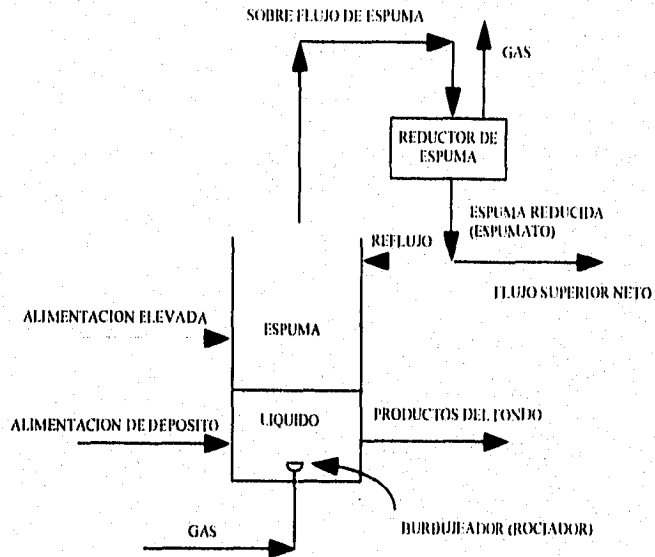


Fig. IV.3

COLUMNA DE FRACCIONAMIENTO POR ESPUMA



Adsorción. La separación lograda por este método depende, en parte, de la selectividad de la adsorción en la superficie de las burbujas. En el equilibrio, la adsorción de los materiales disueltos sigue a la ecuación de Gibbs.

$$d\gamma = -RT \sum \Gamma_i d \ln a_i \quad (4.2)$$

Donde: Γ_i = Es el exceso superficial. Para lograr la mayor parte de los fines, basta considerar Γ_i como la concentración de componente adsorbido i en la superficie, en unidades de, por ejemplo gmol/cm^2 .
 R = Es la constante de los gases.
 T = Es la temperatura absoluta.

γ = Es la tensión superficial
 a_i = Es la actividad del componente i .

El signo menos muestra que el material que se concentra en la superficie reduce, en general, la tensión superficial y viceversa. Esto puede ser a veces una gafa para determinar, en forma preliminar, cuáles son los materiales que se pueden separar.

Cuando se aplica a un surfactante no iónico, en agua pura, a concentraciones por debajo de la concentración micelar crítica, la ecuación se simplifica para dar la ecuación (4.3)

$$\Gamma_s = -\frac{1}{RT} \frac{d\gamma}{\ln C_s} \quad (4.3)$$

Donde: C = Es la concentración masiva y el subíndice s se refiere al surfactante.

En general, se puede considerar que el principal surfactante en la espuma se encuentra presente en las superficies de las burbujas en forma de una monocapa adsorbida.

Factores que afectan la adsorción. K_i para un coligado se puede ver afectada adversamente por una insuficiencia del colector. También se puede reducir debido a un exceso de colector, que compite para obtener la superficie disponible contra el complejo de colector-coligado.

El exceso de colector puede reducir también la separación, al formar micelas en la masa que adsorbe parte del coligado, evitando que llegue a la superficie.

Tamaños de burbujas. Con ciertos errores, los diámetros de las burbujas de espuma se pueden medir fotográficamente. Algunos de estos errores se pueden minimizar al tener cuidados para generar burbujas de tamaño bastante uniforme, por ejemplo, utilizando un burbujeador con orificios idénticos, o un burbujeador con un solo orificio. De otro modo, debe incorporarse una corrección para el sesgo de muestreo estadístico plano en la espuma, con los diámetros reales o los diámetros truncados. La segregación de tamaño puede reducir aproximadamente a la mitad de la desviación estándar al disminuir el diámetro medio de la burbuja mural. Los diámetros de burbuja se pueden medir también en una poza líquida, ya sea en forma fotográfica o indirecta mediante la medición de su velocidad de flujo volumétrico o la determinación estroboscópica de su frecuencia.

Los tamaños de burbujas en formación aumentan en general con la tensión superficial y el diámetro de los orificios. La predicción de tamaños en grupos a partir de orificios múltiples es muy difícil. En soluciones acuosas de baja tensión superficial, son comunes los diámetros de burbujas del orden de 1 mm.

Enriquecimiento y agotamiento. A diferencia del fraccionamiento por espuma simple verdadero, sin cambio significativo del diámetro de las burbujas, la coalescencia en una columna de espuma destruye parte de la superficie de las burbujas y libera materiales adsorbidos para que descendan a través de la espuma que se eleva. Este flujo descendente constituye un reflujó interno, que enriquece la espuma ascendente mediante una acción a contracorriente. El resultado es un espumato más rico, o sea, con un valor más alto de C_0 .

La introducción de la alimentación a la espuma a cierta distancia por encima de la poza contribuye a facilitar la operación de agotamiento. El flujo resultante a contracorriente de la espuma purifica todavía más el fando, o sea reduce C_u .

Teoría de la columna de espuma. Se considera que las corrientes a contracorriente dentro de la espuma consiste realmente en una corriente descendente de una corriente de líquido intersticial y un flujo ascendente de líquido intersticial más la superficie de burbujas.

Una concentración eficaz $\{\bar{C}\}$ en la corriente ascendente, a cualquier nivel de la columna, se define mediante la ecuación (4.4).

$$\bar{C} = C + (GST/U) \quad (4.4)$$

Donde: U = Es el flujo volumétrico de líquido intersticial de flujo ascendente a ese nivel
 Γ = es el exceso superficial en equilibrio con C .

Ecuaciones limitantes. Si se incrementa suficientemente la altura de una columna de fraccionamiento por espuma, se desarrollará un punto de acumulación de concentración entre las corrientes intersticiales a contracorriente. Para un enriquecedor, la separación obtenida se acercará a las predicciones de la ecuación (4.5)

$$C_p = C_u + (GST_u / D) \quad (4.5)$$

Donde: D = Es el flujo volumétrico al que se retira espumato neto.
 C_p = La concentración en espumato neto.

En el Caso habitual del rompimiento total de espuma $C_p = C_u$.

Si la columna alta es un agotador, la separación se acercará a la de las ecuaciones (4.6) y (4.7)

$$C_0 = C_f + (GST_f / Q) \quad \dots (4.6)$$

$$C_w = C_f + (GST_f / W) \quad \dots (4.7)$$

Para una columna combinada suficientemente alta, la separación se acercará a la de las ecuaciones (4.6) y (4.7)

$$C_p = C_f + (GST_f / D) \dots (4.8)$$

La formación de micelas en el divisor reductor de espuma no afecta las ecuaciones limitantes, debido a la oportunidad teóricamente ilimitada en una columna suficientemente alta para su transferencia del refluo a la corriente ascendente.

Operación de la columna. Para asegurar un contacto íntimo entre las corrientes intersticiales a contraflujo, la fracción de volumen de líquido en la espuma se debe mantener por debajo de, aproximadamente 10%. Asimismo, son convenientes los tamaños de burbujas bastante uniformes. Las burbujas de espuma se reunirán en esa forma como poliedros agudos, más que como esferas, y la succión en los capilares formados de ese modo fomentarán una buena distribución del líquido y un contacto adecuado.

Se deben evitar las desviaciones importantes o la canalización visible del flujo taponado de espuma, en caso necesario ampliando la columna o disminuyendo el flujo de gas y/o líquido. La velocidad superficial del gas no debería exceder de 1 o 2 cm/s.

Para columnas más anchas que unos cuantos centímetros, se deben utilizar distribuidores de alimentación y refluo, sobretodo para la espuma húmeda. El contenido del líquido dentro de la espuma se puede monitorear, mediante técnicas conductimétricas.

La espuma húmeda se puede manejar en una columna de cachuchas de burbujeo o en una columna de platos perforados. Alternativamente, se pueden conectar columnas individuales cortas para que funcionen a contracorriente.

Se puede utilizar un flujo muy bajo de gas en una columna de varios pies de altura con refluo interno, para efectuar separaciones difíciles de multicomponentes en operaciones por lotes.

El mismo fin se puede lograr con operación continua a refluo externo total mediante un pequeño codo en U, en la línea de refluo, para la retención del espumato.

La espuma lentamente ascendente en una columna alta se puede utilizar como sorbente para las separaciones cromatográficas continuas. También se utilizan flujos bajos de gas en columnas cortas para producir el espumato de la flotación de iones en operaciones por lotes, la microflotación y la flotación de precipitados.

Coalescencia de la espuma. La coalescencia es de dos tipos: el primero es el crecimiento de las mayores burbujas de espuma a expensas de las menores, debido a la difusión de gas entre burbujas, que es el resultado del hecho de que las burbujas de menor tamaño tienen presiones internas un poco mayores.

El segundo tipo de coalescencia se debe a la ruptura de películas entre burbujas adyacentes. Su velocidad parece seguir la cinética de reacción de primer orden con respecto al número de burbujas y disminuir en función del espesor de la película.

Los dos tipos de coalescencia pueden ser importantes en la separación por espuma que se caracterizan por velocidades bajas de flujo de gas, como la flotación iónica por lotes, que produce espuma portadora de nata, con un tiempo de residencia relativamente largo. Por otra parte, con el flujo relativamente alto de gas en el fraccionamiento por espuma, el tiempo de residencia suele ser demasiado corto para que el primer tipo sea importante y, si la espuma es suficientemente estable, puede carecer de importancia incluso el segundo tipo de coalescencia.

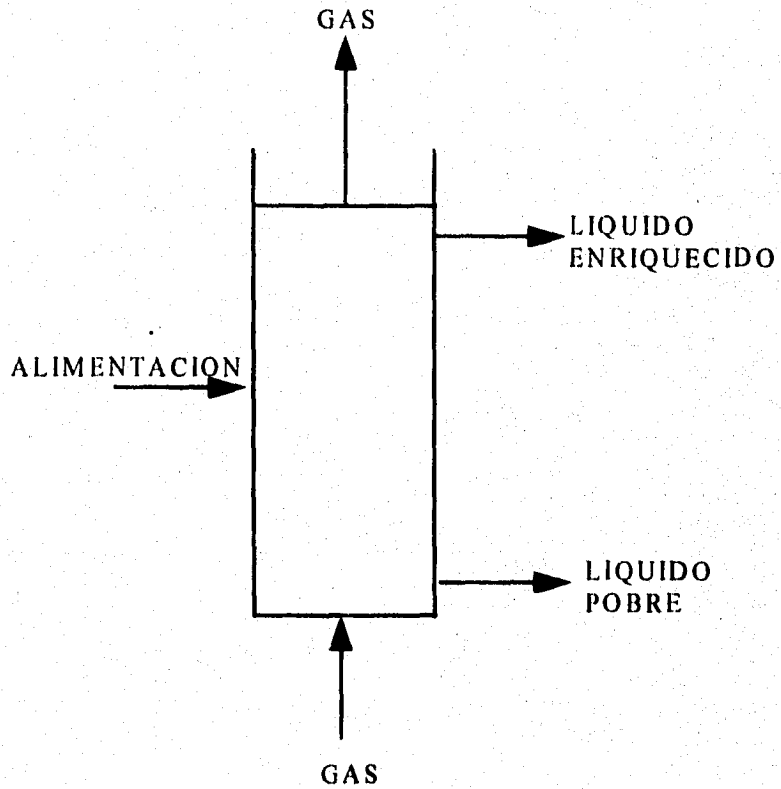
Reducción de la espuma. Por lo común, es conveniente reducir la espuma de sobreflujo. Esto se puede lograr por medios químicos, si no utiliza reflujo externo, o bien, por medios térmicos, si la degradación del producto superior no es un factor importante.

La espuma se puede romper o reducir también con un cesto perforado giratorio. Si el espumato es acuoso, la operación se puede mejorar mediante la descarga sobre teflón, en lugar de vidrio. La espuma se puede reducir también mediante métodos sónicos o ultrasónicos, un disco giratorio y otros medios.

Fraccionamiento por burbuja. En la figura siguiente aparece un fraccionador por burbuja. Esta operación se puede analizar de manera simplificada en términos del transporte ascendente adsorbido, que incrementa el gradiente de concentración y la dispersión en el líquido, que reduce dicho gradiente.

Fig. IV.4

FRACCIONAMIENTO CONTINUO POR BURBUJA



4.2.6. REMOCION DE METALES POR MEDIO DE BURBUJAS DE ADSORCION

Cuando se utiliza la precipitación o la flotación de coloides para la remoción de metales, se ha encontrado que en combinación produce mejores resultados que los métodos convencionales. Cuando las eficiencias de remoción son comparables, otro tipo de factores se deben considerar cuando se requiere seleccionar la mejor opción; esto incluye factores de seguridad, factibilidad de la disposición final de los productos obtenidos así como todos los costos inherentes al sistema seleccionado. (Ref. 13 - Foam Flotation of Heavy Metals and Fluoride-Bearing Industrial Wastewater)

En diversos centros de investigación han hecho pruebas de laboratorio para la remoción de metales mediante esta técnica. Los resultados obtenidos se pueden resumir de acuerdo al tipo de metal que se desee remover. A continuación se describen brevemente las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo los diversos experimentos para cada uno de los metales clasificados como pesados:

CADMIO

Para remover cadmio (como sulfuro) se aplica la flotación de un precipitado utilizando bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HTA) a un pH de 5-9. La concentración residual de cadmio es de aproximadamente 0.5 mgr/lit. Usando la adsorción de coloides y la flotación con sulfuro de fierro y HTA a un PH de 9 se obtiene una concentración residual de 0.003 mgr/lit. Para eliminar el uso del sulfuro, se puede obtener un precipitado de hidróxido de cadmio utilizando hidróxido de fierro y HTA obteniendo un residual de 0.01 mgr/lit a un pH de 12. Las restricciones de cualquiera de estos sistemas se encuentran relacionadas con las variaciones de las fuerzas iónicas presentes en el medio.

CROMO

En la actualidad se ha desarrollado un proceso para recuperar Cr^{6+} reduciéndolo a Cr^{+3} utilizando bisulfito seguido de una precipitación con hidróxido de sodio y precipitación-flotación con dodecilsulfato de sodio (SDS) obteniendo un 99% de remoción, conservando un pH dentro del rango de 7-8.8. Este método ya se aplica en diversas plantas piloto.

COBRE

La remoción del cobre es uno de los más estudiados en el campo de separación por espumas. Este metal se puede separar por la técnica de ión-precipitación o precipitación-flotación. Para la técnica de precipitación-flotación se utiliza hidróxido y SDS para obtener hidróxido cúprico, obteniéndose remociones superiores al 90%.

PLOMO

A pH's menores a 8, el plomo se puede remover por ión-flotación. Para pH's entre 8 y 9 se puede flotar el precipitado como hidróxido utilizando SDS. El sulfuro de plomo es removido rápidamente con HTA en un rango de pH entre 4-9.5, aunque el intervalo óptimo de remoción es de 8-9. Las desventajas de utilizar sulfuros y HTA representa riesgos de toxicidad además de los altos costos implicados. El uso de hidróxido de fierro y SDS provee relativamente de una buena remoción, obteniendo residuales de 0.01-0.02 mgr/lit a un pH entre 6.5 y 7.5.

MERCURIO

El HgS solamente se puede remover con HTA en pH ácido de 1 con un residuo de 0.1 mgr/lit. La utilización de SDS no resulta efectiva bajo ninguna condición debido a las interacciones de las fuerzas iónicas involucradas. Así pues la única forma efectiva de remoción es mediante la flotación de los coloides formados con el HTA.

NIQUEL

La flotación de níquel con SDS e hidróxido de sodio o aluminio obteniendo residuales de 0.1 mgr/lit en un rango de pH de 8-9.5; el uso de hidróxido de fierro es menos efectivo que el hidróxido de aluminio.

ZINC

Para pH alrededor de 8, la flotación del precipitado es muy eficiente. El pH óptimo es de 9.2 utilizando hidróxido de aluminio, el surfactante utilizado es SDS.

La información anterior se puede resumir en el siguiente cuadro (Tabla IV.5):

TABLA IV.5
PARÁMETROS DE LABORATORIO OBTENIDOS EN LA REMOCION DE METALES ESPECIFICOS

METAL	pH	RESIDUAL mgr/lit	REMOVIDO mgr/lit	REMOCION %
Cd	5-9	0.01	19.99	99.95
Cr	7.5-8.8	0.5	19.5	97.5
Cu	6-8	0.004	19.99	99.98
Pb	8	1.6	18.4	92
Hg	2	0.005	19.995	99.97
Ni	9.5	3	17	85

FUENTE (9): "Bubble and Foam Separation"

Para cada metal existen condiciones óptimas para su remoción las cuales han sido obtenidas experimentalmente y reportadas como se mostró anteriormente. Tales condiciones se resumen en la tabla IV.6

TABLA IV.6

METAL	FLOCULANTE	SURFACTANTE	PH OPTIMO	% DE REMOCIÓN
ZINC	Fe(OH) ₃	DODECILAMINA	7.6	94
COBRE	Fe(OH) ₃	DODECILAMINA	7.6	95
PLATA	PbS	STEARLYAMINA	2	92
MERCURIO	CdS	CLORURO DE OCTADECYLTRI METILAMONIO	1	CUANTITATIVO
MOLIBDENO (como Molibdato)	Fe(OH) ₃	SDS	4	95
URANIO	Fe(OH) ₃	SDS	5.7	82
VANADIO	Fe(OH) ₃	SDS	6.4-6.8	91
SELENIO	Fe(OH) ₃			
POSFORO (como fosfato)	Fe(OH) ₃			
ARSENICO (como arsenato)	Fe(OH) ₃	SDS	4	91

FUENTE (9): "Bubble and Foam Separation "

Para el tipo de efluente de interés, los principales metales presentes se encontraran en mezcla, es importante mencionar que estos sistemas se encuentran restringidos por factores diversos como son: concentración inicial de cada metal, si se encuentran mezclados o por separado, la proporción presente de cada uno etc. A continuación se muestra las condiciones óptimas para la separación de una mezcla de Pb, Cu y Zn.

TABLA IV.7
 REMOCION DE UNA MEZCLA DE METALES POR ADSORCION Y FLOTACION COLOIDAL

PH	FLUJO DE	FLUJO DE	RESIDUAL	RESIDUAL	RESIDUAL
	Fe(III)	NaNO ₃	mgr/l	mgr/l	mgr/l
	(mol/l)	(mgr/l)	Cu (II)	Pb(II)	Zn(II)
6.1	100	0.02	0.3	0.2	3.2
6.5	100	0.02	0.25	0.15	2.1
7.02	100	0.02	0.2	0.2	1.8
6.05	100	0.05	0.27	0.15	2.9
6.55	100	0.05	0.26	0.15	2.9
7.05	100	0.05	0.3	0.30	2.2
6.05	100	0.1	0.35	0.4	3.2
6.56	100	0.1	0.26	0.3	2.8
7.02	100	0.1	1.25	0.2	2.9
7.02	150	0.075	7.75	10	3.3
8.05	200	0.075	8	10	3.5

La concentración inicial de cada uno de los metales es de 20 mgr/l

FUENTE (9): "Bubble and Foam Separation"

Como se puede observar, las técnicas de separación por burbujas de adsorción resultan altamente eficientes, siempre y cuando se utilicen en combinación con el proceso de precipitación-coagulación-floculación, por lo que podemos decir que para el presente caso de estudio la técnica más adecuada podría ser un proceso que inicialmente precipite a los metales para posteriormente separarlos por medio de flotación o bien cualquier otra alternativa viable.

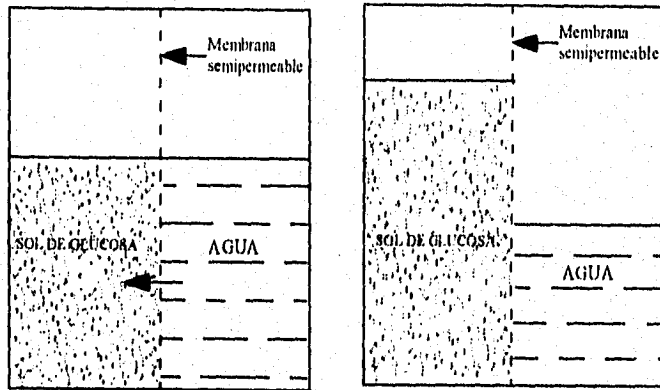
4.2.7. OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa separa un soluto de una solución, obligando al disolvente a fluir a través de una membrana mediante la aplicación de una presión mayor que la presión osmótica normal. En la ósmosis inversa las moléculas son de aproximadamente el mismo tamaño que las del disolvente. El principio se ilustra con las figuras (IV.5).

En la figura a, se describe la ósmosis directa, donde el solvente fluye espontáneamente a través de la membrana semipermeable.

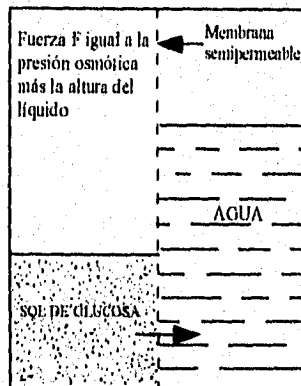
La figura b. ilustra la condición de equilibrio, en este caso el líquido fluye hasta que el flujo del solvente a través de la membrana iguala la presión osmótica y se detiene el flujo. En la figura c. sucede que la fuerza f excede la presión osmótica del compartimiento que contiene el agua contaminada hacia el compartimiento del agua pura, este fenómeno se denomina ósmosis inversa.

Fig. IV.5
PRINCIPIO DE OSMOSIS



Osmosis Directa: El solvente pasa espontáneamente a través de la membrana semipermeable.

Condición de equilibrio: Se detiene el flujo del solvente

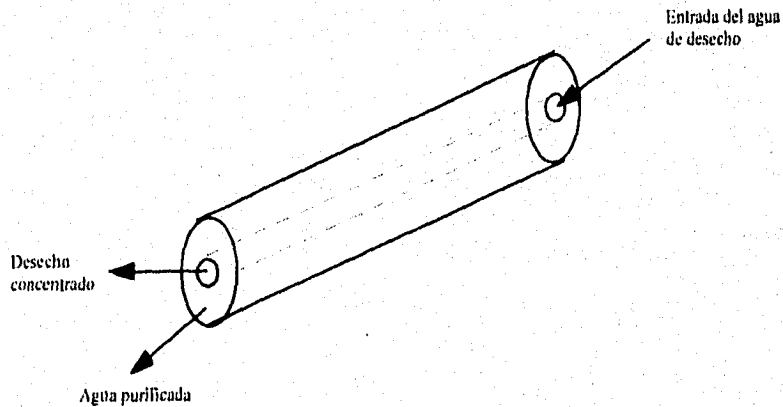


Osmosis reversible:
 Se requiere una fuerza que exceda la presión osmótica

En el tratamiento de aguas residuales por ósmosis inversa, el influente contaminado se pone en contacto con una membrana adaptable a una presión que exceda a la presión osmótica de la solución. Bajo estas condiciones, el agua penetra en la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimiento del agua de desecho. Este concentrado, que corresponde a una pequeña cantidad del volumen total del agua residual, se desecha. El agua purificada se obtiene en el otro compartimiento.

En la práctica el proceso de ósmosis inversa se lleva a cabo en un sistema tubular. El flujo de agua residual a alta presión pasa a través de un tubo interno hecho de una membrana semipermeable y diseñado para operar a altas presiones. El agua purificada se obtiene en el tubo externo, el cual se encuentra a presión atmosférica y está hecho de material ordinario como se muestra en la fig (4.6)

Fig. IV.6
SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA DE CONFIGURACION TUBULAR



La ósmosis inversa se aplicó inicialmente en la desalinización de agua de mar. Se han hecho muchas investigaciones en plantas piloto sobre el uso de este proceso para la separación de ciertos contaminantes de las aguas residuales, algunos de ellos como compuestos de nitrógeno, fósforo, cromatos, etc.

En general las aplicaciones de la ósmosis inversa se resumen en:

- Desalinización de agua de mar.
- Producción de agua potable.
- La desmineralización.
- Las operaciones de recirculación en las plantas de galvanoplastia y electrorecubrimientos metálicos.
- El procesamiento de sueros, jugos y efluentes de la industria alimentaria.
- Aplicación en la industria de pulpa y papel.
- Concentración de agua radiactiva de lavado en las plantas de generación de energía a base de procesos nucleares.

Los dos parámetros básicos para caracterizar un sistema de ósmosis inversa son:

- 1) La producción de agua purificada por unidad de área de membrana (flujo de agua).
- 2) La calidad del producto o pureza del agua purificada (factor de rechazo).

FLUJO DE AGUA.- La producción de agua purificada se mide por el flujo de agua y se define como la cantidad de producto por unidad de área de membrana. Este factor queda determinado por las características físicas de la membrana, tales como espesor, composición y porosidad; además de las condiciones del sistema, como temperatura, presión diferencial, a través de la membrana, concentración de la sal en solución y velocidad de alimentación a través de las membranas.

De esta manera, el flujo de agua es función de la presión diferencial a través de la membrana y está dada por:

$$F_{H_2O} = A(\Delta p - \Delta \pi) \dots (4.9)$$

$$\Delta p = P_f - P_p \dots (4.10)$$

$$\Delta \pi = \pi_f - \pi_p \dots (4.11)$$

Donde: F_{H_2O} es el flujo de agua (gal/día pie²)

A es el coeficiente de permeación por unidad de área de membrana (gal/día pie² atm). Este término incluye las variables físicas de la membrana y es relativamente constante.

Δ_p es la presión ejercida en el influente (P_i) menos la presión sobre el producto (P_p) en atm.

Δ_π es la presión osmótica en el influente (π_i) menos la presión osmótica del producto (π_p).

FACTOR DE RECHAZO.- El mejoramiento de la calidad entre la alimentación y el producto, se expresa cuantitativamente por el factor de rechazo definido como:

$$f = (C_f - C_p) / C_f \dots\dots\dots (4.12)$$

Donde: f es el factor de rechazo (adimensional).

C_f es la concentración del soluto en el influente.

C_p es la concentración del soluto en el producto.

Es evidente que para poder aplicar cualquiera de las técnicas mencionadas para la remoción de metales; es necesario realizar las pruebas experimentales pertinentes con el efluente de interés para obtener la información puntual como la mostrada en los cuadros anteriores. Posteriormente se requiere de efectuar los estudios de escalamiento para evaluar la factibilidad tanto técnica como económica de cada una de las metodologías posibles y de esta manera poder definir con exactitud el proceso y las condiciones necesarias para tratar un efluente en particular. Lo anterior implica un nuevo caso de estudio en las áreas mencionadas por lo que reitera que el presente estudio se limita a la propuesta técnica de una metodología adecuada para la remoción de los metales presentes en el efluente de estudio.

CAPITULO V
CRITERIOS DE SELECCION
DE PROCESOS

CRITERIOS DE SELECCION DE PROCESOS

5.1. PARAMETROS DE SELECCION DEL PROCESO

La elección del proceso de tratamiento, se enfocará a los métodos señalados en el capítulo cuatro del presente trabajo y que tienen como objetivo principal la eliminación de los metales pesados de las aguas residuales provenientes de la regeneración de resinas de intercambio iónico utilizados en la industria alimenticia y farmacéutica; con la finalidad de obtener una solución factible para mejorar la calidad de las aguas residuales, de acuerdo a las exigencias marcadas por el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas, cumpliendo con la **NOM-031-ECOL/1993**

Para desarrollar efectivamente una estrategia de tratamiento de agua residual, es necesario tomar en cuenta en primer lugar las características de todas las corrientes de agua residual de la planta y evaluar la necesidad de tratamiento para cada corriente con respecto a los estándares aplicables.

Además de que el tratamiento adecue la calidad del agua a las normas específicas por el uso al que se destina, requiriéndose la aplicación de una tecnología que asegure la economía y confiabilidad de los sistemas y que tome en consideración los costos de energía, disponibilidad de terreno y el uso de materiales y equipo.

De esta manera el tipo de tratamiento se selecciona considerando parámetros generales, tales como:

a) Origen del efluente

Tipo de agua a tratar, doméstica, municipal o industrial.
Propiedades físicas y Químicas.

b) Uso o destino final del efluente a tratar.

Número de etapas o tratamientos requeridos para obtener una determinada calidad de agua.
Normas Oficiales Mexicanas e Internacionales.

c) Disponibilidad de métodos existentes, aplicables a la necesidad particular o en cuestión.

Selección del método más factible técnica y económicamente.
Disponibilidad de mano de obra, material de construcción, equipo y terreno.
Condiciones topográficas y climatológicas del lugar.
Uso final del agua a tratar.

5.2. CARACTERISTICAS DEL EFLUENTE A TRATAR

☞ Considerando lo anterior y aplicándolo al presente caso de estudio, tenemos las categorías siguientes:

I) Tipo de efluente a tratar:

Las aguas residuales por tratar representan la materia prima principal, por lo tanto es importante conocer sus características tanto físicas como químicas y biológicas, para de esta manera determinar el proceso o la mezcla de procesos con los que debe contar el sistema de tratamiento para lograr una adecuada remoción de contaminantes, además, una alta eficiencia en cuanto a operación del sistema.

El efluente es agua residual proveniente de la regeneración de resinas de intercambio iónico aplicado en la purificación de agua para proceso y/o producto dentro de la industria farmacéutica o de alimentos.

II) Características físicas y químicas:

Efluente que al provenir de una etapa de purificación de agua para proceso ya no contiene contaminantes removibles por tratamientos de tipo meramente físico, puesto que los contaminantes principales contenidos son iones metálicos y su sales obtenidas durante la regeneración de las resinas de intercambio iónico; además de un relativo excedente de solución regenerante NaOH. Estas características le proveen de las siguientes propiedades generales:

Color: turbia blanquecina.

Olor: el característico a la sosa cáustica.

Temperatura: 19-25 C.

pH: >12

Consistencia: agua con la inminente presencia de sólidos suspendidos (hidróxidos insolubles)

Volumen: 15 m³ de efluente/ m³ de resina regenerada (valor promedio para lechos mixtos, aniónicos y/o catiónicos)

III) Uso final o destino del efluente:

El uso final que se le desee dar al agua tratada es un factor importante en la selección del sistema de tratamiento, ya que la calidad del agua varía de un proceso a otro en gran escala

y la reglamentación federal establece diversas normas dependiendo del cuerpo receptor en donde sean vertidas estas aguas o en su caso del reuso particular al que se destine. Es posible generar agua con calidad acorde para que la normatividad permita su descarga en el sistema de alcantarillado municipal o en cuerpos receptores. Sin embargo, es mucho más importante tratar de disminuir el impacto ecológico producido por los contaminantes tóxicos de este tipo de efluente: todo bajo el lineamiento de reutilizar el agua tratada en sistemas de riego agrícola, urbano, o para uso de servicios de tipo sanitario comercial (lavado de autos, servicios sanitarios de limpieza, etc.)

El reciclar una cantidad de agua, por pequeña que sea, traerá tres beneficios inmediatos:

1. Satisfacer con más facilidad la demanda de agua de primer uso, pues en general el reuso del agua la disminuye.
2. Disminuir la cantidad de desechos vertidos a cuerpos receptores y, como consecuencia, abatir los niveles de contaminación en los cuerpos receptores.
3. Reducir, si no es que eliminar, los daños ecológicos que se originan en las regiones en donde el agua es tomada para satisfacer las necesidades de lugares muchas veces distantes al sitio de origen.

IV) Aspectos técnico-económicos:

Por un lado, el hecho de efectuar descargas de este tipo de efluente al sistema de alcantarillado municipal y/o otros cuerpos receptores constituye un delito ecológico si las concentraciones de los contaminantes de interés rebasan lo establecido por la NOM-031-ECOL/1993. Este delito implica una severa sanción de tipo económico, además de que el infractor se verá obligado a implementar algún tipo de tratamiento a su efluente de tal forma que pueda descargar bajo los parámetros que determina la norma.

Si se piensa en la posibilidad de obtener agua con la calidad aceptable para ser reutilizada en los procesos productivos, como servicios auxiliares, es claro de que se presente una forma de optimización en el uso y reuso de ésta, que finalmente se traduce en la reducción de costos por el reuso de la misma y aún más si el agua es una materia prima de importancia en el sector industrial de interés.

El hecho de remover los contaminantes no soluciona el problema; sino que también es factible considerar que una vez separados, estos puedan tener aplicación técnica viable y que, además, permita disminuir la producción de sustancias como estas (metales), que a su vez implicaría una mayor circulación de los mismos y por lo tanto los respectivos riesgos de tipo ecológico.

De todo lo anterior lo que resulta de mayor importancia son los índices de contaminación que implican efluentes como este, ya que cualquier tipo de impacto al medio ambiente tendrá su respectiva consecuencia hacia los seres vivos.

En el aspecto técnico, es evidente que los metales pesados no pueden ser removidos por procedimientos exclusivamente del tipo físico o químico y mucho menos bioquímico; sino que es necesario la implementación de una serie de etapas que permitan obtener agua tratada con la calidad requerida por la normatividad.

5.3. CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Considerando esta serie de aspectos podemos decir que el o los procesos que se requieren para cubrir en su mayor parte las restricciones mencionadas deben cumplir con las características puntuales siguientes:

1.- Máxima eliminación de los metales pesados a fin de:

- a) Obtener las concentraciones residuales de las sales de metales pesados en valores menores a los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad (mencionados en la tabla 1.4 del capítulo I y la tabla A.1 del anexo).
- b) Obtener agua con calidad para ser reutilizada en sistemas de riego, servicios sanitarios, auxiliares, ó bien, descarga a cuerpos receptores.
- c) Eliminar los contaminantes de una fase acuosa sin la necesidad de generar otra fase acuosa contaminada como lo implicaría el lavado o regeneración de membranas o dispositivos de separación.

2.- Cumplir con los aspectos de control ambiental inherentes al caso de estudio:

- a) No generar residuos tóxicos
- b) Generar la menor cantidad posible de residuos; además de obtenerlos en la fase adecuada para el manejo y disposición de los mismos (fase sólida).
- c) El manejo mínimo de etapas y/o operaciones que impliquen riesgos ambientales.

3.- Condiciones operativas (costos):

- a) Menor costo de inversión, operación y mantenimiento.
- b) Disponibilidad de equipos y materiales.
- c) Requerimientos mínimos de espacio, equipo y personal.
- d) Estabilidad y facilidad operativa.

Considerando la información contenida en el capítulo IV con respecto a los procesos específicos aplicables para la eliminación de cada metal, podemos generar el siguiente cuadro:

TABLA V.1
GRADO DE APLICABILIDAD DE LOS PROCESOS EXISTENTES

METAL PROCESO	CADMIO	CROMO	COBRE	PLOMO	ZINC	NIQUEL	TOTAL
PRECIPITACION QUIMICA	APLICA	REQUIERE DE OXIDO-REDUCCION	APLICA	APLICA	APLICA	APLICA	5
INTERCAMBIO IONICO	APLICA	APLICA	APLICA	POCO EFICIENTE	APLICA	APLICA	5
EVAPORACION	APLICA	APLICA	APLICA	APLICA	APLICA	APLICA	6
FLOTACION POR BURBUJAS DE ADSORCION	APLICA	REQUIERE DE OXIDO REDUCCION	APLICA	APLICA	APLICA	APLICA	5
OSMOSIS INVERSA	APLICA	REQUIERE OXIDO-REDUCCION	APLICA	POCO EFICIENTE	APLICA	APLICA	4

FUENTE: Recopilación de Métodos revisados en Cap. IV

TABLA V.2
COSTOS IMPLICADOS EN LA IMPLEMENTACION DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO

PROCESO	AREA	EQUIPO	ENERGIA	PERSONAL	MANNTO	TOTAL FACTOR DE COSTO
PRECIPITACION QUIMICA (COAGULACION-FLOCULACION)	60	45	30	20	10	165
INTERCAMBIO IONICO	30	90	20	80	80	280
EVAPORACION	20	80	100	60	80	340
FLOTACION POR BURBUJAS DE ADOSRCION	50	50	20	20	10	150
OSMOSIS INVERSA	10	100	60	100	100	370

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

10 Calificación a procesos de menor costo.

100 Calificación a procesos que implican altos costos.

FUENTE(7): Anuario de Tecnologías de Tratamiento de aguas Residuales, 1991 DGCOH.

De la tabla anterior podemos definir el factor de costo como la sumatoria de todos los costos implicados en la implementación de cada proceso de tratamiento:

$$F_c = \sum c_i \quad (5.1)$$

donde c_i es el costo i implicado.

Como podemos observar el proceso que permite eliminar a la mayoría de los metales es el de evaporación, aunque los demás (a excepción de la ósmosis inversa) tienen el mismo grado de aplicabilidad todavía no podemos definir con certeza cual de estos es el más adecuado para el presente caso de estudio. De tal manera que será necesario considerar los criterios 1,2 y 3 de la sección anterior como lineamientos para la selección del proceso.

5.4. EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

De esta manera considerando la información de la tabla IV.1, IV.2, V.1 podemos definir el esquema (Tabla V.2), donde se puede definir que proceso cumple con los criterios establecidos a fin de proveer una mejor decisión en la selección.

Es evidente que en este cuadro podemos encontrar más elementos para poder discernir que proceso (s) es el más adecuado para el tratamiento de los efluentes de interés. Así pues podemos discutir cada proceso, comenzando a descartar a aquellos que no satisfagan los requerimientos establecidos al inicio de la presente sección (Cuando se habla del efluente se esta refiriendo al agua residual a tratar, mientras que al decir influente nos referimos a la misma agua residual a tratar pero en la etapa previa al inicio del proceso que se implemente para el tratamiento):

Tabla V.3
EVALUACION DE LAS POSIBLES ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

PROCESO	EFICIENCIA	RESTRICCIONES AMBIENTALES	CONDICIONES OPERATIVAS COSTOS	OBSERVACIONES
PRECIPITACION QUIMICA (COAGULACION-FLOCULACION)	*REMOCION EFICIENTE. 85-95% *GENERA LODOS SUSCEPTIBLES DE SER SECADOS.	* EVENTUALMENTE PUEDE GENERAR EMISIONES VOLATILES RELATIVAMENTE TOXICAS. * VOLUMEN DE LODOS EN FUNCION DE LOS AGENTES QUIMICOS ADICIONADOS.	* FACTOR DE COSTO 165 * PROCESO ESTABLE. POCO SENSIBLE A VARIACIONES DE CAUDAL, CONCENTRACION, ETC.	LA REMOCION ES ALTAMENTE EFICIENTE SIEMPRE Y CUANDO SE TENGA CONTROLADO LA ADICION DE AGENTES QUIMICOS Y EL TIPO DE AGITACION. LOS RESIDUOS GENERADOS SON RELATIVAMENTE INOCUOS DEPENDIENDO DE LOS AGENTES QUIMICOS UTILIZADOS.
INTERCAMBIO IONICO	*REMOCION EFICIENTE. 99% * GENERA NUEVA FASE ACUOSA.	* GENERA NUEVA FASE ACUOSA CONTAMINADA.	* FACTOR DE COSTO 280 * PROCESO ESTABLE, INSENSIBLE A VARIACIONES DE CAUDAL Y CONCENTRACION.	IMPLICA LA NECESARIA REGENERACION DE LOS LECHOS DE INTERCAMBIO IONICO LO QUE IMPLICARIA UNA REDUNDANCIA OPERATIVA PARA EL EFLUENTE DE INTERES.
EVAPORACION	*REMOCION EFICIENTE. 99.99% *GENERA RESIDUO SOLIDO.	* IMPLICA UN ALTO CONSUMO DE ENERGIA CON SUS RESPECTIVOS RIESGOS. * VOLUMEN BAJO DE RESIDUOS.	* FACTOR DE COSTO 340. * PROCESO RELATIVAMENTE ESTABLE, MUY SENSIBLE A VARIACIONES DE CONCENTRACION.	REQUIERE DE UN ALTO CONSUMO DE RECURSOS PARA SU OPERACION Y MANTENIMIENTO, ADEMÁS QUE GENERA PROBLEMAS DE EFLUENTES CONTAMINADOS GENERADOS EN LA DESINCRUSTACION DE LOS EVAPORADORES.
FLOTACION POR BURBUJAS DE ADSORCION	* REMOCION SUPERIOR A LOS PROCESOS CONVENCIONALES 95-99.99% *GENERA RESIDUO SEMISOLIDO.	* GENERA BAJO VOLUMEN DE RESIDUOS SEMISOLIDOS.	* FACTOR DE COSTO 150. * PROCESO ESTABLE. POCO SENSIBLE A VARIACIONES DE CONCENTRACION.	ESTA LIMITADO UNICAMENTE A LAS CONDICIONES ADECUADAS DE TENSION SUPERFICIAL EN EL MEDIO QUE PERMITAN LA FORMACION DE BURBUJAS CON LAS CARACTERISTICAS OPTIMAS PARA LA SEPARACION DE LOS METALES.
OSMOSIS INVERSA	*REMOCION EFICIENTE. 99% *GENERA NUEVA FASE ACUOSA.	* GENERA NUEVA FASE ACUOSA CONTAMINADA.	* 370 * PROCESO INESTABLE. MUY SENSIBLE A VARIACIONES DE CONCENTRACION Y CAUDAL.	REPRESENTA GRAVES PROBLEMAS POR LA OBSTRUCCION DE LAS MEMBRANAS, ASI COMO DEL ALTO CONSUMO DE ENERGIA.

** REDUNDANCIA OPERATIVA: Referido al caso de tratar un efluente proveniente de otra regeneración

FUENTE: Recopilación de Métodos revisados en Cap. IV

a) Ósmosis Inversa.

Si bien este proceso nos representa una excelente eficiencia en la eliminación de los contaminantes, tiene diversas restricciones que lo harían inviable como proceso aplicable al presente caso. Estas restricciones se pueden resumir en:

- * Altos costos de inversión (factor de 370).
- * Proceso inestable (sensible a variaciones de flujo y caudal)
- * Altos requerimientos de servicios (presión)
- * Genera una nueva fase acuosa contaminada al realizar el lavado de las membranas que contiene a los metales separados del efluente tratado.

Aunque estas restricciones no se enlistan conforme a su grado de importancia, (ya que esta depende de cada caso particular), si se puede inferir que la más trascendente es que este proceso nos generará un nuevo efluente líquido contaminado cada vez que se tengan que lavar las membranas de separación lo que nos generaría la redundancia operativa ya mencionada. Por lo anterior se puede descartar a la Ósmosis Inversa como un proceso viable para el presente caso de estudio.

b) Intercambio iónico.

En este caso sucede la misma situación que con la ósmosis inversa ya que, aunque si bien su factor de costo es menor al de la ósmosis inversa (280) aún este se puede considerar como muy elevado, considerando que en dicho factor se involucraron aspectos de espacio, equipo, personal, mantenimiento etc. Sin ser el factor económico el punto de partida para tomar una decisión con respecto a los demás, si es muy importante considerarlo cuando se requiere hacer un balance económico entre el influente a tratar y el efluente obtenido con su respectivo reuso o destino final. Por otra parte este proceso también requiere de una etapa que nos genera nuevamente efluentes líquidos contaminados; es decir, al regenerar el lecho de intercambio que se utilizó para separar a los metales de nuestro efluente de interés, necesariamente se produce un nuevo efluente de regeneración lo que es equivalente a la redundancia operativa. En conclusión podemos descartar el proceso de intercambio iónico como método para la eliminación de metales en el presente caso de estudio.

c) Evaporación.

Como se muestra en el cuadro V.3, este método es el más eficiente en términos de separación de contaminantes y en el sentido de que genera una fase sólida conteniendo a los metales de interés; sin embargo también cuenta con limitantes de importancia como son:

- * Alto factor de costo (340).
- * Alto consumo de energía.
- * Proceso sensible a variaciones de concentración en el influente, situación muy común en el efluente de interés.
- * Requiere de la adición de agentes quelantes para eliminar la dureza debida al calcio y magnesio; elementos presentes en el efluente en mayor proporción que los demás metales.
- * El equipo de evaporación es muy sensible a los agentes corrosivos; el efluente a tratar tiene carácter corrosivo $\text{pH} > 12$.
- * Requiere de la adición de desincrustantes químicos con sus respectivos lavados lo que genera un efluente líquido contaminado (aunque en menor proporción que los dos casos anteriores).

Se puede decir que el proceso de evaporación es factible de aplicarse en el presente caso, siempre y cuando se implementará un etapa previa de tal manera de minimizar el factor de dureza y de corrosión en el influente.

d) Flotación por Burbujas de Adsorción.

Sin duda, este proceso ofrece un sinnúmero de ventajas con respecto a los demás. Además de que representa una alta eficiencia en la separación de los contaminantes, no requiere de una gran inversión ya que su factor de costo es de apenas 150 lo que implica requerimientos mínimos de equipo, personal, mantenimiento etc. Es un proceso estable, ya que es prácticamente insensible a las variaciones de concentración en el influente; requiere de un menor número de etapas que los demás procesos etc.

Por otra parte, aunque este proceso ofrece toda esta gama de ventajas con respecto a los discutidos anteriormente, existen factores que se deben tomar en cuenta para su aplicación en el presente caso, y que son:

- * La flotación de componentes en solución requiere primero de un cambio de fase, es decir, requiere insolubilizar a los contaminantes.
- * La separación se verá favorecida con la adición de los agentes químicos necesarios para obtener las condiciones óptimas de separación (pH, flujo de aire, dimensiones de la columna de separación etc.)

Es importante recalcar que la flotación por burbujas de adsorción por sí sola no proveerá de la separación adecuada para nuestro caso de estudio por lo que es necesario apoyarse de algunos fenómenos físico-químicos ya conocidos como son la coagulación ó la floculación.

En consecuencia podemos decir que la flotación por burbujas de adsorción es la mejor opción como proceso de separación de los metales en el efluente de interés, siempre y cuando se apoye en los fenómenos de coagulación-floculación para adecuar el medio requerido para la mejor eliminación de los contaminantes.

e) Precipitación Química.

Como podemos observar, al igual que el método anterior, la precipitación química provee de una muy buena alternativa de eliminación de los contaminantes en el efluente. Aunque la eficiencia de separación es ligeramente menor a la de las burbujas de adsorción, este proceso implica costos semejantes a los de la flotación con burbujas de adsorción, además que también es un proceso estable y requiere de un mínimo de servicios. Las únicas desventajas que presenta con respecto al proceso de burbujas de adsorción es que la separación de los floculos (lodos) obtenidos requiere de una mayor inversión de espacio tiempo y capital. Esto se traduce a que después de la formación de los floculos su separación es relativamente mas ineficiente que la flotación de partículas (que también pueden ser floculos); este factor cobra mayor importancia si consideramos que la generación del efluente podría ser más frecuente que la capacidad del proceso para tratarlo.

En consecuencia resulta fácil discernir que en cuanto a posibilidades de aplicación es muy semejante al de burbujas de adsorción, sin embargo es notable que también cuenta con algunas deficiencias propias. Por esto se infiere que para poder aplicar este proceso es necesario suplir la etapa que representa la problemática mencionada anteriormente con otra operación unitaria adecuada para el caso.

Es muy claro que los dos últimos procesos discutidos nos representan la mejor opción como posibles alternativas para la eliminación de los metales pesados contenidos en el efluente de estudio, sin embargo es necesario tener en consideración que como cada uno tiene sus limitantes sería por demás imposible poder elegir uno de los dos como alternativa única. Por lo que es posible plantear un proceso que consista de la combinación de cada uno de ellos tratando de enriquecerlos el uno con el otro a manera de obtener un proceso que supere a cada uno de los iniciales en todos los sentidos.

Retomando el punto anterior si observamos las limitantes y ventajas (de uno con respecto del otro) tenemos el siguiente cuadro:

TABLA V.4
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS SELECCIONADOS.

PROCESO	VENTAJA	DESVENTAJA
FLOTACION POR BURBUJAS DE ADSORCION	SE OBTIENE UNA SEPARACION MAS RAPIDA Y EFICIENTE DE LAS FASE LIQUIDO-SOLIDO	REQUIERE DE LA INSOLUBILIZACION DE LOS CONTAMINANTES SOLUBILIZADOS POR MEDIO DE LA COAGULACION-FLOCULACION
PRECIPITACION QUIMICA	INSOLUBILIZA A LOS CONTAMINANTES POR MEDIO DE LA COAGULACION FLOCULACION GENERANDO DOS FASES QUE FACILITAN LA SEPARACION	REQUIERE DE MAYOR TIEMPO Y ESPACIO PARA LA SEPARACION DE LAS FASES

FUENTE: Recopilación de Métodos revisados en Cap. IV

El cuadro anterior muestra claramente como ambos procesos se pueden complementar para generar uno solo de tal forma que se optimisen todos los factores involucrados en la separación de los contaminantes (metales pesados contenidos en el efluente de interés).. Esta combinación permite obtener claramente las siguientes ventajas con respecto a todos los demas:

- * Desde el punto de vista técnico no requiere el lavado de ningún lecho o equipo que propiciará un nuevo efluente conteniendo a los metales extraídos previamente, los cuales ó se descargan o se les proporciona un nuevo tratamiento (redundancia operativa). Además la eficiencia de separación es considerablemente mayor a cualquiera de los procesos revisados de forma independiente.

- * Ambientalmente, representa una solución integral al problema de tratar o descargar el efluente de interes, puesto que extrae a los contaminantes en una fase que permite su manejo y disposición final aislada de cualquier cuerpo receptor o sistema de alcantarillado, que finalmente a largo plazo implicaría la acumulación de los mismos en los ecosistemas.

- * En el aspecto económico, si bien no es el de menor costo, en cuanto a inversión y operación la eficiencia de remoción que provee y la el celo de evitar contribuir a la contaminación del medio ambiente cubre completamente este aspecto, además que como se mostro en los cuadros anteriores los costos involucrados en la implementación y operación se pueden considerara raznables y por lo tanto factibles.

Se observan claramente las ventajas que representan ambos procesos con respecto a los demás; por lo que la conclusión del presente capítulo es que el proceso más adecuado para la eliminación de los metales pesados contenidos en los efluentes de la regeneración de resinas de intercambio iónico es un proceso combinado de Coagulación-Floculación-Flotación por burbujas de adsorción.

Es evidente que el análisis anterior es de tipo cualitativo, lo que no genera una conclusión que si bien pudiese ser evaluada experimentalmente a manera de obtener el mejor método para el presente caso de estudio; es importante recordar que la parte experimental no se encuentra dentro del alcance del presente trabajo de investigación. Por esto en el siguiente capítulo se realizará la descripción cualitativa del proceso combinado mencionado anteriormente como una propuesta de proceso que mencione las etapas involucradas en el mismo así como el sustento teórico involucrado en el mismo.

CAPITULO VI
DESCRIPCION DEL SISTEMA
SELECCIONADO

DESCRIPCION DEL PROCESO SELECCIONADO.

6.1. PRINCIPIO DE OPERACION

El principio para la separación de solutos por burbujas de adsorción, es la diferencia existente entre las actividades superficiales de los materiales presentes en solución o en suspensión. El material puede ser celular o coloidal, cristales minerales, precipitados o bacterias; en algunos casos es más bien la actividad superficial de la interface aire-líquido (fig. VI.1).

Esas actividades superficiales permiten la fijación de los solutos preferencialmente en las interfaces aire-líquido de las burbujas o las espumas.

Como las burbujas o espumas suben desde el seno de la columna líquida, el material atrapado puede ser removido al llegar a la superficie; al colapsarse la espuma, se reduce el volumen facilitando la separación de los solutos o contaminantes.

Cuando el material a remover no tiene una adecuada actividad superficial, este puede ser adsorbido por la adición de un "colector". Esta combinación cuando se selecciona correctamente en la superficie activa de la interface aire-líquido, permite una remoción eficiente. La sustancia de interés por remover se llama "coligando".

La ecuación de Gibbs, forma la base de las separaciones por burbujas de adsorción de especies moleculares iónicas.

$$\Gamma = -\frac{a}{RT} \frac{d\gamma}{da} = \frac{-1}{RT} \frac{d\gamma}{d \ln a} \quad (6.1)$$

Donde: Γ = superficie del soluto en exceso

a = actividad del soluto

γ = tensión superficial

Esta ecuación simplemente describe que las sustancias disminuyen la tensión superficial del solvente para permitir la concentración del soluto en la interface.

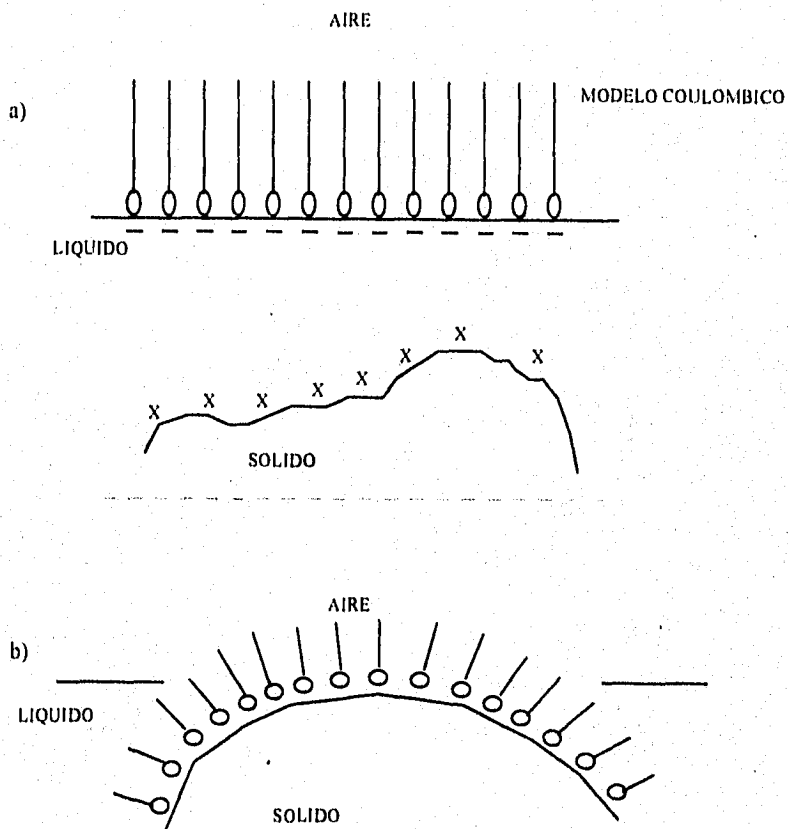


Fig. VI.1 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE DOS MODELOS BASICOS UTILIZADOS EN LA SEPARACION POR BURBUJAS

6.1.1. TIPOS DE SEPARACION.

Las separaciones inicialmente han sido categorizadas como "con espuma" o "sin espuma". Las técnicas sin espuma incluyen el barrido de solvente y el fraccionamiento poco estudiado. Los materiales son adsorbidos en la superficie de las burbujas y son colectados

en un líquido inmiscible, sobre la capa de la superficie del líquido. Como en la parte superior de la columna del líquido las burbujas estallan y el material transportado puede ser removido desde la superficie.

Estas son algunas subcategorías de la separación por espuma, y están resumidas en la tabla VI.1

TABLA VI.1
CLASIFICACION Y PRINCIPIOS DE LAS PRINCIPALES TECNICAS DE OPERACION.

I. Separación por adsorción sin espuma.

- A) "Sublimación de solventes".
- B) Fraccionamiento por burbujas.

II. Separación con espuma.

A. Fraccionamiento con espuma (superficie activa, el material es removido como una interface gas-solvente)

B. Dispersión por microgas (burbujas extremadamente pequeñas)

C. Flotación

1. Flotación de minerales.
2. Flotación de precipitados (formación *in situ* de un flotoide de un precipitado)
3. Flotación de adsorción coloidal (adsorción sobre o coprecipitación con el acarreo de un floculo que es flotado).
4. Ion-flotación (reacción del material con superficie netiva colectora surfactante que produce un precipitado con superficie activa que posteriormente es espumado).
5. Flotación molecular (principio igual a los de ion flotación).

Fuente (27).- "Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse"

Estas incluyen la flotación espumosa, y la dispersión con "microgas". La flotación espumosa es además subdividida. El fraccionamiento con espuma y la flotación ionica requiere de grandes cantidades estequiométricas. El costo de los surfactantes excluye el uso a gran escala de estas técnicas.

En comparación, la flotación por precipitación y adsorción coloidal requiere relativamente menores cantidades de surfactante, solamente lo suficiente para poder formar espuma y el suficiente para generar el material hidrofóbico. Además, las velocidades de remoción de

estas técnicas son generalmente altas. Esto permite generar altos flujos y potencial aplicación a gran escala.

Los modos de operación se pueden resumir en la tabla VI.2

TABLA VI.2
MODOS DE OPERACION DE LA FLOTACION POR ESPUMA.

Opciones	
1. Batch	ó continuo
2. Reflujo del espumato colapsado	ó sin reflujo
3. Multi-etapa	ó etapa simple
4 Alimentación al fondo de la columna	ó flujo directo a partir de la espuma.

Fuente(9).- "Bubble and Foam Separation"

6.2. TEORIA DE SEPARACION

El estudio de estas técnicas ha mostrado que representan una buena oportunidad técnica para su aplicación a gran escala. Además se han encontrado los aspectos sensitivos de estos sistemas, estos factores interfieren a nivel molecular y son: pH, fuerza ionica, concentración del surfactante, y la interacción específica entre iones.

6.2.1. PAPEL DE LA DINAMICA DE FLUIDOS

Las partículas son rebotadas hacia la interfaee aire-líquido de las burbujas o espuma por energía eléctrica. Esta energía eventualmente es mucho mayor que la energía térmica (KT , aprox. $4E-14$ ergs a 298 K)

Sin embargo, esto representa fuerzas viscosas de arrastre, las cuales también deben considerarse. Si estas fuerzas son muy grandes puede interferir en la eficiencia de separación. Otra consideración es la colisión en la sección transversal , en el contacto entre las burbujas y el floculo.

6.2.2. FUERZAS VISCOSAS DE ARRASTRE:

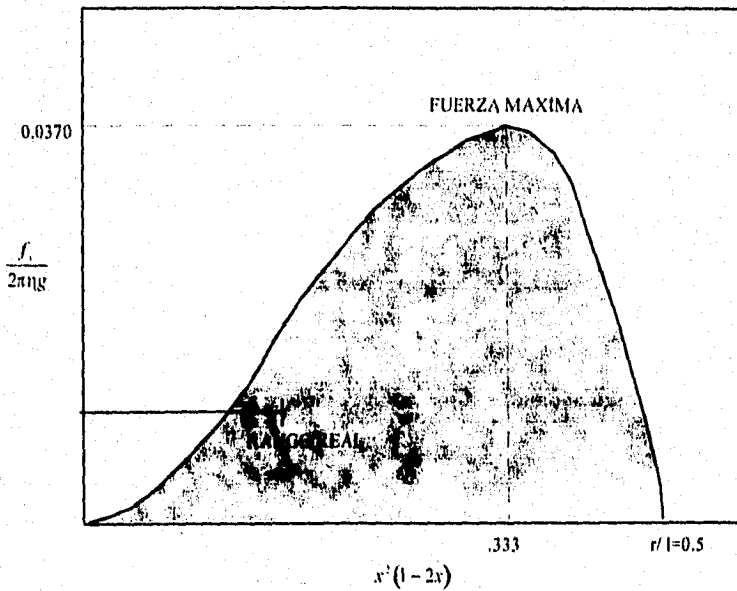
Estas fuerzas resultan del contraflujo del líquido de abajo entre la interfase aire- agua que sube.(fig. VI.2). Generalmente, se puede mostrar que la magnitud de esas fuerzas no son la suficiente para liberar el floculo adsorbido. Los cálculos proveen valores con orden de magnitud de $10E-8$ din, mientras que las fuerzas de ligadura(material- interfase) son del orden de $10E-5$ din, para partículas con radio de $10E-5$ cm (considerando partículas floc esféricas y burbujas).

Sin embargo las fuerzas de ligadura se incrementan con el radio y las fuerzas viscosas de arrastre se incrementan con el cuadrado del radio, entonces las partículas se expanden a un tamaño de $10E-2$ cm , y entonces pueden existir interferencias en la remoción (ec. 6.2. y 6.3)

$$\text{Fuerzas Viscosas } F_v = 6\pi\eta v \quad (\text{ley de Stokes}) \quad (6.2)$$

FUERZA VISCOSA

$$f_v = 6\pi\eta g r^2 (1 - 2r)$$



Donde: r = Radio de partícula
 η = Viscosidad
 g = Constante gravitacional
 Y = Espesor de película

Fig. VI.2 FUERZAS VISCOSAS DE ARRASTRE A CONTRAFLUJO ENTRE EL LIQUIDO EN DESCENSO Y LA INTERFACE EN ASCENSO.

Donde: η = Viscosidad
 g = Constante gravitacional
 r = Radio de partícula
 v = Velocidad en dirección descendente

Pero
$$v = \left(\frac{\rho g}{2\eta} \right) (2lr - 4r^2)$$

Donde: l = Espesor de película
 ρ = densidad del líquido

$$\text{Fuerza de ligadura } F_b = \frac{|\Delta G|}{r} \quad (6.3)$$

Donde: ΔG = Energía de Gibbs (ergs)
 r = Radio de partícula (cm)

La mejor aproximación a las condiciones reales de un sistema de flotación con ascenso de un floc en una burbuja implica un cierto grado de complejidad y una gran inversión de cálculo computacional.

Sin embargo, se puede concluir que la optimización de los tamaños de partícula permite altas eficiencias de remoción.

6.2.3. SECCION TRANSVERSAL DE COLISION.

Se asume que existe una distancia mínima entre la burbuja y la partícula para poder fijarla, si deseamos calcular la velocidad con la que ese proceso de fijación ocurre.

Si γ es la distancia transversal que por atracción coulombica empuja la partícula hacia la burbuja en el tiempo de recorrido del trayecto, se puede demostrar que la partícula puede estar dentro a una distancia de $(3/2)^{1/2}\gamma$ de el centro de la burbuja (fig. VI.3)

Esta captura cuyo volumen es $\frac{3}{2}\pi\gamma^3h$, donde h es la distancia ascendente que recorren las burbujas. Este análisis esta basado en pequeñas burbujas que están dentro del flujo viscoso deslizado según el régimen del mismo.

Para burbujas mas grandes, los efectos inerciales son mas importantes. En este caso se consume un medio no viscoso (flujo no turbulento que permite el paso de las burbujas). Cálculos similares permiten determinar el volumen desde que las partículas son capturadas por las burbujas grandes: $v = 3\pi\gamma ah$, donde γ , h ya fueron definidas antes, y a es el radio de la burbuja.

Esta información permite la determinación de los flujos en los procesos de flotación, basados en el entrapamiento de los floc's en las burbujas, lo que permite conocer el flujo y la concentración del floc.

Para el flujo continuo, con etapa simple en estado estacionario, la concentración del floc en el effluente (C_e) esta dado por la ecuación (6.4).

$$C_e = \frac{C_o}{1 + 9\gamma h Q_a / 4a^2 Q_l} \quad (6.4)$$

Donde: C_o = Concentración del floc en el influente

Q_a = Velocidad de flujo volumétrico de aire

Q_l = Velocidad de flujo volumétrico del líquido

γ , h , a = Términos ya definidos

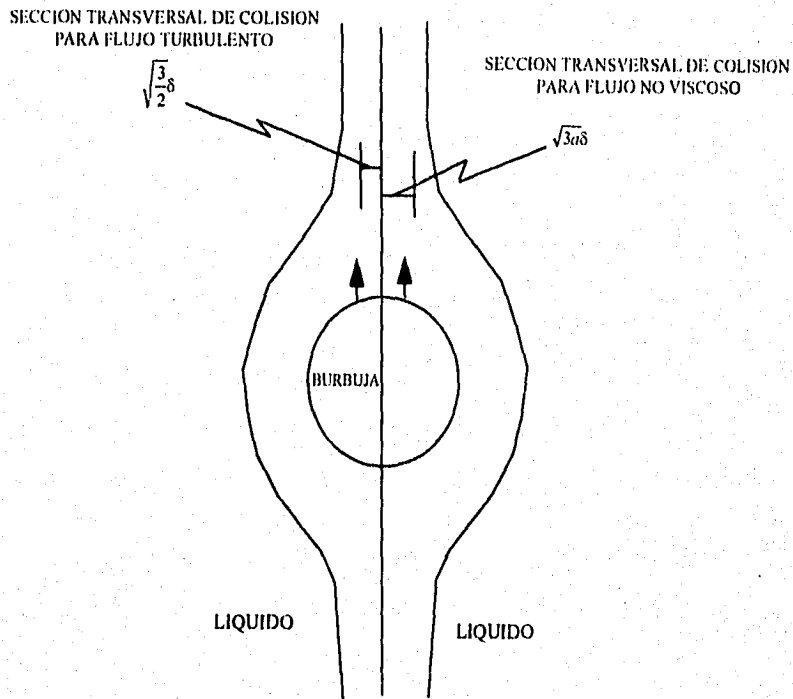


Fig: VI. 3 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE COLISION PARA DOS REGIMENES DE FLUJO-TURBULENTO Y NO VISCOSO

En concentraciones para las cuales las burbujas pueden ser cargadas completamente, el número máximo de partículas que las burbujas pueden acarrear es:

$$M_{\text{max}} = \frac{4a^2}{b^2} \quad (6.5)$$

Donde b es el radio efectivo del floc (mucho menor que el radio a , de la burbuja).

Imponiendo estos límites en el cálculo de la concentración de floc en el efluente, se puede decir que para la remoción continua en un sistema donde las burbujas están saturadas, la velocidad de remoción de las partículas es; simplemente:

$$C_e - C_o = \frac{3Qa}{\pi ab^2 Q_1} \quad (6.6)$$

6.2.4. MODELO MATEMATICO.

El modelo matemático requiere de una gran inversión de tiempo máquina (cálculo computacional), por lo que solamente se muestra una aproximación que permite una máxima eficiencia de operación.

La ecuación no lineal de Poisson-Boltzmann.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{A \sinh(3z\psi / kT)}{1 + B \cosh(ez\psi / kT)} \quad (6.7)$$

Donde $A = 8\pi z a c_o / (1 - 2C_o / C_{max}) D$
 $B = 2C_o / (C_{max} - 2C_o)$
 $z = 1$ (carga de iones en la solución electrolítica)
 $e =$ Carga electrónica
 $C_o =$ Concentración electrolítica
 $C_{max} =$ Concentración máxima
 $D =$ Constante dieléctrica en la solución

Permite el cálculo del potencial eléctrico en la vecindad de la interface floc-agua. Los volúmenes finitos de los iones, que son responsables de la carga en la solución son mostrados en esta ecuación. Esto produce la distribución del potencial entre la interface sólido líquido desde el seno de la solución; entre la interface líquido aire; y entre las dos interfaces sólido-líquido.

El resultado provee el fundamento del modelo coulombico de la flotación de partículas, en donde la partícula sólida cargada es extraída hacia la interface aire-agua opuestamente cargada por la presencia del surfactante ionico. Estos resultados y las técnicas estadísticas son empleados para el cálculo de las isotermas de adsorción de partículas en la interface aire-agua y son la base de este modelo.

También existe un modelo no coulombico; el cual asume que la adsorción del surfactante en las partículas de interés para la formación de una superficie hidrofóbica en que el contacto aire-agua tiene un ángulo menor a cero, esto permite el atrapamiento de las burbujas. La magnitud de las fuerzas de enlace para este modelo puede ser estimada. Entonces es recuperado con las fuerzas de arrastre sobre la partícula fijada en la interface aire- agua en la espuma o sobre las burbujas que ascienden.

Utilizando el modelo no Coulombico, se puede investigar a detalle la adsorción del surfactante en la interface sólido-agua. Las interacciones de Van der Waals de las "colas" de los iones surfactantes, permiten una condensación abrupta del surfactante en la superficie a medida que su concentración en solución se incrementa.

En la figura siguiente se representa la formación de una película condensada (llamada hemicela), apareciendo solo lo necesario para permitir el crecimiento del sólido hidrofóbico en la superficie.

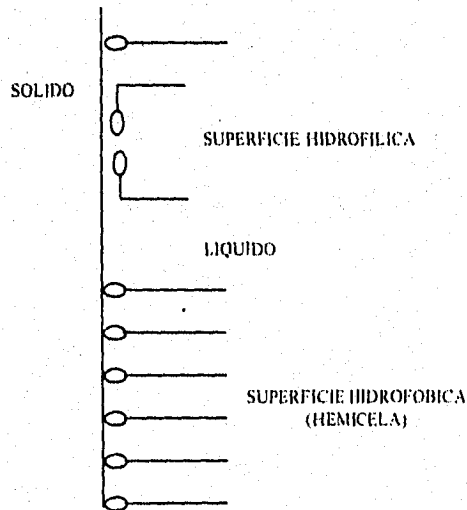


Fig. VI. 4 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA SUPERFICIE HEMICELA-HIDROFOBICA

Esta superficie es afectada por cambios en la fuerza iónica y la densidad de carga en la superficie.

Un estudio análogo permite estudiar la formación de monocapas de surfactante condensado en las interfaces aire-agua.

Esto provee el mecanismo para establecer la densidad de carga en la interface o en el modelo Coulombico.

La información resultante de este modelo matemático ayuda a direccionar algunos problemas prácticos de la flotación. Por ejemplo, dos problemas en la adsorción coloidal de un precipitado son :

1. La recuperación por reciclamiento de surfactante adsorbido en el lodo separado de la espuma colapsada.

2. Interferencia por iones extraños con la formación de hemicelas de surfactante en la interface sólido-agua.

La información es obtenida por el desarrollo de un modelo de "competición" entre los iones surfactantes y otros iones en la adsorción sobre la superficie del floc. Un estimado estadístico, permite observar como interfiere la concentración excesiva de surfactante con la flotación del material.

El resultado de las relaciones entre los modelos Coulombico o no Coulombico generalmente, sirven para predecir la formación de hemicelas, primeramente para la flotación de las partículas y los efectos similares como resultado de la variación de parámetros como la carga de surfactante y la fuerza iónica del mismo.

Estas relaciones se han evaluado con estudios a nivel laboratorio; permitiendo obtener las siguientes conclusiones:

1. Incremento de la fuerza iónica: Decrece la adsorción, decrece el espesor de la película de doble capa, decrece la fuerza de atracción entre las burbujas, decrece el tamaño efectivo de las partículas, y reduce la eficiencia de flotación.

2. Incremento de la temperatura: Decrece la adsorción (mínimo efecto)

3. Incremento del potencial de superficie en la interface aire-agua: Incrementa la adsorción de partículas opuestamente cargadas.

4. Incremento de la magnitud de la atmósfera iónica: Reduce la eficiencia de flotación.

5. Incremento de tamaño de partícula: Incrementa la eficiencia de flotación

6. Incremento de la longitud de enlace del surfactante: Reduce la concentración de surfactante necesario para la formación de hemicelas.

Las aguas residuales industriales son el principal objetivo par la aplicación de estas técnicas. Sin embargo, por la naturaleza multicomponente de las mismas, causa interferencias con los procesos de remoción.

De esta manera es necesario realizar pruebas de laboratorio para poder manipular y analizar los diferentes aspectos involucrados en el proceso de remoción de contaminantes específicos como los metales pesados.

6.3. PROCESO PROPUESTO

6.3.1. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA COLUMNA DE BURBUJEO

Los modelos matemáticos actuales permiten una buena simulación para el diseño y operación de las columnas de burbujeo; sin embargo, esto implica el desarrollo experimental de los mismos, lo cual no esta contemplado en el desarrollo del presente trabajo, por lo cual simplemente se planteará una breve descripción de las posibilidades aplicables a nuestro caso de estudio, y de esta manera poder proponer un diagrama de proceso aplicable al mismo.

La operación de las columnas puede ser de dos formas; batch o continúa. El flujo puede ser simple o en contraflujo; para sistemas en contraflujo existen tres tipos de arreglos:

- a) Stripping
- b) Enriquecimiento.
- c) Combinación de ambos.

En modo de stripping, el influente es alimentado en la parte superior de la columna; a contraflujo con el colector para permitir el ascenso de la espuma formada; la sección de la columna que se encuentra por encima de la alimentación del influente permite el drene de la espuma. En este tipo de arreglo, el objetivo es reducir el soluto en el efluente a niveles considerablemente adecuados. Algunas veces se implementa una recirculación que permita incrementar la eficiencia de la separación.

En las columnas de enriquecimiento, parte del espumato colapsado es recirculado en la parte baja de la columna para incrementar la concentración de soluto en el espumato.

Otra opción es el uso de baffles o mamparas, estas permiten, para flujos continuos mejorar la eficiencia de remoción e incrementa al máximo la carga hidráulica para minimizar el reboso o escurrimiento de la espuma además de evitar otro tipo de dispersiones axiales.

Experimentalmente se ha demostrado que la eficiencia de la separación se incrementa con el incremento de la velocidad de gas, y disminuye con el área de sección transversal de la columna; la dispersión axial, y el tamaño de las burbujas.

Otras consideraciones para el diseño son:

- * Alineación, horizontal y vertical, de la columna.
- * Adecuada distribución del flujo de alimentación de influente en la sección transversal de la columna.
- * Tiempo de floculación adecuado.
- * Control de pH.

Los sistemas desalineados reducen la eficiencia de remoción ya que incrementan las dispersiones por acanalamiento del flujo líquido y la consecuente ruptura de la espuma.

Una vez que se ha llevado a cabo la separación, es importante tener un buen sistema para colapsar la espuma. Existen técnicas especializadas para tal objetivo como los métodos térmicos, sónicos, químicos, etc.; La técnica más adecuada son los diseños hiladores a alta velocidad porque representan altas eficiencias a bajos consumos de energía.

6.3.2. ESCALAMIENTO.

Como se ha mencionado, la aplicación de esta técnica requiere de un estudio preliminar con el respectivo modelado matemático y pruebas de laboratorio; a fin de poder determinar los parámetros de diseño, operación y control involucrados en la implementación física del método. Por otra parte; y como se ha mencionado, el presente estudio solamente tiene alcance para proponer la mejor técnica de remoción de metales pesados en el efluente de interés y por lo tanto es importante considerar que la propuesta de proceso es de tipo cualitativo para que en un estudio posterior se pudiese evaluar experimentalmente los parámetros necesarios para su respectivo escalamiento y la aplicación al presente caso de estudio.

De tal forma, el presente trabajo para su complementación requiere un planteamiento experimental y su posterior desarrollo a nivel piloto; de esta manera se podrá evaluar concretamente la factibilidad técnica y económica del método propuesto.

En el cap. IV se mencionan casos particulares de aplicación con diferentes metales, en mezcla e individualmente. El caso particular de interés evidentemente aplica lo referente a una mezcla de los mismos, de tal forma que por analogía se puede proponer el proceso que permita separar eficientemente a los metales mezclados en el efluente de estudio.

6.3.3. PLANTEAMIENTO DEL PROCESO.

Retomando las características físico-químicas del efluente de interés (**Color:** turbia blanquecina; **Olor:** el característico a la sosa cáustica; **Temperatura:** 19-25 C; **pH:** >12; **Consistencia:** agua con la inminente presencia de sólidos suspendidos (hidróxidos insolubles); **Volumen:** 15 m³ de efluente/ m³ de resina regenerada (valor promedio para lechos mixtos, aniónicos y/o catiónicos) y considerando los aspectos críticos que requiere la aplicación de la técnica seleccionada; requeriremos las operaciones o etapas de proceso siguientes:

1.- Formación de un Floe, compuesto por los hidróxidos insolubles de los metales y otro tipo de sales insolubles formadas con la adición del agente floculante requerido para alcanzar la máxima insolubilización de los solutos de interés.

El tipo de floculante se deberá determinar experimentalmente; además de las concentraciones y flujos requeridos para el caso particular.

2.- Una etapa de adición de un agente surfactante, para permitir las condiciones de tensión superficial y actividad que se requieren para el proceso. Los parámetros de diseño como la naturaleza, flujo, etc, se deberán determinar experimentalmente.

3.- La etapa de separación que consiste de:

- * Columna de Burbujeo.
- * Suministro de aire a presión.
- * Separación y rompimiento de la espuma.

4.- Acondicionamiento y manejo del espumato.

- * Rompimiento de la espuma.
- * Contenedor de espuma colapsada (matas).
- * Filtro prensa para eliminación de efluente líquido.
- * Secador de lodos.

* Análisis de Cretib para el manejo y disposición de los sólidos obtenidos (sales de metales pesados).

Considerando estas etapas como la secuencia operativa requerida para la separación de los metales contenidos en el efluente de estudio, se propone el diagrama de flujo de proceso mostrado al final del presente capítulo.

6.3.4. COMPONENTES DEL PROCESO

- 1.- Contenedor de agua residual proveniente de la regeneración de las resinas de intercambio iónico. (Influente).
- 2.- Tanque de suministro de agente floculante.
- 3.- Tanque de suministro de agente surfactante.
- 4.- Tanque de mezclado para la formación de floe's.
- 5.- Medidor de flujo para el suministro del agua residual hacia la columna de burbujeo.
- 6.- Cuerpo de la columna.
- 7.- Difusor del influente.
- 8.- Baffles para la distribución por etapas.
- 9.- Difusor para el suministro del aire a presión.
- 10.- Medidor de flujo para el suministro de aire comprimido.
- 11.- Válvula reguladora, para el control del suministro de aire.
- 12.- Línea de alimentación de aire comprimido.
- 13.- Indicador de presión.
- 14.- Sensor para el registro de Ph del efluente tratado.
- 15.- Indicador de Ph de salida del efluente.
- 16.- Motor para mecanismo de ruptura de espumas.

- 17.- Colapsador o mecanismo de ruptura de espuma.
- 18.- Clarificador con recirculación de efluente hacia la columna de burbujeo.
- 19.- Control de nivel para clarificador.
- 19a.- Válvula de control para la recirculación del efluente tratado.
- 20.- Contenedor de espuma colapsada o natas.
- 21.- Filtro prensa para la compactación de lodos y extracción de efluente.
- 22.- secador de lodos o natas.
- 23.- Etapa de Análisis de CRETIB, para el manejo reuso o disposición final de los sólidos obtenidos en el secado de los lodos o natas provenientes del secador.

Si bien, el DFP propuesto no se encuentra completamente explícito, este cubre las condiciones mínimas necesarias para su aplicación, las etapas involucradas pretenden proveer las condiciones necesarias tanto físicas como químicas, adecuadas para generar el medio óptimo en el influente y de esta manera poder separar eficientemente a los metales contenidos en el mismo. Sin embargo, es importante señalar que se requiere de un análisis experimental para determinar la naturaleza específica de cada etapa involucrada, lo que implica la revisión y el planteamiento de los siguientes puntos de estudio:

- a) Determinación del tipo de floculante requerido , así como sus respectivos parámetros de operación: temperatura, Concentración, Flujo, Velocidad, etc.
- b) Determinación del tipo de surfactante y sus parámetros de operación.
- c) Condiciones generales de operación de la columna, dimensionamiento, suministro de aire, flujo, cantidad de etapas requeridas (No. de baffles), etc.
- d) Determinación del método de ruptura para la espuma, así como las proporciones generadas para el caso en cuestión. (Vol. de natas por cada vol. de agua residual tratada)

Una vez que se cubran los puntos anteriores, es posible realizar un análisis específico y detallado de ingeniería básica para el dimensionamiento físico del proceso propuesto.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El agua es un excelente disolvente y es esencial en el funcionamiento de toda forma de vida, además de ser un soporte para el crecimiento microbiano y susceptible de contaminarse con cualquier elemento que entre en contacto con ella.

Pero como podemos darnos cuenta el impacto del humano sobre el medio ambiente ha tenido efectos extensos y a veces catastróficos. La descarga sin criterios de desechos industriales y de aguas servidas domésticas contaminan considerablemente los recursos en agua, mientras la industrialización y la urbanización crean demandas cada vez mayores de agua limpia. Los recursos limitados del agua dulce obligan a la comunidad a volver a usar las aguas residuales tratadas en todo momento en que sea posible como fuente alternativa de agua.

Así pues, en el presente trabajo se realizó una revisión de los procesos o metodologías que permiten eliminar eficientemente los metales pesados contenidos en un efluente proveniente de la regeneración de resinas de intercambio iónico, para poder desarrollar un sistema efectivo de tratamiento, tomado en cuenta en primer lugar las características de todas las corrientes de agua residual de la planta y evaluando la necesidad de tratamiento con respecto a los estándares aplicables.

Además de que el tratamiento adecue la calidad del agua a las normas específicas por el uso al que se destina, requiriéndose la aplicación de una tecnología que asegure la economía y confiabilidad de los sistemas y que tome en consideración los costos de energía, disponibilidad de terreno y el uso de materiales y equipo.

La elección del sistema de tratamiento, se basó en los métodos señalados en el capítulo cuatro del presente trabajo y que tienen como objetivo principal la eliminación de los metales pesados de las aguas residuales provenientes de la regeneración de resinas de intercambio iónico utilizadas en la industria alimenticia y farmacéutica; con la finalidad de obtener una solución factible para mejorar la calidad de las aguas residuales, de acuerdo a las exigencias marcadas por el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas, cumpliendo con la **NOM-031-ECOL/1993**

El hecho de remover los contaminantes no soluciona el problema; sino que también es factible considerar que una vez separados, estos puedan tener aplicación técnica viable y que, además, permita disminuir la producción de sustancias como estas (metales), que a su vez implicaría una mayor circulación de los mismos y por lo tanto los respectivos riesgos de tipo ecológico.

Considerando esta serie de aspectos podemos decir que el sistema de tratamiento que se requiere para cubrir en su mayor parte las restricciones mencionadas es el sistema de remoción por medio de burbujas de adsorción, ya que este es un método muy completo, además, permite una remoción del 95-99%, y combinado con otra operación unitaria genera

residuo sólido; además es un proceso estable, poco sensible a variaciones de concentración y está limitado únicamente a las condiciones adecuadas de tensión superficial en el medio que permitan la formación de burbujas con las características óptimas para la separación de los metales.

Es importante mencionar que en función del alcance del presente trabajo los puntos cubiertos permiten describir de manera específica los objetivos generales del mismo; puesto que se logró determinar y analizar los rubros referentes a normatividad, medio ambiente, y metodologías aplicables a la separación de metales pesados en el efluente de estudio. Además fue posible plantear la mejor alternativa como propuesta de aplicación y sentar las bases teóricas para su futuro desarrollo experimental en otro proyecto.

De manera particular podemos concluir que debido a las características físico-químicas de los metales pesados bajo las condiciones presentes en el efluente, el análisis preciso de todas y cada una de las variables involucradas en el fenómeno requiere de su definición, delimitación, planteamiento y corroboración experimental. Esto implica la necesidad de desarrollar otro tipo de estudios que se deriven del presente. Sin embargo se logró definir las condiciones generales presentes en este tipo de efluentes, lo que a su vez permitió tener la guía necesaria para revisar las alternativas existentes (procesos) aplicables al caso y de esta manera poder proponer la más adecuada en función de los parámetros establecidos durante el análisis de los mismos.

En cuanto al aspecto normativo se logró establecer la necesidad de una revisión y actualización cautiva de los sistemas de tratamiento que se lleguen a plantear. Es evidente que la norma 031 requiere de una revisión profunda, ya que lo ideal no es descargar una cierta concentración de contaminantes, más bien se requiere de minimizar al máximo esta concentración en las descargas de agua residual.

ANEXO

ANEXO

LEGISLACION AMBIENTAL REFERENTE A LA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

La ley General De Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente y su reglamento en materia de aguas residuales, regula a través de sus Normas Oficiales Mexicanas el impacto causado por las descargas de aguas residuales estableciendo los límites máximos permisibles de los contaminantes en los efluentes de aguas residuales, por lo que de manera indirecta controla, mitiga y regula el desequilibrio ecológico que es causado por la emisión de aguas residuales en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal a las redes colectoras, ríos y cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos provocando efectos adversos en los ecosistemas.

Es por esto que dicha ley y su reglamento en materia de aguas residuales regula su descarga tanto a ecosistemas naturales como a sistemas de colección y alcantarillado.

CONSTITUCION DE 1917

"A pesar de no haber considerado la necesidad de la protección al medio ambiente, por su avanzado carácter social, permite a la nación condicionar el uso racional de recursos naturales al supremo interés de la sociedad"

Reforma al ARTICULO 27 (10-VIII-87)

Permite a la Nación dictar medidas para:

Preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

Reforma al ARTICULO 73 (10-VIII-87)

Permite a la Nación:

Expedir Leyes en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

LEYES

* LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE (28-y-88).

* SEDUE-SEDESOL-Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca..

* LEY DE AGUAS (2-XII-92)
Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-CNA.

* LEY FEDERAL DE DERECHOS
Secretaría de Hacienda y Crédito Público- cobra la CNA.

* LEY DE ASENTAMIENTOS HUMANOS.

* LEY GENERAL DE BIENES NACIONALES.

* LEY DE SANIDAD FITOPECUARIA.

TRATADOS INTERNACIONALES

* TRATADO DE LIBRE COMERCIO DE AMERICA DEL NORTE

MECANISMOS DE TUTELA JURIDICA CON RELACION AL MEDIO AMBIENTE

PREVENTIVOS

* Manifestación del Impacto Ambiental

* Control de Descargas:

- .- de aguas residuales.
- .- a la atmósfera.
- .- de residuos sólidos.
- .- de residuos peligrosos.

CORRECTIVOS

Sanciones:
Administrativas: multas,
clausura, arresto, decomiso.
Civiles: cuando existe
alguna víctima de una obra
ilícita o, aún cuando sea
lícita, por uso de
sustancias peligrosas, la
energía o causas análogas.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE ECOLOGIA REFERENTE A LA CALIDAD DEL AGUA

Todas las normas oficiales mexicanas referentes a la descarga de aguas residuales tienen la denominación: **NOM-###-ECOL/199#**, los primeros espacios (#) son para asignar un número a la norma en cuestión, mientras que el último espacio sirve para denotar el año en que fue expedida la norma. Cada norma se denomina con un número el cual sirve para identificar al sector o área a la que aplicará tal norma.

Para el caso de la industria que utiliza lechos de intercambio iónico, y que al regenerar dichos lechos descarga aguas residuales a cuerpos receptores, aplicarían varias normas dependiendo del sector industrial, sin embargo la norma que abarca a la mayoría de este tipo de industrias es la **NOM-031-ECOL/1993**.

NOM-031-ECOL/1993

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la Industria, actividades Agroindustriales, Servicios y Tratamiento de Aguas Residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal.

PATRICIO CHIRINOS CALERO, Secretario de desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en los artículos 37 fracciones I, XVII y XXV de la ley orgánica de la administración pública federal, 1o fracción VI, 5o fracciones VIII y XV, 8o fracciones del VII, 117 fracción III, 119 fracción del I, 120 fracción Y, 122, 123, 128, 162, 171 y 173 de la Ley del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente, ha dictado un acuerdo por el que se expide la norma técnica ecológica 031, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes, para las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano y municipal, provenientes de la industria o de los servicios que en la misma se mencionan, con base en lo siguiente:

CONSIDERANDOS

Que la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente establece que todas las descargas de aguas residuales, entre otras a las redes colectoras, como los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, deberán observar las normas técnicas ecológicas que establezca los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes para dichas descargas y, en su caso, las condiciones particulares de éstas que fije la autoridad competente, a fin de asegurar una calidad del agua satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

Que para prevenir y controlar la calidad del agua, es necesario regular las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano y municipal, provenientes de la industria o de los servicios, ya que éstos vierten finalmente dichas aguas que contienen desechos orgánicos, inorgánicos y microbiológicos a cuerpos receptores.

Que por el tipo y cantidad de contaminantes que caracterizan a las aguas residuales de la industria y de los servicios, sus descargas a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, producen daños al mismo sistema o a las plantas de tratamiento de las aguas residuales municipales, por lo que es necesario fijar los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes que deberán satisfacer estas descargas.

Que para la determinación de dichos límites, se estudiaron las posibilidades técnicas de remoción de los contaminantes que generan estas actividades de acuerdo con las experiencias nacionales y la bibliografía internacional al respecto.

Que así mismo, se consideró la factibilidad técnica y económica de instrumentar procesos de depuración por parte de los responsables de las descargas y la efectividad de estos procesos.

Que es posible observar los valores de los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes, en las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, que señala la presente Norma Técnica Ecológica, utilizando alguno o la combinación de los siguientes procesos: neutralización, floculación, sedimentación, nitrificación, desnitrificación, aireación, recarbonatación, oxidación, reducción, separación de grasas y aceites, filtración, tratamiento biológico o, en su caso, aquellos tratamientos que aseguren resultados similares a los que se obtienen con la aplicación de los sistemas mencionados.

ACUERDO

ARTICULO 1o. Se expide la norma técnica ecológica 031, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes, para las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, provenientes de la industria o de los servicios de reparación y mantenimiento automotriz, gasolineras, tintorerías, revelado de fotografía y el del tratamiento de aguas residuales.

ARTICULO 2o. Esta norma técnica ecológica es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, provenientes de la industria o de los servicios a que se refiere el artículo anterior.

ARTICULO 3o. Para los efectos de esta norma técnica ecológica se consideran, además de las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al ambiente, lo siguiente:

AGUAS RESIDUALES. Líquido de composición variada proveniente de los usos domésticos, de fraccionamientos, agropecuario, industrial, comercial, de servicios o de cualquier otro uso, que por este motivo haya sufrido degradación de su calidad original.

AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES O DE SERVICIOS. Aquéllas que provienen de procesos de extracción, beneficio, transformación, generación de bienes de consumo o de sus actividades complementarias, o de los servicios a que se refiera el artículo 1o de esta norma.

AGUAS RESIDUALES URBANAS O MUNICIPALES. Aquéllas que resultan de la combinación de aguas residuales domésticas, comerciales y de servicios públicos o privados, así como industriales en el caso de que los procesos que las generen se localicen en centros de población y se viertan a un sistema de drenaje y alcantarillado operado por la autoridad competente.

CONDICIONES PARTICULARES DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES. Conjunto de los parámetros físicos, químicos y biológicos, así como de sus niveles máximos permisibles en una descarga de aguas residuales, determinados en función de un punto final de descarga, de acuerdo con el uso a que esté destinado el cuerpo receptor con el fin de asegurar el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

CUERPOS RECEPTORES. Lagos, lagunas, acuíferos, redes colectoras, con excepción de los sistemas de drenaje y alcantarillados urbano o municipal; ríos y sus afluentes directos o indirectos, permanentes o intermitentes, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua así como el suelo y el subsuelo.

DEPOSITAR. Acción de colocar o arrojar materiales o residuos en algún cuerpo receptor o a sistemas de drenaje o alcantarillado urbano o municipal.

DESCARGAR. Acción de verter directa o indirectamente, aguas residuales en algún cuerpo receptor o a sistemas de drenaje o alcantarillado urbano o municipal, que incluyen los procesos de infiltración e inyección.

MUESTRA SIMPLE. Aquella tomada ininterrumpidamente durante el periodo necesario para completar un volumen proporcional al caudal, de manera que resulte representativo de las descargas de aguas residuales, medido este en el sitio y en el momento del muestreo.

SISTEMAS DE DRENAJE O ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL. Red colectora integrada por el conjunto de dispositivos o instalaciones que tienen como propósito recolectar y conducir las aguas residuales urbanas o municipales, pudiendo incluir la captación de aguas pluviales.

ARTICULO 4o. Los límites máximos permisibles de los parámetros de los contaminantes, para las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje o alcantarillado urbano o municipal, provenientes de la industria o de los servicios a que se refiere el artículo 1o de esta norma, son los que resultan aplicables en función de los contaminantes generados en el proceso industrial o de servicio de que se trate, de entre los siguientes:

TABLA A.1

PARAMETROS	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PROMEDIO	
	DIARIO	INSTANTANEO
Temperatura		40°C (313 °K)
Potencial de hidrógeno (unidades de PH)	6-9	6-9
Sólidos sedimentables (ml/l)	5.00	10.00
Grasas y aceites (mg/l)	60.00	100.00
Conductividad eléctrica	5,000.00	8,000.00
Aluminio (mg/l)	10.00	20.00
Arsénico (mg/l)	0.50	1.00
Cadmio (mg/l)	0.50	1.00
Cianuros (mg/l)	1.00	2.00
Cobre (mg/l)	5.00	10.00
Cromo hexavalente (mg/l)	0.50	1.00
Cromo total (mg/l)	2.50	5.00
Flúor (mg/l)	3.00	6.00
Mercurio (mg/l)	0.01	0.02
Níquel (mg/l)	4.00	8.00
Plata (mg/l)	1.00	2.00
Plomo (mg/l)	1.00	2.00
Zinc (mg/l)	6.00	12.00
Fenoles (mg/l)	5.00	10.00
Sustancias activas al azul de metileno (mg/l)	30.00	60.00

No se deberán descargar o depositar en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, sustancias o residuos considerados peligrosos en las normas técnicas ecológicas correspondientes, sustancias sólidas o pastosas que puedan causar obstrucciones al flujo de dichos sistemas, así como los que puedan solidificarse, precipitarse o aumentar su viscosidad a temperaturas de entre 5⁰C (278⁰K) a 40⁰C (313⁰K) o lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

ARTICULO 5o. Cuando las autoridades del Departamento del Distrito Federal, Estatales o Municipales, en el ámbito de su competencia, identifiquen descargas que a pesar del cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 4o de esta norma, causen efectos negativos en las plantas de tratamiento de las aguas residuales municipales o en la calidad que éstas deben cumplir antes de su vertido al cuerpo receptor, de acuerdo con sus ordenamientos legales, fijarán condiciones particulares de descarga en las que podrán señalar límites máximos permisibles más estrictos que para los parámetros previstos en el artículo 4o y, en su caso, además límites máximos permisibles para aquéllos parámetros que se consideren aplicables a la descarga como pueden ser:

Alcalinidad/Acidez

Color

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Demanda química de oxígeno (DQO)

Fósforo

Metales pesados

Nitrógeno

Sólidos disueltos

Sólidos suspendidos

Turbiedad

Acrilonitrilo

Acroleína

Compuestos alifáticos y alifáticos halogenados

Compuestos aromáticos, monocíclicos y policíclicos

Esteres del ácido ftálico

Esteres

Isoforona

Nitrosaminas

Plaguicidas

BIBLIOGRAFIA

- 1.- "A Research Publication of the Water Environment Federation", Water Environment Research; Junio 1995, Mark R. Matsumoto, James N. Jensen, Brian E. Reed; pag. 419-428.
- 2.- "Abastecimiento y Distribución de Agua"; Aurelio Hernandez Muñoz; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 3ª Edición, Colección SENIOR No 6, España 1993.
- 3.- "Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales"; Fair, Geyer y Okun, Ed. LIMUSA, S.A. de C.V., México 1990.
- 4.- "Acondicionamiento de Aguas para la Industria"; Sheppard t. Powell; Ed. LIMUSA S.A. de C.V; México D.F. 1981.
- 5.- "Aquatic Pollution", Edward A. Laws, 2ª edición, Honolulu Hawaii and Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc.
- 6.- "Aguas Residuales Industriales"; Nelson L. Nemerow, Universidad de Siracusa; Ed.H. Blume, ediciones España 1977.
- 7.- "Anuario de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales"; DGCOH, México 1991.
- 8.- "Aquatic Toxicology and Water Quality Management"; Jerome O. NRIAGU, J.S.S. LAKSH Minarayana; Ed. Mc Graw-Hill, New York 1990.
- 9.- "Bubble and Foam Separation"; P. Somasandoran, K. P. Anemthopadmanadnan, Harry krum ; Columbia University; Nueva York 1991.
- 10.- "Chemical Treatment Makes Cooling Water Reusable", Chemical Engineering; Julio 1995; Bennett p. Boffardi and Alan I. Smith, Calgon, corp., pag. 106-110.
- 11.- "Depuración de Aguas Residuales"; Aurelio Hernandez Muñoz; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 2ª Edición, Colección SENIOR No 9, España 1992.

- 12.- "Environmental Engineering"; Rowe H. S. Peavy; Ed. Mc Graw-Hill. New York 1986.
- 13.- "Foam Flotation of Heavy Metal and Fluoride- Bearing Industrial Waste Water"; D. J. Wilson; Environmental Protection Agency (EPA) 600-2-77-072, USA Government printing office Washington D. C. 1977
- 14.- "Manual de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales"; IMTA.
- 15.- "Manual del Ingeniero Químico"; Perry and Chilton Ed. Mc Graw Hill, México, 1981
- 16.- "Manual de Tratamiento de Aguas"; Herman Hillebue; Ed. LIMUSA S:A. de C.V.; 8ª Edición, México 1986.
- 17.- "Manual de Tratamiento de Aguas Negras"; Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York; Ed.. LIMUSA S.A. de C.V.; 10ª Edición México D.F.1990
- 18.- "Manual de Tratamiento de Aguas Negras"; Departamento de Sanidad. Estado de Nueva York USA 1986. IAWPRC International Associate on Water Pollution Research and Control Wastewater.
- 19.- "Membranes Minimize Liquid Discharg", Chemical Engineering; Julio 1995; Steve Cappos, Fluid Systems, corp. C. 102-104.
- 20.- "Purificación de Aguas, Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales"; V.II; Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel a. Okui; Ed.. LIMUSA S.A. de C.V; México D.F. 1992.
- 21.- "Standard Hand Book of Environmental Engineering"; Robert A. Corbitt; Mc Graw-Hill 1989.
- 22.- "Tratamiento Biologico de Aguas de Desecho"; Winkler Mitchel, Ed. LIMUSA S.A. de C.V.; México 1986.
- 23.- "Tratamiento de Aguas Residuales"; R.S.Ramallo, Ed. REVERTE,S.A.. España 1991.

- 24.- "Tratamiento de Aguas Residuales Industriales"; Clementina Ramirez Cortina; UAM Azcapozaleco 1992.
- 25.- "Toxic Metal Pollution Control and Work Protection"; City Marshal ; American Hand Book 1981.
- 26.- "Toxicity of Industrial Metal"; Brownie Ethel; American Hand Book; Nueva York 1971.
- 27.- "Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse"; Metcalf & Eddy, inc.; 3ª Edición revisada por George Tchobanoglous; De. Mc Graw-Hill, inc.; Estados Unidos de América 1991.
- 28.- "Wastewater Treatment Technologies"; Chemical Engineering Progress; Agosto 1995, Danelle h. Belhateche, Environcering, Inc. Pag. 32-51.
- 29.- "Water Treatment Principles and Design"; James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc.; A wiley Interscience Publication; Estados Unidos de América 1985.
- 30.- "Zero Discharge a Sisteimatic Aproach to Water Reuse", Chemical Engineering; Julio 1995; Bill Byers, pag. 96-100.