



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA QUÍMICA – INNOVACIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE LA TECNOLOGÍA

**PROPUESTA DE UN PROCESO BASADO EN TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO
PRIMARIO PARA LA DEPURACIÓN DEL AGUA EFLUENTE DE LA PRODUCCIÓN DE
PLASTIFICANTES Y RESINAS**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

I.BQ. MARÍA CATALINA CABRERA MARÍN

TUTOR PRINCIPAL:

DR. M. JAVIER CRUZ GÓMEZ, FACULTAD DE QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. ISAÍAS ALEJANDRO ANAYA DURAND

Secretario: Dr. ALFONSO DURÁN MORENO

Vocal: Dra. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

1^{er}. Suplente: Dr. EDUARDO VEGA GONZÁLEZ

2^{do}. Suplente: Dr. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ

Lugar donde se realizó la tesis: LABORATORIO 212, EDIFICIO DE INGENIERIA QUÍMICA, PRIMER PISO. CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ



Agradecimientos

En primer lugar al Programa de Maestría en Ingeniería de la UNAM, por darme la oportunidad de integrarme a este posgrado que me ha permitido escalar un peldaño más en mi formación académica.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para mis estudios de maestría a través de la beca con número de convenio 550863.

A mi tutor de tesis, el Dr. M. Javier Cruz Gómez, por su guía y apoyo durante todo el proyecto. Gracias también por estar siempre al pendiente de mis avances en el transcurso de la maestría y motivarme a concluir exitosamente esta etapa.



Agradecimientos especiales

A la Facultad de Química de la UNAM, por permitirme contar con el material y equipo necesarios para realizar los trabajos experimentales en el laboratorio 212, Conjunto E, Edificio de Ingeniería Química, a cargo de mi asesor antes mencionado.

A los doctores Ma. del Carmen Durán Domínguez y Alfonso Durán Moreno así como su equipo de investigadores por las facilidades brindadas para realizar parte del trabajo experimental en los Laboratorios 301-303 del Edificio de Alimentos y Química Ambiental (E-3).

A mis profesores del programa de Maestría en Ingeniería, de los campos de conocimiento de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental. Gracias por los conocimientos compartidos y por impulsarme siempre a la excelencia.

Especialmente gracias a dos grandes profesores y amigos *el Prof. Jorge Isaac Hernández Velasco* (Don viejito) y *el Dr. Néstor Noé Catillo López* (Nest), que aunque ya partieron a la presencia de nuestro Padre Dios, sus consejos y enseñanzas quedarán siempre en mi mente y corazón.

A mi mejor amigo, colega y compañero de aventuras, Omar Jorge Tello Hernández (Ñorge), gracias por compartir este sueño y apoyarme en cada momento. Eres el hermano que la vida puso en mi camino desde hace casi 10 años; sabes que siempre estaré para ti como tú lo estás para mí. Te admiro y respeto, confío en que algún día lograremos todas las metas que anhela nuestro corazón. Nunca dejemos de soñar amigo querido.

A mis amigos de LMJ Catedral de Veracruz, que me apoyaron cuando este sueño apenas comenzaba, gracias por motivarme e impulsarme a seguir a pesar de que implicara separarnos (P. Víctor, Marce, Alexis, Mary Chuy, Liz, Richard, Zully), saben que los quiero y extraño.

A mis grandes amigas Lucerito, Martha, Adry, Shivis y Diana por brindarme su amistad sincera desde hace muchos años. Las quiero mucho y espero que Dios nos permita seguir compartiendo muchas experiencias y sueños juntas.



A mis compañeros del Laboratorio 212 (Maye, Olga, Montse, Carlitos, Tania, Orlando, Fer, Faby y Emma), por los momentos compartidos durante esta bella etapa de mis estudios de maestría. Les agradezco las risas, las comidas, las pláticas motivacionales, las salidas desestresantes y sobre todo gracias por hacerme sentir en casa a pesar de estar lejos de mi hogar.

A mis amigos de siempre, a los recientes, a los que me falta por conocer, gracias por los momentos compartidos y los que han de venir, su amistad es un motor que me impulsa a continuar y un tesoro que le da mucho sentido a mi vida. Ustedes saben quiénes son y lo especiales que son para mí.

Pero sobretodo, **gracias a Dios** por la vida, la familia, los amigos y el amor. Gracias Señor por todas las bendiciones que derramas en mi vida. Me esforzaré para dar buenos frutos caminando siempre de tu mano.



Dedicatoria

El presente trabajo que representa una meta más alcanzada en mi vida, se lo dedico a mis padres; ustedes son mi apoyo, mi ejemplo y mayor motivación. Todos mis triunfos serán también suyos porque me educaron con valores que me permiten ser la persona que soy.

A Joel Cabreara Luna, el hombre más inteligente, entregado, íntegro y respetable que conozco, nunca me cansaré de agradecerle a Dios que seas mi padre. Gracias por todo Papito, te amo. Agradezco y valoro tus sacrificios para darnos lo mejor a mi hermana y a mí, tus consejos, regaños, bromas, pero sobre todo por tu amor.

A Virginia Marín Fernández, la mujer más inteligente, valiente, amorosa y noble que conozco, te amo Mamita y le agradezco a Dios que te haya dado esa nueva oportunidad de vivir y estar a mi lado. Gracias por todo lo que haces por nosotros, no hay palabras para describir lo orgullosa que me siento de ser tu hija.

También comparto este triunfo con mi mejor amiga desde siempre, mi hermana, Eugenia Cabrera Marín, con esto te digo que si se puede, que te amo y que deseo que tu también logres todos tus sueños y nunca te detengas. Ahora tienes un pequeño gran motivo para ser mejor en todo cada día, gracias a ti y a Omar por darme el regalo tan hermoso de ser su tía madrina.

A mi sobrino Joel Duvier, que aunque todavía estás muy pequeño para comprender lo mucho que te amo, estoy segura que lo sabes y le pido a Dios que me permita estar ahí para ti siempre que me necesites. Llegaste justo cuando esta aventura iniciaba, y aunque por la distancia me he perdido muchos momentos contigo, sabes que siempre te llevo en mi corazón. Te amo mi niño hermoso.

A mis familiares que siempre han creído en mí y me apoyan incondicionalmente, abuelito Luis, tías, tíos, primas, primos, sobrinos, ustedes saben quiénes son y lo mucho que los amo. Gracias por estar ahí siempre para mí. Menciono especialmente a mis abuelos y tíos que ya gozan de la presencia de Dios pero con quienes tuve la dicha de compartir bellos momentos (Mamy, abue Foncho, tío Luis y tío Claudio siempre estarán en mi corazón).



Índice

Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Justificación	12
1.2 Objetivo General	13
1.2.1 Objetivos Específicos	13
1.3 Hipótesis	13
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	14
2.1 Consumo y distribución del agua en México	14
2.2 Aguas residuales generadas por la industria en México	15
2.3 Normas Oficiales Mexicanas que regulan el vertido del agua residual	17
2.4 La industria seleccionada como caso de estudio: Planta productora de plastificantes y resinas	20
2.4.1 Principales contaminantes presentes en el agua residual a tratar	22
2.5 Principales tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales	24
2.5.1 Tratamientos preliminares	26
2.5.2 Tratamientos primarios	32
2.5.3 Tratamientos secundarios (biológicos)	50
2.5.4 Tratamientos terciarios (avanzados)	54
2.6 Tratamiento de lodos	55
2.7 Selección de las tecnologías de tratamiento	58
Capítulo 3. Metodología	61
3.1 Revisión de la Normatividad Mexicana vigente	61
3.2 Muestreo del agua efluente de los principales procesos	62
3.3 Caracterización de cada corriente por separado antes del tratamiento primario	63
3.4 Selección de tecnologías de tratamiento y su posterior aplicación a nivel laboratorio	67
3.4.1 Identificación de los aspectos a considerar para la evaluación de tecnologías	67
3.4.2 Evaluación de tecnologías de tratamiento	69
3.4.3 Aplicación de tecnologías de tratamiento a nivel laboratorio	76



3.5 Caracterización del agua después del tratamiento primario (una sola corriente)	82
Capítulo 4. Resultados y discusión	83
4.1 Caracterización de las tres principales corrientes antes del tratamiento primario	83
4.2 Aplicación de las principales tecnologías de tratamiento primario a nivel laboratorio	85
4.2.1 Flotación	87
4.2.2 Coagulación-Floculación	89
4.2.3 Filtración	91
4.3 Caracterización del agua después del tratamiento primario (una sola corriente)	92
4.4 Propuesta del tren de tratamiento	94
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	99
Bibliografía	100
Anexos	102
Anexo A. Fichas técnicas de los principales contaminantes presentes en las distintas corrientes de agua a tratar	102
Anexo B. Normas mexicanas para el análisis y caracterización del agua residual	106



Índice de Tablas

Tabla 1. Límites permisibles de contaminantes establecidos por la Norma vigente	18
Tabla 2. Normas Mexicanas para el análisis del agua residual	19
Tabla 3. Tipos de Plastificantes que se producen en la planta caso de estudio	20
Tabla 4. Contaminantes presentes en cada corriente de agua efluente de los procesos	23
Tabla 5. Tipos de tratamiento para las aguas residuales	24
Tabla 6. Clasificación de rejillas en función de la luz entre barros	27
Tabla 7. Clasificación de los tamices	28
Tabla 8. Tipos de desarenadores	30
Tabla 9. Tipos de sedimentación	33
Tabla 10. Tipos de sedimentadores	35
Tabla 11. Tipos de flotación en función de cómo se introduce el aire	39
Tabla 12. Factores que influyen en el proceso de coagulación	45
Tabla 13. Principales floculantes empleados en los procesos de clarificación	46
Tabla 14. Principales parámetros a medir para caracterizar el agua residual	64
Tabla 15. Aspectos a considerar en la evaluación de tecnologías	67
Tabla 16. Puntaje asignado a cada aspecto de la evaluación	68
Tabla 17. Escala de calificación de atributos	69
Tabla 18. Características específicas de las tecnologías a evaluar (a)	70
Tabla 19. Peso y calificación de los aspectos para cada tecnología (a)	71
Tabla 20. Resumen final de la evaluación de tecnologías (a)	72
Tabla 21. Características específicas de las tecnologías a evaluar (b)	73
Tabla 22. Peso y calificación de los aspectos para cada tecnología (b)	74
Tabla 23. Resumen final de la evaluación de tecnologías (b)	75
Tabla 24. Material potencialmente recuperable en cada corriente de agua tratada por flotación	77
Tabla 25. Parámetros evaluados durante la coagulación	78
Tabla 26. Parámetros evaluados durante la floculación	79
Tabla 27. Resultados de la caracterización de las tres principales corrientes antes del tratamiento	83
Tabla 28. Tecnologías de tratamiento primario aplicadas	86
Tabla 29. Condiciones óptimas obtenidas para la coagulación	89
Tabla 30. Condiciones óptimas obtenidas para la floculación	89



Tabla 31. Resultados de la caracterización después del tratamiento	92
Tabla 32. Características técnicas de los filtros intermitentes de arena	92

Índice de Figura

Figura 1. Uso del agua en México	14
Figura 2. Zonificación de un sedimentador convencional (Vista de planta)	37
Figura 3. Zonificación de un sedimentador convencional (Corte longitudinal)	37
Figura 4. Modelo de la doble capa en partículas coloidales	42
Figura 5. Fenómeno de la coagulación	44
Figura 6. Sistema de flotación por aireación	77
Figura 7. Inyección de aire y formación de finas burbujas	77
Figura 8. Muestras de las tres corrientes de agua mezcladas (previamente desnatadas)	80
Figura 9. Agua con pH básico	80
Figura 10. Aplicación del coagulante (agitación rápida)	80
Figura 11. Aplicación del floculante (agitación lenta)	80
Figura 12. Sedimentación de los lodos	80
Figura 13. Remoción de lodos por decantación	80
Figura 14. Agua clarificada (coagulada-floculada)	81
Figura 15. Sistema de filtración	81
Figura 16. Sólidos retenidos en el filtro	81
Figura 17. Sólidos en el fondo del vaso de precipitados	81
Figura 18. Grasas separadas del agua de Lavado de DOTP	87
Figura 19. Grasas separadas del agua de Lavado de Aceite epoxidado de soya	87
Figura 20. Comparación de grasas separadas de las dos corrientes	87
Figura 21. Agua de lavado de DOTP antes del desnatado	88
Figura 22. Agua de lavado de DOTP después del desnatado	88
Figura 23. Agua de lavado de aceite epoxidado de soya antes del desnatado	88
Figura 24. Agua de lavado de aceite epoxidado de soya después del desnatado	88
Figura 25. Agua antes de la coagulación-floculación	90
Figura 26. Agua después de la coagulación-floculación	90
Figura 27. Agua antes de la filtración	91
Figura 28. Agua después de la filtración	91
Figura 29. Diagrama general del proceso de tratamiento de agua propuesto	96
Figura 30. Tanque de coagulación-floculación propuesto	97



Capítulo 1. Introducción

El incremento de la demanda de agua como herramienta para el desarrollo económico ha conducido a una sobreexplotación del recurso hídrico y ha ocasionado un alto nivel de contaminación del agua residual, principalmente proveniente de la industria.

En México, los hechos antes mencionados han conducido a cambios en los planteamientos sobre política del agua, mediante la creación y actualización de Normas Oficiales que garanticen la calidad y la protección del recurso.

La industria, uno de los principales consumidores de agua, se enfrenta con la problemática de eficientar y racionalizar el uso del preciado líquido, además de asegurarse de que sus descargas no contengan contaminantes que generen un impacto ambiental negativo. En consecuencia, es indispensable aplicar tratamientos a las aguas residuales efluentes de la industria.

En el presente trabajo se propone un proceso de tratamiento para el agua proveniente de la industria de plastificantes y resinas. Dicho proceso está basado en tecnologías de tratamiento primario con el objetivo de hacer factible técnica y económicamente su aplicación en plantas de este tipo y así evitar que el agua efluente sea descargada al sistema de alcantarillado municipal sin ningún tratamiento previo.

La caracterización de las diferentes corrientes de agua efluente de los procesos de la planta también se describen en el presente trabajo, ya que los resultados fueron de primordial importancia para la propuesta de un tren de tratamiento adecuado.

Una ventaja importante de la aplicación de este tren de tratamiento consiste en la separación de grasas y aceites mediante flotación, ya que el material separado es potencialmente reutilizable en los procesos de la planta. Además, este proceso permite el cumplimiento de los principales parámetros que establece la NOM-002-SEMARNAT-1996.



1.1 Justificación

En México, la industria genera cada año un volumen de agua residual de alrededor de 5,500 millones de m³. Considerando que solo existen aproximadamente 2,617 plantas de tratamiento de agua residual operando a nivel nacional, se estima que solo se trata el 34% de la misma y que el 66% restante es vertida a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo (datos obtenidos del informe estadístico de CONAGUA 2014).

En el mismo informe se resalta que la industria química generó ese año un volumen de descarga de agua residual de 220 millones de m³, posicionándola como una de las más contaminantes debido a las altas concentraciones de materia orgánica que contienen sus descargas.

La planta seleccionada como caso de estudio descarga diariamente alrededor de 13 m³ de agua generada de los procesos químicos de esterificación y epoxidación, lo que se traduce en aproximadamente 3,900 m³ anuales de agua que contiene un alto potencial de contaminantes por las materias primas que se utilizan.

Actualmente el agua residual efluente de los procesos de la planta, es vertida al sistema de alcantarillado municipal sin ningún tratamiento previo. Esto se debe a que no cuentan con un sistema de tratamiento que opere de manera eficiente, por lo que este trabajo representa una alternativa para que el agua que se vierta al sistema de alcantarillado pueda estar dentro de los límites que establece la norma

Debido a lo anterior, es evidente la necesidad de buscar procesos de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, que tengan una alta efectividad y bajos costos para posibilitar su aplicación inmediata.

En este trabajo se plantea el tratamiento primario como una alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales que permita a la planta seleccionada dar cumplimiento a la NOM-002-SEMARNAT-1996

El tren de tratamiento propuesto, adicionalmente confiere ventajas de recuperación de material potencialmente reutilizable y de este modo contribuir al cuidado del ambiente disminuyendo la generación de residuos.



1.2 Objetivo General

Evaluar un proceso para la depuración del agua efluente de la producción de plastificantes y resinas basado en tecnologías de tratamiento primario que permita recuperar material plastificante y dar cumplimiento a la NOM-002-SEMARNAT-1996.

1.2.1 Objetivos Específicos

- ◆ Caracterizar el agua efluente de los procesos de producción de plastificantes y resinas con base a la NOM-002-SEMARNAT-1996.
- ◆ Evaluar las principales opciones de tecnologías de tratamiento que reduzcan los contaminantes presentes en la caracterización.
- ◆ Aplicar a nivel laboratorio las tecnologías de tratamiento seleccionadas.
- ◆ Validar la eficacia de los tratamientos ya probados, mediante una nueva caracterización del agua.
- ◆ Proponer un tren de tratamiento que permita obtener agua con calidad adecuada para ser vertida al drenaje municipal de acuerdo a los límites que establece la norma.

1.3 Hipótesis

Debido al tipo de procesos que se realizan en la planta seleccionada como caso de estudio, se sabe que el agua residual presenta una alta concentración de material graso y sólidos suspendidos.

Con base a la literatura, se propone que ambos contaminantes puedan ser removidos por tecnologías de tratamiento primario; además al separar las grasas y aceites, se podría estar recuperando material plastificante.

Considerando lo anterior, se espera que sí sea posible tratar el agua efluente de la producción de plastificantes y resinas con tecnologías de tratamiento primario, recuperando material potencialmente reutilizable y dando cumplimiento a la NOM-002-SEMARNAT 1996.



Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1 Consumo y distribución del agua en México

El agua como motor de desarrollo y fuente de riqueza, ha constituido uno de los pilares fundamentales para el progreso del hombre. En nuestro país, desde hace varios años, la distribución y gestión de los recursos hídricos ha sido un objetivo prioritario que se ha orientado a satisfacer la demanda en cantidades suficientes.

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por sus siglas en inglés) reporta que existe una desigualdad en el uso del agua entre los países del mundo. Los 10 países con mayor consumo de agua son India, China, EUA, Pakistán, Japón, Tailandia, Indonesia, Bangladesh, México y Rusia.

De acuerdo a los datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en México el agua se distribuye de la siguiente manera: 77% se utiliza en la agricultura, 14% en el abastecimiento público, 5% en las termoeléctricas y 4% en la industria (figura 1).

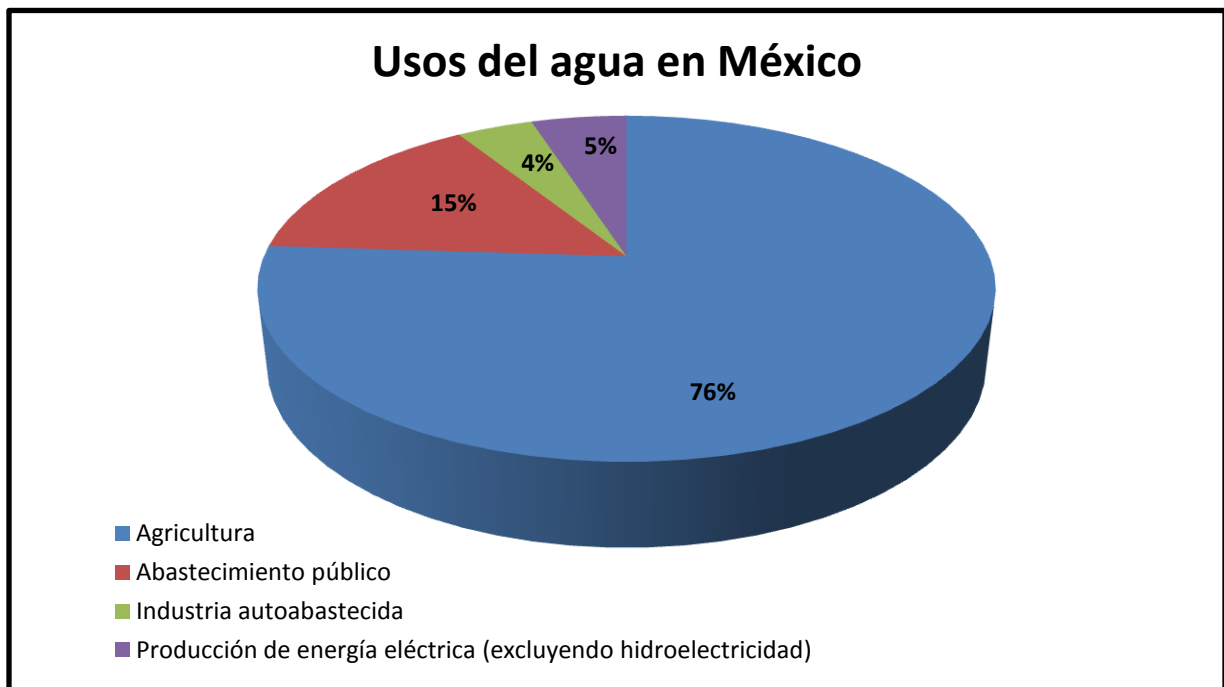


Figura 1. Uso del agua en México.
(Imagen elaborada con datos del Informe de la CONAGUA "Estadísticas del Agua en México", Edición 2014).



De acuerdo al informe de la CONAGUA titulado "Estadísticas del agua en México, edición 2014", el uso del agua para abastecimiento público consiste en el agua entregada por las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a diversas industrias y servicios. La fuente predominante de agua para este uso es la subterránea con el 60.4% del volumen, seguida por el agua superficial con el 39.6%.

En el rubro de la industria autoabastecida se incluye a la industria que toma el agua que requiere directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país. Conforman este rubro los sectores de minería, electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, así como la construcción y las industrias manufactureras. Para este uso, la fuente predominante es la subterránea con un volumen de 59.2%.

El agua incluida en el rubro de producción de energía eléctrica se refiere a la utilizada en centrales de vapor duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogas y de combustión interna. Cabe resaltar que el 68.9% del agua concesionada a este uso corresponde a la planta carboeléctrica de Petacalco, ubicada en las costas de Guerrero, cerca de la desembocadura del río Balsas.

2.2 Aguas residuales generadas por la industria en México

Es conocido que la industria utiliza grandes cantidades de agua durante sus procesos y que los usos del agua para este rubro son tan variables como tipos de empresas y procesos industriales existen. En algunos casos, el agua se usa para enfriar máquinas y los sistemas del proceso de producción; en otros, para lavar productos y para retirar desechos industriales.

Aunque la industria autoabastecida sólo utiliza 4% del total de agua disponible en nuestro país, es el sector que genera mayor impacto ambiental negativo debido a la alta concentración de contaminantes que contienen sus descargas.

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



La CONAGUA informa en su Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (2013), que en ese año toda la Industria generó un volumen de agua residual de 176 m³/s (equivalente a 5,500 millones de m³/ año) y solo trató 60.7 m³/s de aguas residuales en las 2,617 plantas que operan a nivel nacional.

Lo anterior indica que en el 2013 sólo se trató el 34% del agua residual industrial y que aproximadamente el 66 % de la misma (alrededor de 3,600 millones de m³) fue vertida a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento previo.

Tan solo en ese año la industria química tuvo un volumen de descarga de 220 millones de m³ (equivalente a 7 m³/s).

En relación con estos datos, la CONAGUA reporta que en nuestro país la industria y la agricultura son las responsables de la mayoría de los contaminantes y que actualmente solo se trata alrededor de 20% del agua residual, es decir, que aproximadamente el 80% del agua residual se descarga a ríos y lagos sin ningún tratamiento previo. Esto se debe principalmente a la carencia de plantas de tratamiento de agua residual que operen de manera eficiente.

Por su parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) afirma que la industria consume alrededor de 6 km³ anuales de agua y descarga anualmente 5.3 km³ de aguas residuales que al ser vertidas sin tratamiento generan un fuerte impacto ambiental negativo.

Por lo tanto, en nuestro país existe una urgente necesidad de desarrollar técnicas innovadoras, eficaces y económicas para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria.



2.3 Normas Oficiales Mexicanas que regulan el vertido del agua residual

En nuestro país, la normatividad vigente para regular el manejo del agua residual se encuentra en las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Lodos y biosólidos. Que establece las especificaciones y límites máximos permisibles para su aprovechamiento y disposición final.

La industria seleccionada como caso de estudio en este trabajo, está regulada por la **NOM-002-SEMARNAT-1996**, ya que el agua residual es vertida directamente al sistema de alcantarillado municipal. Esta Norma Oficial Mexicana tiene el objetivo de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.

Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado. En ella se estipula que no se deben descargar o depositar en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal,



materiales o residuos considerados peligrosos, conforme a la regulación vigente en la materia.

En la tabla 1 se muestran los principales parámetros para los que esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Tabla 6. Límites permisibles de contaminantes establecidos por la Norma vigente

Parámetro	Límite establecido por la NOM-002-SEMARNAT-1996 (promedio diario)
Temperatura (°C)	40
pH	5.5-10
Grasas y aceites (mg/L)	75
Sólidos sedimentables (ml/L)	7.5
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	200
DBO (mg/L)	200
Materia flotante (mg/L)	Ausente
Arsénico total (mg/L)	0.5
Cadmio total (mg/L)	0.5
Cianuro total (mg/L)	1
Cobre total (mg/L)	10
Cromo hexavalente (mg/L)	0.5
Mercurio total (mg/L)	0.01
Níquel total (mg/L)	4
Plomo total (mg/L)	1
Zinc total (mg/L)	6



Además de las Normas Oficiales, en nuestro país existen Normas Mexicanas (NMX) que permiten conocer los parámetros críticos que deben medirse en el análisis del agua residual.

Estas normas también establecen la metodología que se debe seguir para realizar una caracterización del agua residual y poder comparar los resultados que se obtengan con los límites establecidos por la NOM.

Las NMX aplicables al análisis del agua residual se resumen en la tabla 2 y se citan en las Normas Oficiales Mexicanas.

Tabla 7. Normas Mexicanas para el análisis del agua residual

Parámetro a medir	NMX de referencia
Sólidos sedimentables	NMX -AA-004-SFI-2013
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000 PROY-NMX-AA-005-SCFI-2008
Materia flotante	NMX-AA-006-SCFI-2010
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	NMX-AA-028-SCFI-2001 PROY-NMX-AA-028/1-SCFI-2008
DQO (Demanda Química de Oxígeno)*	NMX-AA-030-2-SCFI-2011
Determinación de metales pesados	NMX-AA-051-SCFI-2001 PROY-NMX-AA-051/5-SCFI-2008

*parámetro no estipulado como obligatorio por la NOM-002-SEMARNAT-1996



2.4 La industria seleccionada como caso de estudio: Planta productora de plastificantes y resinas

La planta seleccionada como caso de estudio se dedica a la producción de aceite de soya epoxidado así como plastificantes monoméricos y poliméricos. Los plastificantes son aquellas sustancias orgánicas que se incorporan a los compuestos plásticos para incrementar su flexibilidad, blandura y procesabilidad.

Los principales tipos de plastificantes que se producen en esta planta se describen en la siguiente tabla:

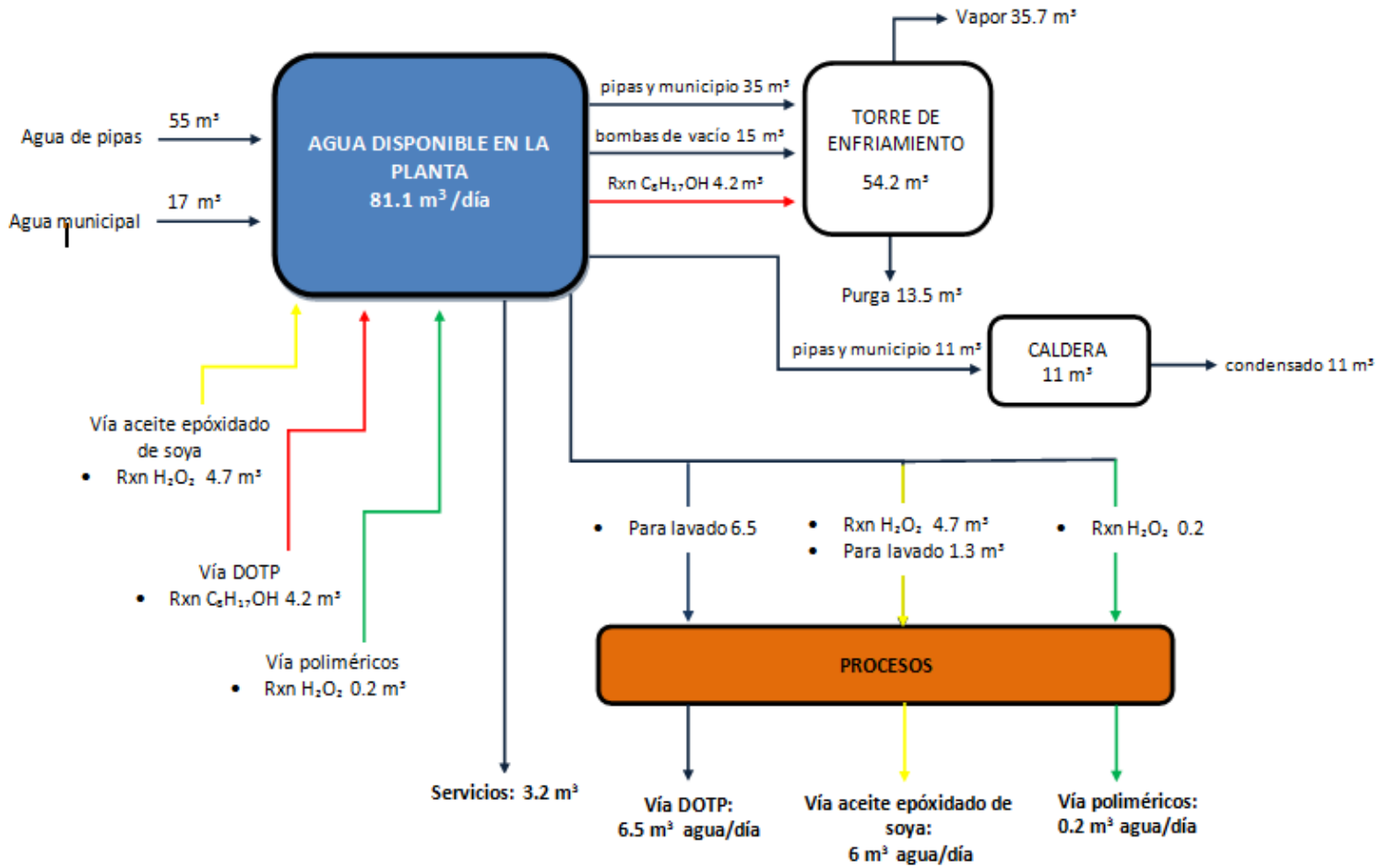
Tabla 8. Tipos de Plastificantes que se producen en la planta caso de estudio

Tipo de plastificante	Características
Plastificantes primarios	Son compatibles y susceptibles a ser únicos en la formulación. Ofrecen mínima extracción con solventes, jabones y aceites, así como mínima migración.
Plastificantes epoxidados	Tienen una menor solvatación respecto a los plastificantes primarios, sin embargo, ofrecen dos características sustanciales que los hacen primordiales en las formulaciones vinílicas: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Estabilizadores térmicos suplementarios. ✓ Dispersante para pigmentos.
Plastificantes poliméricos	Reducen o minimizan la extracción de algún componente del compuesto por contacto con solventes, gasolinás, aceites y jabones; además reducen la migración por exposición a la intemperie o a la temperatura.

Como es característico en la mayoría de las industrias, el agua de desecho de sus procesos contiene algunas sustancias contaminantes que son necesarias reducir o eliminar antes de verterlas al sistema de alcantarillado. Es importante identificar esas sustancias contaminantes para seleccionar el tratamiento más adecuado. Dichos contaminantes se describen más adelante de este capítulo.



La distribución general del agua dentro de la planta se muestra a continuación:





2.4.1 Principales contaminantes presentes en el agua residual a tratar

Los contaminantes del agua son aquellos parámetros o compuestos que, en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, dañar la infraestructura hidráulica o inhibir los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Para cumplir con la normatividad ambiental vigente sobre el vertido de aguas residuales, es necesario remover (o reducir la concentración de) las sustancias contaminantes presentes en el agua residual de la planta seleccionada como caso de estudio.

Antes de seleccionar el tren de tratamiento más adecuado para el agua residual, es necesario conocer la composición de la misma, esto se realiza mediante la caracterización cuantitativa y cualitativa de las muestras del agua a tratar. Con los resultados de la caracterización del agua residual, es posible conocer el grado de contaminación que representa verter estos desechos a los cuerpos de agua nacionales.

La característica física más importante del agua residual es el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

De acuerdo a las Estadísticas del Agua en México, 2014 (CONAGUA), en el caso del agua residual doméstica, cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables del agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas, 40-60%, carbohidratos, 25-50%, y grasas y aceites, 10%.

Entre las técnicas más utilizadas para evaluar el grado de contaminación del agua residual se encuentran la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica del oxígeno (DBO) cuyas técnicas se basan en el consumo de oxígeno.

La DQO es la cantidad de oxígeno en mg/L consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. Se emplean oxidantes químicos, como el dicromato de potasio. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente



oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.

La DBO es la cantidad de oxígeno en mg/L necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua. Normalmente se emplea la DBO₅, que mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días. La determinación del mismo, está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

En la tabla 4 se muestran los materiales que posiblemente se pueden encontrar en cada corriente del agua residual de la planta seleccionada como caso de estudio.

La importancia de conocer las propiedades de estas sustancias radica en que si se encuentran presentes en el agua residual a tratar es necesario conocer previamente sus características. En el **anexo A** se muestran las fichas técnicas de dichas sustancias potencialmente contaminantes.

Tabla 9. Contaminantes presentes en cada corriente de agua efluente de los procesos

Corriente efluente de los procesos	Material potencialmente presente en el agua residual
Agua de reacción de DOTP (dioctil tereftalato)	2-etilhexanol y plastificante
Agua de lavado de DOTP (dioctil tereftalato)	2-etilhexanol, ácido tereftálico, sosa cáustica alcohol lineal 6,8,10
Agua de lavado de Aceite epoxidado de soya	Aceite epoxidado de soya, ácido fórmico, agua oxigenada, sosa cáustica, tensoactivos

La concentración de los contaminantes en el agua dependen de la cantidad de lotes o productos que se fabriquen al día, sin embargo, actualmente todas las descargas se juntan en una sola fosa para después ser vertidas al sistema de alcantarillado municipal



2.5 Principales tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales

En este capítulo se describen las principales tecnologías de tratamiento que se pueden aplicar al agua residual proveniente de la industria. Cada operación unitaria o proceso unitario se clasifica de acuerdo al tipo de tratamiento al que pertenece, existiendo desde los más simples como la decantación hasta los avanzados como la ósmosis inversa y la oxidación avanzada.

Es importante recordar que se conocen como operaciones unitarias a los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, y como procesos unitarios a los métodos que en que la eliminación de contaminantes se realiza con base a procesos químicos o biológicos. En la actualidad, estas operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los llamados tratamientos primario, secundario y terciario.

Debido a que en este trabajo se propone un proceso basado en tecnologías de tratamiento primario, como una primera etapa para la depuración del agua proveniente de una planta productora de plastificantes y resinas, se profundiza en los fundamentos teóricos de dichos tratamientos primarios mientras que los demás tipos de tratamiento se abordan de manera menos profunda.

En la tabla 5 se resumen los principales tipos de tratamiento de aguas residuales domésticas que también pueden aplicarse a las aguas de desecho industrial. (Metcalf & Eddy, 1998)

Tabla 5. Tipos de tratamiento para las aguas residuales

Tipo de tratamiento	Objetivo	Ejemplos
<p>Preliminar</p>	<p>Separar los desechos sólidos muy grandes y voluminosos que pudiera tener el agua residual. Su función es evitar daños en los equipos de las plantas de tratamiento (bombas, válvulas, aireadores, etc.).</p>	<p>Rejillas (retiene material grueso, principalmente basura).</p> <p>Tamices (retiene sólidos más pequeños para evitar atascamiento de tuberías).</p> <p>Microfiltros (existen diferentes tamaños de malla y cuentan con un sistema de lavado para mantenerlas limpias).</p> <p>Desarenadores (unidades que retienen arenas, tierra y algunos elementos vegetales o minerales).</p>



<p>Primario (Pretratamiento)</p>	<p>Remover los sólidos en suspensión y parte de la materia orgánica presentes en el agua residual a través de procesos físicos o fisicoquímicos.</p>	<p>Sedimentación Desengrasado y desaceitado Flotación Neutralización del pH Coagulación–floculación Filtración Desorción (eliminación de contaminantes volátiles)</p>
<p>Secundario (Biológico)</p>	<p>Eliminar la materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta a través de procesos de naturaleza biológica utilizando microorganismos (principalmente bacterias). Los procesos aerobios se basan en la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO₂ y H₂O. Los procesos anaerobios transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO₂.</p>	<p>Lodos Activos Lechos Bacterianos Biodiscos y biocilindros Reactores Biológicos Secuenciales (SBR) Filtros Verdes Digestión Anaerobia Reactor Biológico de Membrana (MBR) Lagunas de estabilización</p>
<p>Terciario (Avanzado)</p>	<p>Eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como los nutrientes, fósforo y nitrógeno.</p>	<p>Intercambio Iónico Adsorción (carbón activado) Microfiltración y Ultrafiltración Ósmosis Inversa Electrodesinfección Membranas cerámicas Oxidación Avanzada</p>

Debido a las características que presenta el agua residual industrial, es común que en las plantas depuradoras industriales no se apliquen tratamientos preliminares. Sin embargo, los tratamientos primarios (pretratamientos) son ampliamente utilizados en estas plantas ya que la mayor parte del agua proveniente de la industria contiene altas concentraciones de sólidos suspendidos que pueden ser fácilmente separados por métodos fisicoquímicos, además estos pretratamientos son fundamentales para obtener buenos resultados en los tratamientos biológicos y avanzados.



2.5.1 Tratamientos preliminares

Como se mencionó anteriormente, a diferencia del agua residual urbana que contiene grandes cantidades de objetos y basura de mayor tamaño (como latas, botellas, palos, piedras, envases, juguetes, etc.), la mayoría de las veces el agua residual industrial se encuentra libre de ese tipo de objetos, lo que ocasiona que las plantas depuradoras industriales no incluyan tratamientos preliminares dentro de sus procesos; sin embargo es posible que en algunas ocasiones lleguen a las plantas depuradoras de aguas residuales industriales sacos, plásticos, envases, trapos, herramientas, etcétera.

Estos materiales ocasionan problemas de diferente índole a las instalaciones de depuración, pueden provocar la obstrucción de colectores, canales o tuberías, dañar equipos de bombeo, bloquear mecanismos en movimiento o atascar las purgas de las unidades, entre otros problemas.

Teniendo en cuenta todo lo indicado anteriormente, es evidente la importancia de su eliminación en la fase inicial de la planta depuradora. En estos casos la primera operación que se realiza es la de desbaste.

El desbaste consiste en la separación de los sólidos de volumen elevado, que como se ha indicado anteriormente, producirían gravísimas alteraciones en el funcionamiento normal de la planta.

Entre los objetivos que tienen los procesos de desbaste, se destacan como los más importantes:

- ◆ Protección mecánica de los equipos.
- ◆ Evitar posibles alteraciones a la circulación del agua residual a través de la depuradora.
- ◆ Evitar la presencia de sólidos inertes de gran tamaño en el tratamiento de fangos.
- ◆ Obstrucción de las líneas y canales de la planta.
- ◆ Evitar la acumulación de estos residuos en los canales y equipos.

Los equipos utilizados con mayor frecuencia en este tipo de tratamiento son las rejas o rejillas, tamices y desarenadores que se describen a continuación. (Metcalf & Eddy, 1998)

2.5.1.1 Rejas

Las rejas consisten básicamente en un conjunto de barras metálicas de sección regular, paralelas y de separación uniforme entre ellas, situadas en un canal de hormigón, en posición transversal al flujo, de tal forma que el agua residual pase a



través de ellas, quedando retenidos todos los sólidos presentes, con un tamaño superior a la separación entre barrotes. Todas las barras de la reja se encuentran fijadas en un marco, con el fin de rigidizar el sistema.

El objetivo del proceso de desbaste mediante rejas es la eliminación de todos los sólidos en suspensión de tamaño superior a la separación entre barrotes (luz) con el fin de evitar obstrucciones en líneas o problemas mecánicos en los equipos dinámicos.

La separación de los sólidos de gran tamaño presentes en las aguas residuales, se basa en su tamaño, de tal forma que quedaran retenidos todos aquellos que tengan un tamaño superior a la separación fijada entre los barrotes.

En la tabla 6 se muestra la primera clasificación de las rejas que está establecida por la separación o luz entre los barrotes:

Tabla 6. Clasificación de rejas en función de la luz entre barrotes

Tipo	Luz o separación entre barrotes (mm)
Rejas de gruesos	>50
Rejas de medios	15 a 50
Rejas de finos o rejillas	8 a 12

En estos equipos, cuanto menor sea la separación o luz entre barrotes, mayor será el volumen de residuos eliminados.

Existen rejas de limpieza manual y automática. Las primeras son instaladas en plantas de bajo caudal y el sistema se basa en un rastrillo con púas que se encastran en los espacios abiertos de las rejas. Con el fin de facilitar el trabajo de limpieza, el ángulo de la reja con el canal suele estar próximo a los 45-60°.

Las rejas de limpieza automática requieren una menor atención que las manuales ya que la limpieza se lleva a cabo mediante unos rastrillos que encastran entre los barrotes y se deslizan a lo largo de los mismos siendo arrastrados acoplados a cadenas sinfín, a un brazo basculante, cable de arrastre, etc.

La velocidad de desplazamiento de los rastrillos viene fijada por el fabricante del equipo, siendo los valores generalmente adoptados entre 2 y 5 m / min. El espesor de los rastrillos varía entre 10 y 20 mm. El sistema de limpieza automático de las rejas, lleva a cabo su función de forma discontinua, siendo actuado mediante un temporizador o bien por determinación de la diferencia de nivel del agua antes y después de la reja.



En las rejjas de funcionamiento automático, el ángulo del equipo con la solera del canal, suele estar entre 75-85°.

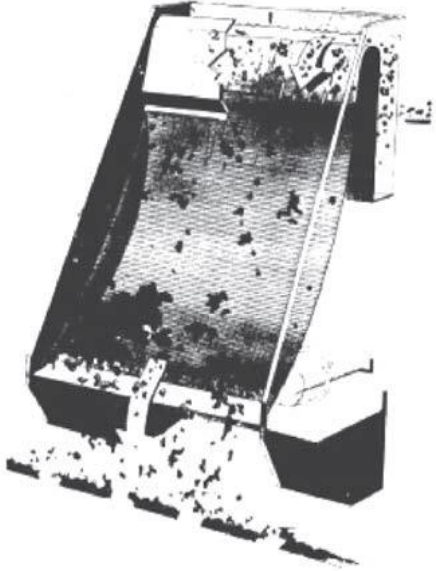
2.5.1.2 Tamices

Los tamices, al igual que las rejjas, son equipos para la eliminación de sólidos en suspensión de gran tamaño, consistentes en hacer pasar el agua a través de una placa perforada con ranuras o perforaciones de 1 a 3 mm o bien por una malla de acero inoxidable con luz entre 0.5 y 2 mm.

El empleo de este tipo de equipos, es muy aconsejable en el tratamiento de determinadas aguas industriales, como pueden ser mataderos, fábricas de cerveza, industrias de fermentación y en general aquellas aguas industriales con alto contenido en sólidos en suspensión de tamaño de partícula próxima a 1 mm o superiores; la construcción de los diferentes tipos de tamices se lleva a cabo en acero inoxidable.

La clasificación de los tamices se presenta en la tabla 7 (Metcalf & Eddy, 1998):

Tabla 7. Clasificación de los tamices

Tipo de tamices	Características	Ejemplo
<p>Estáticos</p>	<p>Los microtamices o tamices estáticos no tienen ninguna parte móvil. La luz de paso de la malla de estos equipos varía generalmente entre 0.5 y 2.0 mm y unas superficies filtrantes con anchuras que varían desde 0.3 hasta 1.8 m con una capacidad de tratamiento entre 400 y 1,200 L/m² min, dependiendo de la luz y del tipo de sólido a eliminar.</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento mínimo • No tienen consumo energético 	



<p>Dinámicos o Rotativos</p>	<p>Están formados por un cilindro cuya virola está formada por una malla de inoxidable a través de la cual fluye el agua residual, quedando retenidos sobre la superficie los sólidos en suspensión a eliminar. Al girar el cilindro, extrae del agua los mencionados sólidos, que son arrastrados por la superficie del tamiz y separados posteriormente mediante una rasqueta.</p> <p>La capacidad de tratamiento de los tamices dinámicos es superior a la de los estáticos, siendo la luz de la malla utilizada entre 0.5 a 1.5 mm.</p>	
<p>De superficie móvil</p>	<p>En los tamices de superficie móvil, esta se va desplazando de abajo arriba, formando una banda continua, existiendo diferentes modelos en el mercado, siendo instalados al igual que las rejas en canal.</p> <p>El paso de luz en estas unidades, es mayor que en los tamices estáticos y dinámicos, variando entre 1 y 4 mm.</p>	

2.5.1.3 Desarenadores

El desarenado consiste en un proceso en el que se produce una separación por decantación diferencial o selectiva, de todas aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos), impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica).

Las partículas de naturaleza inorgánica eliminadas en este proceso, son conocidas con el nombre genérico de arenas, incluyendo en dicha denominación otros productos presentes en el agua residual, como pueden ser escorias, gravas, cáscaras de huevo, objetos metálicos, etc.



Estas unidades en sus diferentes versiones, son utilizadas en todas las plantas depuradoras urbanas, no siendo de utilidad de forma general en las depuradoras de aguas industriales. Dentro de la industria se pueden encontrar en las azucareras en el tratamiento de las aguas de arrastre y transporte de la remolacha.

En la tabla 8 se muestran los principales tipos de desarenadores que se utilizan como tratamiento preliminar en la aguas residuales principalmente urbanas. (Metcalf & Eddy, 1998)

Los desarenadores eliminan todos aquellos sólidos en suspensión, con un peso específico igual o mayor de 2.65 y un tamaño de partícula superior a 0.15- 0.2 mm.

Tabla 8. Tipos de desarenadores

Tipo de desarenador	Características	Ejemplo
<p>De flujo horizontal</p>	<p>Consisten en hacer pasar el agua residual a través de un canal, de dimensiones apropiadas que mantenga la velocidad del agua en un valor próximo a 0.3 m/s.</p> <p>A esa velocidad se produce la decantación de las arenas en el fondo del canal, manteniendo en suspensión por arrastre los sólidos en suspensión de menor densidad, la materia orgánica.</p>	
<p>De sección cuadrada</p>	<p>En estos equipos, el agua residual se hace pasar a través de un tanque de sección cuadrada, donde tiene lugar la separación de las arenas por decantación.</p> <p>Los sólidos depositados en el fondo del equipo, son arrastrados mediante un mecanismo giratorio hacia una poceta situada en un lado del tanque, del que son extraídos hacia la superficie por una rampa mediante un mecanismo de vaivén provisto de un rastrillo o bien por un tornillo helicoidal.</p>	



<p style="text-align: center;">Aireados</p>	<p>Estas unidades consisten en un canal de geometría determinada, como el indicado en la figura adjunta, que disponen de un colector provisto de difusores que crean un movimiento de tipo helicoidal al agua a su paso por el equipo.</p> <p>La velocidad de giro o rotación del agua vendrá determinada por la cantidad de aire inyectado a través de los difusores.</p>	
--	--	--



2.5.2 Tratamientos primarios

Generalmente el tratamiento primario de las aguas residuales industriales es clave para el éxito de la depuración final, ya sea un tratamiento secundario (biológico) o terciario (avanzado), dependiendo los fines del agua a tratar.

En algunas industrias este tipo de tratamiento es el único que se le da al agua residual ya que la mayoría de estos desechos se vierten al sistema de alcantarillado urbano o municipal donde posteriormente recibirán un tratamiento secundario o avanzado según se requiera.

Los principales procesos fisicoquímicos que pueden ser incluidos en el tratamiento primario son los siguientes (Metcalf & Eddy, 1998):

:

- ◆ Sedimentación
- ◆ Flotación
- ◆ Coagulación-floculación
- ◆ Filtración

También se pueden incluir otros como la neutralización del pH y la desorción, sin embargo, los enlistados son considerados los de mayor impacto en la depuración del agua residual industrial.

Este tipo de tratamiento permite eliminar una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual, sin embargo, el efluente suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO y/o DQO alta (Sainz S.,2005)

2.5.2.1 Sedimentación (decantación)

Es un proceso físico de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Está en función de la densidad del líquido, del tamaño, del peso específico y de la morfología de las partículas. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le conoce también como decantación.

El objetivo fundamental de la sedimentación es la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual, obteniéndose un líquido claro sobrenadante en la superficie del equipo y unos sólidos que son extraídos en forma de fangos o lodos, con una concentración más o menos elevada por el fondo.



Entre los fines que tiene encomendado el proceso de decantación, se encuentran:

- Proteger los procesos posteriores sobre todo los de oxidación biológica de la presencia de fangos inertes.
- Evitar su vertido al cauce receptor, por la problemática que ocasionan en el mismo.
- Cumplir con la normativa vigente.

Los principales tipos de sedimentación se describen en la tabla 9. Este proceso puede ser intermitente, cuando se realiza el llenado de un depósito de agua y permanece en reposo durante varias horas para después vaciar la parte superior del agua hasta el nivel que está por encima de los lodos depositados. (Arboleda Valencia, 2000)

Tabla 9. Tipos de sedimentación

Tipo de sedimentación	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1 Sedimentación de partículas discretas	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No hay interacción entre las partículas y el resto del fluido	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o pre-sedimentadores
2 Sedimentación floculenta	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño	Sedimentación de flóculos en decantadores horizontales o de placas
3 Sedimentación retardada	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente.
4 Sedimentación compresión	Soluciones de alta concentración	Se forma una estructura entre las partículas, que va modificándose lentamente con el tiempo	Compactación de depósito de lodos



El proceso de decantación se basa en la diferencia de peso específico entre la partícula sólida a separar y el agua, de tal forma que una disminución de la velocidad ascensional del líquido a un valor menor que la caída del sólido, permita que la materia sedimentable se deposite en el fondo del equipo.

La decantación de partículas (en un intervalo de concentraciones en que no existan interferencias entre ellas) pueden ser estudiadas mediante las leyes de Newton y Stokes. Sin embargo, determinar de forma teórica la velocidad de caída de las partículas a partir de la ley de Stokes, presenta una serie de inconvenientes como:

1. El peso específico de todas las partículas no es el mismo al tratarse de sólidos de diferente composición.
2. Las partículas no son esféricas ni de sección circular.
3. El tamaño y forma geométrica de las partículas es diferente de unas a otras.

Debido a los inconvenientes mencionados, la forma habitual es la determinación experimental de una velocidad final de caída de las partículas (V_c) y proceder al dimensionamiento del tanque, de tal forma que queden eliminadas todas las partículas que posean una velocidad de caída mayor que la velocidad ascensional del agua. Las ecuaciones de los parámetros de diseño se muestran a continuación:

$$\text{Área: } S (m^2) = \frac{Q(m^3/h)}{v(m/h)}$$

$$\text{Volumen: } Vol (m^3) = Q \left(m^3/h \right) \times Tr(h)$$

$$\text{Altura: } h (m) = Q \left(m^3/h \right) \times \frac{Tr(h)}{S_h(m^2)}$$

Siendo:

Q : caudal, m^3/h

S : superficie, m^2

V : velocidad ascensional del agua, o carga superficial, m/h

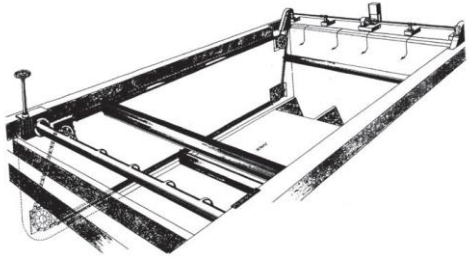
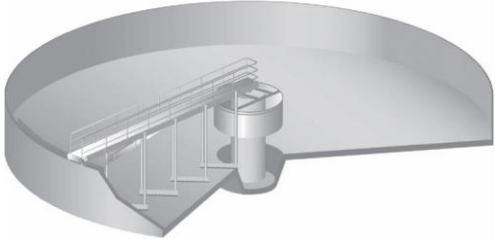
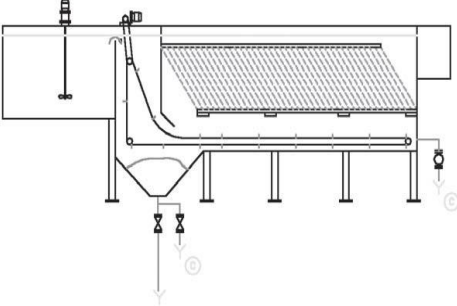
Vol : volumen, m^3

h : altura del decantador, m



Los principales tipos de sedimentadores se describen en la tabla 10. La forma de los equipos donde se lleva a cabo la sedimentación es variable, en función del tamaño de la instalación, el terreno y sus condiciones, los costos. (Metcalf & Eddy, 1998)

Tabla 10. Tipos de Sedimentadores

Tipo de sedimentador	Características	
Sedimentadores rectangulares	La velocidad de desplazamiento horizontal del agua es constante y se suelen utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas). Suelen ser equipos poco profundos.	
Sedimentadores circulares	En ellos el flujo de agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarnos del centro del sedimentador.	
Sedimentadores lamelares	Han surgido como alternativa a los sedimentadores poco profundos, al conseguirse una mayor área de sedimentación en el mismo espacio. Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y recogiendo en el fondo del sedimentador.	



La sedimentación o decantación primaria, permite eliminar aproximadamente el 60% de sólidos en suspensión y un 30% de la materia orgánica presentes en el agua residual.

Los decantadores estáticos operan mejor de forma rectangular, puesto que las variaciones de flujo de un tanque circular provocan la formación de vórtices o remolinos que hacen que los lodos suban a la superficie. Las variaciones de temperatura entre el agua afluyente y el agua del decantador también generan movimientos de convección que producen un efecto de remolino.

Los progresos en el diseño y operación de sedimentadores han mejorado los resultados de la floculación aumentando la concentración del flóculo, o recirculando los fangos, con lo cual se acelera la decantación.

Para el agua de consumo o de uso industrial, se combinan la floculación y la decantación en un solo aparato. Cuando el volumen de lodos es elevado, se utiliza el decantador-floculador de raquetas.

Esta operación por un lado permite eliminar los sólidos en suspensión (en un 60% aproximadamente) presentes en las aguas residuales y la materia orgánica (en un 30% aproximadamente) y por otro lado, protegen los procesos posteriores de oxidación biológica de la intrusión de fangos inertes de densidad elevada.

Una unidad de sedimentación consta de cuatro zonas:

- ◆ **Zona de entrada** cuya función es la distribución del agua en forma que la velocidad sea uniforme en toda la sección transversal, minimizando además las corrientes que causan turbulencia.
- ◆ **Zona de sedimentación** propiamente dicha, donde se produce la remoción de sólidos del agua.
- ◆ **Zona de salida o recolección del agua**, la cual recoge el agua clarificada en forma que la velocidad sea lo más uniforme posible.
- ◆ **Zona de depósito de lodos**, utilizada para almacenar los lodos sedimentados hasta el momento que se retiren del reactor.

En las figuras 2 y 3 se muestra la zonificación de un sedimentador convencional. El comportamiento de partículas de diferentes velocidades de sedimentación corresponde a trayectorias rectas en la zona de sedimentación debido a la



composición de los dos movimientos: el de desplazamiento con el flujo de velocidad, v_f , y el de sedimentación respecto al fluido de velocidad, v_s .

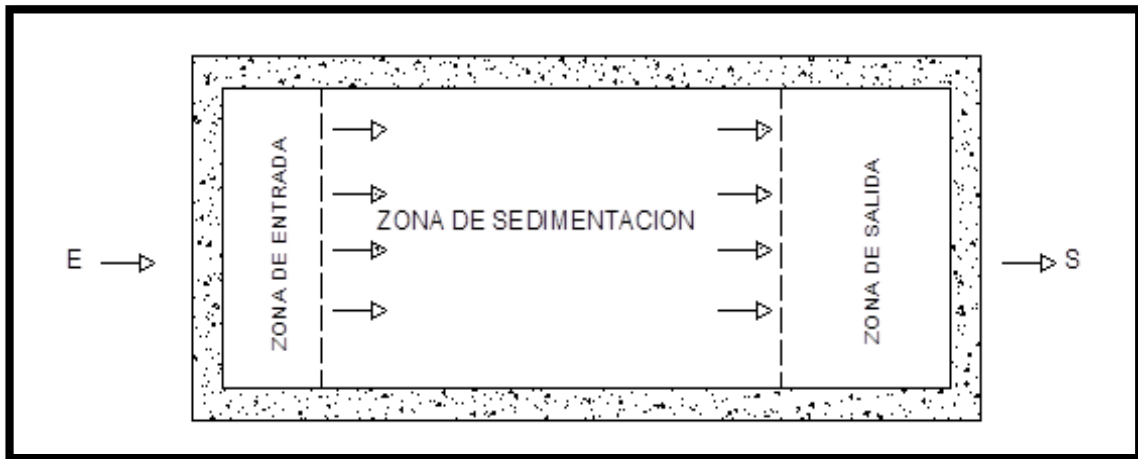


Figura 2. Zonificación de un sedimentador convencional (Vista de planta)

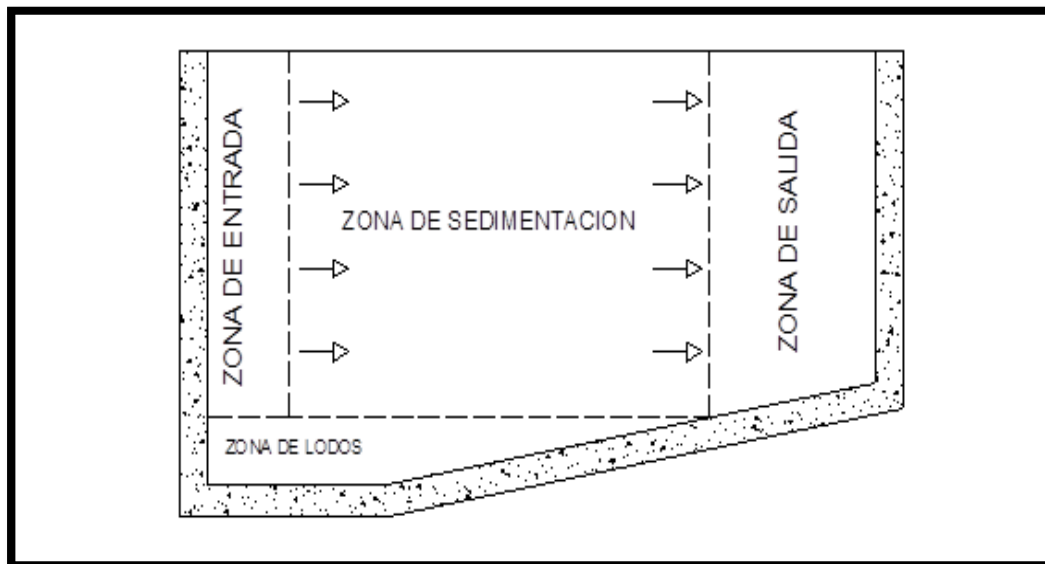


Figura 3. Zonificación de un sedimentador convencional (Corte longitudinal)



2.5.2.2 Flotación

Es un proceso físico fundamentado en la diferencia de densidades. La flotación permite separar la materia sólida o líquida de menor densidad que la del fluido, por ascenso de ésta hasta la superficie del fluido, ya que en este caso, las fuerzas que tiran hacia arriba (rozamiento y empuje del líquido) superan a la fuerza de la gravedad.

El proceso de flotación con aire es utilizado en el tratamiento de aguas residuales con el fin de eliminar (Forero J, 1999):

- ◆ Sólidos en suspensión de densidad igual o inferior a la del agua.
- ◆ Partículas de grasas y aceites si se encuentran en estado libre.

La separación se lleva a cabo introduciendo o formando burbujas de aire de un tamaño muy fino en el agua residual. Estas burbujas tienden a fijarse en la superficie de la materia a separar, de tal forma que el peso específico del conjunto partícula-aire, es menor que el del agua, creándose una velocidad ascensional suficiente para que la partícula alcance la superficie del líquido, consiguiendo con este método, que incluso partículas con mayor densidad que el agua, puedan ser separadas por flotación en superficie, de donde son retiradas mediante los mecanismos apropiados.

El fin fundamental de los procesos de flotación es eliminar los sólidos en suspensión de menor densidad que el agua, y por tanto no eliminables a través de los procesos de decantación, la eliminación de aceites y grasas no eliminadas en los sistemas de separación específicos y los sólidos en suspensión incluso con densidad mayor que el agua.

En este tipo de procesos se obtiene además del agua tratada, un residuo de fangos de flotación o “natas” que contienen los sólidos en suspensión y las grasas y aceites separados.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido, se tienen tres sistemas de flotación que se describen en la tabla 11 (Metcalf & Eddy, 1998).



Tabla 11. Tipos de flotación en función de cómo se introduce el aire

Tipo de Flotación	Descripción del proceso	Ventajas	Desventajas
Flotación a presión atmosférica	Consiste en la introducción directa de pequeñas burbujas de aire en el agua residual a tratar, mediante difusores de burbuja fina, situados en el fondo del tanque de flotación.	Ofrece ayuda en la separación de aceites y grasas, debido al bajo número de capturas de sólidos por las burbujas de aire inyectadas.	La eficiencia de este sistema es baja en la separación de sólidos en suspensión.
Flotación por disolución de aire (DAF)	En este sistema el aire es disuelto hasta saturación en el agua residual bajo una presión entre cuatro y seis atmósferas, seguido de una descompresión a presión atmosférica. Cuando la presión del líquido disminuye, el gas disuelto en exceso es liberado en forma de finas burbujas, a lo largo de toda la masa del líquido.	La generación de microburbujas (de 30 a 120 micras de diámetro), tiene tendencia a formarse en la interfase sólido-líquido, produciéndose la fijación del aire sobre las partículas (sólidos en suspensión o grasas y aceites) facilitando la flotación de las mismas. Alta eficiencia de remoción.	El consumo energético es el más elevado de todas las variantes, precisando un equipo de presurización de gran tamaño.
Flotación por aire inducido (IAF)	En este caso el aire se introduce en el agua mediante turbinas o bien eyectores, presentándose en unidades compactas.	Al girar el rotor se produce la mezcla del aire con el agua residual objeto de la flotación. El rotor hace que la posibilidad de contacto entre las burbujas y las partículas sólidas contenidas en el líquido sea alta, con el máximo rendimiento de la flotación.	En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el sistema DAF, lo que genera una menor eficiencia de remoción de sólidos suspendidos o gotas de grasa.

Estos procesos no se utilizan en la línea de agua de las plantas depuradoras urbanas empleándose con mayor amplitud en determinadas plantas depuradoras industriales, como pueden ser en refino de petróleo, petroquímicas, alimentación, etcétera.



Al igual que en el proceso de decantación, se evita la presencia de estos contaminantes en tratamientos posteriores o bien en el vertido del agua al cauce receptor. El sistema de flotación que produce un mejor rendimiento de separación y en consecuencia el más utilizado, es el de flotación por aire disuelto aunque también es más complejo y costoso.

La construcción de estos tanques de flotación puede ser de forma rectangular o bien circular, estando provisto en el primer caso de unas barrederas superficiales arrastradas por cadenas sinfín para la extracción de las espumas y en el segundo caso las barrederas son radiales. Con el propósito de poder ajustar la velocidad de giro o de desplazamiento de las barrederas, se debe disponer de un variador de la velocidad en el mecanismo de arrastre.

Las ecuaciones de los parámetros de diseño se muestran a continuación:

$$\text{Área: } S (m^2) = \frac{Q(m^3/h)}{CH(m^3/m^2 \times h)}$$

$$\text{Volumen: } Vol (m^3) = Q \left(m^3/h \right) \times Tr(h)$$

$$\text{Altura: } h (m) = Q \left(m^3/h \right) \times \frac{Vol (m^3)}{S (m^2)}$$

Donde:

Q : caudal, m^3/h

CH : carga hidráulica, $m^3/m^2 \times h$

S : superficie, m^2

Vol : volumen, m^3

Tr : tiempo de retención, h

h : altura del decantador, m



2.5.2.3 Coagulación-Floculación

El agua residual contiene sustancias tanto disueltas como en suspensión, ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. La materia en suspensión puede tener un tamaño y densidad tal que puede eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas partículas son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial, que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y la formación de una partícula más pesada para poder así sedimentar.

Se llama Coagulación-Floculación al proceso por el cual las partículas coloidales se aglutinan en pequeñas masas, con pesos específico superior al del agua, llamadas flocúlos. Dicho proceso se usa para lograr la (Lorenzo Y., 2006):

- ◆ Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica.
- ◆ Remoción de color verdadero y aparente.
- ◆ Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos, entre otros.
- ◆ Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados.
- ◆ Destrucción de algas y plancton en general.

Teoría de la coagulación-floculación

Los coloides forman sistemas muy estables, por lo que es imposible su sedimentación natural. También son sustancias responsables de la turbiedad y el color del agua.

Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida; éstas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos.

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula coloidal y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto existe un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta. En la figura 4 se muestra el modelo de la doble capa en partículas coloidales.

Además de las fuerzas electrostáticas de repulsión entre los coloides, pueden actuar las fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas de atracción originadas por acción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas. Las fuerzas de Van der Waals son independientes de la carga neta de los coloides y no varían con el pH o con otras características de la fase acuosa, pero sólo actúan a distancia muy pequeña. Al



acercarse dos partículas la fuerza de repulsión aumenta para mantenerlas separadas. Si se acerca lo suficiente y sobrepasan la barrera de energía, entonces la fuerza de atracción de Van der Waals predominará y las partículas podrán unirse. Cuando se obtiene esta condición se dice que el coloide se ha desestabilizado (Degrémont, 1979).

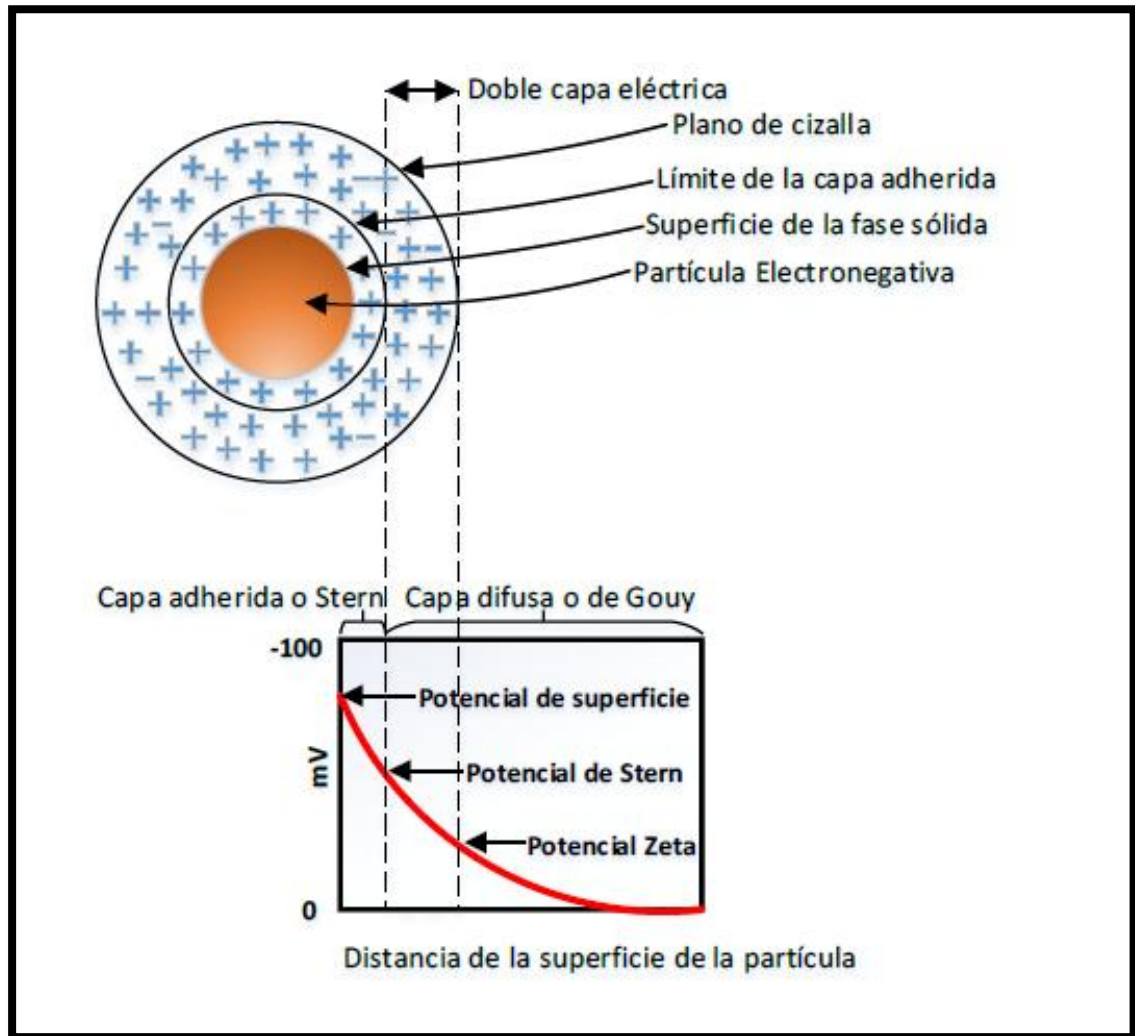


Figura 4. Modelo de la doble capa en partículas coloidales.

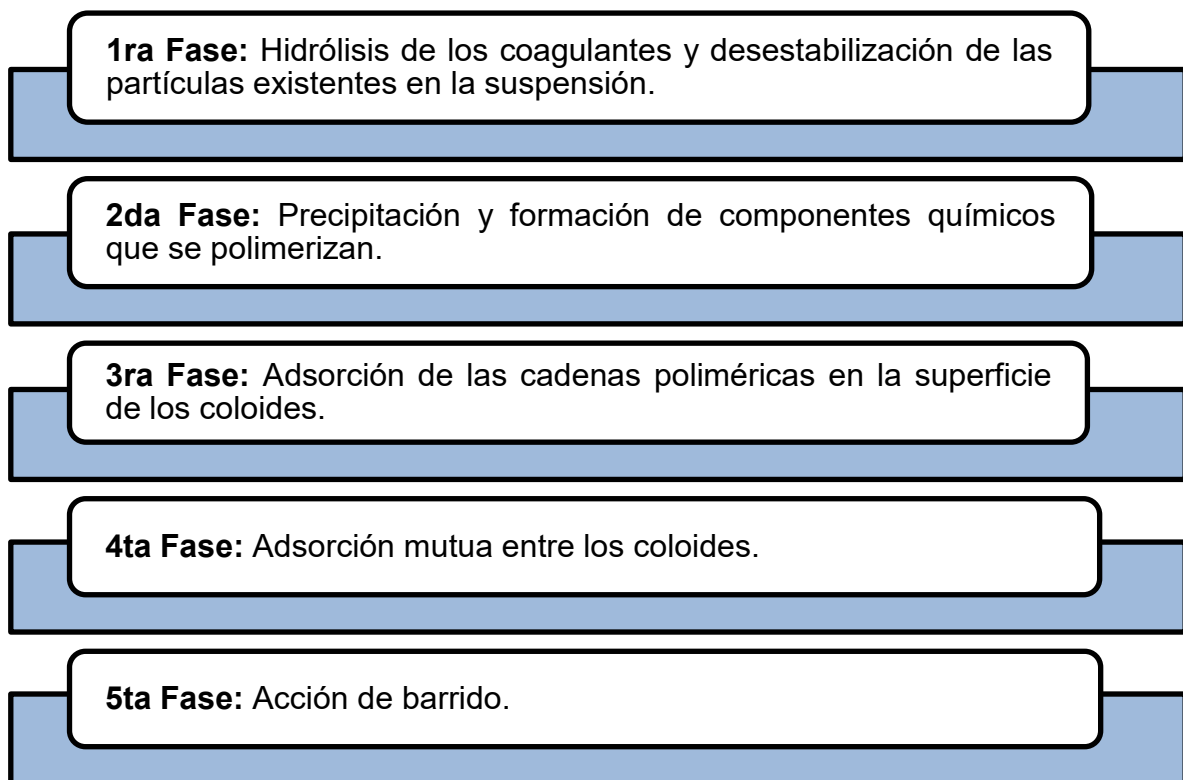
Coagulación

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización suele realizarse añadiendo al agua determinadas sales de aluminio o hierro llamadas coagulantes.



Los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que rodean a las partículas coloidales dispersas en el agua.

El término coágulo se refiere a las reacciones que ocurren al agregar un coagulante al agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundos. En el siguiente esquema se describen las etapas del proceso de coagulación (Lorenzo Y., 2006):



Cuando se agrega un coagulante al agua, éste se hidroliza y puede producir la desestabilización de las partículas por simple adsorción específica de los productos de hidrólisis, generalmente con carga positiva, en la doble capa que rodea a los coloides negativamente cargados (compresión de la doble capa o neutralización de las cargas), o por interacción química con los grupos ionizables de su superficie. En la figura 5 se presenta un esquema del fenómeno de la coagulación.

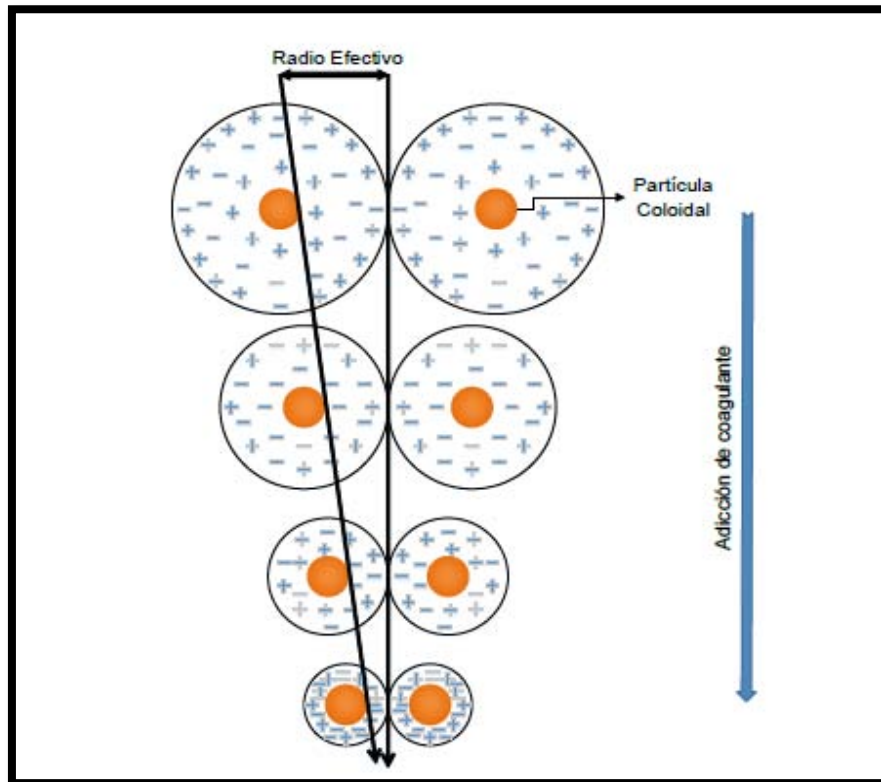


Figura 5. Fenómeno de la coagulación

Existen algunos factores químicos e hidráulicos que se deben considerar en el proceso de coagulación, ya que influyen en los resultados del mismo. En la tabla 12 se describen los principales factores y su efecto en el proceso (Rigola, 1990).

Tabla 12. Factores que influyen en el proceso de coagulación

Factores	Efecto en el proceso de coagulación
<p>pH del agua</p>	<p>Para cada coagulante existe una zona de pH donde se produce una buena floculación en corto tiempo y con una dosis baja de coagulante. En la literatura encontramos algunas relaciones (pH-tipo de coagulante) que reducen el número de ensayos de jarras. Trabajar con el pH óptimo permite utilizar menos coagulante y optimizar el proceso de coagulación.</p>



Temperatura del agua	La temperatura del agua también influye grandemente en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del floculo. Según disminuye la temperatura del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de floculos adecuados.
Concentración de coagulante	Es necesario realizar ensayos de jarras (Jar-test) para determinar la dosis óptima del coagulante, de lo contrario se formarán aglomerados muy pequeños que dificultarán la formación de floculos más grandes que sedimenten con facilidad
Secuencia de aplicación de las sustancias químicas	El coagulante debe añadirse primero para desestabilizar las partículas coloidales y comenzar la formación de pequeños floculos; posteriormente se debe añadir el floculante para aumentar su volumen, peso y cohesión.
Grado de agitación	Se requiere de una agitación rápida y constante que facilite el contacto del coagulante con las partículas coloidales del agua y de este modo haya un mayor número de colisiones entre las partículas para formar floculos de mayor tamaño y que la sedimentación se realice rápidamente.
Tiempo de coagulación	El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve, menos de un segundo y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar.

Habitualmente se utilizan como coagulantes las sales de hierro y aluminio ya que tiene la ventaja de actuar como coagulante-floculante al mismo tiempo (Lorenzo Y., 2006).

- ◆ Las sales de Fe_3^+ : Pueden ser $FeCl_3$ (cloruro férrico) o $Fe_2(SO_4)_3$ (sulfato férrico), con eficacia semejante. Se pueden utilizar tanto en estado sólido como en disoluciones. La utilización de una u otra está en función del anión, si no se desea la presencia de cloruros o sulfatos.
- ◆ Las sales de Al_3^+ : Suele ser $Al_2(SO_4)_3$ (sulfato de aluminio) o policloruro de aluminio. En el primer caso es más manejable en disolución, mientras que en el segundo presenta la ventaja de mayor porcentaje en peso de aluminio por Kg dosificado.

Floculación

La formación de floculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras.



Los objetivos principales de la floculación consisten en aglomerar a los microflóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como la sedimentación y la filtración.

La floculación puede ser de dos tipos, según el contacto de las partículas (Aguilar 2002):

- ◆ Floculación ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido.
- ◆ Floculación pericinética, que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas en él, debido a la agitación y por la gravedad y el peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento browniano.

La velocidad de formación del flóculo es proporcional a la concentración de las partículas en el agua y del tamaño inicial de estas. Existe un límite máximo de velocidad que no puede ser sobrepasado para evitar el rompimiento del flóculo. Dicho límite se determina mediante ensayos de jarras que permiten encontrar el rango óptimo de velocidad de agitación en la floculación.

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) y por el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico). Para los procesos de clarificación de aguas se utilizan los floculantes que se muestran en la tabla 13 (Lorenzo, 2006).

Tabla 13. Principales floculantes empleados en los procesos de clarificación

Floculante	Características
Sílice activada	Fue el primer floculante empleado y sigue siendo el que mejores resultados puede dar cuando se emplean sales de aluminio. Su mayor desventaja es su inestabilidad.



Arcillas	Bentonitas, caolinitas son añadidas como lechadas para aumentar frecuencia de colisiones y aumentar el peso en el flóculo.
Polímeros orgánicos naturales	Son principalmente almidones (polisacáridos) extraídos de granos semillas y corteza de origen vegetal así como varios tipos de suelos. Generalmente no tienen un peso molecular tan alto como los polímeros sintéticos.
Polímeros orgánicos sintéticos	Son producidos por la transformación química de los derivados del petróleo y del carbón. Generalmente presentan alto peso molecular, lo que favorece la aglomeración de los flóculos a través de puentes.
Polímeros no iónicos	Las poliácridamidas ($2- 4 \times 10^6$ g/mol) son usadas en clarificación y deshidratación de lodos, incrementan la resistencia del flóculo y frecuentemente se utilizan también como ayudantes de filtración en línea. Las poliaminas de cadenas más cortas (menor de 1×10^6 g/mol), son usadas sólo en clarificación como coagulantes primarios y como ayudante de coagulación la de alto peso molecular.
Polímeros aniónicos	Son polielectrolitos cargados negativamente y caracterizados por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción y grupos ionizados negativamente (carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero.
Polímeros catiónicos	Son polielectrolitos cargados positivamente que poseen en sus largas cadenas una carga eléctrica positiva, debido a grupos aminos o amonio cuaternario, capaz de remover la turbidez y el color, pueden usarse junto a coagulantes inorgánicos, resistentes al cloro, su densidad de carga no es sensible a cambios de pH.

El mayor beneficio obtenido con los floculantes poliméricos es un incremento en el tamaño del flóculo, obteniéndose una más rápida sedimentación. Estos productos funcionan primariamente como floculantes de alto peso molecular.

Esto contrasta con los polielectrolitos catiónicos de menor peso molecular, los cuales funcionan como coagulantes primarios (neutralización). Los floculantes no funcionan positivamente como coagulantes primarios excepto en casos donde su carga es de menor orden.

Las dosis de polímeros floculantes para clarificación de aguas es normalmente muy baja, en el rango de 0.05-2.0 ppm; para control de la contaminación de 1.0-10 ppm.



2.5.2.4 Filtración

La filtración es una operación unitaria en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de sólidos en suspensión. Esta operación se emplea para conseguir una mayor eliminación de sólidos en suspensión, de los efluentes de los procesos de tratamiento biológicos y químicos, también se utiliza para la eliminación del fósforo precipitado por vía química, y como etapa previa de un proceso de electrodiálisis.

La filtración puede realizarse como etapa única de separación de sólidos en suspensión o con un tratamiento previo de coagulación floculación que permita separar los sólidos de menor tamaño y la materia coloidal.

El objetivo básico de la filtración, por lo tanto, es separar las partículas y microorganismos, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficacia de los procesos anteriores. (Arboleda, 2000)

La filtración puede efectuarse de muchas formas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos), en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados), con flujo ascendente, descendente y mixto (parte ascendente y parte descendente).

Por otro lado, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad, según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante.

- En los filtros de acción lenta, el agua pasa por gravedad a través de la arena a baja velocidad. La separación de las materias sólidas, se efectúa al pasar el agua por los poros de la capa filtrante adheriéndose las partículas sólidas a los granos de arena. Después de un largo periodo de tiempo, quedan obstruidos los poros de la capa arenosa y ésta debe limpiarse. Estos filtros se utilizan normalmente para aguas potables.

Según la velocidad de filtración los filtros pueden ser rápidos ($120-360 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$), ó lentos ($7-14 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$), siendo estos últimos poco usados en la actualidad en el tratamiento terciario, utilizándolos en tratamientos biológicos para depuración. (Arboleda, 2000)



- En los filtros de arena de acción rápida con superficie libre, el agua desciende por gravedad a través de la arena a alta velocidad. Se utilizan para efluentes de aguas residuales provenientes de un tratamiento secundario, y es indispensable un pretratamiento con un coagulante para eliminar la mayor parte de las materias en suspensión por asentamiento. El filtro de arena de acción rápida, se limpia con una corriente de agua en dirección contraria, que expande y lava la arena separando los sólidos acumulados.

El objetivo de los filtros es retener en la superficie o en el seno de la masa filtrante, las partículas sólidas que contiene un líquido; se denomina filtración en superficie a la primera y filtración en profundidad a la segunda.

Si la materia en suspensión que debe separarse tiene una dimensión superior a la de los poros, esta quedará retenida en la superficie del filtro. En este caso la filtración se denomina superficial, en torta o sobre soporte. En caso contrario, si la materia en suspensión tiene una dimensión menor a la de los poros, esta quedará retenida en el interior de la masa porosa y la filtración se denomina en volumen, en profundidad o lecho filtrante.

Los flóculos que se forman en la coagulación total del agua, se eliminan en su mayor parte en el proceso de decantación; el agua que llega a los filtros sólo contiene trazas de flóculos cuya cohesión depende de los reactivos utilizados. Con una buena decantación, los filtros se encuentran en una situación ideal que consiste en recibir agua de calidad prácticamente constante y con una baja concentración de sólidos suspendidos.

Los filtros de arena rápidos son eficaces en el tratamiento de aguas muy contaminadas y de las que están sujetas a extremas variaciones en la contaminación y en la turbidez. Por las altas velocidades de filtración, el coste inicial de construcción de un filtro rápido es bajo, en comparación con el de un filtro lento para la misma capacidad.



2.5.3 Tratamientos secundarios (biológicos)

El tratamiento secundario consiste en una serie de procesos de naturaleza biológica que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P).

En la mayoría de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y por último, en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en el agua.

Los procesos aerobios se basan en la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO_2 y H_2O . Los procesos anaerobios transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO_2 .

A continuación se describen los principales procesos de tratamiento biológico propuestos por Metcalf & Eddy, 1998.

2.5.3.1 Lodos Activados (Fangos activos)

Fangos Activos es un proceso aerobio de biomasa suspendida, que requiere un contacto íntimo entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno. Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada o en un tanque de aireación, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes (se mantiene una determinada concentración de microorganismos aerobios).

Para acelerar los procesos naturales se les suministra oxígeno disuelto aumentando así la capacidad de tratamiento además de obtener una mejor calidad del efluente y menor cantidad de fangos.

Se clasifican en procesos de mezcla completa o flujo pistón:

- Los procesos de mezcla completa se caracterizan por la uniformidad de las características del licor en el tanque de aireación o balsa aireada.
- Los procesos de flujo pistón, sin embargo, mantienen un gradiente de concentración en función de la distancia a la entrada del proceso. En estos procesos no existe mezcla.



El modelo de mezcla completa puede adoptar las siguientes variantes:

- ◆ **Aireación prolongada:** Consiste en un tanque de aireación, con un sistema de aireación por turbinas, aireadores sumergibles o difusores cerámicos. Éstos mantienen la biomasa en suspensión e introducen el oxígeno necesario. Estos procesos se caracterizan por su baja carga másica y baja producción de fangos. Además, su utilización es interesante cuando se pretendan eliminar compuestos con nitrógeno simultáneamente con la materia orgánica.
- ◆ **Contacto-estabilización:** Este proceso se desarrolla en dos tanques. El primero denominado de contacto en el que se mezclan el efluente con el fango recirculado, en el existe aireación y mezcla completa. Después del contacto se produce la sedimentación, recirculando el fango al tanque de estabilización. En el tanque de estabilización se desarrolla la nueva biomasa, que es enviada al tanque de contacto y así iniciar de nuevo el ciclo.

2.5.3.2 Lechos Bacterianos

También denominados filtros biológicos o filtros percoladores. Se basa en los procesos biológicos aerobios. Consiste en poner el agua residual en contacto con un material inerte o soporte donde se adhieren los microorganismos.

Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie sobre el que se rocía el agua a tratar.

Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa, sobre la que se dispersa el agua residual a tratar, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural.

El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie, y por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente.

2.5.3.3 Biodiscos y Biocilindros

Los Contactores Biológicos Rotativos están basados en los procesos biológicos aerobios. Estos requieren un contacto íntimo entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno.

- ◆ **Los biodiscos** consisten en una serie de placas o discos colocados en un eje horizontal que giran lentamente dentro del tanque que contiene el agua residual, con un 49 % de la superficie sumergida.



Sobre la superficie de los discos se fija la biomasa que se encuentra alternativamente en contacto con el agua residual y el aire. Esto posibilita la ingestión de la materia orgánica por parte de los microorganismos y su posterior degradación en presencia del oxígeno del aire.

- ◆ **Los biocilindros** son una variante de los biodiscos. Su principal diferencia es la sustitución de los discos por biocilindros. Éstos están formados por una malla metálica cuyo interior se rellena de piezas de plástico que sirven de soporte a la biomasa.

En estos sistemas se produce un exceso de biomasa que se desprende del contactor. Esta se mantiene en suspensión en el tanque gracias al movimiento del material soporte. Para regular la cantidad de microorganismos presentes en el sistema se dispone de un clarificador o decantador secundario. En él se produce la sedimentación del exceso de biomasa.

2.5.3.4 Reactores Biológicos Secuenciales (SBR)

Los reactores biológicos secuenciales (SBR) son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. Los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de fangos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación. No obstante, existe entre ambos una importante diferencia.

En las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en los SBR, los procesos tienen lugar secuencialmente en el mismo tanque. El empleo de un único tanque reduce sustancialmente el espacio y la inversión necesarios.

2.5.3.5 Filtros Verdes

Los Filtros Verdes se basan en la propiedad que tiene el suelo de depurar física y biológicamente las aguas que le son aplicadas en forma de riego.

Los procesos principales que se desarrollan en el suelo son: filtrado físico, adsorción-precipitación, intercambio iónico, asimilación de nutrientes y oligoelementos. Los cultivos más empleados son los capaces de asimilar grandes cantidades de agua y nutrientes.

2.5.3.6 Digestión Anaerobia



La Digestión Anaerobia es un proceso anaerobio de biomasa suspendida. Se utiliza especialmente cuando las aguas residuales tienen una gran carga contaminante.

Consiste en la descomposición de la materia orgánica, que genera como producto final un gas de alto contenido energético, llamado biogás, formado fundamentalmente por metano (60-80%), dióxido de carbono (40-20%) y trazas de otros elementos como sulfuro de hidrógeno.

Este biogás es susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica.

El proceso de digestión anaerobia se realiza en tanques completamente cerrados en los que intervienen varios tipos de microorganismos. Entre los más importantes y específicos de este proceso están por un lado las bacterias productoras de ácidos y por otro las bacterias productoras de metano.

Las bacterias productoras de ácidos transforman la materia orgánica compleja, en productos intermedios. Las bacterias productoras de metano actúan sobre dichos productos intermedios transformándolos en gases y subproductos estabilizados. El proceso que se origina es lento y requiere unas condiciones determinadas.

La primera fase del proceso se denomina fase ácida, con pH por debajo de 6.8, la segunda fase se denomina fase de formación de metano, la cual aumenta el pH a valores de 7.4, estas bacterias son muy sensibles a los valores de pH y se inhiben con valores inferiores a 6.

2.5.3.7 Reactor Biológico de Membrana (MBR)

El Reactor Biológico de Membrana (MBR), se compone de dos partes integradas en una sola: por un lado, el reactor biológico responsable de la depuración biológica y por otro, la separación física de la biomasa y el agua mediante un sistema de filtración directa con membranas.

El sistema tiene una mayor capacidad para eliminar DQO coloidal, ya que al no atravesar la membrana tiene un tiempo de contacto mucho mayor con la biomasa.

Además, en los sistemas MBR se deriva de las elevadas concentraciones de biomasa con las que se trabaja en el reactor biológico gracias a la presencia de una barrera física (membrana) que no deja escapar las bacterias, lo que permite un control perfecto sobre la edad del fango y los parámetros principales de operación del sistema (Metcalf & Eddy, 1998).



2.5.4 Tratamientos terciarios (avanzados)

El tratamiento avanzado se define como el nivel de tratamiento necesario, más allá del tratamiento secundario convencional, para la eliminación de constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, los compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión.

Los tratamientos avanzados se emplean para posibilitar la reutilización de las aguas residuales, para lo cual es preciso conseguir efluentes de alta calidad como en el caso del agua empleada para procesos o servicios industriales, así como para la recarga de aguas subterráneas (Rodríguez, Letón, Rosal, 2006).

2.5.4.1 Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico mediante el cual se degrada la materia orgánica contaminante de un agua residual.

El proceso consiste en someter al vertido a corriente eléctrica haciendo que se desestabilicen los contaminantes suspendidos o disueltos en el agua. Tras esta reacción, los contaminantes precipitan formando un fango, que se puede eliminar mediante decantación o flotación con sistemas convencionales.

Las características de este sistema lo hace efectivo para múltiples sectores industriales. Así, ha sido utilizado para depuración de aguas de orujeras, fundición, vinazas, curtidos etc.

2.5.4.2 Electrooxidación (oxidación electroquímica)

Electrooxidación, el proceso de oxidación electroquímica, consiste en la aplicación de una determinada densidad de corriente, los electrodos utilizados dependen del objetivo a conseguir en cada prueba electroquímica.

En la literatura se propone el uso de oxidantes compatibles con el medioambiente con procesos catalíticos de alta eficiencia. La versatilidad del equipo de electrooxidación, permite diversificar la naturaleza tanto del oxidante como del electrodo sin la necesidad de paradas ni cambio de equipo.



2.6 Tratamiento de lodos

El origen y principales características de los lodos o fangos se describen a continuación:

a) Lodos primarios: se originan en la decantación primaria. Estos fangos no han sufrido un tratamiento biológico, no se han descompuesto, por lo que son altamente inestables y putrescibles. Al cabo de cierto tiempo producen mal olor. Su contenido en humedad varía entre el 95-99%.

b) Fangos biológicos: se denominan comúnmente fangos en exceso y proceden del proceso de fangos activados. Su materia orgánica está parcialmente descompuesta. Color marrón oscuro. Tienen un olor a tierra húmeda no desagradable, pero en su descomposición posterior se hacen sépticos y producen olores desagradables. Su contenido en humedad varía entre el 98-99.5% y son difíciles de concentrar. Pueden espesarse directamente o enviarse a la decantación primaria, donde decantan conjuntamente con los fangos primarios, dando lugar a los Fangos Mixtos.

c) Fangos digeridos aeróbicamente: son fangos de color marrón oscuro. Tienen apariencia floculenta. Olor poco desagradable.

d) Fangos de precipitación química: su velocidad de descomposición es algo menor que la de los primarios. Color oscuro, algo rojizo si contienen mucho hierro. El olor puede ser desagradable, aunque no tanto como el de los fangos primarios.

Los lodos producidos en el tratamiento del agua poseen más del 95% de agua, por lo que ocupan volúmenes importantes, siendo por su naturaleza putrescibles.

Lo anterior hace necesario un tratamiento para modificar sus características y permitir unas condiciones tales que su evacuación y disposición final sean óptimas desde el punto de vista sanitario, medioambiental y de su manejo.

El tratamiento de lodos se puede lograr a través de los siguientes procesos:

- **Digestión anaeróbica:** permite la estabilización, la reducción del volumen y la inactivación de organismos patógenos. Existen las alternativas de digestión en dos etapas con recuperación de gas, digestión abierta sin recuperación de gas.
- **Lagunas de lodos:** pueden emplearse como digestores o para almacenamiento de lodos ya digeridos. Para evitar malos olores se deben usar cargas bajas menores a $0.25 \text{ kg SSV/m}^2 \cdot \text{día}$.



- **Aplicación de lodos sobre el terreno:** los lodos estabilizados pueden ser aprovechados para acondicionar suelos, siempre que se haya removido por lo menos el 55% de los sólidos volátiles suspendidos.
- **Remoción de lodos de las lagunas de estabilización:** en la estación seca se realizará el drenaje de las lagunas hasta alcanzar un nivel que permita la exposición al ambiente del lodo sedimentado en el fondo. El lodo seco puede ser removido con equipo mecánico y almacenado en pilas de 2 m por 6 meses cuando proviene de lagunas primarias
- **Lecho de secado:** es el método más simple y económico para deshidratar los lodos estabilizados. El dimensionamiento de lechos se calculará en función a la masa y volumen de los lodos estabilizados, adoptando una profundidad de aplicación de 20 a 40 cm que se realizará entre 4 y 6 horas. El periodo de secado será entre 3 y 4 semanas en climas cálidos y entre 4 y 8 semanas en climas más fríos.

◆ Primera etapa de tratamiento: Espesamiento

La etapa de espesamiento incluye para reducir el volumen de los fangos mediante concentración o eliminación parcial de agua, los fangos activados que normalmente se bombean desde los tanques de decantación secundaria con un contenido de sólidos del 0.8% pueden espesarse hasta un contenido del 4% de sólidos, consiguiéndose de esta manera una reducción del volumen del fango a una quinta parte del volumen inicial. Con ello se obtienen una serie de ventajas:

- Reducción del volumen de los tanques posteriores al espesamiento, así como su equipamiento.
- Reducción de la cantidad de calor requerida para el calentamiento de los fangos en procesos tales como digestión anaerobia, secado térmico e incineración.
- Reducción y mejora de los rendimientos de los equipos de deshidratación.

Dos son los tipos más frecuentes de espesamientos son por gravedad y por flotación. Además, existe el espesamiento por centrifugación, alternativa válida para cualquier tipo de fango, aunque está más indicada para concentrar fangos muy hidrófilos (que difícilmente liberan el agua que contienen), de difícil compactación. llamados fangos en exceso.

◆ Segunda etapa de tratamiento: Estabilización

La digestión aerobia de los sólidos se produce, sea o no intencionadamente, en cualquiera de los casos de tratamiento secundario convencional. En el proceso de



aireación prolongada, la digestión aerobia se continúa casi hasta el máximo límite obtenible de reducción de materia orgánica (volátil).

La aireación prolongada es un proceso biológico en el que se digieren por vía aerobia, es decir, en presencia de oxígeno. El fango en exceso producido se conduce, bien sólo o bien mezclado con los fangos primarios, al proceso de estabilización.

El fango biológico tiene una gran cantidad de materia orgánica en forma de células y microorganismos que han estado oxidando la materia orgánica en el tratamiento secundario y que después de éste se encuentra en pequeña proporción.

💧 **Tercera etapa de tratamiento: Deshidratación y secado**

Con el objetivo de una eliminación lo más completa posible del agua del fango. Normalmente con una etapa de acondicionamiento previo. Métodos más utilizados: filtros de vacío, filtros prensa, filtros banda, centrifugas, evaporación térmica o en eras de secado.

💧 **Cuarta etapa de tratamiento: Evacuación**

Consiste en el depósito o destino final de los lodos. Los principales métodos son los vertedero de seguridad o de residuos sólidos urbanos según sus características; incineración con o sin adición de combustible adicional según el poder calorífico de los lodos, se generan cenizas, escorias y gases que necesitan tratamiento, con o sin recuperación de energía; compostaje, descomposición biológica controlada, de la materia orgánica, en condiciones aerobias, con el fin de obtener “composta” (abono orgánico).



2.7 Selección de las tecnologías de tratamiento

2.7.1 Definición de Tecnología

La tecnología se puede definir como el conjunto de conocimientos, procedimientos y técnicas que, aplicados de forma lógica y ordenada, permiten al ser humano modificar su entorno material o virtual para satisfacer sus necesidades, esto es, un proceso combinado de pensamiento y acción con la finalidad de crear soluciones útiles.

Para Visscher (2005), la tecnología es el resultado de la relación entre herramientas y tareas, es un producto que puede ser un elemento tangible o intangible generado por que el equipo humano ha tenido una razón fundamental o una motivación para resolver una tarea o un problema, o para alcanzar una meta establecida.

La definición anterior sugiere que la tecnología no solamente consta del sistema físico sino también de elementos organizacionales para su manejo, ya que requiere determinado tipo de personal para su administración, operación y mantenimiento.

2.7.2 Modelo de evaluación de tecnologías

En el Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos (Anaya y colaboradores, 2013) se menciona que la tecnología de un proceso es uno de los factores más importantes para determinar la viabilidad de un proyecto, ya que ésta define la eficiencia de las operaciones, calidad de los productos, necesidades de mano de obra y el impacto ambiental del proceso.

El continuo desarrollo tecnológico hace necesario evaluar el desempeño de diferentes tecnologías; para lograr seleccionar las más adecuadas se requiere determinar los requerimientos de materias primas, insumos, servicios auxiliares, costos de operación y mantenimiento, entre otros factores.

En el antes citado Manual, también se afirma que el desarrollo de un modelo de evaluación de alternativas tecnológicas puede realizarse mediante la ejecución de cuatro etapas:

- ◆ Identificación de los criterios que afectan la selección de la alternativa tecnológica.
- ◆ Clasificación de todos los criterios identificados.
- ◆ Formulación de un modelo en términos de la clasificación.
- ◆ Calificación de los términos del modelo.

La identificación de los criterios tiene como objetivo verificar que las tecnologías propuestas cumplan con los requerimientos del proceso y reconocer las ventajas y



desventajas que presenten. Esta identificación se puede hacer por comparación, por abstracción o por imposición.

La comparación se aplica al confrontar los requerimientos de una tecnología con las condiciones del proyecto. Por su parte, la abstracción consiste en prever posibles resultados al implantar una tecnología, los cuales podrían ser favorables o desfavorables. El caso de la imposición, generalmente se presenta cuando el cliente está más inclinado al empleo de una tecnología porque está más familiarizado con ella o porque le ha funcionado bien en otras plantas, etc.

La clasificación de los criterios consiste en la utilización de filtros restrictivos para descartar desde el principio las alternativas que no cumplan con las restricciones impuestas, con el objetivo de simplificar la tarea de evaluar una gran cantidad de tecnologías simultáneamente.

La formulación de un modelo en términos de la clasificación, se trata de considerar en conjunto todos los requerimientos de cada una de las tecnologías que no hayan sido descartadas, con el fin de empezar a evaluar las ventajas o desventajas que presenten cada una con relación a la otra.

Finalmente, se debe proceder a calificar las alternativas tecnológicas para decidir cuál será seleccionada. Una de las metodologías más ampliamente utilizadas para evaluar tecnologías es el método matricial. Éste método consiste en asignar a cada aspecto un factor de peso correspondiente a su importancia para tomar la decisión

Posteriormente, cada tecnología podrá ser calificada numéricamente de acuerdo a si cumple en mayor o en menor grado con cada factor, y la calificación final será determinada como el promedio ponderado por la suma de los productos parciales (Calificación x Peso), calculados para cada tecnología.

A continuación se describen los principales aspectos que se deben considerar en una evaluación de tecnologías (Anaya y colaboradores, 2013):

a) Aspectos técnicos del proceso:

Estos consideran las características de la tecnología desde el punto de vista del proceso a nivel ingeniería básica y conceptual. Esto se realiza a través del análisis comparativo entre las alternativas que se ofrecen, estableciendo sus ventajas y desventajas y tomando en cuenta el techo tecnológico como referencia.

b) Aspectos técnicos complementarios:

Dentro de estos se agrupan los criterios que no corresponden propiamente a las características de la tecnología, pero que proporcionan confianza de que se tenga un buen funcionamiento en la fase operativa de la planta.

c) Aspectos contractuales:



En éstos se evalúan todos aquellos factores inherentes al contrato y aunque éstos pueden modificarse en la etapa de negociación, se espera que sea en beneficio del usuario de la licencia (licenciatario) y no del licenciador.

d) Aspectos plausibles:

Estos aspectos agrupan los criterios macro-económicos, políticos, sociales y ecológicos que pueden afectar en la evaluación de un proyecto de inversión.

e) Aspectos estratégico-tácticos:

Se consideran de gran importancia ya que la tecnología que se adquiere debe ser congruente con la estrategia tecnológica.

f) Aspectos normativos:

Estos agrupan los criterios que involucran la normatividad que puede regir un proyecto en sus diferentes fases, es decir, desde la licitación hasta la emisión de contaminantes, cuando la planta esté operando.

Es importante resaltar que los diferentes aspectos descritos anteriormente tienen diferente temporalidad, es decir, en algunos sus efectos son inmediatos mientras que otros son a largo plazo.

La utilización de criterios restrictivos (filtros) para descartar desde el principio alternativas que no cumplan con las restricciones impuestas desde el inicio, pueden significar un ahorro de esfuerzos en el proceso de selección.

La metodología descrita anteriormente, es una herramienta integral que presenta la flexibilidad al poder seleccionar la técnica de análisis y comparación de alternativas con base al tipo de proyecto y a la información que se tiene disponible.



Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describen los pasos y procedimientos utilizados para el desarrollo del proyecto. El desarrollo experimental se dividió en cinco etapas que se muestran en el siguiente esquema:



El desarrollo experimental se realizó en el Laboratorio 212 de Ingeniería Química del conjunto E, de la Facultad de Química en Ciudad Universitaria. Sin embargo, el muestreo del agua residual y algunas pruebas de caracterización fueron realizadas en la planta productora de plastificantes y resinas seleccionada como caso de estudio. También se realizaron algunos experimentos en el Laboratorio 303 de Ingeniería Ambiental, también del edificio E, de la Facultad de Química, UNAM.

A continuación se describe de manera detallada cada una de las etapas del proyecto de investigación así como las normas revisadas, los equipos utilizados y las pruebas realizadas.

3.1 Revisión de la Normatividad Mexicana vigente

La revisión de las principales Normas Oficiales Mexicanas fue una etapa importante para dar inicio al trabajo experimental de este proyecto.



Una vez planteado el problema de investigación, se analizó cuál de las tres principales NOM's aplica para el caso de estudio seleccionado, esto con base al cuerpo receptor y destino del agua residual a tratar.

De este modo, se determinó que por tratarse de una planta que vierte su agua residual al sistema de alcantarillado municipal, la norma que rige dicha práctica es la NOM-002-SEMARNAT-1996, misma que establece los límites máximos permisibles de los contaminantes en las descargas de aguas residuales de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Debido a que este trabajo representa la primera etapa de un proceso de tratamiento de aguas residuales que requiere la planta, el objetivo principal consiste en dar cumplimiento a la normatividad vigente y se plantea que esto se puede lograr con tecnologías de tratamiento primario. Sin embargo, en este trabajo también se hacen algunas recomendaciones de tratamientos avanzados que podrían permitir en una segunda etapa, obtener agua con calidad adecuada para reutilizarse dentro de la planta, dando cumplimiento a la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Además de consultar las Normas Oficiales Mexicanas, se revisaron las Normas Mexicanas que establecen la metodología para realizar mediciones de los parámetros críticos para la caracterización del agua residual.

3.2 Muestreo del agua efluente de los principales procesos

El muestreo del agua efluente de los procesos se realizó como lo establece la NMX-AA-003-1980, empleando recipientes adecuados para el transporte y conservación de las muestras desde el Estado de México hasta Ciudad Universitaria.

Se emplearon recipientes de polietileno con tapa hermética y capacidad de 5 litros cada uno; las muestras fueron identificadas con una etiqueta que contenía la siguiente información:

- ◆ Fecha y hora de muestreo
- ◆ Identificación de la corriente a la que pertenece la descarga
- ◆ Temperatura de la muestra
- ◆ Número de muestra
- ◆ Nombre de la persona que realizó el muestreo

Se buscó que todas las muestras recolectadas fueran representativas de las características del agua efluente de cada proceso, por lo que con ayuda de los operadores mejor capacitados en muestreo, se tomaron muestras compuestas de las



descargas de al menos 3 lotes (correspondientes a los tres turnos de operación que completan las 24 hrs).

Las corrientes de agua que se muestrearon para su posterior análisis se enlistan a continuación:

- ◆ Agua de lavado de DOTP
- ◆ Agua de reacción de DOTP
- ◆ Agua de Lavado de Aceite epoxidado de soya

Las muestras fueron conservadas a una temperatura de 4 °C y el tiempo entre la extracción de la muestra y el análisis de la misma no excedió los tres días como indica la norma.

3.3 Caracterización de cada corriente por separado antes del tratamiento primario

La planta seleccionada como caso de estudio, cuenta con una fosa de aproximadamente 20 m³, que recibe toda el agua efluente de los procesos productivos, del lavado de áreas y equipos, así como del laboratorio; actualmente toda esa agua es vertida al sistema de alcantarillado municipal sin ningún tratamiento previo.

En el presente trabajo se propuso caracterizar cada una de las corrientes por separado, con el objetivo de analizar el nivel de contaminación del agua efluente de los principales procesos ya que no se tenía un antecedente de alguna caracterización.





Aunado a lo anterior, se justificó la separación de las corrientes para su posterior caracterización argumentando que con ello se podría observar que procesos son los que generan más contaminantes y posibilitar que en un futuro la empresa pudiera reducir los materiales contaminantes de sus procesos.

Después de recolectar el agua proveniente de los tres principales procesos productivos, se procedió a caracterizar cada una de ellas con base a las NMX que tiene de referencia la NOM-002-SEMARNAT-1996. En la tabla 14 se muestran los principales parámetros que se deben medir con base a lo que establece la norma.



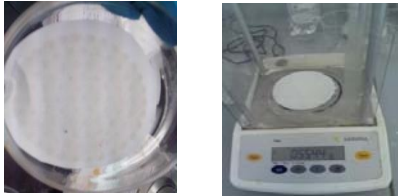


La medición del pH y temperatura se realizó en la planta al recolectar las muestras, esto con ayuda de un potenciómetro marca HANNA, mientras que el resto de los análisis se realizaron en el laboratorio 212 de la facultad de química de la UNAM; las muestras de agua fueron transportadas en las condiciones y temperatura que indica la norma de muestreo y almacenamiento de muestras.



Tabla 14. Principales parámetros a medir para caracterizar el agua residual

Parámetro a determinar	Definición	Materiales y Equipos para el análisis
<p>Sólidos Sedimentables (NMX-AA-004-SFI-2013)</p>	<p>La cantidad de sólidos que en un tiempo determinado se depositan en el fondo de un recipiente en condiciones estáticas.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p style="text-align: center;">Conos Imhoff con 1L de capacidad</p>
<p>Grasas y Aceites (NMX-AA-005-SCFI-2000)</p>	<p>Son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano como disolvente.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Equipo de filtración al vacío</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Balanza analítica</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Equipo de extracción Soxhlet</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Matraz de bola fondo plano</p>



<p>Sólidos Suspensos Totales</p>	<p>Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.</p>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Equipo de filtración al vacío</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Estufa de secado</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Balanza analítica</p> </div> </div>
<p>Materia flotante (NMX-AA-006-SCFI-2010)</p>	<p>Todo aquel material que quede retenido en una malla entre 2.8 mm y 3.3 mm de abertura.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Malla de acero inoxidable</p> </div>
<p>pH (NMX-AA-008-SCFI-2011)</p>	<p>Concentración de iones hidrógeno</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Potenciómetro HANNA</p> </div>



<p>Temperatura (NMX-AA-007-SCFI-2013)</p>	<p>Potencial o grado calorífico referido a un cierto cuerpo.</p>	 <p>Potenciómetro HANNA</p>	
<p>DBO (NMX-AA-028-SCFI-2001)</p>	<p>Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua. La prueba tiene un periodo de duración de 5 días.</p>	 <p>Vasos de precipitado 1L</p>	 <p>Sol. amortiguadora de fosfatos e Inoculo</p>
<p>DQO* (NMX-AA-030-2-SCFI-2011)</p>	<p>La concentración de masa de oxígeno es equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida, cuando una muestra de agua es tratada con este oxidante bajo condiciones definidas.</p>	 <p>Tubos de ensayo con dicromato de potasio y sol. sulfúricas</p>	 <p>Espectrofotómetro (absorbancia a 620 nm)</p>

*Parámetro no especificado como obligatorio por la NOM-002-SEMARNAT-1996



La metodología detallada para realizar los análisis y determinaciones de los parámetros antes mencionados se describen en el **anexo B**.

3.4 Selección de tecnologías de tratamiento y su posterior aplicación a nivel laboratorio

La selección de las tecnologías que posteriormente se aplicarían a nivel laboratorio, se realizó mediante una evaluación matricial.

Después de caracterizar cada corriente de agua residual, se consultó en la literatura cuáles son las principales tecnologías de tratamiento que se aplican para reducir los contaminantes presentes en el agua a tratar.

El proceso de selección antes mencionado, se basó en el Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos (Anaya y colaboradores, 2013).

En este trabajo, se utilizó el método de comparación para identificar los criterios y aspectos de la evaluación tecnológica.

3.4.1 Identificación de los aspectos a considerar para la evaluación de tecnologías

Para la selección de las tecnologías de tratamiento primario del agua residual proveniente de la producción de plastificantes y resinas se consideran los aspectos descritos en la tabla 15.

La comparación de tecnologías se realizó para cada etapa de tratamiento, teniendo cada una como objetivo remover o separar: grasas y aceites, sólidos SST y algunos sólidos disueltos.

Tabla 15. Aspectos a considerar en la evaluación de tecnologías

Aspecto (Ai)	Decisión
Aspectos técnicos del proceso	Si
Aspectos técnicos complementarios	Si
Aspectos económico-financieros	Si
Aspectos normativos	Si
Aspectos plausibles	No
Aspectos contractuales	No



El primer aspecto a evaluar para seleccionar una tecnología son los factores técnicos, ya que de esta manera se pueden descartar las tecnologías que no sean apropiadas para las condiciones del proyecto. Los aspectos técnicos complementarios también son importantes para la selección de la tecnología.

El aspecto económico financiero es importante ya que en todos los proyectos se busca proponer procesos eficientes a un costo razonable y proporcionando beneficios para el cliente.

Los aspectos normativos son muy importantes en este proyecto, debido a que las condiciones para verter el agua efluente de los procesos está regulada por una Norma Oficial Mexicana.

Cabe señalar que los aspectos contractuales y plausibles se evalúan para proyectos de inversión con enfoques macroeconómicos, políticos y sociales, por lo que no se consideran decisivos en este proyecto ya que solo nos interesa únicamente comparar las ventajas y desventajas de cada tecnología.

En la tabla 16 se definen los puntajes asignados a cada aspecto de evaluación..

Tabla 16. Puntaje asignado a cada aspecto de la evaluación

Aspecto (Ai)	Puntaje (Pi)
Aspectos técnicos del proceso	40
Aspectos técnicos complementarios	15
Aspectos económico-financieros	30
Aspectos normativos	15
$\Sigma P_i =$	100

El primer aspecto a evaluar para seleccionar una tecnología son los factores técnicos del proceso, ya que de esta manera se pueden descartar las tecnologías que no sean apropiadas para los requerimientos del proceso.

A continuación, se presenta una lista de los principales requerimientos de la planta seleccionada como caso de estudio:

- Se requiere una calidad de agua que cumpla con lo que establece la NOM-002-SEMARNAT-1997
- El sistema debe tener un mínimo consumo de productos químicos.
- Se requiere que el sistema tenga un mínimo consumo de servicios auxiliares.
- Se debe considerar la disposición final de los lodos generados en el proceso.



- ◆ Se dispone de un área no mayor a 100 m² para la instalación de los equipos por lo que se requiere que el área sea mínima.
- ◆ El mantenimiento y limpieza de los equipos debe ser mínimo.

Los requerimientos anteriormente descritos, son muy importantes para la toma de decisión en la evaluación de tecnologías, por lo tanto se le asignará una calificación a cada rubro dónde se consideren las características máximas y mínimas de los factores considerados.

Para establecer la escala de calificación (Ci), se considera utilizar el rango de 0 a 5 en dónde los valores 2 y 4 no aplican. Esta escala fue propuesta por McConell y Khalil (1988) para calificar los atributos de los factores. Ver tabla 17.

Tabla 17. Escala de calificación de atributos

Descripción	Calificación (Ci)
Atributo no disponible	0
Calificación mínima (atributo muy pobre)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (atributo muy bueno)	5

3.4.2 Evaluación de tecnologías de tratamiento

La evaluación de tecnologías por el método matricial se realizó para las tres etapas de tratamiento que se identifican como necesarias con base a los resultados obtenidos en la caracterización preliminar. Por tal motivo, las tecnologías a evaluar deben tener como objetivo:

- ◆ La separación de grasas y aceites
- ◆ La remoción de SST

El estudio se fundamentó en la información técnica disponible en la literatura. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de tecnologías con base a los aspectos y subaspectos previamente definidos.



a) Separación de grasas y aceites: Como resultado de la caracterización del agua residual, se conoce que presenta una elevada concentración de grasas y aceites por lo que se propone que la separación de estos residuos sea el primer paso en el proceso de tratamiento.

Las tecnologías evaluadas para esta etapa son la flotación por inyección de aire y la flotación por aire disuelto (FAD), en la tabla 18 se comparan algunos parámetros específicos de ambas tecnologías (Ramalho, 1996).

Tabla 18. Características específicas de las tecnologías a evaluar (a)

Parámetro	Flotación por inyección de aire	Flotación por aire disuelto (FAD)
Pretratamiento	No requiere	Filtrado preliminar
Consumo de Reactivos	Aire atmosférico	Aire a presión
Tipo de operación	Batch/continuo	Continuo
Temperatura	Ambiente	Menor a 40°C
Eficiencia de remoción de grasas y aceites	90-95%	95-99%
Tamaño de burbujas (micras)	100-500	40-100
Consumo de energía ($W \cdot m^3$ de agua tratada/h)	20-30	45- 60
Tiempo de retención (min)	5-15	20-30

El resultado de la evaluación de los subaspectos de los aspectos previamente definidos, se muestran en la tabla 19, también se presenta el peso que se asignó a cada factor y subaspecto.



Tabla 19. Peso y calificación de los aspectos para cada tecnología (a)

Atributos	Peso (wi)	Flotación por inyección de aire		Flotación por aire disuelto (FAD)	
		Calificación (Ci)	Calificación ponderada (wi*Ci)	Calificación (Ci)	Calificación ponderada (wi*Ci)
Aspectos técnicos del proceso					
Concordancia del proceso con las bases de diseño					
Capacidad requerida	0.06	5	0.3	5	0.3
Calidad del agua tratada	0.08	5	0.4	5	0.4
Disponibilidad de servicios auxiliares	0.08	5	0.4	3	0.24
Características relevantes del proceso					
Condiciones de operación	0.07	5	0.35	3	0.21
Eficiencia en la remoción de grasas y aceites	0.07	3	0.21	5	0.35
Pre o post tratamientos necesarios	0.09	5	0.45	3	0.27
Consumo de servicios auxiliares	0.08	5	0.4	1	0.08
Impacto ecológico de la tecnología	0.06	3	0.18	3	0.18
Aspectos técnicos complementarios					
Información técnica	0.07	5	0.35	3	0.21
Calidad de la información técnica suministrada	0.06	3	0.18	3	0.18
Aspectos económicos					
Requerimientos de servicios auxiliares	0.07	5	0.35	1	0.07
Energía eléctrica	0.06	3	0.18	1	0.06
Reactivos químicos	0.05	5	0.25	5	0.25
Costos de operación y mantenimiento	0.05	5	0.25	3	0.15
Aspectos normativos					
Normas ecológicas*	0.05	3	0.15	3	0.15

*Cumplimiento de límites máximos de grasas y aceites permisibles por la NOM-002-SEMARNAT-1996



La puntuación de cada factor se obtuvo con la metodología descrita por Baca Urbina (2001). A continuación, se presenta la matriz con el puntaje final calculado para cada tecnología evaluada. Ver tabla 20.

Tabla 20. Resumen final de la evaluación de tecnologías (a)

Tecnología	ΣwiCi (aspecto técnico)	ΠiΣwiCi (peso del aspecto técnico)	ΣwiCi (aspecto técnico comp.)	ΠiΣwiCi (peso del aspecto técnico comp.)	ΣwiCi (aspecto económico-financiero)	ΠiΣwiCi (peso del aspecto económico-financiero)	ΣwiCi (aspecto normativo)	ΠiΣwiCi (peso del aspecto normativo)	ΣΠiΣwiCi Calificación total de la tecnología
Flotación por inyección de aire	2.69	107.6	0.53	7.95	1.03	30.9	0.15	2.25	148.7
Flotación por aire disuelto (FAD)	2.03	81.2	0.39	5.85	0.53	15.9	0.15	2.25	105.2

Como resultado de la evaluación presentada en esta tabla, se concluye que la alternativa tecnológica más factible de aplicarse para nuestro caso de estudio es la flotación por inyección de aire, puesto que obtuvo una puntuación mayor que la flotación por aire disuelto (FAD).

Esto se debe principalmente a que los aspectos técnicos y económicos tienen un peso mayor en la decisión final y la flotación por inyección de aire no requiere presurización, lo que significa menores costos de inversión y operación.

La eficiencia de remoción de grasas y aceites es buena para ambas tecnologías, y la flotación (FAD) además logra remover un porcentaje de microorganismos y DBO, sin embargo requiere una filtración preliminar lo que también representa un incremento en los costos. Otra desventaja que presenta la flotación FAD es su sensibilidad a las variaciones de temperatura debido a que afecta la solubilidad del aire en el agua.



b) Remoción de SST: Los resultados de la caracterización del agua residual, muestran que el agua estudiada presenta una alta concentración de sólidos suspendidos totales (por encima del límite máximo que establece la norma).

Por tal motivo, las tecnologías evaluadas para esta etapa son la coagulación-floculación y la electrocoagulación. En la tabla 21 se comparan algunos parámetros específicos de ambas tecnologías (Ramalho, 1996).

Tabla 21. Características específicas de las tecnologías a evaluar (b)

Parámetro	Electrocoagulación	Coagulación-floculación
Pretratamiento	Desnatado	Desnatado
Consumo de Reactivos	No requiere	Coagulante y floculante
Tipo de operación	Batch	Batch
Temperatura	Ambiente	Ambiente
Eficiencia de remoción de SST	60-85%	90-99%
Generación de lodos	Baja (lodos compactos)	Baja
Eliminación de SDT	Buena	Mínima (por adsorción o arrastre)
Otros requerimientos	Placas de aluminio (electrodos de sacrificio)	No requiere

El resultado de la evaluación de los subaspectos de los aspectos previamente definidos, se muestran en la tabla 22, también se presenta el peso que se asignó a cada factor y subaspecto.



Tabla 22. Peso y calificación de los aspectos para cada tecnología (b)

Atributos	Peso (wi)	Electrocoagulación		Coagulación-floculación	
		Calificación (Ci)	Calificación ponderada (wi*Ci)	Calificación (Ci)	Calificación ponderada (wi*Ci)
Aspectos técnicos del proceso					
Concordancia del proceso con las bases de diseño					
Capacidad requerida	0.05	5	0.25	5	0.25
Calidad del agua tratada	0.07	5	0.35	3	0.21
Disponibilidad de servicios auxiliares	0.06	3	0.18	5	0.3
Características relevantes del proceso					
Condiciones de operación	0.08	3	0.24	5	0.4
Eficiencia en la remoción de SST	0.07	5	0.35	5	0.35
Pre o post tratamientos necesarios	0.08	3	0.24	5	0.4
Consumo de servicios auxiliares	0.09	1	0.09	3	0.27
Impacto ecológico de la tecnología	0.06	3	0.18	3	0.18
Aspectos técnicos complementarios					
Información técnica	0.08	1	0.08	5	0.4
Calidad de la información técnica suministrada	0.06	3	0.18	3	0.18
Aspectos económicos					
Requerimientos de servicios auxiliares	0.08	1	0.08	3	0.24
Energía eléctrica	0.07	1	0.07	3	0.21
Reactivos químicos	0.05	5	0.25	3	0.15
Costos de operación y mantenimiento	0.05	1	0.05	3	0.15
Aspectos normativos					
Normas ecológicas*	0.05	3	0.15	3	0.15

*Cumplimiento de límites máximos de grasas y aceites permisibles por la NOM-002-SEMARNAT-1996



A continuación, en la tabla 23 se presenta la matriz con el puntaje final calculado para cada tecnología evaluada. La puntuación de cada factor se obtuvo con la metodología descrita por Baca Urbina (2001).

Tabla 23. Resumen final de la evaluación de tecnologías (b)

Tecnología	ΣwiCi (aspecto técnico)	PiΣwiCi (peso del aspecto técnico)	ΣwiCi (aspecto técnico comp.)	PiΣwiCi (peso del aspecto técnico comp.)	ΣwiCi (aspecto económico-financiero)	PiΣwiCi (peso del aspecto económico-financiero)	ΣwiCi (aspecto normativo)	PiΣwiCi (peso del aspecto normativo)	ΣPiΣwiCi Calificación total de la tecnología
Electro-coagulación	1.88	75.2	0.26	3.9	0.45	13.5	0.15	2.25	94.85
Coagulación-floculación	2.36	94.4	0.58	8.7	0.76	22.8	0.15	2.25	128.15

Como se observa en los resultados de esta tabla, la alternativa tecnológica más factible de aplicarse para la remoción de SST, es la coagulación-floculación.

Los bajos puntajes para la electrocoagulación se deben principalmente a sus requerimientos de servicios auxiliares e insumos como la reposición de los electrodos de sacrificio (generalmente de aluminio), lo que genera altos costos de operación y mantenimiento.

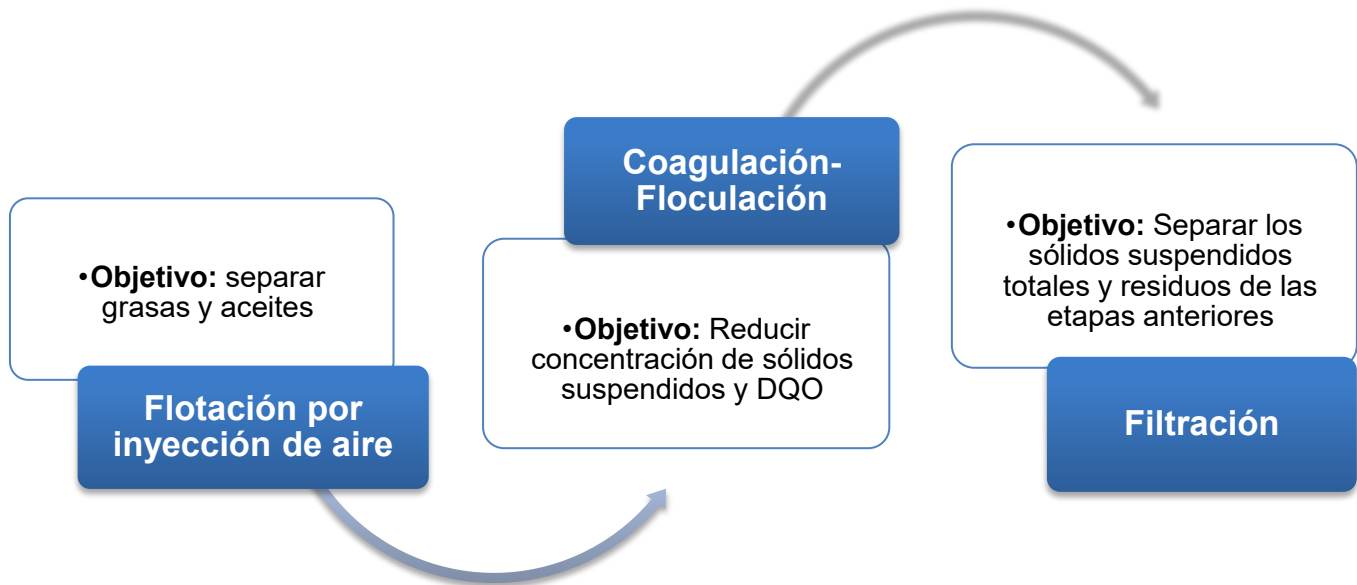
A pesar de que la electrocoagulación genera flóculos de mayor tamaño (lo que facilita su separación) y lodos más compactos y estables, presenta la desventaja de que existe poca disponibilidad de información técnica en la literatura y como no está desarrollada a nivel industrial sólo se encuentran diseños a nivel planta piloto.

La coagulación-floculación es una alternativa que permite reducir entre el 60 y el 85% de los SST presentes en el agua residual, por lo que se propone sea evaluada a nivel laboratorio para encontrar las condiciones óptimas de operación.



3.4.3 Aplicación de tecnologías de tratamiento a nivel laboratorio

En el siguiente esquema se muestran las tres tecnologías de tratamiento primario que fueron seleccionadas para aplicarse a nivel laboratorio al agua residual proveniente de la producción de plastificantes y resinas.



Flotación por aireación:

El objetivo de aplicar esta tecnología de tratamiento, consiste separar las grasas y aceites que se encuentran presentes en grandes cantidades (con base a los resultados de la caracterización previa) en el agua a tratar.

Conociendo las materias primas que emplean en los tres principales procesos productivos, se planteó la posibilidad de recuperar algunos de los materiales separados mediante la flotación. Dichos materiales potencialmente recuperables se muestran en la tabla 24 para cada una de las corrientes de agua efluente de los procesos



Tabla 24. Material potencialmente recuperable en cada corriente de agua tratada por flotación

Corriente	Material potencialmente recuperable
Agua de reacción de DOTP	2-etilhexanol y plastificante
Agua de lavado de DOTP	Plastificante
Agua de lavado de Aceite epoxidado de soya	Aceite epoxidado de soya

El proceso de flotación se realizó mediante la aplicación de aire comprimido tomado de las instalaciones del Laboratorio 212 del Conjunto E, de la facultad de química. Se utilizaron tanques de plástico de 20 L de capacidad, mangueras y un tubo de vidrio capilar para la formación de pequeñas burbujas.

A continuación se muestran las imágenes del proceso aplicado a nivel laboratorio.



Figura 6. Sistema de flotación por aireación



Figura 7. Inyección de aire y formación de finas burbujas

El aire comprimido fue inyectado al agua a tratar con una presión de salida de 6 bares, mediante un tubo de vidrio delgado que generó finas burbujas (4-8 mm de diámetro) que al adherirse a las partículas de grasa y aceite, permitieron su ascensión a la superficie del tanque.

Con esta operación unitaria, fue posible remover fácilmente las grasas y aceites de las tres corrientes tratadas.



Coagulación-Floculación:

Se aplicó esta tecnología de tratamiento con el objetivo de reducir la elevada concentración de sólidos suspendidos presentes en el agua a tratar (con base a los resultados de la caracterización previa).

Para este proceso se utilizó sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ como coagulante ya que es de los más estudiados y recomendados en la literatura para tratamiento de aguas residuales. Además se trata de un reactivo de bajo costo lo que favorece su aplicación a nivel industrial.

El sulfato de aluminio también es conocido en la industria como alumbre y se puede encontrar en forma granular, cristales, polvo o solución.

Mediante un ensayo de jarras se probaron diferentes dosis de coagulante y floculante así como tiempos de mezcla y velocidades de agitación.

En la tabla 25 se muestran los principales parámetros y niveles que se probaron durante la coagulación. Los parámetros con los que se obtuvo una mayor clarificación fueron seleccionados como óptimos para el proceso.

Tabla 25. Parámetros evaluados durante la coagulación

Coagulante: Alumbre $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$	
Parámetro	Nivel de variación
Mezcla rápida	100 , 110 y 120 rpm
Tiempo de mezclado	1 y 2 min
Dosis del coagulante	0.5-2.5 mg/L

Como se explica en el capítulo 2.5.2.3 (ver pág. 41), durante la coagulación se requiere una mezcla rápida en un corto periodo de tiempo que permita el mayor contacto posible entre el coagulante y los sólidos suspendidos, ya que de este modo el coagulante actúa desestabilizando las partículas suspendidas permitiendo su aglomeración.

En contraste, durante la etapa de la floculación se requiere una mezcla lenta para evitar que se rompan los flóculos formados y el tiempo de mezclado debe ser mayor para lograr un tamaño de flóculo mayor y facilitar la sedimentación de los mismos.



Para la floculación se utilizó un polímero catiónico (Optafloc 4384H) en presentación líquida, que tiene la característica de generar una menor cantidad de lodos y con una consistencia compacta que facilita la separación por decantación del agua tratada.

En la tabla 26 se muestran los principales parámetros y niveles que se probaron durante la floculación.

Tabla 26. Parámetros evaluados durante la floculación

Floculante: polímero catiónico (Optafloc 4384H)	
Parámetro	Nivel de variación
Mezcla lenta	25, 35 y 40 rpm
Tiempo de mezclado	15 y 20 min
Dosis del Floculante	1-4 mL/L

Durante la etapa de coagulación-floculación se juntaron las tres corrientes previamente desnatadas (grasas y aceites removidas), esto se hizo debido a que los resultados de la caracterización posterior al desnatado, mostraron que las corrientes presentaban características similares.

También se planteó la posibilidad de que la coagulación se vea favorecida al mezclar las tres corrientes, debido a que la mezcla adquiere un valor de pH básico. Lo anterior se justifica con la literatura, que indica que cuando se trabaja con sulfato de aluminio solo coagula a pH inferior a 7.4 o superior a 8.5 (Lorenzo, 2006).

Para realizar las pruebas de jarras se utilizó un equipo floculador Mod. JLT4 marca VELP. El equipo consta de cuatro jarras de vidrio con 1 litro de capacidad cada una, presenta diferentes niveles de velocidad (10-300 rpm) y luz de fondo para una mejor visualización de la formación de los flóculos.

En las figuras 8 a 13 se muestra como se realizaron los ensayos de jarras para encontrar la dosis óptima de coagulante y floculante así como las mejores condiciones del proceso.



Figura 8. Muestras de las tres corrientes de agua mezcladas (previamente desnatadas)

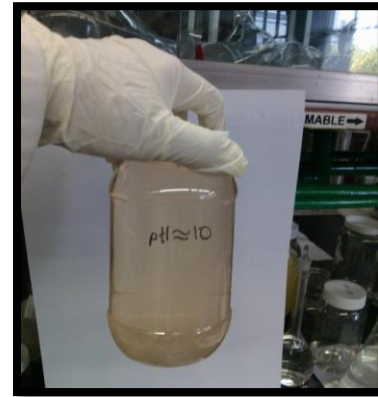


Figura 9. Agua con pH básico



Figura 10. Aplicación del coagulante (agitación rápida)



Figura 11. Aplicación del floculante (agitación lenta)



Figura 12. Sedimentación de los lodos



Figura 13. Remoción de lodos por decantación

Filtración:

El objetivo de aplicar esta tecnología de tratamiento, consiste en separar las partículas sólidas suspendidas que pudieron quedar de los tratamientos previos.

Empleando papel filtro Whatman y vacío fue posible separar las partículas suspendidas que no habían sedimentado después del desnatado y de la floculación del agua tratada.

En las figuras 14 a 17 se muestra como se realizó el proceso de filtración a nivel laboratorio aplicado a las aguas previamente clarificadas (floculadas).



Figura 14. Agua clarificada (coagulada-floculada)



Figura 15. Sistema de filtración



Figura 16. Sólidos retenidos en el filtro



Figura 17. Sólidos en el fondo del vaso de precipitados



3.5 Caracterización del agua después del tratamiento primario (una sola corriente)

En esta etapa se caracterizó el agua previamente tratada a nivel laboratorio con tecnologías de tratamiento primario.

Fueron realizados los mismos análisis que en capítulo 3.3, sin embargo con esta nueva caracterización se pudo verificar la eficiencia de los tratamientos aplicados y con ello comprobar que es posible cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes que establece la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Los análisis que realizaron al agua tratada se enlistan a continuación:

- ◆ **Sólidos Sedimentables** (NMX-AA-004-SFI-2013)
- ◆ **Grasas y Aceites** (NMX-AA-005-SCFI-2000)
- ◆ **Sólidos Suspendidos Totales**
- ◆ **pH** (NMX-AA-008-SCFI-2011)
- ◆ **Temperatura** (NMX-AA-007-SCFI-2013)
- ◆ **DBO** (NMX-AA-028-SCFI-2001)
- ◆ **DQO*** (NMX-AA-030-2-SCFI-2011)

*Parámetro no establecido como obligatorio por la NOM- 002-SEMARNAT-1996.



Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos realizados, tanto en la primera y segunda caracterización, como en la aplicación a nivel laboratorio de las tecnologías de tratamiento primario.

De acuerdo a la metodología empleada en este trabajo, los resultados se presentan de la siguiente manera:

- ◆ Caracterización de cada corriente por separado antes del tratamiento primario.
- ◆ Aplicación de principales tecnologías de tratamiento primario a nivel laboratorio.
- ◆ Caracterización del agua después del tratamiento primario (una sola corriente).
- ◆ Propuesta del tren de tratamiento.

La discusión de los resultados es producto del análisis de los mismos con base a los fundamentos teóricos que establece la literatura, esto con el objetivo de comprobar la hipótesis planteada, además de sustentar la importancia y utilidad de este proyecto de investigación

4.1 Caracterización de las tres principales corrientes antes del tratamiento primario

En la tabla 18 se muestran los resultados de la caracterización de cada corriente de agua residual: agua de lavado de DOTP, agua de reacción de DOTP, agua de lavado de aceite epoxidado de soya.

Tabla 18. Resultados de la caracterización de las tres principales corrientes antes del tratamiento

Parámetro	Agua lavado DOTP	Agua de reacción de DOTP	Agua lavado Aceite epoxi de soya	Límite establecido por la NOM-002-SEMARNAT-1996
Temperatura (°C)	21	21	21	40



pH	12.5	3	4.7	5.5-10
Grasas y aceites (mg/L)	104	0	255	75
Sólidos sedimentables (mL/L)	0	0	0	7.5
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	478	95	270	200
DBO (mg/L)	N/D	N/D	N/D	200
Materia Flotante	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
PARÁMETROS NO ESPECIFICADO COMO OBLIGATORIO POR LA NORMA				
DQO (mg/L)	5 070	613	25 485	N/A

Los valores encerrados en círculos color rojo, son aquellos que superan el límite máximo permisible que establece la norma vigente.

Como se muestra, el pH del agua de lavado de DOTP es básico mientras que el de las otras dos corrientes es ácido. Dicha diferencia de los valores de pH permitió sugerir la posibilidad de mezclar las tres corrientes con el objetivo de neutralizar el pH sin añadir soluciones amortiguadoras que generan un costo adicional al tratamiento.

La propuesta de mezclar las tres corrientes contempla la separación previa de las grasas y aceites en las corrientes de lavado de DOTP y aceite epoxidado de soya. Esto con el objetivo de recuperar material potencialmente reutilizable y obtener una corriente de agua residual más homogénea.

La elevada concentración de sólidos suspendidos totales sugiere la necesidad de aplicar el tratamiento de coagulación- floculación para reducir los valores hasta los que la norma establece como permisibles.



Aunque se realizó dos veces la prueba de 5 días para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), los resultados de esta no arrojaron valores muy cercanos a cero para las tres corrientes. Algunas de las explicaciones que se plantearon sobre los bajos valores de DBO fueron:

- a) El alto contenido de materia orgánica recalcitrante (no fácilmente biodegradable) presente en el agua residual, con base a la información de las fichas técnicas de las materias primas.
- b) Insuficiente actividad microbiana. Esto debido a que el inóculo no fue adecuado (viejo) o fue inhibido por agentes tóxicos presentes en el agua analizada.
- c) Error en la técnica con que se realizaron las pruebas.

Debido a que los resultados de la DBO sugieren que el agua seleccionada como caso de estudio no tiene materia orgánica fácilmente biodegradable, se decidió medir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y tomar los resultados como referencia del grado de contaminación del agua por presencia de materia orgánica en el agua residual.

A pesar de que la DQO no es un parámetro que la norma vigente considere obligatorio a cumplir, sus resultados reflejan un panorama más amplio del grado de contaminación del agua residual ya que incluyen también a la DBO.

Como era de esperarse al ver los resultados de los parámetros medidos, los valores de la DQO resultaron muy elevados, lo que compromete la posibilidad de depurar el agua con tecnologías de tratamiento primario.

Sin embargo, como respuesta a la iniciativa por parte de la planta seleccionada como caso de estudio para dar un primer paso en el cumplimiento de la norma vigente, se considera viable reducir al menos los demás parámetros a los niveles que establece la norma aplicando dichas tecnologías.

Lo anterior se propone considerando que el agua residual que se trate será vertida al sistema de alcantarillado urbano o municipal, donde será sometida a tratamientos posteriores una vez que llegue a la depuradora municipal.

4.2 Aplicación de las principales tecnologías de tratamiento primario a nivel laboratorio

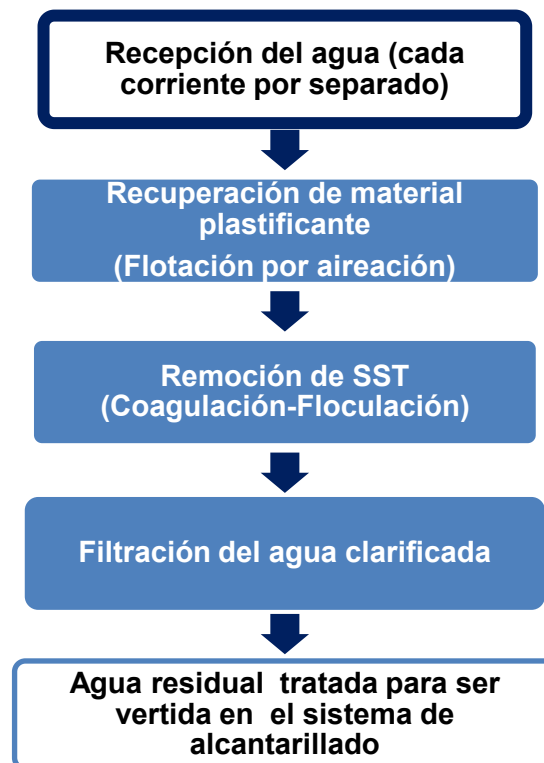


Las tecnologías de tratamiento primario que se probaron a nivel laboratorio así como los agentes contaminantes que se esperaban reducir se muestran en la tabla 19. En dicha tabla también se muestra el material que se separa en cada etapa de tratamiento.

Tabla 19. Tecnologías de tratamiento primario aplicadas

Tecnología de tratamiento primario	Agente contaminante a reducir	Material que se separa
Desnatado por flotación	Grasas y aceites	Plastificante, 2- etilhexanol
Coagulación-Floculación	Sólidos suspendidos totales, DQO	Lodos
Filtración	Sólidos suspendidos totales, DQO y residuos de floculación	Lodos en agua de retrolavado

A continuación se muestra el diagrama de bloques del proceso de tratamiento de aguas probado:





4.2.1 Flotación

Como ya se mencionó, durante la separación de grasas y aceites fue posible recuperar material potencialmente reutilizable ya que se estima que contiene altas concentraciones de plastificante y 2-etilhexanol.

En las figuras 18 a 20 se puede observar la cantidad de material graso separado. Este material se deberá analizar posteriormente para verificar si es factible recuperarlo o reprocesarlo. El alcance de este trabajo consiste únicamente en separarlo del agua residual.



Figura 18. Grasas separadas del agua de Lavado de DOTP



Figura 19. Grasas separadas del agua de Lavado de Aceite epoxidado de soya

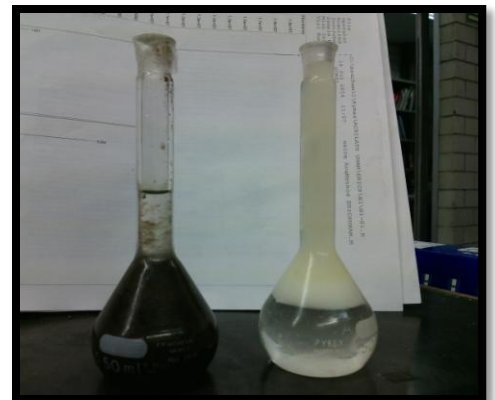


Figura 20. Comparación de grasas separadas de las dos corrientes

En promedio se separaron 150 mL/L de grasas y aceites del agua de lavado de DOTP, mientras que del agua de lavado de aceite epoxidado de soya se recuperaron 100 mL/L.

Con base en lo anterior, se observa que el 15% del volumen de agua de lavado de DOTP es material graso separado y el 10% del volumen de agua de lavado de aceite epoxidado de soya corresponde a las grasas y aceites recuperadas.

Si consideramos que dicho material podría ser potencialmente reutilizable en la planta, esto significaría un beneficio económico ligado al proceso de tratamiento del agua residual.



En las figuras 21 a 24 se muestra una comparación de la apariencia del agua antes y después del desnatado por flotación.

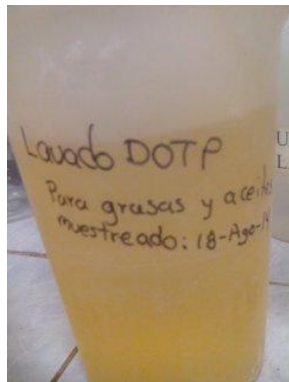


Figura 21. Agua de lavado de DOTP antes del desnatado

Figura 22. Agua de lavado de DOTP después del desnatado

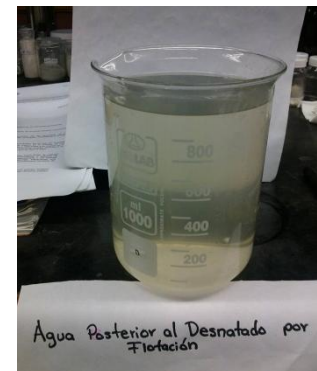
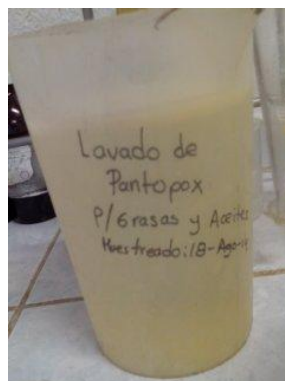


Figura 23. Agua de lavado de aceite epoxidado de soja antes del desnatado

Figura 24. Agua de lavado de aceite epoxidado de soja después del desnatado

Durante esta etapa se removió la mayoría de grasas y aceites presentes en cada corriente de agua residual (80%). Debido a que el agua de reacción de DOTP no presentó dicho contaminante, no fue necesario someterla a esta etapa primera etapa de tratamiento.

Después de esta etapa de tratamiento fue posible mezclar las tres corrientes de agua residual para facilitar la aplicación de los tratamientos posteriores.



4.2.2 Coagulación-Floculación

Como se detalló en el capítulo anterior, mediante un ensayo de jarras se probaron diferentes dosis de coagulante y floculante así como tiempos de mezcla y velocidades de agitación, con el objetivo de encontrar la dosis exacta para reducir las concentraciones de sólidos suspendidos totales y una pequeña parte de la materia orgánica disuelta (que genera una alta DQO).

En las tablas 29 y 30 se muestran los niveles a los que se obtuvieron los mejores resultados de la coagulación y floculación.

Tabla 29. Condiciones óptimas obtenidas para la coagulación

Coagulación: Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	
Parámetro	Nivel óptimo
Mezcla rápida	100 rpm
Duración de mezclado	1 min
Dosis del coagulante	2 mg/L

Tabla 30. Condiciones óptimas obtenidas para la floculación

Floculación: polímero catiónico (Optafloc 4384H)	
Parámetro	Nivel óptimo
Mezcla lenta	40 rpm
Duración de mezclado	15 min
Dosis del Floculante	3 mL/L

Como resultado de mezclar las tres corrientes de agua en esta etapa, se alcanzó un pH 10 y con este se realizaron los ensayos de jarras. Considerando que Lorenzo, 2006 indica que al trabajar con sulfato de aluminio la coagulación se lleva a cabo a valores de pH inferiores a 7.4 o superior a 8.5, se planteó que a un pH de 10 la coagulación se ve favorecida, lo que se traduce en una buena reducción de sólidos suspendidos totales.

Una vez encontradas las condiciones óptimas de la coagulación y floculación se repitieron los ensayos de jarra para comprobar la efectividad. La ventaja que se obtiene al trabajar a esas condiciones es que se genera una menor cantidad de lodos y hay una buena reducción de sólidos suspendidos totales.

En las figuras 25 y 26 se muestran las diferencias de color y turbiedad del agua antes y después del tratamiento.

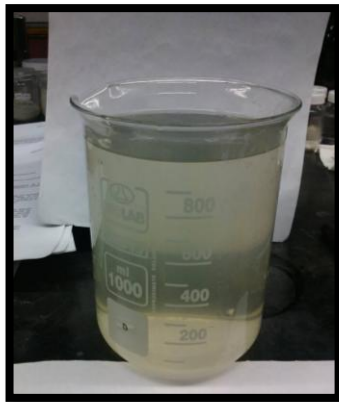


Figura 25. Agua antes de la coagulación-floculación

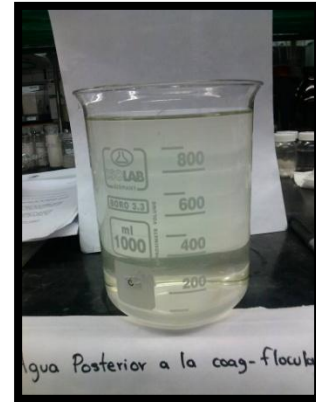


Figura 26. Agua después de la coagulación-floculación

Como se observa en las figuras, el agua está más clara después de la coagulación-floculación, esto se debe a la sedimentación de los sólidos suspendidos totales y las grasas emulsionadas que no se separaron mediante la flotación.

Se sabe que también es posible reducir una pequeña parte de la materia orgánica disuelta por arrastre debido a la adsorción en los flóculos, lo que se traduce en una reducción de la DQO (Durán, 2016).



4.2.3 Filtración

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficacia de los procesos anteriores.

Los flóculos que se forman en la coagulación-floculación del agua, en su mayor parte se eliminan en el proceso de decantación; el agua que llega a los filtros sólo contiene trazas de flóculos cuya cohesión depende de los reactivos utilizados.

En las figuras 27 y 28 se muestra como se visualiza el agua antes y después de la filtración.



Figura 27. Agua antes de la filtración

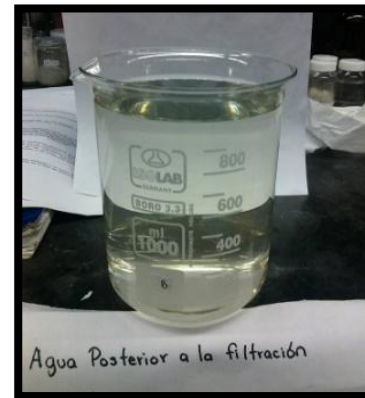


Figura 28. Agua después de la filtración

Como se muestra en las figuras, después de la aplicación de esta tecnología se obtuvo un agua más clara, esto debido a la separación de los sólidos suspendidos totales que no se removieron con los tratamientos previos.

Después de esta etapa de tratamiento se realizó una nueva caracterización al agua para verificar que cumpliera con los límites máximos permisibles que establece la norma vigente.



4.3 Caracterización del agua después del tratamiento primario (una sola corriente)

Los resultados de la caracterización que se realizó al agua tratada se muestran en la tabla 31. Dichos resultados son comparados con los límites que especifica la norma.

Tabla 31. Resultados de la caracterización después del tratamiento

Parámetro	Agua efluente (después del tratamiento primario)	Límite establecido por la NOM-002-SEMARNAT-1996
TEMPERATURA (°C)	17	40
pH	8	5.5-10
GRASAS Y ACEITES (mg/L)	20	75
SÓLIDOS SEDIMENTABLES (mL/L)	0	7.5
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)	50	200
DBO (mg/L)	N/D	200
MATERIA FLOTANTE	AUSENTE	AUSENTE
PARÁMETROS NO ESPECIFICADO POR LA NORMA		
DQO (mg/L)	4 000	N/A

Como se puede observar en la tabla, el pH promedio es 8, sin embargo éste varía entre 7 y 10 (como consecuencia de variaciones en los procesos), por lo que sería necesario ajustar el pH con una solución de ácido sulfúrico o clorhídrico en un tanque de homogenización antes de aplicar la coagulación-floculación.



La DQO elevada (4 000 mg/L) refleja una alta concentración de sólidos disueltos que no son posibles de eliminar por tratamientos primarios. Sin embargo, parámetros que inicialmente se encontraban por encima de los límites establecidos por la norma (grasas y SST) , se encuentran dentro de especificación después del tratamiento primario.

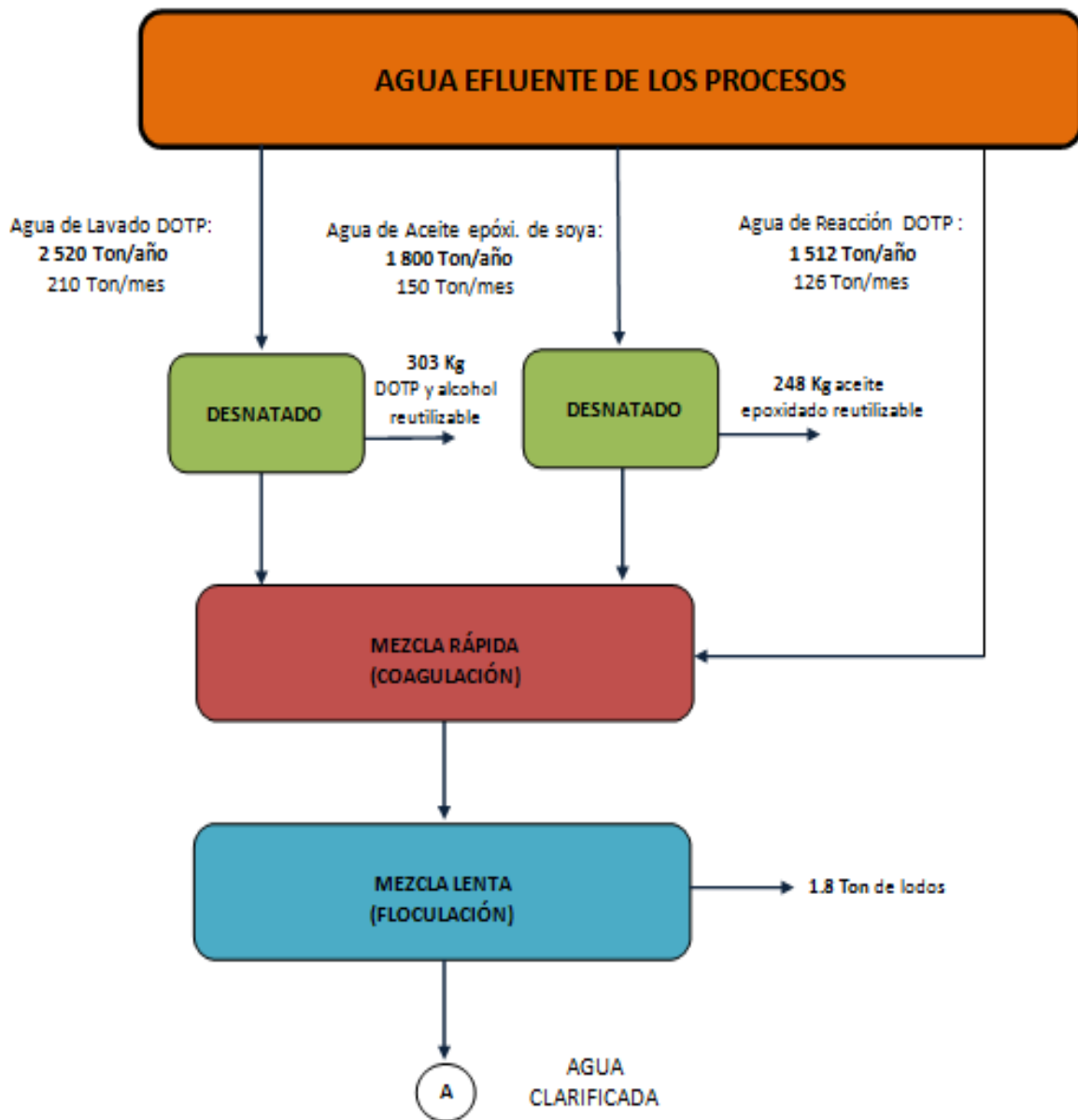
De este modo, aplicando tecnologías de tratamiento primario es posible dar cumplimiento a la NOM-002-SEMARNAT-1996, resaltando que la DQO sigue siendo muy elevada (debido principalmente sólidos disueltos) por lo que el agua efluente presenta un alto grado de contaminación lo que imposibilita su uso dentro de los procesos o servicios de la planta.

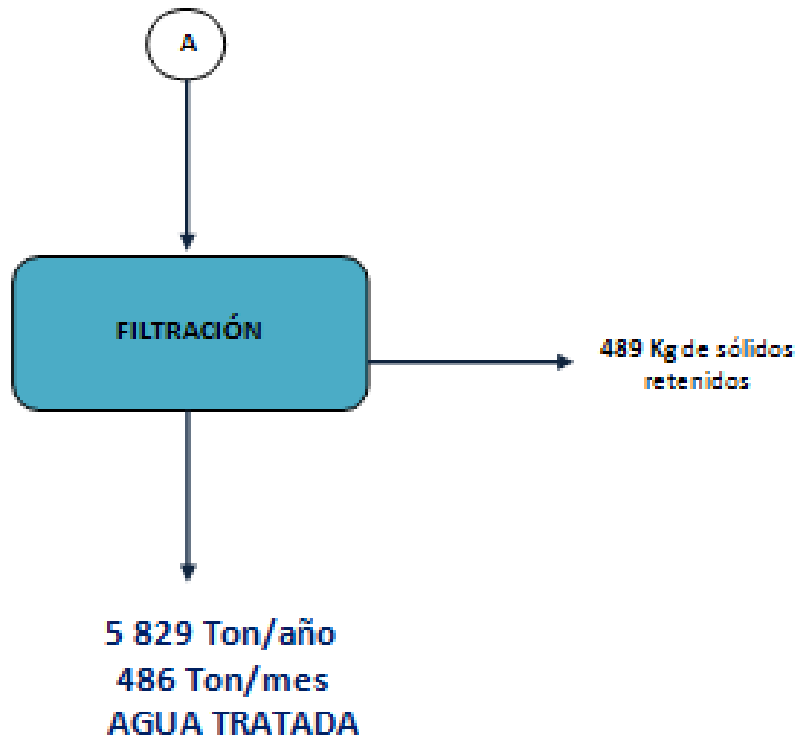
A pesar de que el agua tratada alcanza una calidad suficiente para ser vertida al sistema de alcantarillado como lo indica la norma, es importante seguir trabajando en probar tratamientos avanzados que logren reducir sus niveles de DQO y sólidos disueltos totales con el objetivo de poder reutilizarla y lograr en un futuro disminuir las emisiones de agua residual.



4.4 Propuesta del tren de tratamiento

A continuación se muestra un resumen del balance de materia correspondiente al proceso de tratamiento de agua propuesto.





Del balance podemos resaltar la importancia que tiene separar las grasas y aceites ya que se podrían recuperar más de 500 kg anuales de material potencialmente reutilizable.

Por otro lado, nos muestra que durante la coagulación-floculación se generan aproximadamente 1.8 Ton de lodos anuales, por lo que es indispensable considerar un plan de disposición de lodos en la propuesta final del proceso de tratamiento.

Los sólidos que se separan durante la filtración equivalen a poco menos de 500 Kg anuales, lo que sugiere considerar también estrategias para disposición de dichos materiales.

En la figura 29 se propone el diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales tipo batch.

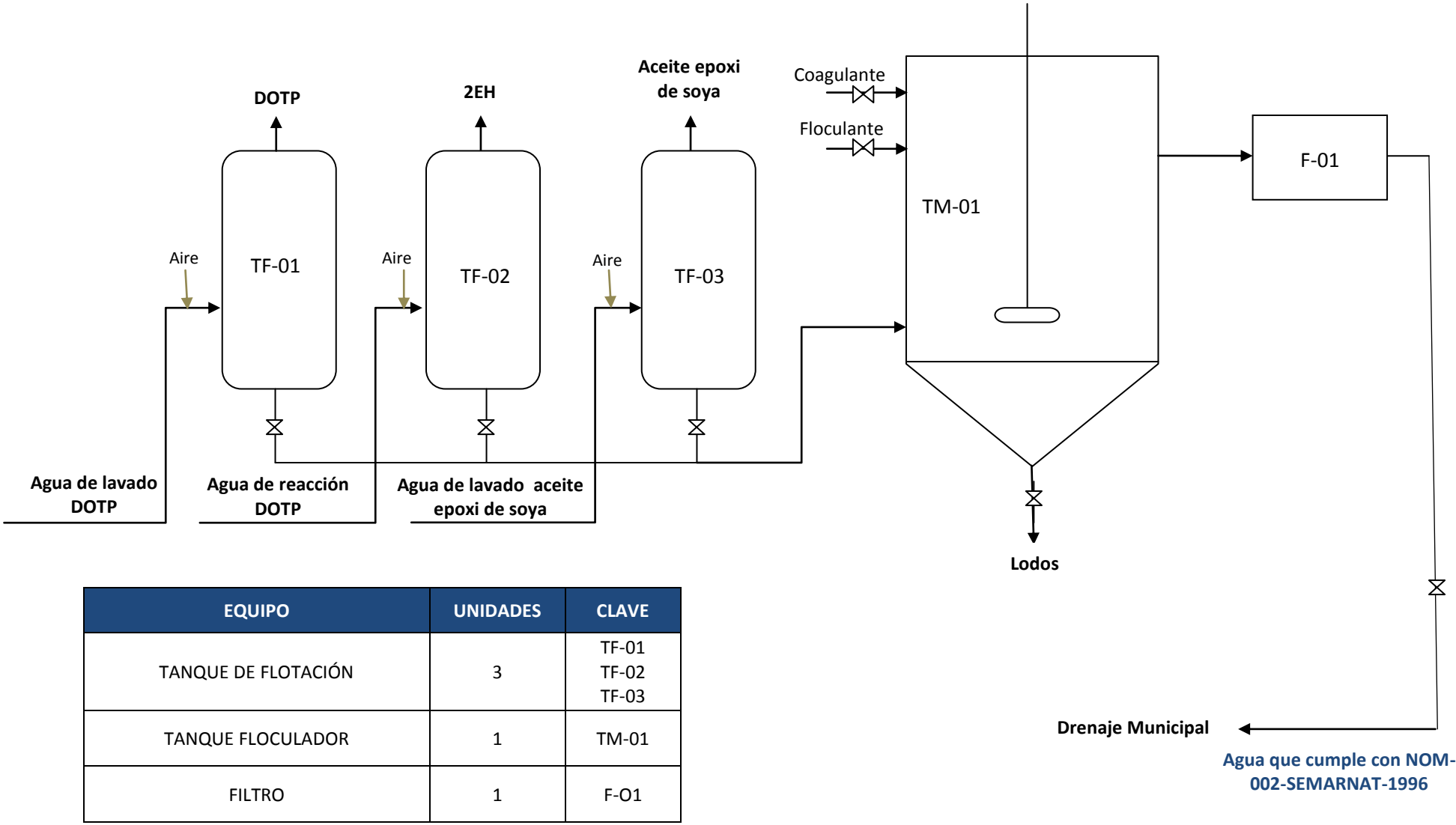


Figura 29. Diagrama general del proceso de tratamiento de agua propuesto



A nivel industrial se recomienda utilizar tanques de flotación equipados con difusores de aire para generar las burbujas, uno para cada corriente: agua: lavado de DOTP y Aceite epoxidado de soya, dichos tanques deberán tener una capacidad de aproximadamente 10 m³ cada uno.

Para el proceso de coagulación-floculación se recomienda instalar un tanque floculador con capacidad de 20 m³ (figura 30). Dicho tanque deberá contar con sistema de agitación de 2 niveles (mezcla rápida y mezcla lenta) y se recomienda que tenga una configuración cónica (zona de depósito de lodos) con el objetivo de poder purgar los lodos generados durante la coagulación-floculación.

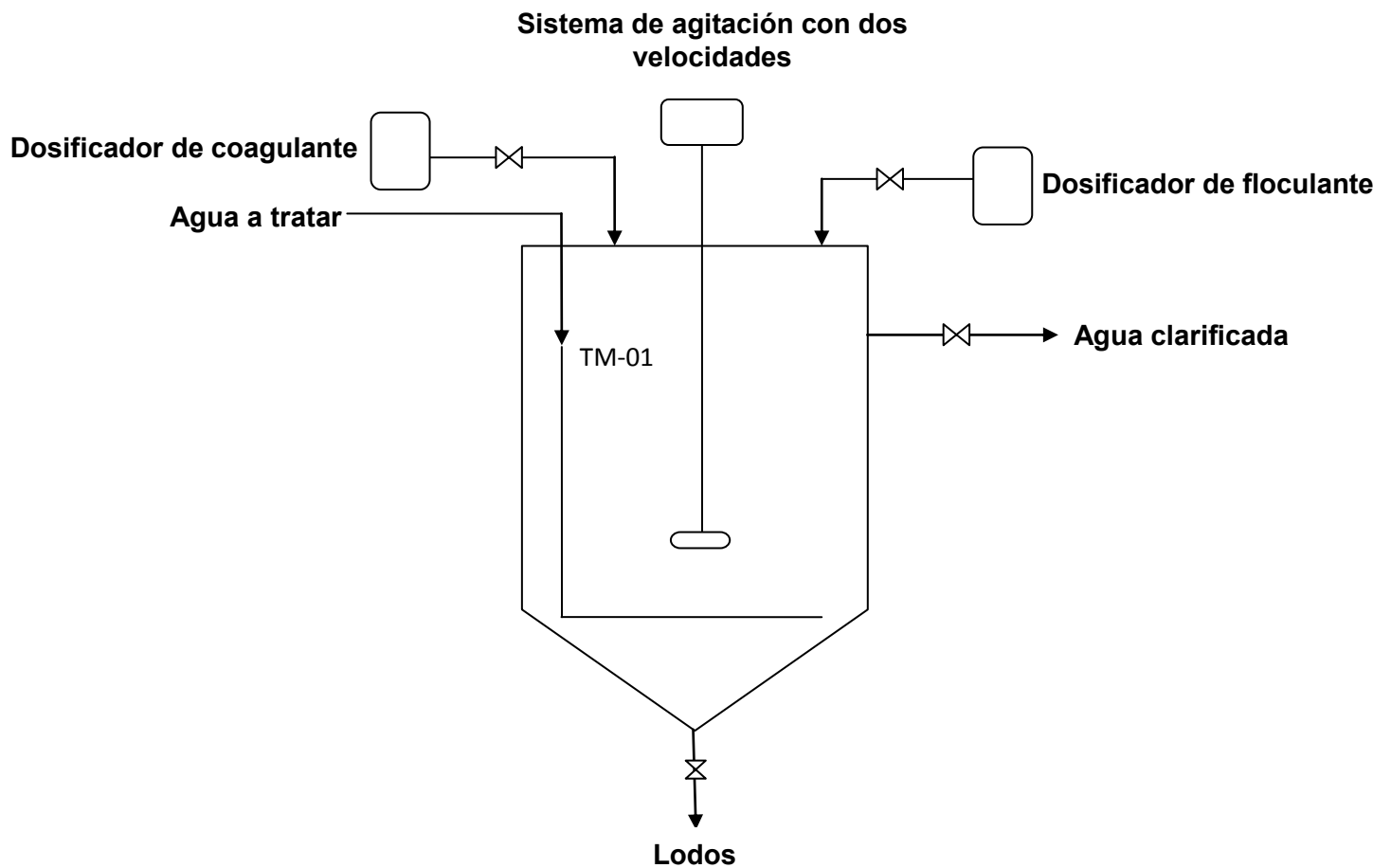


Figura 30. Tanque de coagulación-floculación propuesto



Como etapa final del tren de tratamiento, se propone esta operación unitaria con el objetivo de separar los sólidos remanentes de los procesos anteriores.

Una opción viable de aplicar en el caso de estudio seleccionado, son los filtros intermitentes de arena. Dichos filtros son sistemas utilizados para remover sólidos, DBO y algunos tipos de microorganismos.

Estos filtros se emplean para tratar efluentes de tratamientos primarios o secundarios. En la tabla 32 se describen las principales características técnicas de estos sistemas (Ramalho, 1996).

Tabla 32. Características técnicas de los filtros intermitentes de arena

Parámetro	Criterios de diseño
Carga hidráulica	0.08 a 0.2 m ³ /m ² /día
Lecho filtrante	Material granular con menos de 1% de materia orgánica
Profundidad del lecho	0.6-0.90 m
Tamaño efectivo de la arena	0.35-1 mm
Coefficiente de uniformidad	<4
Número de unidades	Mínimo 2 (cada uno con capacidad de tratar todo el caudal)



Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Analizando los resultados obtenidos en la caracterización del agua después de la aplicación de los tratamientos primarios, fue posible comprobar la eficacia del proceso basado en tecnologías de tratamiento primario para la depuración del agua residual proveniente de una planta de plastificantes y resinas, dando cumplimiento a los límites máximos que establece la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Sin embargo, es éticamente apropiado resaltar que el agua aún contiene materia disuelta que no fue removida por los métodos fisicoquímicos aplicados, por lo que es necesario buscar otras alternativas tecnológicas que permitan reducir los niveles de DQO (4 000 mg/L) que presenta el agua, ya que esto sigue representando un problema serio de contaminación a los cuerpos receptores finales.

Debido a que el volumen de agua residual que genera los procesos de la planta seleccionada como caso de estudio es elevado (5 829 Ton de agua/año), aplicar el tren de tratamiento propuesto en este trabajo representaría un impacto ambiental positivo ya que se reduciría de manera importante la concentración de contaminantes presentes en el agua efluente que es descargada al sistema de alcantarillado municipal.

El tren de tratamiento propuesto es sencillo y además permite la recuperación de material potencialmente reutilizable en los procesos productivos (mediante la separación de grasas y aceites por flotación).

Como resultado de los múltiples ensayos de jarras que se realizaron para encontrar las condiciones óptimas del proceso, fue posible encontrar condiciones para una baja generación de lodos durante la floculación (1.8 Ton/año).

Se recomienda contar con un depósito de lodos en el cual estos puedan ser contenidos hasta su disposición final, sin embargo, por las características del agua es posible que los lodos generados en la coagulación-floculación pudieran trasladarse fuera de la planta para darles algún uso posterior. Para dicho propósito es recomendable realizar la caracterización de estos lodos y poder darles un uso a su disposición final de acuerdo a la norma vigente.

Cabe resaltar que las tecnologías de tratamiento primario fueron aplicadas a nivel laboratorio y es importante validar la eficiencia del tren de tratamiento escalándolo a nivel piloto o directamente en planta.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la DQO no se logró reducir hasta niveles aceptables con tratamientos primarios, por lo que se recomienda en un futuro trabajar en la reducción de los sólidos disueltos mediante la aplicación de tratamientos avanzados o terciarios.



Bibliografía

- Aguilar, M.I. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. (Ilustrada ed.). España: EDITUM
- Anaya, Barragán y Vergara (2013). Manual de Temas Selectos de Ingeniería de Proyectos. UNAM.
- Arboleda, J. (2000). Teoría y Práctica de la purificación del agua. McGraw Hill. Tercera Edición. Colombia
- Arellano, B. (2014). Diagnóstico y propuesta de mejora de un sistema de coagulación-floculación como pretratamiento de un sistema de desmineralización de agua de una refinería. México: Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM.
- Atlas del Agua en México. (2013). Comisión Nacional del Agua. México.
- Degrémont. (1979). Manual Técnico del agua. España: Degrémont.
- Estadísticas del Agua en México. (2013). Comisión Nacional del Agua. México.
- Forero J., Díaz J. (1999). Diseño de nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. Instituto Colombiano del Petróleo. Colombia.
- Guía para el control y prevención de la contaminación industrial (1998). Santiago de Chile.



Informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, agua para todos, agua para la vida.(2003). UNESCO-WWAP.

Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. (2013). Comisión Nacional del Agua. México.

Lorenzo Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Cuba.

Metcalf & Eddy. (1998). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw Hill. Tercera Edición.

Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Barcelona, España: Alfaomega.

Sainz S. J. (2005). Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Fundación EOI, Medio Ambiente. España.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de Aguas Residuales a los sistemas de alcantarillado Urbano o Municipal. Diario Oficial de la Federación, 3 de junio de 1998.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las Aguas Residuales Tratadas que se reúsen en Servicios al Público. Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre de 1998.



Anexos:

Anexo A. Fichas técnicas de los principales contaminantes presentes en las distintas corrientes de agua a tratar

◆ Epoxidados

Propiedad	Aceite de soya epoxidado	Ac. Fórmico	Sosa Cáustica (NaOH)
Biodegradable	NO	SI	NO
Bioacumulación	-	NO	NO
Corrosivo/Irritante	NO	CORROSIVO	CORROSIVO
Coef. Rep.octanol/agua	-	-2,1 (pH 7)	N.A
No. CAS	8013-07-8	64-18-6	1310-73-2
Otras propiedades	Índice de refracción a 20°C: 1.473 Dens.rel: 0.997 g/cm ³ Inmiscible en agua	P. eb: 106 – 107°C P.fus: -13,5 a 15 °C pH. <1 a 25°C Dens. rel: 1,195 – 1,21 g/cm ³ a 20 °C Totalmente soluble en agua y algunos disolventes orgánicos	P.eb: 1390°C P.fus: 318°C Dens.rel. (agua = 1): 2.1 Sol. en agua, g/L a 20°C: 1090 Pres.vap, kPa a 739°C: 0.13 Soluble en agua, alcohol y glicerol



◆ Plastificantes

Propiedad	2-etilhexanol	Ácido Tereftálico	Anhídrido Ftálico	Ácido Adípico	alcohol lineal 6,8,10
Biodegradable	SI	SI	SI	SI	*
Bioacumulación	NO	NO	NO	NO	*
Corrosivo/Irritante	Irritante	Irritante	Corrosivo	NO	*
Coef. Rep.octanol/agua	N.A	1.96	1.6	0.08	*
No. CAS	104-76-7	100-21-0	85-44-9	124-04-9	*
Otras propiedades	pH=7-8.5 Combustible Pres.vap,mmHg a 20°C: 48 Insoluble en agua Soluble en etanol, acetona, cloroformo, éter etílico.	Dens.rel. (agua = 1): 2.1 Sol. en agua, g/100 ml a 20°C: 0.28 Presión de vapor, Pa a 20°C: <1	P.eb: 284°C (sublima) P.fus: 131°C Dens: 1.53 g/cm ³ Sol. en agua: reacciona lentamente Pres.vap, Pa a 20°C: <0.3	P.eb: 338°C P.fus: 152°C Dens. rel. (g/ml): 1.36 Sol. en agua: moderada (1.4 g/100 ml a 15°C) Pres. vap., Pa a 18.5°C: 10	*

* La tabla con la descripción de los alcoholes lineales se presenta más adelante.

Otra materia prima a considerar es la Sosa cáustica (NaOH) que se describió en la tabla de epoxidados.



*Alcoholes lineales

Propiedad	Hexanol	Octanol	Decanol
Biodegradable	-	-	-
Bioacumulación	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SI
Corrosivo/Irritante	Irritante	Irritante	Irritante
Coef. Rep.octanol/agua	2,03	3	4.23
No. CAS	111-27-3	111-87-5	112-30-1
Otras propiedades	P.eb: 157°C P.fus: -44,6°C Dens.rel (agua = 1): 0,82 g/cm ³ Sol.en agua, g/100 ml a 20°C: 0,59 Pres.vap, kPa a 25°C: 0,124	P.eb: 194-195°C P.fus: -15,5°C Dens.rel (agua = 1): 0,83 g/cm ³ Sol.en agua, g/100 ml a 20°C: 0,30 (muy baja) Pres.vap, Pa a 20°C: 8.7	P.eb: 230 °C P.fus: 7 °C Dens.rel (agua = 1): 0,83 g/cm ³ Sol.en agua, g/100 ml a 20°C: 0,37 (muy baja)



- **Poliméricos**

Propiedad	Dimetil Tereftatato	Monopropilenglicol	Dietilenglicol
Biodegradable	SI	SI	SI
Bioacumulación	NO SIGNIFICATIVA	NO	NO
Corrosivo/Irritante	NO	NO	NO
Coef. Rep.octanol/agua	2.25	-0.92	-1,47
No.CAS	120-61-6	57-55-6	111-46-6
Otras propiedades	<p>P.eb: 288°C P.fus: 140°C Dens.rel (agua = 1): 1.2 Solubilidad en agua: 0.036 g/L a 20°C Pres.vap, kPa a 150°C: 1.7</p>	<p>Pres.Vap: 0.07 mmHg a 20°C pH:7 P.fus:-60 °C P.eb: 188 °C Densidad relativa:1.04 gr/cm3 Soluble en agua, etanol, éter, benceno, acetona, cloroformo, aceite de pino.</p>	<p>P.eb: 245°C P.fus: -6,5°C Dens. rel. (agua = 1): 1,12 Sol. en agua: miscible Pres. de vap., Pa a 20°C: 2,7</p>

Otras materias primas a considerar son el Anhídrido ftálico y 2-etil hexanol que se describieron en las tablas anteriores.



Anexo B. Normas mexicanas para el análisis y caracterización del agua residual

NMX-AA-034-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

Las aguas naturales o residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos o sales disueltas no pueden ser utilizadas en forma directa por las industrias o por las plantas potabilizadoras. De ello se deriva el interés por determinar en forma cuantitativa estos parámetros.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

PRINCIPIO DEL MÉTODO

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

EQUIPO Y MATERIALES

Sólo se mencionan los equipos y materiales que son de relevancia para el presente método.

Equipo:

- Bomba de vacío
- Estufa eléctrica, para operar de 103°C a 105°C
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg
- Mufla eléctrica para operar a 500°C ± 50°C

Materiales:

- Cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra
- Desecador, provisto con un desecante que contenga un indicador colorido de humedad
- Crisol Gooch de poro fino con adaptador de hule para el equipo de filtración
- Matraz Kitazato de 1 L a 2 L de capacidad
- Filtro de fibra de vidrio de tamaño adecuado al crisol Gooch utilizado con una porosidad de 2 µm o menor
- Pinzas para crisol



- Guantes para protección al calor
- Careta para protección al calor

PROCEDIMIENTO

- Preparación de cápsulas de porcelana:
 1. Las cápsulas se introducen a la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 min.
 2. Sacar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
 3. Pesar las cápsulas y registrar los datos.
 4. Repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtendrá hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0,5 mg. Registrar como peso G.
- Preparación de crisoles Gooch:
 1. Introducir el filtro de fibra de vidrio en el crisol con la cara rugosa hacia arriba, mojar el filtro con agua para asegurar que se adhiera al fondo del crisol.
 2. Los crisoles se introducen a la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlos a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 min.
 3. Sacar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
 4. Pesar los crisoles y repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtiene hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0,5 mg. Registrar como G3.
- Preparación de la muestra:
 1. Sacar las muestras del sistema de refrigeración y permitir que alcancen la temperatura ambiente. Agitar las muestras para asegurar la homogeneización de la muestra.
- Medición para sólidos totales (ST):
 1. En función de la cantidad de sólidos probables tomar una cantidad de muestra que contenga como mínimo 25 mg/L de sólidos totales, generalmente 100 mL de muestra es un volumen adecuado.
 2. Transferir la muestra a la cápsula de porcelana que previamente ha sido puesta a peso constante (ver inciso 9.1.4).
 3. Llevar a sequedad la muestra en la estufa a $103^{\circ}\text{C}-105^{\circ}\text{C}$. Enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G1.
- Sólidos suspendidos totales (SST):



1. Medir con una probeta, un volumen adecuado de la cantidad seleccionada de muestra previamente homogeneizada la cual depende de la concentración esperada de sólidos suspendidos.
2. Filtrar la muestra a través del crisol Gooch preparado anteriormente aplicando vacío, lavar el disco tres veces con 10 mL de agua, dejando que el agua drene totalmente en cada lavado.
3. Suspender el vacío y secar el crisol en la estufa a una temperatura de 103°C a 105°C durante 1 h aproximadamente. Sacar el crisol, dejar enfriar en un desecador a temperatura ambiente y determinar su peso hasta alcanzar peso constante registrar como peso G4.

- Sales disueltas totales (SDT):

La determinación de las sales disueltas totales es por diferencia entre los sólidos totales menos sólidos suspendidos totales.

CÁLCULOS

- Calcular el contenido de sólidos totales de las muestras como sigue:

$$ST = (G1 - G) * 1\ 000 / V$$

donde:

ST son los sólidos totales, en mg/L;

G1 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

G es el peso de la cápsula vacía, en mg a peso constante, y

V es el volumen de muestra, en mL.

- Calcular el contenido de sólidos suspendidos totales de las muestras como sigue:

$$SST = (G4 - G3) * 1\ 000 / V$$

donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L;

G3 es el peso del crisol con el disco a peso constante, en mg;

G4 es el peso del crisol con el disco y el residuo seco, en mg, y

V es el volumen de muestra, en mL.

- Calcular el contenido de sales disueltas totales de las muestras como sigue:

$$SDT = ST - SST$$

donde:

SDT son las sales disueltas totales, en mg/L

ST son los sólidos totales, en mg/L

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/L

- Reportar los valores obtenidos de la muestra control junto con los resultados del análisis.
- Reportar los resultados, en mg/



NMX-AA-008-SCFI-2011
ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DEL PH -
MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático.

Asimismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control (por ejemplo, floculación y desinfección de cloro), el control de plumbosolencia de aguas potables y tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales. Se utilizan distintos métodos de determinación, que van desde la simple utilización de papel indicador a sofisticados métodos utilizando un medidor de pH.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana es de aplicación nacional y establece el método de prueba para determinar el pH en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas.

Este método es aplicable a todos los tipos de agua y muestras de aguas residuales en el intervalo de pH 3 a pH 10.

REACTIVOS

- Disoluciones amortiguadoras de pH de referencia:

Utilice las disoluciones B, C, D, F e I, que se encuentran en el apéndice informativo B, o disoluciones amortiguadoras de pH de referencia comerciales que no estén afectadas por el crecimiento de microorganismos. Si las disoluciones no se esterilizan son estables durante aproximadamente 6 semanas. El dióxido de carbono de la atmósfera afecta a disoluciones de pH con valores de pH de más de 4.

Cabe aclarar que los valores de pH asignados a estas disoluciones son nominales, no son trazables a las unidades del SI y de ningún modo reemplazan el uso de materiales de referencia certificados. El usuario deberá determinar si son adecuadas para un propósito específico.

NOTA 1: No se deben usar disoluciones amortiguadoras de pH comercialmente disponibles que contienen sales de mercurio como conservador.

NOTA 2: Para otras disoluciones reguladora de pH

EQUIPO

- Recipiente de muestreo,



Con capacidad mínima de 500 mL, fondo plano y hecho con vidrio de baja alcalinidad, por ejemplo, vidrio de borosilicato. Recipientes de plástico que puedan ser impermeables a los gases.

- Termómetro

Con una resolución de 0.5 °C

- Potenciómetro

Con una impedancia de entrada superior a 1012 Ω , compensación de temperatura y corrección de pendiente en milivolt por unidad de pH. El potenciómetro deberá tener una resolución de 0,01 unidades de pH o mejor.

- Electrodo de vidrio y electrodo de referencia

El sistema de medición de electrodo de vidrio tendrá una diferencia de potencial nula (0 volts) entre pH = 6.5 y pH = 7.5, usando un electrodo de referencia similar al electrodo de referencia que tiene membrana de vidrio (Sistema de electrodo simétrico). La resistencia de la membrana de los electrodos de vidrio será $R_m < 109 \Omega$. La celda puede también ser un electrodo combinado comercialmente disponible.

NOTA 3: Los electrodos de calomel contienen mercurio y sus sales. En el caso de una ruptura, el contenido tóxico del metal pesado entra en contacto con el medio, por lo tanto, en general, y especialmente en el agua utilizada para beber o de albercas, debe ser utilizado un electrodo de referencia de plata / cloruro de plata.

NOTA 4: Se recomiendan electrodos de referencia con un caudal de 0.1 mL a 2 mL por día. Todos los electrodos nuevos deben ser probados antes de su uso y, a continuación, a intervalos regulares.

- Electrodo de vidrio para agua con una baja conductividad.
- Procedimientos de ensayo de unidades electrónicas y los electrodos.

MUESTREO Y MUESTRAS

El valor de pH puede cambiar rápidamente en la muestra de agua como resultado de procesos químicos, físicos o biológicos. Por esta razón, mida el pH lo más rápidamente posible sin exceder 6 h después de la toma de muestra.

Si éste no es el caso, pase un tubo flexible de la toma de muestras al fondo de un recipiente de muestreo y llene el recipiente hasta desbordar. Alternativamente, enjuague el recipiente con la muestra y sumérjalo en la misma. Llene el recipiente evitando la presencia de aire. Elimine todas las burbujas de aire de la muestra por agitación suave y tapando el recipiente.

Analice a más tardar 24 h después de la toma de muestra. Evite los cambios bruscos de temperatura y el intercambio gaseoso con la atmósfera. Ejemplo: sumergir botella *winkler*, y taparla dentro de la muestra evitando la turbulencia.



PROCEDIMIENTO

💧 Preparación:

Mida la temperatura de las disoluciones amortiguadoras de pH. Ajuste el control de la temperatura del potenciómetro. De acuerdo con las instrucciones del fabricante, considere la posibilidad del punto isopotencial. Las disoluciones amortiguadoras de pH y las muestras deben tener la misma temperatura, cuando sea posible.

💧 Calibración en dos puntos:

Para llevar a cabo la calibración del medidor de pH o potenciómetro siga las instrucciones del fabricante del equipo. Lea cuidadosamente el manual del mismo, ya que parámetros como la compensación de temperatura, el reconocimiento automático de disoluciones de calibración, estabilidad de las lecturas, intervalos permisibles de la pendiente y el punto de isopotencial, pueden influir adversamente en la calibración e incluso dar lugar a errores sistemáticos.

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Reportar el pH con las cifras decimales indicadas por el instrumento.
Reportar la temperatura a la cual se efectuó la medición.

EJEMPLOS:

pH 8.450, medido a 10.2 °C.

pH 7.62, medido a 16.4 °C en el laboratorio 2 h después de la toma de muestras.



NMX-AA-007-SCFI-2013
ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN
AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES
TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

La temperatura termodinámica, también denominada temperatura absoluta, es una de las magnitudes fundamentales que definen el Sistema Internacional de Unidades (SI) y cuya unidad es el kelvin, simbolizado como K. Esta unidad se utiliza tanto para expresar valores de temperatura termodinámica como intervalos de temperatura.

Es usual expresar la temperatura con base en la escala Celsius (°C), definida con relación a la temperatura termodinámica por:

$$t (\text{°Celsius}) = T (\text{kelvin}) - 273,15 \text{ K}$$

El método de prueba normado establece el procedimiento para realizar la medición en el sitio donde se encuentra el agua, y el resultado se expresa en grados Celsius (°C).

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura, en aguas naturales crudas no salinas (epicontinentales, subterráneas y pluviales), en aguas salinas (marinas, costeras, de estuarios, esteros, marismas y subterráneas), aguas residuales crudas municipales e industriales y aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo comprendido entre 0 °C y 45 °C.

Para su uso doméstico, como fuente de abastecimiento de agua potable, público urbano, recreativo con y sin contacto directo, riego agrícola, pecuario, acuacultura, industrial y protección de la vida acuática marina y de agua dulce y descarga en cuerpos receptores y alcantarillado municipal o reúso. Es de aplicación nacional.

PRINCIPIO

El principio se basa en las propiedades de los materiales de dilatarse o contraerse con los cambios de temperatura o en las propiedades eléctricas de los mismos con los que se realizará la medición; estas propiedades son siempre las mismas para una temperatura dada, lo que permite graduar los instrumentos de medición.

MATERIALES

Son válidos para el uso propuesto de esta norma los siguientes dispositivos, siempre y cuando se encuentren calibrados o verificados contra un termómetro calibrado.



- Termómetro o juego de termómetros de líquido en vidrio, con graduación de al menos 1 °C, para cubrir el intervalo de -1 °C a 101 °C.
- Termómetro con sensor de termistor, con una resolución de lectura de al menos 0,5 °C, para cubrir el intervalo de -1 °C a 101 °C.
- Termopar, con una resolución de lectura de al menos 0,5 °C, para cubrir el intervalo de -1 °C a 101 °C.
- Termómetro con resistencia de Pt, con una resolución de lectura de al menos 0,5 °C, para cubrir el intervalo de -1 °C a 101 °C
- Envases de polietileno o de vidrio limpios.
- Vasos térmicos de doble pared, provistos de su respectiva tapa.

EQUIPO

En el caso de que el Laboratorio efectúe la verificación de sus termómetros se requiere un baño maría con control de temperatura ajustable por lo menos entre 10 °C y 45 °C.

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Para esta medición no se requiere preparación ni conservación de las muestras. Las determinaciones de temperatura deben efectuarse de inmediato en el lugar de muestreo.

Cuando sea preciso extraer una muestra, se toma un volumen aproximado de 1 L para termómetros de inmersión parcial en un envase de polietileno, de vidrio limpio o de doble pared y aproximado de 500 mL para Termopar u otro instrumento, en un envase de polietileno, de vidrio limpio o de doble pared; se determina la temperatura de inmediato.

Si la temperatura del cuerpo de agua o de la descarga es apreciablemente mayor o menor que la del ambiente (diferencia de temperatura superior a 5 °C), se recomienda extraer la muestra mediante un recipiente de muestreo y colocarlo posteriormente en un recipiente de doble pared, colocar la tapa y medir de inmediato la temperatura.

PROCEDIMIENTO

Siempre que sea posible se debe realizar la medición directamente en el cuerpo de agua, en caso de que esto no sea posible, extraer una porción de la muestra como se indicó anteriormente. Esperar el tiempo suficiente para obtener mediciones constantes. Enjuagar con agua destilada el instrumento de medición.

Las lecturas se obtienen directamente de la escala del aparato medidor de temperatura, y se informan en grados Celsius (°C). En el caso de aguas residuales, de ser posible todas las lecturas deben hacerse en las descargas o bien recolectar la muestra y realizar la medición.



En caso de que no sea posible, ésta puede medirse en un punto accesible del conducto más próximo a la descarga.

- Medir directamente la temperatura del agua, en caso de requerir extraer muestra, introducir el recipiente para muestreo, moverlo de manera circular durante 1 min para que se equilibre su temperatura con la del agua y retirar el recipiente con la muestra.
- Sumergir inmediatamente el termómetro, en posición centrada en el recipiente, hasta la marca de inmersión parcial o hasta una graduación apropiada si el termómetro es de inmersión total. Aplicar ligeros movimientos circulares por lo menos durante 1 min hasta que la lectura del termómetro se estabilice. Si la temperatura de la muestra difiere en más de 5 °C de la del ambiente, repetir el muestreo utilizando el vaso de doble pared. Si el termómetro es de sensor, éste debe sumergirse en el volumen mínimo de muestra y a la profundidad que recomienda el fabricante y las lecturas deben efectuarse después del tiempo de equilibrio recomendado en el manual del usuario.
- Registrar la lectura y la altura de la columna emergente si el termómetro utilizado es de inmersión total.
- Realizar por triplicado las operaciones.

CÁLCULOS

Calcular el promedio de las tres lecturas. Los resultados obtenidos se expresan redondeando al entero y en grados Celsius (°C).



NMX-AA-006-SCFI-2010
ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE MATERIA FLOTANTE EN
AGUAS RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

La medición de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas es de importancia para el control y tratamiento de descargas.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas.

PRINCIPIO

Este método se basa en la observación de la materia flotante en una muestra de aguas residuales en el sitio de muestreo mediante la separación de ésta en una malla de aproximadamente 3 mm de abertura; este método es una prueba cualitativa.

MATERIALES

- Malla metálica con abertura entre 2,8 mm y 3,3 mm;
- Recipiente de boca ancha con volumen que se encuentre entre 3 L y 5 L;
- Agitador de vidrio con gendarme, y
- Espátula

RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

- Debe tomarse un mínimo de 3 L de muestra. La muestra debe ser tomada directamente de la descarga; cuando esto no sea posible, utilizar un recipiente de muestreo.
- El análisis debe realizarse en campo.
- No se debe preservar la muestra.
- Tiempo máximo previo al análisis: no aplica.

PROCEDIMIENTO

- Verter la muestra a través de la malla, teniendo cuidado de que la materia flotante que sobrenada, quede retenida en dicha malla.
- Arrastrar con agitador de vidrio o una espátula hacia la malla toda aquella materia flotante que quedara sobre la superficie de la muestra que se está vertiendo o aquella adherida a las paredes del recipiente.



- ◆ Interpretación. Inmediatamente después de filtrar la muestra, se procede al examen de la malla.

El informe depende de la presencia o ausencia de materia flotante retenida en la malla. Reportar como ausencia de materia flotante, si al examinar la malla no se observa a simple vista ninguna partícula retenida. Reportar como presencia de materia flotante, si al revisar visualmente la malla se encuentran partículas retenidas.



NMX-AA-005-SCFI-2000
ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE GRASAS Y ACEITES
RECUPERABLES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES
Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

Este método permite una estimación del contenido de grasas y aceites en aguas naturales, residuales y residuales tratadas al determinar gravimétricamente las sustancias que son extraídas con hexano de una muestra acuosa acidificada. La determinación de grasas y aceites es indicativa del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos.

En la determinación de grasas y aceites no se mide una sustancia específica sino un grupo de sustancias con unas mismas características fisicoquímicas (solubilidad). Entonces la determinación de grasas y aceites incluye ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece un método de análisis para la determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

PRINCIPIO

Este método se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un Soxhlet empleando hexano como disolvente. Una vez terminada la extracción se evapora el hexano y se pesa el residuo que ha quedado en el recipiente; siendo este valor el contenido de grasas y aceites.

REACTIVOS Y PATRONES

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo, a menos que se indique otro grado.

Cuando se indique agua debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características: a) Resistividad, megohm-cm a 25°C: 0,2 mínimo; b) Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C: 5,0 máximo y c) pH: 5,0 a 8,0.

Ácido Clorhídrico concentrado(HCl);

- Hexano (C_6H_{14});
- Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4);
- Suspensión de tierra de diatomeas-sílice o tierra Sílice de aproximadamente 10 g/L de agua;
- Ácido Clorhídrico (1:1): Mezclar volúmenes iguales de Acido Clorhídrico concentrado y agua.
- Acido Sulfúrico (1:1): Mezclar volúmenes iguales de Acido Sulfúrico concentrado y agua, y



- Aceite de referencia: Pesar aproximadamente y con precisión la cantidad requerida de una mezcla de aceite de referencia (mezcla de mineral SAE20 y vegetal mixto) acorde a la cantidad esperada de grasas y aceites en la muestra y agregar la mezcla a 1 L de agua.

MATERIALES

- Cartuchos de extracción de celulosa para Soxhlet;
- Papel filtro con tamaño de poro fino;
- Embudo Büchner, y
- Desecador.

EQUIPO

- Equipo de extracción Soxhlet;
- Bomba de vacío u otra fuente de vacío;
- Estufa eléctrica capaz de mantener 103°C;
- Estufa eléctrica de vacío capaz de mantener 80°C;
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg, y
- Equipo de filtración a vacío.

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

De la superficie del cuerpo de agua coleccionar un volumen de aproximadamente 1 L de muestra en un frasco de vidrio de boca ancha y tapa de cubierta de politetrafluoroetileno, poliamida, PVC polietileno o metálica. Ya que pueden ocurrir pérdidas de grasas y aceites por el equipo de muestreo, no se permite la colecta de una muestra compuesta. Dado que la muestra entera se ocupa en esta prueba, no se pueden tomar alícuotas de la muestra para realizar otro tipo de análisis.

En caso de existir la presencia de aceites emulsionados en el agua a muestrear, la muestra se toma de 20 cm a 30 cm de profundidad, cuando no haya mucha turbulencia para asegurar una mayor representatividad.

La muestra debe preservarse por acidificación con ácido clorhídrico 1:1 a un valor de pH menor a dos y refrigerarlas a 4°C. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 28 días.

PROCEDIMIENTO

- Medir el pH de las muestras el cual debe ser menor de 2, si no tiene este valor acidifique con ácido clorhídrico 1:1 ó ácido sulfúrico 1:1. Para muestras con un pH menor de 8 unidades generalmente es suficiente con adicionar 5 mL de ácido clorhídrico 1:1 ó 2 mL de ácido sulfúrico 1:1.



- ◆ Preparar los matraces de extracción introduciéndolos a la estufa a una temperatura de 103°C - 105°C, enfriar en desecador y pesarlos, repetir el procedimiento hasta obtener el peso constante de cada uno de los matraces.
- ◆ Preparar el material filtrante colocando un papel filtro en el embudo Büchner, colocar el embudo en un matraz Kitazato y agregar 100 mL de la suspensión de tierra de diatomeas-sílice sobre el filtro, aplicar vacío y lavar con 100 mL de agua.
- ◆ Transferir el total de la muestra acidificada al embudo Büchner preparado aplicando vacío hasta que cese el paso de agua.
- ◆ Medir el volumen de la muestra.
- ◆ Con ayuda de unas pinzas, transferir el material filtrante a un cartucho de extracción. Limpiar las paredes internas del embudo y el frasco contenedor de la muestra, así como la parte interna de la tapa del frasco con trozos de papel filtro previamente impregnados de disolvente (hexano) tener cuidado en remover la película de grasa y los sólidos impregnados sobre las paredes; colocar los trozos de papel en el mismo cartucho.
- ◆ Secar el cartucho en una estufa a 103°C - 105°C por un período de 30 min. Transcurrido este período colocar en el equipo Soxhlet.
- ◆ Adicionar el volumen adecuado de hexano al matraz de extracción previamente puesto a peso constante y preparar el equipo Soxhlet. Evitar tocar con las manos el cartucho y el matraz de extracción, para ello utilizar pinzas ó guantes de látex.
- ◆ Colocar el equipo de extracción sobre la parrilla de calentamiento, controlar la temperatura del reflujo y extraer a una velocidad de 20 ciclos/hora durante un período de 4 h.
- ◆ Una vez terminada la extracción retirar el matraz del equipo Soxhlet, y evaporar el disolvente.
- ◆ El matraz de extracción libre de disolvente se coloca en el desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.
- ◆ Pesar el matraz de extracción y determinar la concentración de grasas y aceites recuperables.
- ◆ Analizar un blanco de reactivo bajo las mismas condiciones de la muestra.

CÁLCULOS



- Calcular las grasas y aceites recuperables (G y A) en la muestra usando la siguiente ecuación:

$$G \text{ y } A \text{ (mg/L)} = (A - B) / V$$

donde:

A es el peso final del matraz de extracción (mg);

B es el peso inicial del matraz de extracción (mg), y

V es el volumen de la muestra, en litros.

- Restar al resultado obtenido de la muestra el valor del blanco de reactivo.
- Reportar los resultados del análisis en mg/L.

SEGURIDAD

- ✓ No ha sido determinada la carcinogenicidad de todos los reactivos con precisión. Por lo que cada sustancia química debe tratarse como peligro potencial a la salud. La exposición a estas sustancias debe reducirse al menor nivel posible. Se sugiere que el laboratorio realice monitoreos de higiene ocupacional de cada reactivo a los que pueda estar expuesto el analista y que dichos resultados se encuentren a su disposición.
- ✓ Este método puede no mencionar todas las precauciones de seguridad asociadas con su uso. El laboratorio es responsable de mantener un ambiente de trabajo seguro y un archivo de las Normas de seguridad respecto a la exposición y manejo seguro de las sustancias químicas especificadas en éste método. Debe tenerse un archivo de referencia de las hojas de información de seguridad el cual debe estar disponible a todo el personal involucrado en estos análisis.
- ✓ El ácido clorhídrico concentrado puede ser nocivo si se inhala, ingiere o entra en contacto con la piel. Puede causar irritación en las mucosas y en las vías respiratorias altas. Una exposición prolongada o repetida puede causar reacciones alérgicas en individuos sensibles.
- ✓ Mientras se trabaje con cualquiera de los reactivos químicos descritos en este método, deberá usarse: bata, mascarilla contra disolventes, lentes de protección y guantes antiácido.



NMX-AA-004-SCFI-2013
ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES
EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES
TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

Las aguas naturales, residuales o residuales tratadas con altos contenidos de sólidos sedimentables no pueden ser utilizadas en forma directa por las industrias o las plantas potabilizadoras, de ello se deriva el interés por medir en forma cuantitativa este parámetro.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Es de aplicación nacional.

MATERIALES

- Frasco de polietileno o vidrio con una capacidad mínima de 1,5 L, con tapa de boca ancha;
- cono de sedimentación tipo Imhoff de vidrio o plástico;
- bases para conos Imhoff;
- agitador largo, y
- reloj o cronómetro.

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

- La muestra puede ser puntual (simple) o compuesta.
- Colectar un volumen de muestra homogéneo y representativo superior a 1 L en un frasco de polietileno o vidrio con tapa de boca ancha, teniendo siempre en cuenta que el material en suspensión no debe adherirse a las paredes del recipiente.
- Transportar la muestra y mantenerla entre 2 °C a 8 °C hasta realizar el análisis.
- El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días. Sin embargo, se recomienda realizar el análisis dentro de las 24 h posteriores a su colecta.

PROCEDIMIENTO

- Mezclar la muestra a fin de asegurar una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de todo el cuerpo del líquido. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al momento de su medición.



- Colocar la muestra bien mezclada en un cono Imhoff hasta la marca de 1 L.
- Dejar sedimentar 45 min, una vez transcurrido este tiempo desprender suavemente los sólidos adheridos a las paredes del cono con un agitador; mantener en reposo 15 min más y registrar el volumen de sólidos sedimentables en mL/L. Si la materia sedimentable contiene bolsas de líquido y/o burbujas de aire entre partículas gruesas, estimar aproximadamente el volumen de aquellas y restar del volumen de sólidos sedimentados.

En caso de producirse una separación de materiales sedimentables y flotables, no deben valorarse estos últimos como material sedimentable.

CÁLCULOS

- Tomar directamente la lectura de sólidos sedimentables del cono Imhoff.
- Reportar la lectura obtenida en mL/L.



NMX-AA-030/2-SCFI-2011
ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA
DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y
RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

INTRODUCCIÓN

El valor de la demanda química de oxígeno, DQO-TS, del agua, determinado a través de este método del dicromato, puede ser considerada como una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, por ejemplo: la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos presentes en el agua. El grado en el cual los resultados de prueba se aproximan al valor teórico depende principalmente de qué tan completa es la oxidación. La prueba DQO-TS es una prueba empírica y los efectos de cualquier agente oxidante o reductor son incluidos en el resultado. Bajo las condiciones de la prueba, muchos compuestos orgánicos y la mayoría de los agentes reductores inorgánicos se oxidan en una proporción de entre 90 y 100 %. Para aguas que contienen estos compuestos, como las residuales, de desecho industrial u otras aguas contaminadas, el valor de DQO-TS es una medida realista de la demanda teórica de oxígeno. Sin embargo, para aguas que contienen grandes cantidades de otras sustancias que son difíciles de oxidar, bajo las condiciones de prueba, como compuestos nitrogenados y heterocíclicos, por ejemplo, piridina e hidrocarburos alifáticos y aromáticos, el valor de DQO-TS es una medida pobre de la demanda teórica de oxígeno. Éste puede ser el caso de algunas descargas industriales.

La relevancia del valor de DQO-TS dependerá de la composición del agua analizada. Esto deberá tenerse en cuenta a la hora de evaluar resultados obtenidos por el método especificado en la presente norma mexicana.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana especifica un método para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO-TS) usando el método de tubo sellado. La prueba es empírica y aplicable a cualquier muestra acuosa, que incluye todo tipo de agua residual y de desecho industrial. Esta norma es de aplicación nacional.

El método es aplicable a muestras sin diluir con un valor de DQOTS hasta 1 000 mg/L y una concentración de masa de cloruro que no exceda 1 000 mg/L. Las muestras con valores de DQO-TS mayores requieren ser diluidas previamente. Para muestras con valor bajo de DQO, la precisión de la medición se reduce y el límite de detección es afectado con una disminución en la sensibilidad del método.

Las muestras con una alta concentración de cloruro necesitarán ser diluidas antes del análisis para dar una concentración de masa de cloruro de aproximadamente 1000 mg/L o menor.



El método oxida casi todos los tipos de compuestos orgánicos y la mayoría de los agentes reductores inorgánicos. Tiene un límite de detección (4,65 veces la desviación estándar por lote de un blanco o de una referencia de muy bajo nivel) de 6 mg/L para detección espectrofotométrica a 600 nm, y 15 mg/L para detección de titulación como se reporta por un laboratorio cuando compara las técnicas fotométricas con las de titulación usando un equipo de prueba comercial con un intervalo de hasta 1 000 mg/L.

La sección de esta norma mexicana sobre titulación, es aplicable a muestras que presentan un color atípico o turbiedad después de la etapa de digestión.

PRINCIPIO

Las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio (II). La plata actúa como catalizador para oxidar la materia orgánica más resistente. El mercurio reduce la interferencia causada por la presencia de iones cloruro. La cantidad de dicromato utilizada en la oxidación de la muestra se determina midiendo la absorbancia del Cromo (III) formado a una longitud de onda de (600 ± 20) nm para un intervalo hasta de 1 000 mg/L. Las mediciones de la absorbancia se efectúan en el tubo de digestión, que hace las veces de celda, y son convertidas a un valor de DQO-TS.

REACTIVOS

- Agua
Con las siguientes características: Conductividad máxima 5,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C y pH de 5,0 a 8,0.
- Tubos sellados DQO-TS
Siempre que sea posible se recomienda adquirir tubos sellados DQO-TS listos para su uso. Esto minimiza el manejo de productos químicos tóxicos por personal del laboratorio. Los tubos de tipo comercial se pueden comprar para cubrir diferentes intervalos de análisis, (por ejemplo, hasta 50 mg/L, 160 mg/L, 1 000 mg/L ó 1 500 mg/L).

Si los tubos no se pueden adquirir ya preparados, entonces prepárelos en el laboratorio, para un intervalo de análisis de hasta 1 000 mg/L. En este caso, el usuario determinará la reproducibilidad de la transmisión óptica de los tubos o transferirá el contenido después de la digestión a una celda de vidrio con una longitud de paso óptico de 10 mm. El intervalo de concentración DQO-TS de tubos comerciales será especificado por el fabricante y no deberá excederse. Si esto llegara a ocurrir, la muestra deberá diluirse convenientemente dentro del intervalo de concentración de masa especificado.

- Dicromato de potasio,



Disolución de referencia certificada (donde aplique), $c(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 0,10 \text{ mol/L}$ (intervalo de hasta $1\ 000 \text{ mg/L}$ de DQO-TS). Disolver $(29,418 \pm 0,005) \text{ g}$ de dicromato de potasio (secado a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por $2 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$) en aproximadamente 600 mL de agua en un vaso de precipitado.

Agregar cuidadosamente 160 mL de ácido sulfúrico concentrado, con agitación. Dejar enfriar y diluir a $1\ 000 \text{ mL}$ en un matraz volumétrico. La disolución es estable al menos por seis meses.

- Ácido sulfúrico
- Ácido sulfúrico concentrado, $\gamma(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,84 \text{ g/mL}$.
- Ácido sulfúrico diluido, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 4 \text{ mol/L}$. A un vaso que contenga aproximadamente 500 mL de agua, añadir cuidadosamente con agitación, $(220 \pm 10) \text{ mL}$ de ácido sulfúrico concentrado. Dejar enfriar y diluir a $(1\ 000 \pm 10) \text{ mL}$ en una probeta. Almacenar en un frasco de vidrio. La disolución es estable por doce meses.
- Ácido sulfúrico diluido, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,8 \text{ mol/L}$. A un vaso que contenga $(180 \pm 2) \text{ mL}$ de agua, añadir cuidadosamente con agitación, $(20 \pm 1) \text{ mL}$ de ácido sulfúrico concentrado. La disolución es estable por doce meses.
- Disolución de sulfato de mercurio (II), $c(\text{HgSO}_4) = 1,35 \text{ mol/L}$. Disolver $(80 \pm 1) \text{ g}$ de sulfato de mercurio grado reactivo en $(200 \pm 2) \text{ mL}$ de ácido sulfúrico diluido. La disolución es estable por doce meses.
- Sulfato de plata en ácido sulfúrico, $c(\text{Ag}_2\text{SO}_4) = 0,038\ 5 \text{ mol/L}$. Disolver $(24,0 \pm 0,1) \text{ g}$ de sulfato de plata en 2 L de ácido sulfúrico concentrado. Para obtener una disolución satisfactoria, agite la mezcla inicial. Deje reposar una noche y después agite nuevamente con el fin de disolver todo el sulfato de plata. Almacenar en botella de vidrio oscuro protegido de la luz directa del sol. La disolución es estable por doce meses.
- Reactivos premezclados preparados (con un intervalo de DQO-TS de hasta $1\ 000 \text{ mg/L}$). Colocar $(0,50 \pm 0,01) \text{ mL}$ de dicromato de potasio en tubos de digestión individuales. Agregar con cuidado $(0,20 \pm 0,01) \text{ mL}$ de disolución de sulfato de mercurio (II), seguido de $(2,50 \pm 0,01) \text{ mL}$ de sulfato de plata. Agitar cuidadosamente y a continuación, tape los tubos. Deje reposar una noche para enfriar. Agitar de nuevo antes de su uso. Este reactivo preparado es estable por un año si se almacena en lugar oscuro a temperatura ambiente.

EQUIPO Y MATERIALES

Aparatos para la etapa de digestión:



- Placas de calentamiento, capaz de mantener una temperatura de $(150 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sin causar sobrecalentamiento local a los contenidos de los tubos que estén siendo probados. La placa de calentamiento debe tener capacidad para sostener al menos 10 tubos. Los orificios en la placa de calentamiento deben ser de un diámetro tal que la pared del tubo de vidrio esté en contacto estrecho con la placa de metal. La profundidad en los orificios debe ser tal que pueda ocurrir el calentamiento adecuado de los contenidos.
- Tubos de digestión, fabricados de vidrio resistente al ácido, capaces de resistir una presión de 600 kPa a $150 ^\circ\text{C}$ (e.g. longitud de 185 mm, diámetro externo de 14 mm y grosor de pared de 1 mm) o los disponibles comercialmente. Los tubos de vidrio se acoplarán a la placa de calentamiento de manera tal que la pared esté en contacto estrecho con la placa de metal. Antes de usarse deberán ser inspeccionados para asegurar que no están dañados o rotos de alguna manera, y serán descartados si es detectado cualquier defecto ligero. Los tubos de vidrio se proveerán con tapas adecuadas.
- Pipeta, capaz de dispensar $(2,00 \pm 0,02)$ mL.
- Aparatos para la medición de la etapa final
- Aparato de detección espectrofotométrica
- Espectrofotómetro, con capacidad de medición a (600 ± 20) nm. Es altamente recomendable que el espectrofotómetro sea capaz de medir la absorbancia de la muestra digerida directamente del tubo sellado, eliminando así la necesidad de transferir la disolución a una celda separada.
- Instalaciones de almacenaje adecuadas, para los tubos sellados de digestión usados. Los tubos sellados de digestión usados y sus contenidos deberán desecharse de acuerdo con los requerimientos nacionales.
- Centrífuga, adecuada para soportar los tubos de digestión.
- Aparato para la detección por titulación.
- Bureta, por ejemplo, de 10 mL con graduaciones de 0,02 mL, o titulador digital, por ejemplo, con una resolución de 0,02 mL o mejor (para titular muestras digeridas turbias de los tubos sellados).
- Agitador magnético para titulación
- Barra de agitación y recuperador de barra de agitación



RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

Tomar la muestra de acuerdo con NMX-AA-003 vigente y además con las siguientes consideraciones:

- ✓ Tomar una muestra del agua para ser analizada en una botella limpia de vidrio o polipropileno y almacenar de 2 °C a 8 °C en un lugar oscuro.
- ✓ Después del muestreo, lleve a cabo el análisis tan pronto como sea posible.

Si es indispensable el almacenamiento, agregar ácido sulfúrico a la muestra hasta un pH menor a 2. La muestra acidificada y refrigerada es estable por un mes. Si la muestra se mantiene a -20 °C es estable por un mes.

PROCEDIMIENTO ANALÍTICO PARA MEDICIÓN DEMUESTRAS

◆ Etapa de digestión:

1. Inspeccione con cuidado todos los tubos nuevos sellados de digestión para ver si tienen algún defecto. Verificar si la disolución en el tubo muestra alguna traza de color verde; si es así, rechace el tubo.
2. Encender la placa de calentamiento y precalentar a 150 °C.
3. Quitar la tapa del tubo de digestión.
4. Agitar vigorosamente y homogenizar la muestra e inmediatamente pipetear 2,00 mL de la muestra en el tubo de digestión. Para cualquier muestra que se prevé que tenga un valor de DQO-TS mayor a 1 000 mg/L, pipetear en el tubo de digestión 2,00 mL de una porción de la muestra diluida apropiadamente. Llevar a cabo una determinación de blanco utilizando agua con cada lote de análisis.
5. Colocar la tapa firmemente y mezclar el contenido invirtiendo suavemente el tubo varias veces.
6. Limpiar el exterior del tubo con un papel suave.
7. Colocar el tubo en la placa de calentamiento. Reflujar el contenido a 150 °C durante 2 h ± 10 min.
8. Retirar los tubos de la placa de calentamiento y dejar enfriar a 60 °C o menos. Mezclar el contenido invirtiendo cuidadosamente cada tubo varias veces mientras permanezcan calientes. Después, dejar enfriar los tubos a temperatura ambiente antes de medir la absorbancia.

◆ Detección Espectrofotométrica:

1. Si las muestras digeridas enfriadas son claras (por ejemplo ausencia de cualquier turbiedad visible), medir la absorbancia a 600 nm utilizando el espectrofotómetro. Los resultados obtenidos mediante lectura directa del instrumento o por comparación contra la gráfica de calibración.

NOTA: Si el espectrofotómetro o los tubos no son adecuados para medir la absorbancia de la disolución directamente del tubo sellado, es necesario tener



precaución de no alterar algún sedimento en el fondo del tubo al transferir algo del contenido a una celda de 10 mm de longitud de paso óptico al medir la absorbancia.

2. Si alguna de las muestras digeridas enfriadas se muestran turbias, centrifugar a $(4\ 000 \pm 200)$ g durante $(5,0 \pm 0,5)$ min. Si la disolución de digestión ya no es turbia, medir la absorbancia a 600 nm utilizando el espectrofotómetro. Tener precaución al momento de centrifugar los tubos sellados.
3. Si la disolución después de la etapa de digestión y el tratamiento centrífugo continúa turbia o si la muestra digerida presenta un color atípico, proceda como en el punto 2.

CÁLCULO DE RESULTADOS

- Obtener los resultados de las mediciones a través de la lectura directa del espectrofotómetro o a partir de la curva de calibración.
- Registrar estos resultados. Si algún resultados está fuera del intervalo de trabajo, repetir el análisis mediante dilución de la muestra original.
- Calcular el valor de la γ (DQO-TS), en miligramos de oxígeno por litro, hasta tres cifras significativas, como pueden ser leídas de la curva de calibración, dependiendo de la concentración encontrada.

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Informe los resultados de γ (DQO-TS) hasta tres cifras significativas, en función de la concentración encontrada y la validación de los datos del método.

**NMX-AA-028-SCFI-2001****ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA****INTRODUCCIÓN**

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Se determina la cantidad de oxígeno utilizada por una población microbiana heterogénea para transformar la materia orgánica, en un periodo de incubación de 5 días a 20°C.

PRINCIPIO DEL MÉTODO

El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C. Para la determinación de oxígeno disuelto (OD) se puede emplear cualquiera de los dos métodos establecidos en la norma mexicana NMX-AA-012-SCFI.

REACTIVOS Y PATRONES

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo, a menos que se indique otro grado.

- Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características:
 - a) Resistividad, megohm-cm a 25°C: 0,2 min.;
 - b) Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C: 5,0 máx., y
 - c) pH: 5,0 a 8,0.
- Fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4)
- Fosfato dibásico de potasio (K_2HPO_4)
- Fosfato dibásico de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de amonio (NH_4Cl)
- Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)



- Cloruro de calcio anhidro (CaCl_2)
- Cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Sulfito de sodio (Na_2SO_3)
- 2-cloro-6 (triclorometil) piridina
- Glucosa grado patrón primario ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)
- Ácido glutámico grado patrón primario ($\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$)
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Ácido nítrico (HNO_3)
- Disolución amortiguadora de fosfato. Pesar aproximadamente 8,5 g de fosfato monobásico de potasio, 21,75 g de fosfato dibásico de potasio, 33,4 g de fosfato dibásico de sodio heptahidratado y 1,7 g de cloruro de amonio, disolver en 500 mL de agua y aforar a 1 L. El pH de la disolución debe ser de 7,2.
- Disolución de sulfato de magnesio. Pesar aproximadamente 22,5 g de sulfato de magnesio heptahidratado, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de cloruro de calcio. Pesar aproximadamente 27,5 g de cloruro de calcio anhidro, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de cloruro férrico. Pesar aproximadamente 0,25 g de cloruro férrico hexahidratado, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de ácido sulfúrico (0,1N). Agregar aproximadamente 2,8 mL de ácido sulfúrico concentrado a 500 mL de agua, mezclar bien y diluir hasta 1 L.
- Disolución de hidróxido de sodio (0,1N). Pesar aproximadamente 4,0 g de hidróxido de sodio, disolver en agua y diluir a 1 L.
- Disolución de sulfito de sodio. Pesar aproximadamente 1,575 g de sulfito de sodio, disolver en agua y diluir a 1 L. Esta disolución no es estable; por lo que debe prepararse diariamente.
- Disolución patrón de glucosa-ácido glutámico. Secar glucosa y ácido glutámico a 103°C durante una hora. Pesar aproximadamente y con precisión 150,0 mg de glucosa (ver inciso 5.12) y 150,0 mg de ácido glutámico, diluir en agua y aforar a 1 L. Preparar inmediatamente antes de usarla. Esta disolución tiene una DBO5 de 198 mg/L.
- Disolución de cloruro de amonio. Pesar aproximadamente 1,15 g de cloruro de amonio (ver inciso 5.4) y disolver en 500 mL de agua, ajustar el pH a 7,2 con disolución de hidróxido de sodio (ver inciso 5.21) y aforar a 1 L. La disolución contiene 0,3 mg N/mL.

EQUIPO Y MATERIALES

Equipo

- Equipo de aireación con difusor
- Incubador: Controlado por termostato a $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Eliminar toda la luz para evitar la posibilidad de producción fotosintética de oxígeno disuelto.
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg
- Medidor de oxígeno disuelto



Material

- Todo el material usado en la determinación debe ser exclusivo para este procedimiento. Para el lavado del material remojar durante 1 h en una disolución de ácido sulfúrico al 10 % y enjuagar con agua. Los detergentes con base de amoníaco no deben usarse para la limpieza del material.
- Los contenedores de las muestras deben lavarse con disolución de detergente no iónico, libre de metales, enjuagarse con agua, remojar en ácido toda la noche y volver a enjuagarse con agua libre de metales.
- Para el material de cuarzo, politetrafluoroetileno o material de vidrio debe dejarse remojando de 12 h a 24 h con HNO₃ (1:1), HCl (1:1) o con agua regia (3 partes de HCl concentrado + 1 parte de HNO₃ concentrado) a 70°C solo en los casos que presente material adherido, después debe ser enjuagado con agua libre de metales.
- En los casos de que el material presente grasas, enjuagar con acetona y/o hexano.
- Botellas Winkler de vidrio para incubación con capacidad de 300 mL de aforo total y con boca estrecha, reborde y tapón de vidrio esmerilado, de forma cónica.
- Contratapa de politetrafluoroetileno u otro material plástico para botella Winkler
- Bureta

RECOLECCIÓN, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS

- ✓ En el caso de aguas naturales debe tomarse un mínimo de 1 L de muestra en un envase de polietileno o vidrio. En el caso de aguas residuales (DBO₅ mayores a 50 mg/L) deben tomarse mínimo 100 mL. Pueden utilizarse muestras simples o compuestas.
- ✓ No se debe agregar ningún preservador a las muestras. Solo deben conservarse a 4°C hasta su análisis.
- ✓ El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 24 h.

PROCEDIMIENTO

- Preparación de agua para dilución:



1. Colocar el volumen requerido de agua en un frasco y añadir por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos. Preparar el agua de dilución diariamente. Analizar y almacenar el agua de dilución.

◆ Inóculo:

1. Fuente de la siembra. Es necesario contar con una población de microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable de la muestra. El agua residual doméstica, los efluentes no clorados o sin desinfección, los efluentes de las plantas de tratamiento de desechos biológicos y las aguas superficiales que reciben las descargas de aguas residuales que contienen poblaciones microbianas satisfactorias. Algunas muestras no contienen una población microbiana suficiente (por ejemplo, algunos residuos industriales no tratados, residuos desinfectados, residuos de alta temperatura o con valores de pH extremos).
2. Para tales residuos, sembrar el agua de dilución añadiendo una población de microorganismos. La mejor siembra es la que proviene del efluente de un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales. Cuando se usa como siembra el efluente de tratamiento biológico de sistema de aguas residuales se recomienda la inhibición de la nitrificación.
3. Determinar si la población existente es satisfactoria haciendo la prueba de la siembra en una muestra para DBO_5 . El incremento del valor de la DBO_5 indica una siembra exitosa.

◆ Pretratamiento de la muestra:

1. Muestras con pH ácidos o básicos. Neutralizar las muestras a un pH entre 6,5 y 7,5 con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio de concentración tal que la cantidad de reactivo no diluya la muestra en más del 0,5 %. El pH del agua de dilución sembrada no debe verse afectado por la dilución de la muestra.
2. Muestras que contienen cloro residual. Si es posible, evitar las muestras que contengan cloro residual, tomándolas antes del proceso de cloración. Si la muestra ha sido clorada pero no hay residuo detectable de cloro, sembrar el agua de dilución. Si hay cloro residual, eliminar el cloro de la muestra y sembrar con Inóculo.
3. Muestras sobresaturadas con OD. En aguas frías o en aguas donde se produce la fotosíntesis (aguas de embalses), es posible encontrar muestras que contienen más de 9,0 mg OD/L a 20°C. Para evitar la pérdida de oxígeno durante la incubación de tales muestras, reducir el OD por saturación, calentando la muestra aproximadamente a 20°C en frascos parcialmente llenos mientras se agitan con fuerza o se airean con aire limpio, filtrado y comprimido.
4. Ajustar la temperatura de la muestra a 20°C \pm 1°C antes de hacer diluciones.

◆ Técnica de dilución:



1. Las diluciones que dan lugar a un OD residual mayor de 1 mg/L y una captación de OD de al menos 2 mg/L después de 5 días de incubación, producen los resultados más confiables. Hacer varias diluciones (al menos 3) por duplicado de la muestra preparada para obtener una captación de OD en dicho intervalo. La experimentación con una muestra concreta permite el uso de un número menor de diluciones. Un análisis más rápido tal como la DQO, presenta una correlación aproximada con la DBO₅ y sirve como una guía para seleccionar las diluciones.

En ausencia de datos previos, utilizar las siguientes diluciones: de 0 % a 1 % para los residuos industriales fuertes, de 1 % a 5 % para las aguas residuales sedimentadas y crudas, del 5 % al 25 % para el efluente tratado biológicamente y del 25 % al 100 % para las aguas superficiales contaminadas.

2. Diluciones preparadas directamente en frascos tipo Winkler. Utilizando una pipeta volumétrica, añadir el volumen de muestra deseado a frascos Winkler individuales de 300 mL. Añadir cantidades adecuadas del material de siembra a los frascos tipo Winkler o al agua de dilución. Llenar los frascos con suficiente agua de dilución, sembrada si es necesario, de forma que la inserción del tapón desplace todo el aire, sin dejar burbujas.

No realizar diluciones mayores de 1:300 (1 mL de la muestra en un frasco). Determinar el OD inicial en uno de los frascos de cada una de las diferentes diluciones. En los frascos de los duplicados de cada una de las diluciones, Ajustar herméticamente el tapón, poner un sello hidráulico y la contratapa e incubar durante 5 días a 20°C.

- Determinación del OD inicial

- Incubación:

1. Incubar a 20°C ± 1°C las botellas de DBO₅ que contengan las muestras con las diluciones deseadas, los controles de siembra, los blancos de agua de dilución y el control de glucosa-ácido glutámico. En caso de no contar con contratapas, diariamente se debe verificar que el sello hidráulico esté intacto en cada botella incubada, agregar agua si es necesario.

- Determinación del OD final:

Después de 5 días de incubación determinar el OD en las diluciones de la muestra, en los controles y en los blancos. La medición del OD debe ser realizada inmediatamente después de destapar la botella de Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire por la muestra.

CÁLCULOS:



- Calcular la DBO_5

Cuando no se utilice inóculo ni diluciones:

$$DBO_5 \text{ (mg/L)} = OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}$$

donde:

OD_i mg/L es el oxígeno disuelto inicial, y

OD_5 mg/L es el oxígeno disuelto al quinto día.

Cuando se emplea una dilución:

$$DBO_5 \text{ (mg/L)} = \frac{OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

Cuando se utiliza inóculo sin dilución:

$$DBO_5 \text{ (m/L)} = (OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}) - C1 (B1 - B2) (Vt) C2(Vm)$$

Cuando se utiliza inóculo sin dilución con dilución:

$$DBO_5 \text{ (m/L)} = [(OD_i \text{ mg/L} - OD_5 \text{ mg/L}) - C1 (B1 - B2) (Vt)] C2(Vm)$$

donde:

B1 es el OD del inóculo antes de la incubación, en mg/L;

B2 es el OD del inóculo después de la incubación, en mg/L;

C1 es el volumen de inóculo en la muestra;

C2 es el volumen de inóculo en el inóculo control;

Vt es el volumen total del frasco Winkler, y

Vm es el volumen de muestra sembrada.

- Reportar los resultados en mg/L de DBO_5 con dos cifras significativas con la precisión (media, desviación estándar) correspondiente.