



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
Colegio de Ingeniería Ambiental

Tesis

**“Estrategias de mejora al sistema del tratamiento
final de agua residual de una empresa del sector
automotriz para impulsar el aprovechamiento de su
efluente de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-
1997”**

Que para obtener el título de:
Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta

ELVIRA VERA AGUILAR

Director de Tesis

M.I.A MIRIAM VEGA HERNÁNDEZ

Codirector de Tesis

M.I.A ANGEL SILVETI LOEZA

Asesores

Dr. Heriberto Hernández Cocoltzi

Dra. María Teresa Zayas Pérez

Enero 2024

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	6
1. Planteamiento del problema.....	6
2. Justificación	7
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general	9
3.1.1 Objetivos específicos.....	9
4. Hipótesis.....	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	10
5. Problemática del agua y su relación con la industria	10
6. Adaptación corporativa	11
7. Estrategias de aprovechamiento de Aguas Residuales Tratadas.....	12
8. Aguas residuales: contaminantes parámetro.....	15
8.1 Sólidos	17
8.2 Demanda bioquímica de oxígeno.....	17
8.3 Demanda química de oxígeno	17
8.4 Coliformes fecales	18
8.5 Grasas y aceites	18
9. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	19
10. ¿Qué es el Tratamiento de Aguas Residuales?	20
11. Clasificación de Métodos de Tratamiento de Aguas Residuales	20
11.1 Procesos unitarios físicos	20
11.2 Procesos unitarios químicos.....	21
11.3 Proceso unitario biológico.....	21
11.4 Procesamiento de aguas residuales	22
12. Reactores secuenciales.....	25
12.1 Reactor de flujo continuo	25
12.2 Reactor secuencial por lotes de flujo intermitente	26
12.3 Fases del SBR	27
12.4 Ciclos del SBR.....	28
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	31
13. Área de estudio	31
14. Muestreo	32
15. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos.....	34

16.	Evaluación de la operación y mantenimiento de planta mediante lista de verificación...	48
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		52
17.	Resultados del muestreo	52
18.	Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos	53
19.	Resultados de la aplicación de la lista de verificación	54
20.	Solución de problemas para la producción de espuma y nata.....	55
20.1	Tasas erráticas de desecho de lodo	57
20.2	Organismos filamentosos productores de espuma.....	57
20.3	Deficiencia de nutrientes	58
20.4	Envejecimiento del lodo	59
21.	Mecanismo de reducción de grasas en SBR	60
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....		61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ejemplos de reutilización de aguas residuales	14
Tabla 2.	Contaminantes y su importancia en las aguas residuales.	16
Tabla 3.	Límites máximos permisibles de contaminantes.....	19
Tabla 4.	Procesos unitarios utilizados para la eliminación de constituyentes de interés presentes en las aguas residuales.....	24
Tabla 5.	Características del muestreo.....	34
Tabla 6.	Pesos de los matraces	41
Tabla 7.	Lista de verificación de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento biológico de aguas residuales.....	48
Tabla 8.	Hoja de campo	52
Tabla 9.	Resumen de resultados y valores LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997	54
Tabla 10.	Producción de espuma en un SBR	56
Tabla 11.	Compuestos químicos apropiados para la adición de nutrientes.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Gestión circular del agua	11
Figura 2.	Las 5 fases de un SBR.....	27
Figura 3.	Empleo de dos tanques SBR.....	28
Figura 4.	Sincronización de los ciclos de dos tanques SBR.....	28
Figura 5.	Ciclo de 6 horas de un SBR típico para el tratamiento de aguas domésticas. 29	
Figura 6.	Ejemplo de un diagrama de un SBR.....	32
Figura 7.	Muestreo del efluente	33
Figura 8.	Método de determinación de Coliformes Fecales	35
Figura 9.	Siembra de la muestra.....	36
Figura 10.	Diluciones de 10 mL, 1 mL y 0,1 mL pruebas presuntivas con caldo lactosa 36	
Figura 11.	Diluciones de 10 mL, 1 mL y 0,1 mL pruebas presuntivas con caldo lactosa bilis verde brillante.	37
Figura 12.	Valores de NMP por cada 100 mL de muestra y 95 % de límite de confianza (cuando se utilizan cinco alícuotas de muestra de 10 mL, cinco de 1 mL y cinco de 0,1 mL). 38	
Figura 13.	Método de determinación de Huevos de Helminto.....	39
Figura 14.	Método de determinación de Grasas y Aceites	40
Figura 15.	Proceso de recirculación para la extracción de grasas y aceites	41
Figura 16.	Medición de DBO ₅	42
Figura 17.	Método de determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅ ...	43
Figura 18.	Botellas Winkler con diluciones del 5, 15 y 25%	44
Figura 19.	Determinación de SST.....	45
Figura 20.	Método de determinación de los Sólidos Suspendidos Totales SST	46
Figura 21.	Oil Skimmer	60

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de creciente conciencia ambiental y la imperante necesidad de adoptar prácticas sostenibles en la industria, el presente trabajo de investigación se adentra en la evaluación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Biológica en una empresa del sector automotriz establecida en Puebla, Pue. La motivación detrás de este estudio radica en la búsqueda de estrategias de mejora para el Tratamiento de Aguas Residuales (TAR) para alcanzar el cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, siendo los Coliformes Fecales, los Huevos de Helminto, las Grasas y Aceites, la DBO₅ y los SST los parámetros definidos. Cabe destacar que la empresa automotriz le da un actual cumplimiento a la NOM-001-SEMARNAT-2021.

La investigación entonces se fundamenta en análisis fisicoquímicos y microbiológicos ejecutados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con el fin de caracterizar el efluente generado por la empresa automotriz. A su vez, se ha aplicado una lista de verificación meticulosa para evaluar la eficiencia en la operación y mantenimiento de la PTAR. Tras la obtención de los resultados de los análisis del laboratorio donde únicamente el parámetro de Grasas y Aceites estuvo fuera del LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997, y confirmando el buen funcionamiento de la PTAR con la lista de verificación, se llevó a cabo una investigación bibliográfica donde se definió el uso de los “oil skimmers” (desnatadores de aceite) en los tanques SBR como recomendaciones en la optimización del tren de tratamiento para la reducción de grasas y aceites.

La investigación aspira a contribuir con medidas que le faciliten el reúso de las aguas residuales a la industria automotriz, protegiendo simultáneamente el medio ambiente, mediante la reducción del consumo de agua de extracción en pozo profundo y la disminución de las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua nacionales con índices de calidad en declive.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1. Planteamiento del problema

En 2017, del total del agua concesionada, el 9% se destinó a la industria autoabastecida y de generación de energía eléctrica. Durante el periodo de 2001 a 2017 fueron las aguas superficiales la principal fuente de abastecimiento con cantidades entre 5 074 y 5 659 hm³, lo equivalente al 68 y 77%, respectivamente. En el mismo periodo, la extracción de agua subterránea incrementó para el suministro de la industria en un 68.6% lo que se traduce en un uso de 2 683 hm³ de agua. [1]

Lo que incide en que, de los 653 acuíferos que México reporta, 115 de ellos presentan sobreexplotación, situación fomentada por la extracción de agua. Además, se estima que en 69 de las 757 cuencas hidrológicas existentes, surja una situación de déficit, ya que el caudal concesionado es mayor que el agua renovable. [2]

La fragilidad de los acuíferos se debe a que, el agua se renueva muy lentamente a diferencia de los cuerpos de agua superficial, como ríos y lagos, teniendo periodos muy largos para renovarse. Y en algunos casos no son renovables, ya que se encuentran a grandes profundidades. De modo que, si se explotan sin control podrían agotarse definitivamente. [3]

En consecuencia, el agotamiento de los niveles de las aguas subterráneas compromete a la desaparición de manantiales, vegetación nativa, humedales, lagos, gasto base de ríos y ecosistemas locales, aunado a esto, se afecta el rendimiento de los pozos y la disminución del gasto, lo que conlleva a que los costos de extracción se incrementen. [4]

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) los sectores de la industria y la energía eléctrica aumentarán su demanda mundial de agua en un 24% para el 2050. También se menciona que en zonas donde se presente estrés hídrico afectará la escasez de

agua, por la disminución de agua devuelta al ciclo hidrológico. Los principales riesgos que la industria y sector de energía eléctrica enfrentarán será la escasez de agua, inundaciones, sequías y estrés hídrico, por lo que es necesario desarrollo medidas de adaptación y mitigación para contrarrestar estas repercusiones sustanciales. [5]

Con el objetivo de reducir costos, disminuir la extracción de agua de pozo profundo y mitigar los impactos ambientales asociados con las descargas de aguas residuales de una empresa automotriz situada en el estado de Puebla, se busca proponer estrategias de mejora que incrementen la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales y como resultado el efluente cumpla con los parámetros de calidad establecidos en normativa oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual es un requisito legal en el país para el uso de aguas residuales tratadas en servicios al público con contacto directo o indirecto. Esta estrategia de tratamiento permitiría a la empresa reutilizar el agua tratada en el riego de áreas verdes y torres de enfriamiento, reduciendo así su dependencia del agua de pozo profundo y disminuyendo los impactos ambientales en la explotación de agua subterránea, y en las descargas de aguas residuales.

2. Justificación

México, como miembro de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) debe trabajar en diferentes campos como normativas, programas, tecnologías en orden de dar cumplimiento a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que contempla 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), 169 metas y 230 indicadores globales, con el fin de orientar acciones multisectoriales a favor de las personas, la preservación del planeta, la prosperidad económica en disminución de desigualdades, así como fomentar la paz y las alianzas. [6]

En cuanto al desarrollo sostenible, se presenta como un proceso donde las necesidades presentes y futuras pueden ser satisfechas mediante la conservación de la vida y la salud del hombre, lo que implica contar con educación de avanzada,

crecimiento económico, modernidad y avances tecnológicos sin comprometer el ambiente y por el contrario, protegerlo. Uno de los puntos clave a considerar en el desarrollo sostenible es el manejo del agua, así pues, el manejo sostenible del agua requiere de acciones que cumplan y se adapten con la sociedad, viabilidad económica y la correcta gestión para salvaguardar el medio ambiente, apuntando a la búsqueda de soluciones no convencionales.

Relacionándose así el reúso del agua tratada como una de las acciones que favorecen el desarrollo sostenible. La manera segura de reutilizar el agua es tener acceso a una amplia variedad de tecnologías que sean capaces de eliminar eficazmente los contaminantes presentes en las aguas residuales. Es importante tener en cuenta que no existe una tecnología tan eficaz de eliminar todos los tipos de contaminantes, pero si existen conjuntos de procesos tecnológicos que pueden reducir la concentración de cualquier contaminante a niveles aceptables para cualquier uso del agua. [7]

El propósito fundamental del tratamiento de aguas consiste en salvaguardar la salud y fomentar el bienestar de los miembros de la sociedad. Al reintegrar las aguas residuales a los ríos o lagos, la humanidad se convierte en usuario directo o indirecto de ellas, y conforme la población incrementa, surge la necesidad de establecer sistemas de tratamiento o renovación que posibiliten la eliminación de los riesgos para la salud y la reducción de los daños ambientales. [8]

El reúso de aguas residuales tratadas impacta 3 de los 17 ODS de la Agenda 2030. En primer lugar, el Objetivo 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y saneamiento para todos. En segundo lugar, el Objetivo 9, que promueve la construcción de infraestructuras resilientes y la industrialización sostenible. Por último, el Objetivo 12, que busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

La temática en cuestión aporta en la búsqueda de estrategias de aprovechamiento del agua para el desarrollo sostenible de una empresa automotriz considerando el reúso de aguas residuales tratadas con el fin de poder emplear el agua tratada

una o más veces antes de ser descargada a cuerpos de agua nacionales que actualmente presentan bajos índices de calidad, de modo que esta acción repercutirá en la reducción del elevado consumo de extracción de agua en pozo profundo y disminuirá las descargas de aguas residuales. En el marco del compromiso social, se busca contribuir con medidas que permitan la adaptación de la industria automotriz al cambio climático y la protección del medio ambiente, garantizando que las generaciones futuras puedan disfrutar de una vida plena y sostenible.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer mejoras en el sistema de tratamiento final del agua residual de una empresa del sector automotriz para el aprovechamiento de su efluente acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

3.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar el efluente de la planta biológica de tratamiento de agua residual de una industria automotriz de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Evaluar la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento biológica de aguas residuales mediante una lista de verificación.
- Proponer estrategias de mejora al tratamiento final de las aguas residuales para su aprovechamiento.

4. Hipótesis

Las condiciones de operación actuales de la planta de tratamiento biológico de la empresa del sector automotriz de estudio cumplen con los requerimientos de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para el aprovechamiento de su efluente.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

5. Problemática del agua y su relación con la industria

A nivel mundial la industria usa alrededor del 19% del agua extraída, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Se proyecta que la demanda global de agua para la industria manufacturera tendrá un aumento del 400% en un periodo desde el 2000 al 2050. [9]

Para que cualquier negocio logre un desempeño exitoso, es necesario asegurar el acceso a buena fuente de abastecimiento con buena calidad, lo cual se ha visto afectado debido a la incertidumbre e imprevisibilidad, así como la creciente variabilidad de la recarga de aguas subterráneas y superficiales, consecuencia del cambio climático. El panorama de los efectos del cambio climático prevén que tanto en las zonas secas y en las regiones subtropicales sufrirán de estrés hídrico. Esto impactará sin lugar a duda los sectores de la generación de energía y la industria, incluyendo sus cadenas de suministro.

El estrés hídrico amenaza la generación de energía, tan solo a través de la falta de agua. Esto afecta en el suministro de materias primas o en las cadenas de suministro, a su vez al transporte, la comunicación, líneas de transmisión e incluso tuberías.

Otras afectaciones financieras a las empresas en cuanto a la escasez de agua es no poder asegurar su rentabilidad en países con bajos ingresos de agua, propensos al estrés hídrico, empeorado por el cambio climático.

Ahora bien, las empresas pueden tomar medidas ante el riesgo de la escasez de agua, pudiendo adoptar la gestión circular del agua, donde el uso de este recurso no sigue un proceso lineal con creciente contaminación por la descarga de aguas residuales, si no, convirtiéndolo en un proceso circular, donde el agua se recircula continuamente. Según el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés), la gestión circular del agua se

caracteriza por reducir, reutilizar, reciclar, restaurar y recuperar, buscando un enfoque de las 5R, como se observa en la *figura 1*. Además, la recuperación de las aguas residuales es parte del razonamiento de la economía circular, alineándose con la filosofía de evitar o minimizar la generación de desechos. [5]



Figura 1. Gestión circular del agua

Fuente: Tomado de [5]

6. Adaptación corporativa

Debido al estrés hídrico, los negocios buscan combatir los riesgos a través de la adaptación al cambio climático con la reutilización y la eficiencia del agua, según datos del WBCSD en 2017. Las tecnologías actualmente conocidas se basan en el conjunto de separación de fases, precipitación, flotación, tratamiento biológico, filtración y separación, y en algunos casos dependiendo del nivel de tratamiento requerido, en soluciones basadas en la naturaleza como humedales artificiales.

El éxito en construir un futuro seguro del agua requerirá que las empresas reestructuren sus modelos de negocio, productos y prácticas, en orden de separar la producción y el consumo del agotamiento de los recursos hídricos. Hacer frente

a la crisis global de agua y clima, además de mejorar la gestión del agua, se ejercería una mejor gestión empresarial. [5]

7. Estrategias de aprovechamiento de Aguas Residuales Tratadas

Las aguas residuales presentan una composición diversa que varía según la actividad y el propósito para los cuales fueron generadas, lo que resulta en fluctuaciones en las concentraciones de contaminantes. En general, se puede afirmar que estas aguas contienen elementos como materia orgánica, organismos patógenos, grasas y aceites, nutrientes, así como contaminantes tóxicos tanto orgánicos como inorgánicos, además de minerales disueltos.

En cualquier proyecto de reutilización, la primera etapa crucial es la caracterización del agua residual. Este proceso implica la toma y análisis de muestras de agua para evaluar parámetros físicos, químicos y biológicos que determinarán su calidad y, por consiguiente, su aptitud para el aprovechamiento. [10]

Agricultura

La agricultura, como la principal consumidora de agua, está adoptando cada vez más la práctica de utilizar agua residual urbana tratada para la irrigación en todo el mundo. La utilización del agua residual parcialmente tratada en la agricultura beneficia a conservar, ampliar y gestionar más íntegramente los recursos hídricos disponibles. Además, los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno presentes en el agua residual tratada pueden tener un gran valor para los agricultores. Dependiendo de la tecnología de tratamiento utilizada, los niveles de fósforo y nitrógeno en los efluentes de aguas residuales tratadas pueden ser significativamente altos, lo que podría mejorar tanto el rendimiento como el tamaño de los cultivos. No obstante, la reutilización del agua residual conlleva riesgos, como los de salud pública, aspectos agronómicos y preocupaciones ambientales, si no se planifica, gestiona y ejecuta adecuadamente. [11]

Riego de Campos de Golf y Campos Recreativos

Las "Directrices de Reutilización del Agua de 2004" (EPA, 2004) señalaron el riego de campos de golf como una práctica común en la reutilización del agua urbana. Aunque este uso sigue siendo atractivo, ya que grandes cantidades pueden beneficiar a un solo usuario, es esencial que los planificadores consideren prácticas operativas y tomen precauciones.

El riego de parques públicos, centros recreativos, campos deportivos, patios escolares, campos de juego y áreas verdes alrededor de edificios públicos también desempeña un papel significativo en la reutilización del agua. Las consideraciones para el riego de estas áreas son similares a las de los campos de golf. [12]

Embalses

El uso del agua recuperada en el mantenimiento de embalses abarca desde la creación de obstáculos acuáticos en campos de golf hasta la construcción a gran escala de embalses recreativos con actividades que involucran contacto incidental (pesca y navegación) y contacto corporal completo (natación y vadear). En lo que respecta a la calidad del agua para la reutilización recreativa que implica contacto corporal, la EPA ha establecido criterios de calidad del agua recreativa desde 1986 para las aguas superficiales que reciben efluentes. Estos criterios fueron desarrollados con el propósito de salvaguardar a los nadadores de posibles enfermedades resultantes de la exposición a patógenos en aguas recreativas. [12]

Reutilización Ambiental e Industrial

La reutilización ambiental incluye principalmente el uso de agua recuperada para apoyar humedales y para complementar los flujos de arroyos y ríos.

Desde la publicación de las Directrices de Reutilización del Agua de 2004, se ha observado un crecimiento en el uso industrial de agua recuperada en diversas industrias, que abarcan desde la electrónica hasta el procesamiento de alimentos, y una adopción más amplia por parte de la industria de generación de energía. En los últimos años, estas industrias han incorporado el uso de agua recuperada para diversas aplicaciones, que van desde el agua de proceso y la alimentación de calderas hasta el uso en torres de enfriamiento, así como las descargas de inodoros y la irrigación de áreas. [12]

La ejecución de la mayoría de los proyectos grandes de reutilización aguas residuales, se realiza a través de diversas modalidades de asociaciones público-privadas, utilizando una combinación de financiamiento tanto público como privado. Se presentan algunos ejemplos de casos de reutilización de aguas residuales en la *Tabla 1*. [11]

Tabla 1. Ejemplos de reutilización de aguas residuales

Caso	
México: San Luis Potosí	Agua residual tratada para la industria (para el enfriamiento de la central eléctrica), agricultura (riego de 500 hectáreas) y conservación ambiental (mejora de los humedales) como parte del plan integral de saneamiento y reutilización del agua residual.
México: Atotonilco de Tula	Agua residual tratada reutilizada para agricultura (irrigación Valle Mezquital). Autogeneración de energía con biogás para cubrir alrededor del 60% de las necesidades de energía.
Egipto: Cairo, New Cairo	Agua tratada reutilizada para agricultura.
Sudáfrica: Durban	Agua residual tratada vendida para propósitos industriales: Modi (industria de papel) y SAPREF (refinería)
Perú: Arequipa, Cerro Verde	Reutilización del agua residual tratada para industria minera
India: Nagpur	Agua residual tratada reutilizada para enfriamiento en la central eléctrica.

Fuente: [11]

8. Aguas residuales: contaminantes parámetro

La molécula de agua pura se compone por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno. Sin embargo, el agua existente en el planeta presenta diversas características físicas, químicas y biológicas que determinan la calidad del agua y de esto, el propósito para su uso adecuado o inadecuado. [13]

La producción de residuos generados por las actividades humanas es inevitable. Una parte significativa de estos residuos termina en las aguas residuales. La cantidad y calidad de las aguas residuales es determinada por varios factores. No todos los seres humanos o industrias generan la misma cantidad de residuos. La cantidad y tipo de residuos que se producen en los hogares se ve influenciada por el comportamiento, estilo y nivel de vida de los habitantes, así como por el marco técnico y jurídico en el que las personas se encuentran. [14]

Tipos de aguas residuales:

- Aguas residuales domésticas
- Aguas residuales de instituciones
- Aguas residuales industriales
- Infiltración en el sistema de alcantarillado
- Pluviales
- Lixiviados
- Aguas residuales de fosas sépticas. [14]

La interrelación que existe entre el cambio climático y la salud tiene graves impactos, muchos de estos están relacionados con el agua. El reúso de aguas residuales tratadas es una alternativa confiable para contrarrestar los impactos del cambio climático. Sin embargo, existen riesgos para la salud humana y ambiental si se trata el agua de manera deficiente, por la carga microbiana y los contaminantes emergentes que incluye el agua recuperada. [5]

Las descargas de aguas residuales (AR) afectan la calidad de los cuerpos receptores, a continuación se presenta en la *Tabla 2* los contaminantes de importancia en las aguas residuales. [8]

Tabla 2. Contaminantes y su importancia en las aguas residuales.

Contaminante	Causa de su importancia
Sólidos suspendidos	Pueden conducir al desarrollo de depósitos de lodos y condiciones anaerobias cuando se descargan AR crudas en un medio acuático
Materia orgánica biodegradable	Está compuesta principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas. Se mide en términos de DBO y DQO por lo general. Si no es previamente removida puede producir agotamiento del OD de la fuente receptora y desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Producen enfermedad.
Nutrientes	El C, N y P son nutrientes. Cuando se descargan en las aguas residuales pueden producir crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando se descargan en cantidades excesivas sobre el suelo pueden producir polución del agua subterránea.
Materia orgánica refractaria	Resiste tratamiento convencional. Ejemplos: detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Proviene de aguas residuales comerciales e industriales y es posible que deban ser removidos para reúso del agua.
Sólidos inorgánicos disueltos	Algunos como el calcio, sodio y sulfatos son agregados al suministro doméstico original como resultado del uso y es posible que deban ser removidos para el reúso del agua.

Fuente: Adaptado de [8]

8.1 Sólidos

El contenido de sólidos en el agua tiene un efecto directo en la cantidad de lodo producido en el sistema de tratamiento o disposición. Los sólidos totales en una muestra de agua son el residuo después de la evaporación y el secado. Los sólidos sedimentables miden el volumen de los sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff en una hora y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple. Los sólidos disueltos son el material soluble y coloidal que a menudo requiere oxidación biológica o coagulación y sedimentación para su remoción. Los sólidos suspendidos son la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos filtrados. Los sólidos volátiles son la fracción orgánica que se volatiliza a una temperatura de $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$ y su medición es crucial en los lodos. [8]

8.2 Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos oxiden la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. También se utiliza como parámetro en la evaluación de la calidad de aguas residuales y superficiales. Además, es ampliamente utilizado para diseñar sistemas de tratamiento biológico, medir la eficiencia de los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras. [8]

8.3 Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno es una medida útil de la cantidad de compuestos orgánicos en aguas residuales industriales o municipales que son tóxicas para la vida biológica, y se puede ser medido en aproximadamente tres horas.

La DQO se utiliza para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica biodegradable en una muestra de agua, usando un agente oxidante fuerte, generalmente dicromato de potasio, en un medio ácido y alta temperatura. [8]

8.4 Coliformes fecales

La detección y reconocimiento de microorganismos patógenos en aguas residuales es un proceso complejo, por lo que se utilizan los coliformes fecales como indicadores de la presencia de contaminación o la existencia de organismos patógenos causantes de enfermedades.

La presencia de bacterias coliformes en excrementos humanos permite su detección y uso como un indicador sanitario confiable. Estas bacterias son bacilos gran-negativos, aerobios y facultativos anaerobios, con producción de gas al fermentar la lactosa. El grupo de los coliformes totales incluye a los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*, siendo la especie *E. coli* la más representativa de la contaminación fecal. Sin embargo, algunas *Aerobacter* y *Escherichias* se pueden encontrar en el suelo pero no siempre indica contaminación fecal.

Los coliformes se encuentran en los excrementos humanos, por lo tanto, su presencia puede detectarse con facilidad y utilizarse como norma de control sanitario. [8]

8.5 Grasas y aceites

Se consideran grasas y aceites a los compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno que flotan en el agua residual, recubren las superficies y causan problemas de mantenimiento. Estas sustancias son solubles en hexano, que se utiliza para extraerlas. La presencia de grasas y aceite en el agua residual puede interferir con la actividad biológica porque son difíciles de biodegradar. Sin embargo, los aceites y grasas de origen vegetal y animal son biodegradables. Por otro lado, los aceites y grasas de origen mineral pueden ser no biodegradables y requieren pretratamiento antes de someterlos a tratamiento biológico. En resumen, la presencia de grasas y aceites en el agua residual puede tener un impacto significativo en la calidad del agua y los procesos de tratamiento, y es importante identificar su origen para seleccionar el tratamiento adecuado. [8]

9. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

De acuerdo con la 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. Se presentan 5 parámetros a medir: Coliformes fecales, Huevos de Helminto, Grasas y aceites, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y Sólidos Suspendidos Totales, con límites máximos permisibles de cada contaminante para cada tipo de reúso, como se muestra en la *Tabla 3*, con el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud de la población. [15]

Cada parámetro tiene su propio método de prueba, en caso de la normatividad mexicana se estandariza con las normas procedimentales NMX, a excepción de los Huevos de Helminto, que su método de prueba se anexa en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes

		Promedio mensual				
		Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y aceites m/l	DBO ₅ mg/l	SST/mg/l
Métodos de prueba		NMX-AA-042	Anexo 1 NOM-003-SEMARNAT-1997	NMX-AA-005	NMX-AA-028	NMX-AA-034
Tipos de reúso	Servicios al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
	Servicios al público con contacto Indirecto u ocasional	1,000	≤5	15	30	30

Fuente: Adaptado de [11]

10. ¿Qué es el Tratamiento de Aguas Residuales?

La mayoría de los compuestos que podemos encontrar en las aguas residuales no son el objetivo principal del tratamiento, pero contribuyen a la toxicidad de las aguas residuales, ya sea en relación con los procesos biológicos de tratamiento o a las aguas receptoras. Las sustancias que se encuentran en el efluente podrían terminar en un sistema de abastecimiento de agua potable, dependiendo de si se trata de extracción de agua superficial. Los metales presentes en las aguas residuales pueden influir en la posibilidad de reutilización de los lodos de tratamiento de aguas residuales como abono para cultivos. [14]

Las aguas residuales se tratan a través de una serie de barreras en el proceso de tratamiento, que es la combinación de procesos unitarios utilizados en el sistema. La misión principal de la planta de tratamiento de aguas residuales (y del operador) es tratar el flujo de residuos a un nivel de pureza aceptable para devolverlo al medio ambiente o para su reutilización inmediata. [16]

11. Clasificación de Métodos de Tratamiento de Aguas Residuales

Los compuestos encontrados en las aguas residuales son eliminados mediante métodos físicos, químicos y biológicos. Los métodos individuales generalmente se clasifican como procesos unitarios físicos, químicos y biológicos.

11.1 Procesos unitarios físicos

Se trata de los métodos en los cuales se aplican las fuerzas físicas. Estos métodos surgen a partir de las observaciones directas del hombre en la naturaleza, siendo los primeros tratamientos de aguas residuales en utilizarse, como el tamizado, la mezcla, la floculación, la sedimentación, la flotación, la filtración y la adsorción.

11.2 Procesos unitarios químicos

Los procesos unitarios químicos son métodos de tratamiento en los cuales la eliminación de compuestos se logra mediante la introducción de productos químicos o la realización de otras reacciones químicas. La precipitación, la transferencia de gas, la adsorción y la desinfección son ejemplos de estos procesos químicos. Durante el tratamiento, se forma un precipitado químico que puede ser eliminado mediante sedimentación, filtración o procesos de membrana. En la mayoría de los casos, el precipitado resultante contendrá tanto los compuestos que reaccionaron con los productos químicos añadidos como los compuestos que fueron arrastrados fuera del agua residual a medida que se sedimentaba el precipitado. Un ejemplo común de transferencia de gas es la adición de oxígeno al agua para respaldar reacciones aeróbicas. Asimismo, el uso de cloro para desinfectar aguas residuales, una práctica que ha estado en vigencia por más de un siglo, es otro proceso químico común. [17]

11.3 Proceso unitario biológico

Los procedimientos de tratamiento en los cuales la eliminación de compuestos se logra mediante la actividad biológica se denominan procesos unitarios biológicos. El tratamiento biológico se emplea principalmente para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables, ya sean coloidales o disueltas, presentes en las aguas residuales. Fundamentalmente, estas sustancias se transforman en (a) gases que pueden liberarse en la atmósfera y (b) tejido celular biológico que puede eliminarse mediante sedimentación u otro proceso de separación sólida. Además, el tratamiento biológico se utiliza para la eliminación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales. Con un control ambiental adecuado, en la mayoría de los casos, es posible tratar las aguas residuales de manera biológica. Por ende, es responsabilidad del ingeniero garantizar que se genere y controle un entorno apropiado de manera efectiva para lograr todos los objetivos del tratamiento. [17]

11.4 Procesamiento de aguas residuales

Para alcanzar la eliminación de compuestos, se agrupan diversos procesos unitarios, a lo que se conoce como tratamiento primario, secundario, terciario y avanzado. El término "primario" se refiere a la aplicación de procesos unitarios físicos, mientras que "secundario" se refiere a procesos unitarios químicos y biológicos, y "terciario" se relaciona con la combinación de los tres. Aunque es importante destacar que estos términos son arbitrarios. En general, la complejidad del diagrama de flujo del proceso de tratamiento dependerá de los compuestos que deben eliminarse y de los niveles requeridos de eliminación. En la *Tabla 4* se muestran algunos métodos aplicables a la eliminación de compuestos.

En cuanto a los niveles de tratamiento de aguas residuales:

Preliminar: Eliminación de constituyentes de aguas residuales como trapos, palos, objetos flotantes, arena y grasa que pueden causar problemas de mantenimiento u operativos en las operaciones, procesos y sistemas auxiliares de tratamiento.

Primario: Eliminación de una parte de los sólidos en suspensión y materia orgánica del agua residual.

Secundario: Eliminación de materia orgánica biodegradable (en solución o suspensión) y sólidos en suspensión. La desinfección suele estar incluida en la definición de tratamiento secundario convencional.

Terciario: Eliminación de sólidos en suspensión residuales (después del tratamiento secundario), generalmente mediante filtros de medio granular, filtros de tela o microcribas. La desinfección suele formar parte del tratamiento terciario. La eliminación de nutrientes a menudo se incluye en esta definición.

Avanzado: Eliminación de materiales disueltos y en suspensión que quedan después del tratamiento biológico normal, cuando es necesario para diversas aplicaciones de reutilización del agua. [17]

Tratamiento de residuos sólidos retenidos y lodos producidos

El manejo de las aguas residuales produce diversos desechos como resultado de las operaciones y procesos involucrados. Los residuos sólidos comprenden principalmente los materiales retenidos en las cámaras de rejillas y desarenadores. En los sedimentadores, tanto primarios como secundarios, se generan lodos con una alta concentración de materia orgánica e inorgánica que se acumulan en las tolvas de sedimentadores y deben ser retirados regularmente. La fracción de residuos sólidos retenidos en el pretratamiento puede ser adecuadamente dispuesta en un vertedero sanitario autorizado oficialmente. Por otro lado, antes de su disposición final, los lodos generados en los procesos de tratamiento deben ser acondicionados y tratados. Debido a su elevado contenido de materia orgánica putrescible, los lodos suelen someterse a deshidratación y, cuando es posible, a un tratamiento especial mediante procesos biológicos como la digestión anaerobia, digestión aerobia, oxidación, compostaje e incineración. [18]

La depuración de aguas residuales se lleva a cabo normalmente en tanques o reactores donde se dan procesos físicos, químicos y biológicos. Los tipos principales de reactores empleados en el tratamiento de aguas residuales incluyen reactor de lotes, reactor de flujo tubular o reactor de flujo pistón, reactor agitado de tanque de flujo continuo o mezcla completa y reactor de flujo arbitrario. [19]

Tabla 4. Procesos unitarios utilizados para la eliminación de constituyentes de interés presentes en las aguas residuales

Constituyentes	Procesos unitarios
<u>Sólidos suspendidos</u>	Cribado Eliminación de arena Sedimentación y clarificación de alta velocidad Flotación Precipitación química con sedimentación Filtración en profundidad Filtración en superficie Filtración mediante membranas.
<u>Materia orgánica</u>	Variaciones aeróbicas de crecimiento suspendido Variaciones aeróbicas de crecimiento adherido Sistemas físico-químicos Oxidación química Oxidación avanzada Filtración mediante membranas.
<u>Nutrientes, Nitrógeno</u>	Oxidación química (cloración de punto de quiebre) Nitrificación y desnitrificación en crecimiento suspendido Variación de nitrificación y desnitrificación de crecimiento adherido Desgasificación Intercambio iónico.
<u>Fósforo</u>	Precipitación química Eliminación biológica de fósforo.
<u>Nitrógeno y fósforo</u>	Variación en la eliminación de nutrientes biológicos.
<u>Patógenos</u>	Compuestos de cloro Dióxido de cloro Ozono Radiación UV Tratamiento térmico (pasteurización).
<u>Sólidos coloidales y disueltos</u>	Membranas Tratamiento químico Adsorción de carbono Intercambio iónico.
<u>Compuestos orgánicos volátiles</u>	Desgasificación Adsorción de carbono Oxidación avanzada.
<u>Olores</u>	Lavadores químicos Adsorción de carbono Biofiltros de goteo Filtros de composta

Fuente: Adaptado de [17]

12. Reactores secuenciales

El reactor de lote secuencial o SBR (por sus siglas en inglés Sequencing Batch Reactor) es un método para el tratamiento de aguas residuales usando el crecimiento suspendido. Se trata de una versión modificada del método de lodos activados. En este caso, es un tanque de retención que recibe una cantidad específica de aguas residuales para su tratamiento. Después de haber tratado dicha cantidad, se libera una parte, permitiendo así el paso a la recolección, tratamiento y descarga de una nueva cantidad de aguas residuales, repitiéndose de manera secuencial. Hay dos tipos de SBR: el de flujo intermitente y el de flujo continuo. [20]

La esencia del proceso SBR reside en su sistema de control. Este sistema integra sensores de nivel, temporizadores y microprocesadores, proporcionando flexibilidad y precisión en la operación del SBR. Al ajustar los tiempos de fase para las reacciones biológicas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas/fermentativas dentro de una secuencia o ciclo específico, se logra el control de la nitrificación, desnitrificación y la eliminación biológica del fósforo. Los SBR se emplean para el tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales e industriales, especialmente en regiones con flujos reducidos o patrones de flujo altamente variables. [20]

Sin embargo, hay varias inconveniencias relacionadas con el SBR, como la pérdida importante de carga a través del sistema, la dificultad para la eliminación de materiales flotantes y el decantado intermitente, que generalmente necesita ser igualado antes de los procesos de tratamiento posteriores, como la filtración y la desinfección. [20]

12.1 Reactor de flujo continuo

Dentro del SBR de flujo continuo, el influente fluye de manera ininterrumpida a lo largo de todas las fases del ciclo. Con el fin de minimizar la posibilidad de

cortocircuitos de contaminantes, se incorpora comúnmente al SBR una partición o barrera que separa la zona de aireación turbulenta de la zona tranquila. [20]

12.2 Reactor secuencial por lotes de flujo intermitente

El SBR de flujo intermitente recibe las aguas residuales o influentes en momentos predeterminados y emplea secuencias temporales o cinco fases durante un ciclo para llevar a cabo diversas operaciones de tratamiento. Estas operaciones son similares a las que realiza el proceso convencional de lodos activados, pero en este caso, se ejecutan en un solo tanque.

Generalmente, se utilizan dos reactores simultáneamente. Debido a que un reactor se cierra al influente durante el tratamiento de un conjunto de aguas residuales, es necesario operar dos reactores en paralelo. En este caso, puede ser llenado una vez con aguas residuales hasta alcanzar su nivel operativo normal, y luego se procede a tratar esas aguas a lo largo de todas las fases de un ciclo. También es factible llenar el mismo reactor con varios lotes pequeños de aguas residuales hasta que se alcance el nivel operativo normal. No obstante, después de introducir cada lote pequeño en el reactor, se lleva a cabo su tratamiento o aireación antes de incorporar el siguiente lote pequeño.

La principal ventaja del proceso por lotes sobre el proceso continuo es su flexibilidad para ajustar las condiciones del reactor mediante controles de tiempo y oxígeno disuelto. Esto facilita mejorar la eficiencia del tratamiento en un SBR al cambiar la duración de las fases, sin necesidad de agregar o quitar tanques de tratamiento como en el proceso continuo. [20]

12.3 Fases del SBR

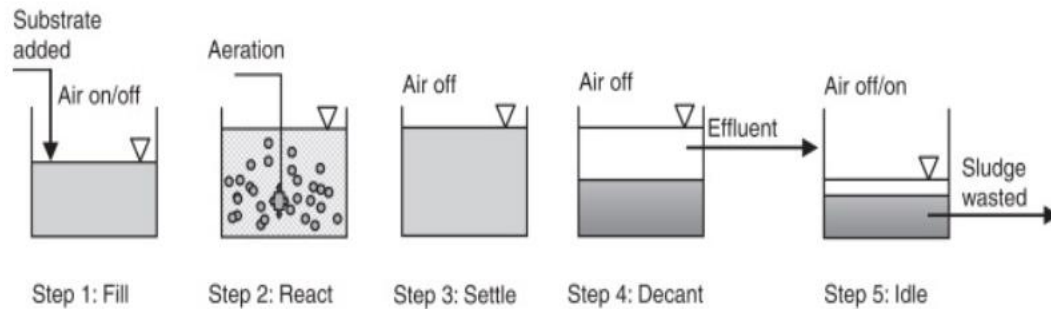


Figura 2. Las 5 fases de un SBR.

Fuente: Tomado de [21]

En la *Figura 2* se muestran las 5 fases de un SBR: Llenado, Reacción, Sedimentación, Decantación y la etapa de Reposo. Durante la etapa de Llenado, se introduce influente al SBR, que puede ser un Llenado aireado, con mezcla o Estático. Cuando se alcanza el nivel normal de llenado, el SBR pasa a la etapa de Reacción o periodo aireado. Después de la aireación, viene la etapa de Sedimentación, donde no hay aireación ni mezcla, permitiendo que los sólidos se depositen y produzcan un sobrenadante de alta calidad. Luego de la etapa de Sedimentación, se retira el sobrenadante durante la etapa de Decantación. Si hay tiempo antes de la siguiente etapa de Llenado, el SBR puede entrar en una etapa de Reposo.

En las PTAR que emplean la tecnología del SBR, comúnmente cuentan con al menos dos tanques SBR. Donde el agua residual cruda llega a un tanque de ecualización, que posteriormente se descarga al SBR1 para la fase de llenado, mientras que el SBR2 está lleno y completando su ciclo, como el ejemplo de la *Figura 3* y cumplir con una sincronización de los ciclos, para garantizar que mientras el SBR1 cumple con sus últimas fases, el SBR2 inicie el llenado, a como se muestra en la *Figura 4*. [20]

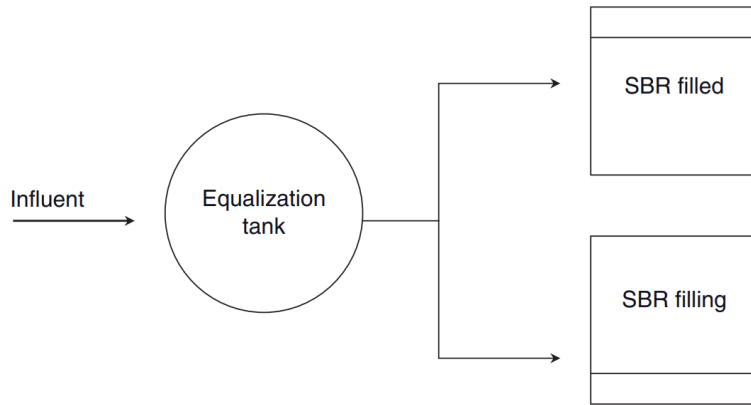


Figura 3. Empleo de dos tanques SBR

Fuente: Tomado de [20]

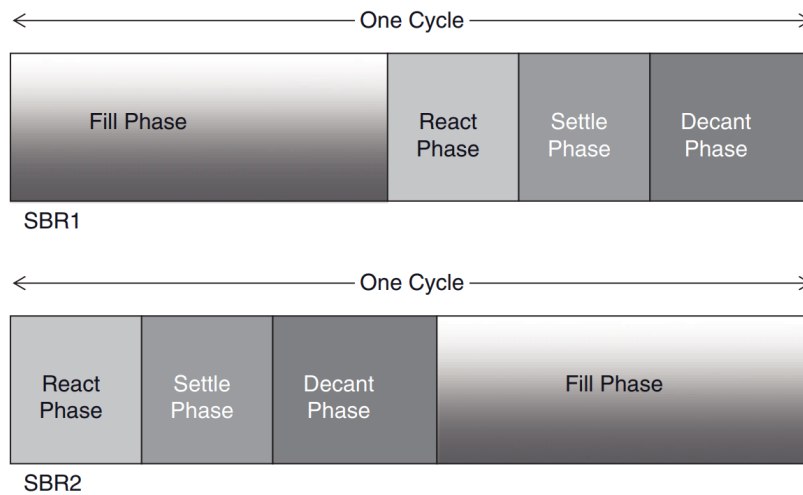


Figura 4. Sincronización de los ciclos de dos tanques SBR

Fuente: Tomado de [20]

12.4 Ciclos del SBR

El número de ciclos y los tiempos de las fases en cada ciclo de un reactor secuencial por lotes (SBR) se determinan por: la cantidad de aguas residuales o flujo a tratar, la fuerza de las aguas residuales, los requisitos de tratamiento y el número de reactores en paralelo disponibles para su uso en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Los factores operativos que determinan el número de ciclos por día son el volumen de aguas residuales a tratar y el tiempo mínimo de tratamiento requerido. Comúnmente un ciclo es completado en un periodo de tiempo de 6 horas a como

se ilustra en la *Figura 5* . Los tiempos de la fase de llenado deben ser iguales a los tiempos de la fase sin llenado para sistemas de doble reactor.

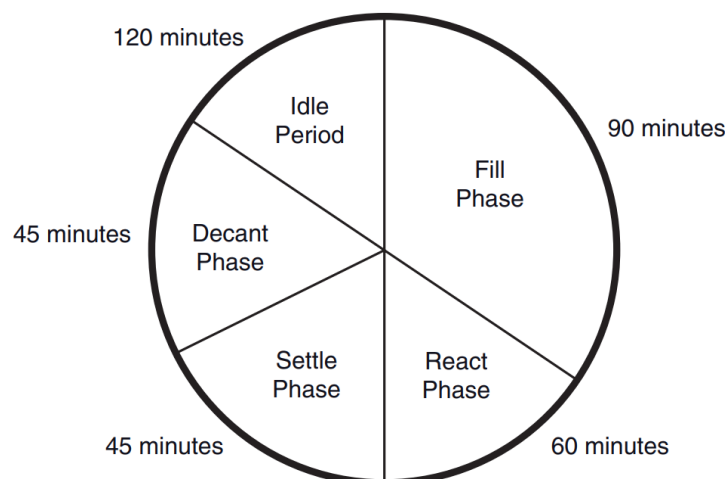


Figura 5. Ciclo de 6 horas de un SBR típico para el tratamiento de aguas domésticas.

Fuente: Tomado de [20]

El número de ciclos diarios y la duración de las fases por ciclo se ven influenciados por dos factores ambientales: las condiciones climáticas frías y las condiciones climáticas húmedas. [20]

Operación en clima frío

La temperatura fría del agua residual afecta fuertemente la eficiencia del tratamiento. Los cambios en la temperatura influyen en cómo trabajan las bacterias en un SBR y afectan la velocidad de procesos clave, como la formación de floculación y la nitrificación. Las bajas temperaturas también favorecen el crecimiento de un organismo que produce espuma llamado *Microthrix parvicella*.

Cuando sube la temperatura, la actividad biológica se acelera, pero si baja mucho la temperatura, la actividad enzimática disminuye, las enzimas se detienen y también se pierde eficiencia en el tratamiento. Cada aumento de 10 °C duplica la velocidad a la que trabajan las enzimas.

La temperatura ideal para un SBR es entre 20 °C y 25 °C. Por lo tanto, si la temperatura baja o está por debajo de los 16 °C, es importante tomar medidas

para asegurar que el tratamiento de aguas residuales sea efectivo y cumpla con los requisitos. Esto es importante para las instalaciones con poco o nulo flujo de agua, sobre todo durante la noche, entre las 11:00 p.m. y las 6:00 a.m.

Algunas medidas operativas que se pueden utilizar para mantener un tratamiento eficiente durante temperaturas bajas de aguas residuales incluyen:

- Aumentar la concentración de sólidos suspendidos volátiles en licor mixto.
- Agregar productos de bioaumentación.
- Agregar coagulante y/o polímero.
- Aumentar el tiempo de reacción para fases específicas.
- Colocar reactores adicionales en línea.
- Reducir la carga de DQO del influente al SBR.
- Aumentar la concentración de oxígeno disuelto.

Puede ser necesario combinar varias medidas operativas en caso de que una medida no sea suficiente. [20]

Operación en condiciones húmedas

Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales con sistemas de alcantarillado combinado y sin medidas para desbordamientos pueden experimentar un aumento significativo en el flujo y filtraciones de agua. Estos problemas afectan negativamente a un SBR de varias maneras, pues aumentan la concentración de oxígeno disuelto, diluyen la carga orgánica (DBO) y reducen la temperatura.

El incremento en la concentración de OD afecta la capacidad del SBR para generar condiciones anóxicas y anaeróbicas durante las fases de llenado mixto y llenado estático, respectivamente.

No obstante, para aprovechar la tecnología SBR, es necesario cumplir con dos requisitos: mejorar el control y capacitación del operador, y contar con dos o más reactores o tanques de pre-ecualización para la operación del proceso y redundancia. [20]

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

13. Área de estudio

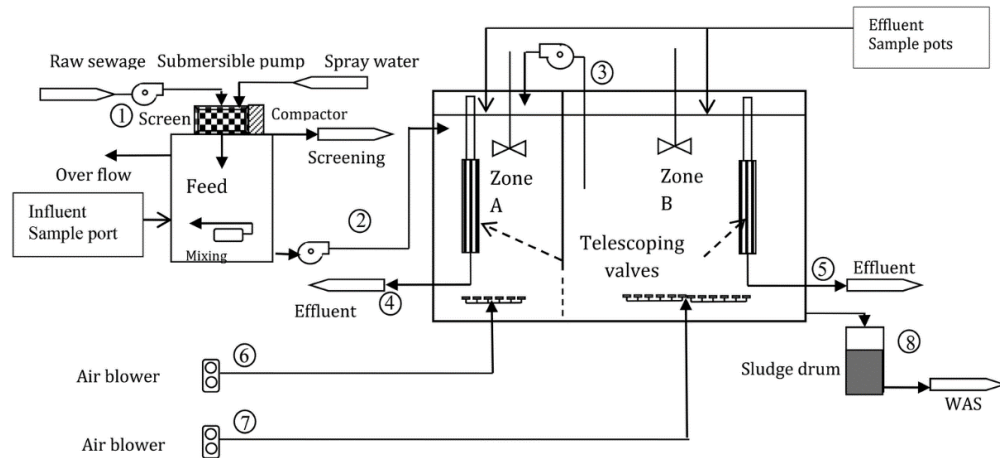
La planta biológica de tratamiento de aguas residuales se encuentra como último proceso del tren de tratamiento, la tecnología empleada se trata de 2 tanques SBR como en la *Figura 6*, los cuales son alimentados por el efluente resultante de dos plantas de tratamiento fisicoquímicas y del agua residual proveniente de los sanitarios, y la descarga final dirigida al Río Atoyac.

El agua llega directamente al tanque ecualizador de entrada de concreto, este tanque tiene la función de recibir el agua y homogenizarla antes de su entrada a los tanques SBR. Dicho tanque cuenta con sensor de nivel y 2 bombas sumergibles

Las bombas sumergibles trabajan de manera alterna, cada una alimentando un reactor SBR para considerar el llenado entre 4-6 horas. Seguidamente, se lleva a cabo un tratamiento biológico en 5 etapas:

1. Llenado: Durante el llenado se tienen los lodos en suspensión constante para asegurar una mezcla homogénea dentro del reactor. Para ello se activa el soplador en intervalos durante todo el tiempo de llenado.
2. Reacción: Durante estas etapas la agitación continúa funcionando y se tiene una entrada de oxígeno que airea el agua. Se cuenta con 2 sopladores para ambos SBRs y se mide continuamente la temperatura y la cantidad de oxígeno presente en reactor.
3. Sedimentación: Una vez que los organismos removieron el material orgánico, se deja de suministrar oxígeno y se detiene la agitación. De esta forma, sin movimiento, el agua permite que los sólidos que se formaron en la etapa anterior se sedimenten.
4. Decantación: En esta etapa se utiliza un decantador para remover el agua clarificada de la superficie. Después del tiempo de sedimentación, una señal activa el decantador para que permita la salida de agua.

5. Purga: Esta etapa se refiere a la remoción de lodos del fondo del reactor. Esta solo ocurre cuando se procede a dar mantenimiento a los tanques y no es una etapa que se lleve a cabo en cada ciclo. Dependerá de los parámetros de diseño del SBR.



① Indicates stream number

Stream 1: Raw Influent

Stream 4&5: Decanted Effluents

Stream 2: SBR Feed

Stream 6&7: Process Air Supply

Stream 3: Internal Recirculation

Stream 8: Waste Activated Sludge (WAS)

Figura 6. Ejemplo de un diagrama de un SBR

Fuente: Tomado de [22]

14. Muestreo

El muestreo de la descarga para la caracterización se realizó de acuerdo con el procedimiento que indica la NMX-AA-003-1980, donde las muestras fueron representativas de las condiciones en el punto y hora de muestreo, siendo el canal Parshall (*Figura 7*) el punto final de descarga del efluente y teniendo el volumen suficiente para efectuar en él las determinaciones correspondientes. [23]



Figura 7. Muestreo del efluente

Fuente: Elvira Vera

La toma de muestras de cada parámetro se realizó en base a cada norma procedimental, resumidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Características del muestreo

	Grasas y Aceites	Coliformes fecales	DBO ₅	Huevos de Helminto	SST
Volumen de análisis	1 L	100 mL	1 L	5 L	600 mL
Tipo de muestra	Simple	Simple	Compuesta o simple	Compuesta	Compuesta o simple
Tipo de recipiente	Vidrio de boca ancha y tapa con contratapa de plástico o metálica.	Frascos o bolsas estériles	Envase de polietileno o vidrio.	Plástico de 8 L	Plástico o vidrio
Preservación de la muestra	Preservarse por acidificación con ácido clorhídrico 1:1 ó ácido sulfúrico 1:1 a un valor de pH de dos o menor.	Con tiosulfato de sodio sólido (10 mg/envase de 100 mL) o con 0,1 mL de disolución estéril al 10 %.			
T° de preservación	4 °C ± 2 °C.	4 °C ± 2 °C	4 °C		4 °C ± 2 °C
Tiempo para análisis	Máximo de 30 días.	Hasta 48 h, conservándola a 2 °C ± 1 °C.	24 h máximo.		7 días

Fuente: Elaboración propia a partir de [15][24][25][26][27]

15. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos

A continuación, se describen los principios de los métodos de prueba a realizar a la muestra de agua residual.

Coliformes fecales

Para la determinación de coliformes fecales se preparó una inoculación de alícuotas en tubos donde las muestras fueron diluidas en un medio líquido selectivo con lactosa (*Figura 9*). Posteriormente fueron incubados a una temperatura de 35°C y pasadas las 24 y 48 horas se evaluó la turbidez y producción de gas, los tubos que presentaron estas características fueron subcultivados en un medio confirmativo más selectivo, estos nuevos subcultivos

fueron incubados a una temperatura de 35°C durante 24 horas para la enumeración de organismos coliformes y subsecuentemente a una temperatura de 44,5°C durante 22 horas, para organismos coliformes termotolerantes y *E. coli*. Finalmente, se calculó el número más probable (NMP) de organismos coliformes, termotolerantes y *E. coli* contenidos en 100 mL de muestra a partir de tubos positivos, el análisis se llevó a cabo utilizando tablas estadísticas [24]. En la *Figura 8* se resume el procedimiento.

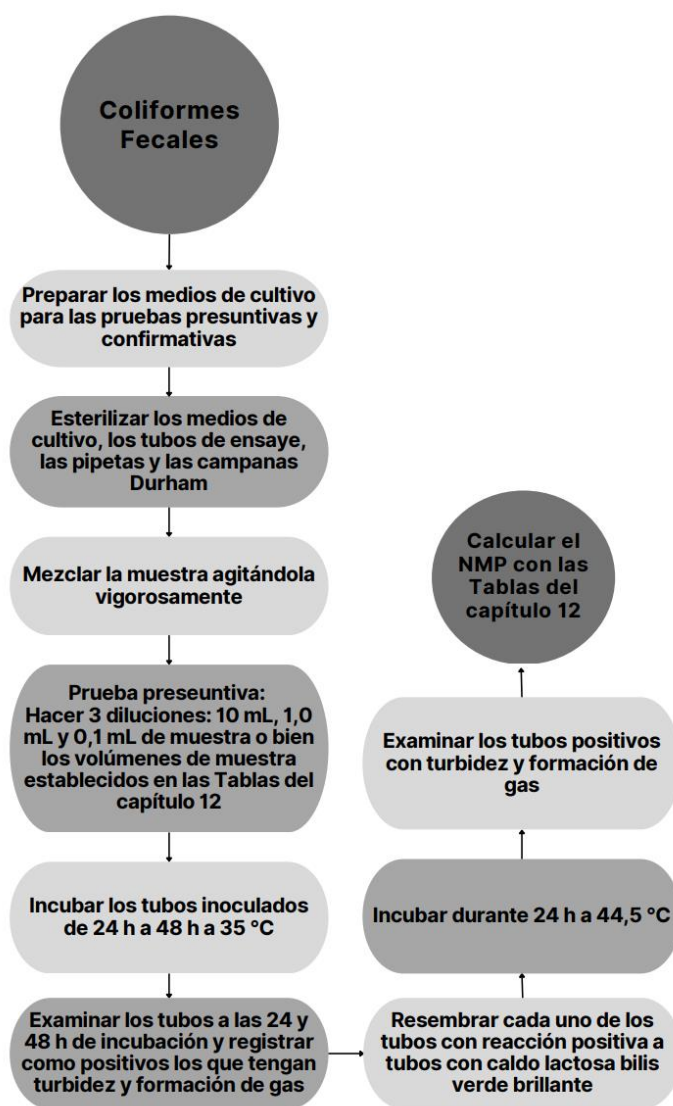


Figura 8. Método de determinación de Coliformes Fecales

Fuente: Elaboración propia a partir de la [24]

Para esta determinación se optó por realizar 5 diluciones de 10 mL, 1 mL y 0,1 mL como lo indica la norma. Tal como se observa en la *Figura 10 y 11* los 30 tubos de ensaye tanto de la prueba presuntiva como de la prueba confirmativa presentan formación de gas en las campanas Durham e incluso formación de nata en la serie de diluciones con mayor concentración de muestra (10 mL) en la prueba confirmativa.

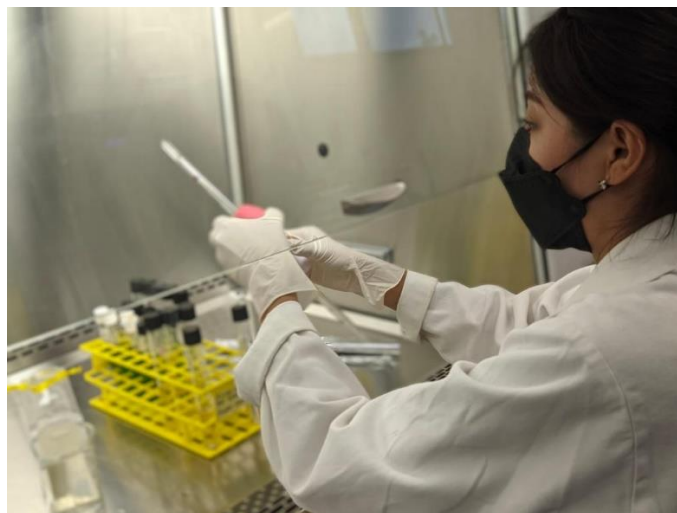


Figura 9. Siembra de la muestra

Fuente: Elvira Vera



Figura 10. Diluciones de 10 mL, 1 mL y 0,1 mL pruebas presuntivas con caldo lactosa

Fuente: Elvira Vera

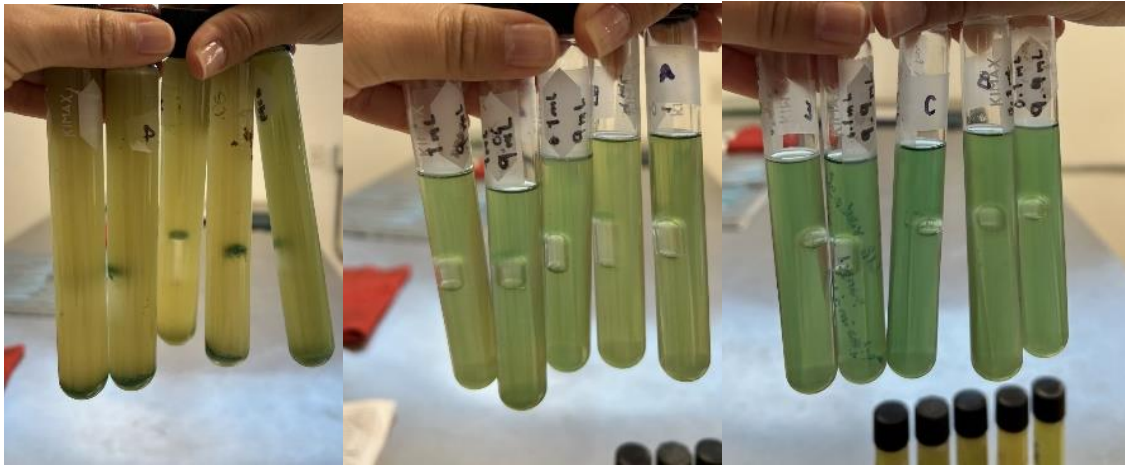


Figura 11. Diluciones de 10 mL, 1 mL y 0,1 mL pruebas presuntivas con caldo lactosa bilis verde brillante.

Fuente: Elvira Vera

La NMX-AA-042-SCFI-2015 indica que para conocer el número más probable por cada 100 mL de muestra (NMP/ 100 mL) se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$NMP/100\text{ mL} = \frac{10}{V} \times F(NMP/100\text{ mL}) \quad (1)$$

Donde la variable F se obtuvo consultando la tabla 12.2 de la NMX-AA-042-SCFI-2015 (*Figura 12*) al resultar positivos los 5 tubos de cada dilución, en ambas pruebas, se tiene entonces un valor de ≥ 1800 NMP por 100 mL y el volumen total utilizado para inocular fue de 55.5 mL.

Número de tubos que dieron reacción positiva			NMP por 100 mL	Límite de confianza al 95 %	
5 de 10 mL	5 de 1 mL	5 de 0,1 mL		Inferior	Superior
5	3	1	110	31	250
5	3	2	140	37	340
5	3	3	180	44	500
5	4	0	130	35	300
5	4	1	170	43	490
5	4	2	220	57	700
5	4	3	280	90	850
5	4	4	350	120	1 000
5	5	0	240	68	750
5	5	1	350	120	1 000
5	5	2	540	180	1 400
5	5	3	920	300	3200
5	5	4	1600	640	5800
5	5	5	≥ 1800	-	-

Figura 12. Valores de NMP por cada 100 mL de muestra y 95 % de límite de confianza (cuando se utilizan cinco alícuotas de muestra de 10 mL, cinco de 1 mL y cinco de 0,1 mL).

Fuente: Tomado de [24]

$$\frac{10}{55.5 \text{ mL}} \times (1800 \text{ NMP} / 100 \text{ mL})$$

$$= 324.32 \text{ NMP} / 100 \text{ mL}$$

Huevos de Helminto

El análisis de los huevos de helminto se realizó mediante el método difásico y de flotación. En primer lugar, la muestra se sedimentó durante toda la noche, para posteriormente aspirar el sobrenadante, el cual se filtró, centrifugó, decantó en una solución de sulfato de zinc (ZnSO_4), se repitieron algunos pasos previos para después resuspender la muestra en una solución de alcohol, ácido y éter. El sedimento fue distribuido en una celda Sedwich-Rafter, y se continuó con un

barrido al microscopio, para finalmente, realizar los cálculos correspondientes [11]. En la *Figura 13* se resume el procedimiento.

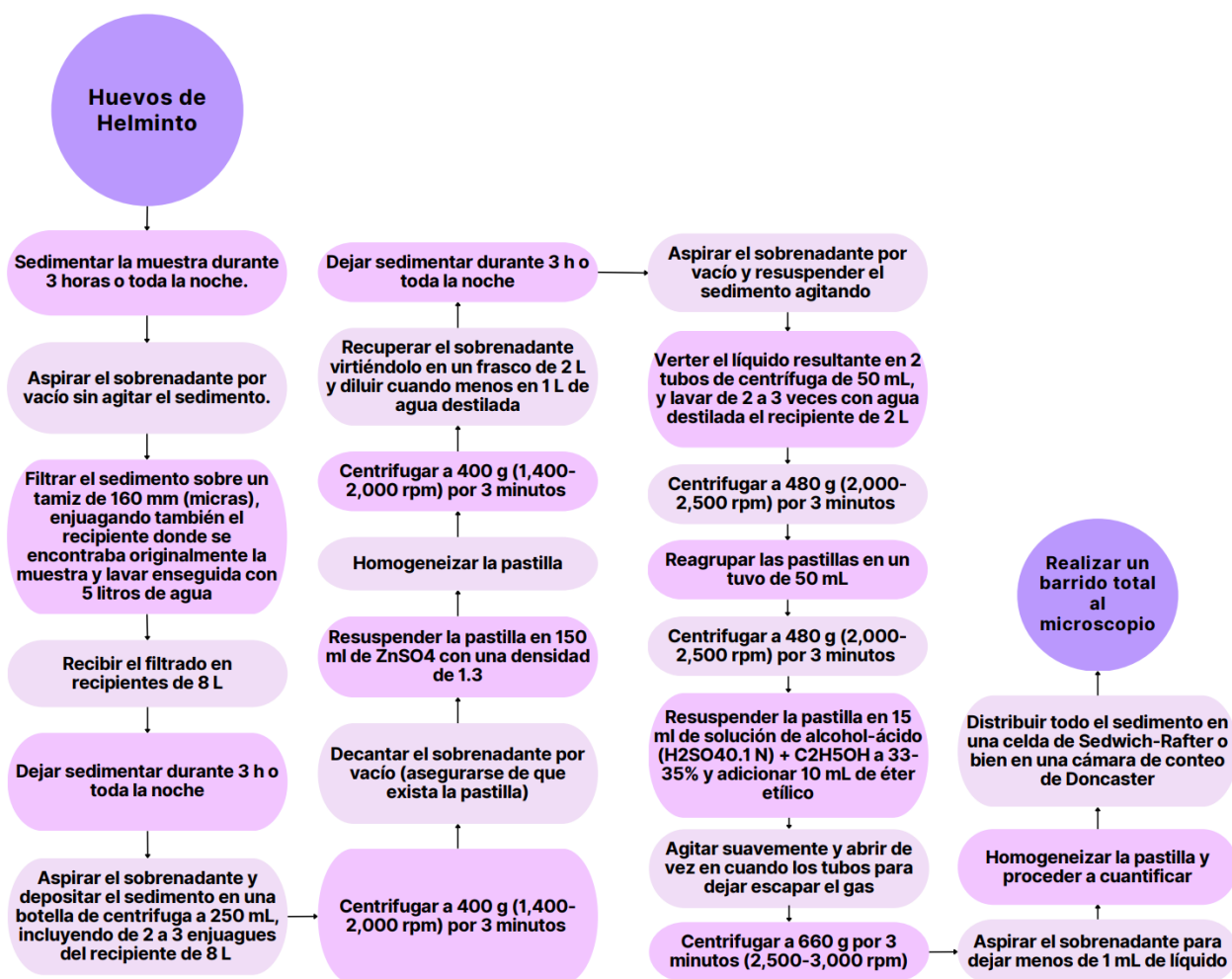


Figura 13. Método de determinación de Huevos de Helminto

Fuente: Elaboración propia a partir de [11]

Grasas y Aceites

En esta determinación, las grasas y aceites fueron adsorbidas en una solución de tierra de diatomeas, posteriormente, se extrajo en un equipo de extracción por recirculación empleando etanol como disolvente. Después de la extracción, el etanol fue evaporado y, finalmente, pesado el residuo final del recipiente utilizado

para conocer el valor del contenido de grasas y aceites [14]. En la *Figura 14* se resume el procedimiento.

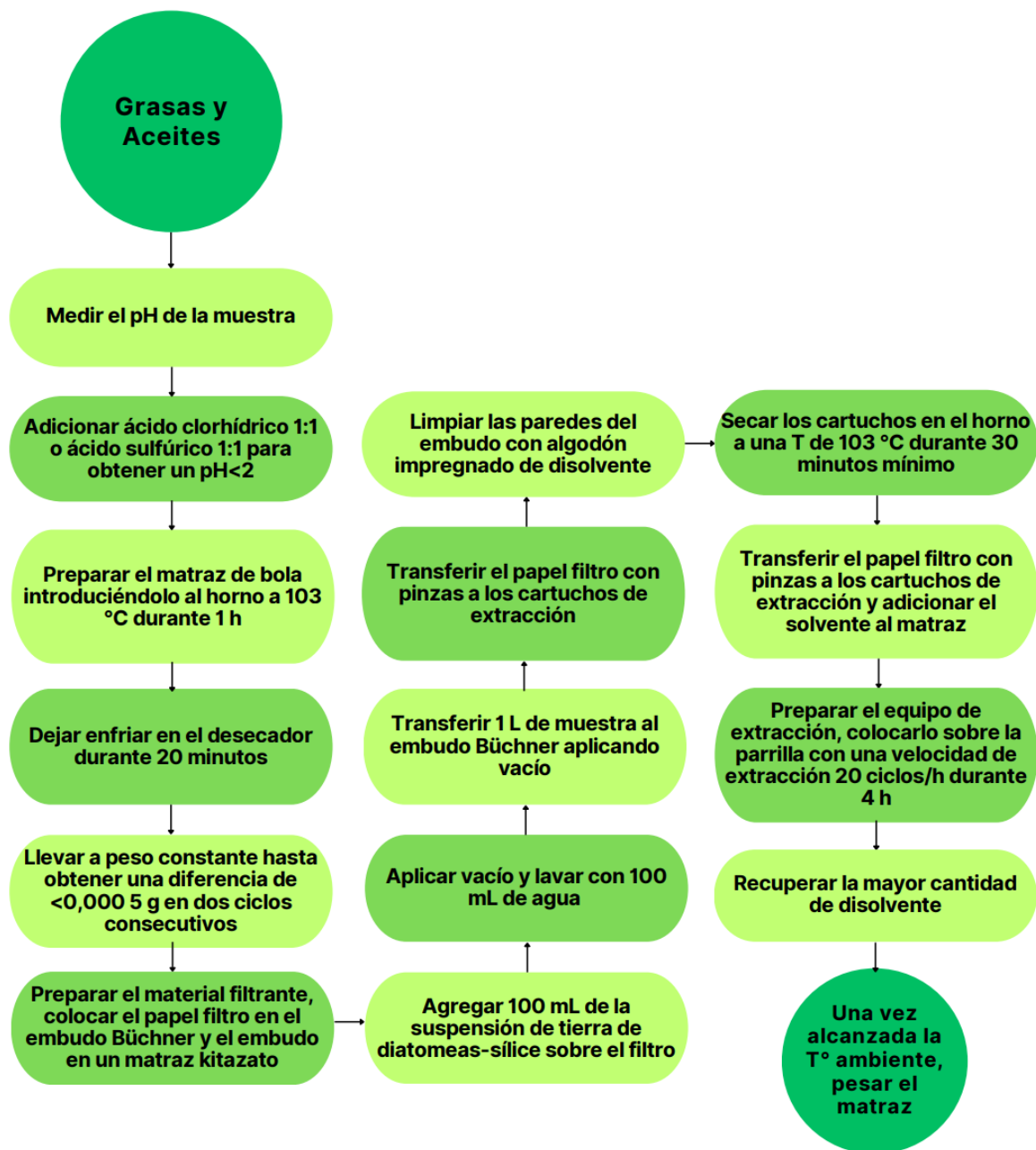


Figura 14. Método de determinación de Grasas y Aceites

Fuente: Elaboración propia a partir de [14]

Para este parámetro se realizó la determinación por duplicado (*Figura 15*), siguiendo la NMX-AA-005-SCFI-2013, se utilizó la ecuación 2 para el cálculo de las grasas y aceites, en la *Tabla 6* se muestran los pesos de los matraces, y el procedimiento y los resultados se muestran a continuación:



Figura 15. Proceso de recirculación para la extracción de grasas y aceites

Fuente: Elvira Vera

$$GYA = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} - \text{Blanco} \quad (2)$$

Tabla 6. Pesos de los matraces

		Matraz 1	Matraz 2
Peso constante	m_1	111.9179 g	115.3448 g
	m_2	111.9193 g	115.3456 g
	m_i	111.9198 g	115.3460 g
	m_f	111.9516 g	115.3653 g

$$\text{Matraz 1} = \frac{(111\,951.6\,mg - 111\,919.8\,mg)}{1\,L} - 0$$

$$31.8\,mg/L$$

$$\text{Matraz 2} = \frac{(115\,365.3\,mg - 115\,346\,mg)}{1\,L} - 0$$

$$19.3\,mg/L$$

Finalmente, se promediaron ambos resultados y se obtuvo un valor de 25.55 mg/L, el cual al superar el LMP de 15 mg/L no da cumplimiento a la NOM-003-SEMARNAT-1997

Demanda Bioquímica de Oxígeno

A partir del muestreo, se midió el oxígeno disuelto inicial por el método yodométrico (*Figura 16*) , se preservó la muestra durante 5 días a una temperatura de 20°C, y se realizó nuevamente la medición del oxígeno disuelto [15]. En la *Figura 17* se resume el procedimiento.

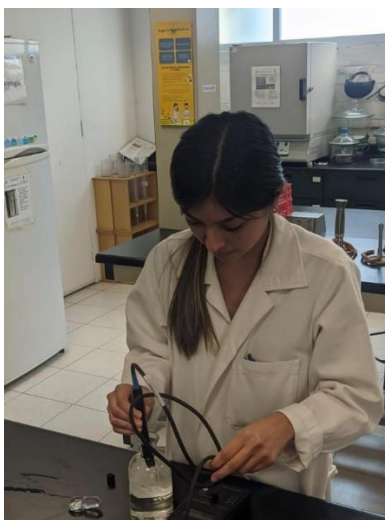


Figura 16. Medición de DBO₅

Fuente: Elvira Vera

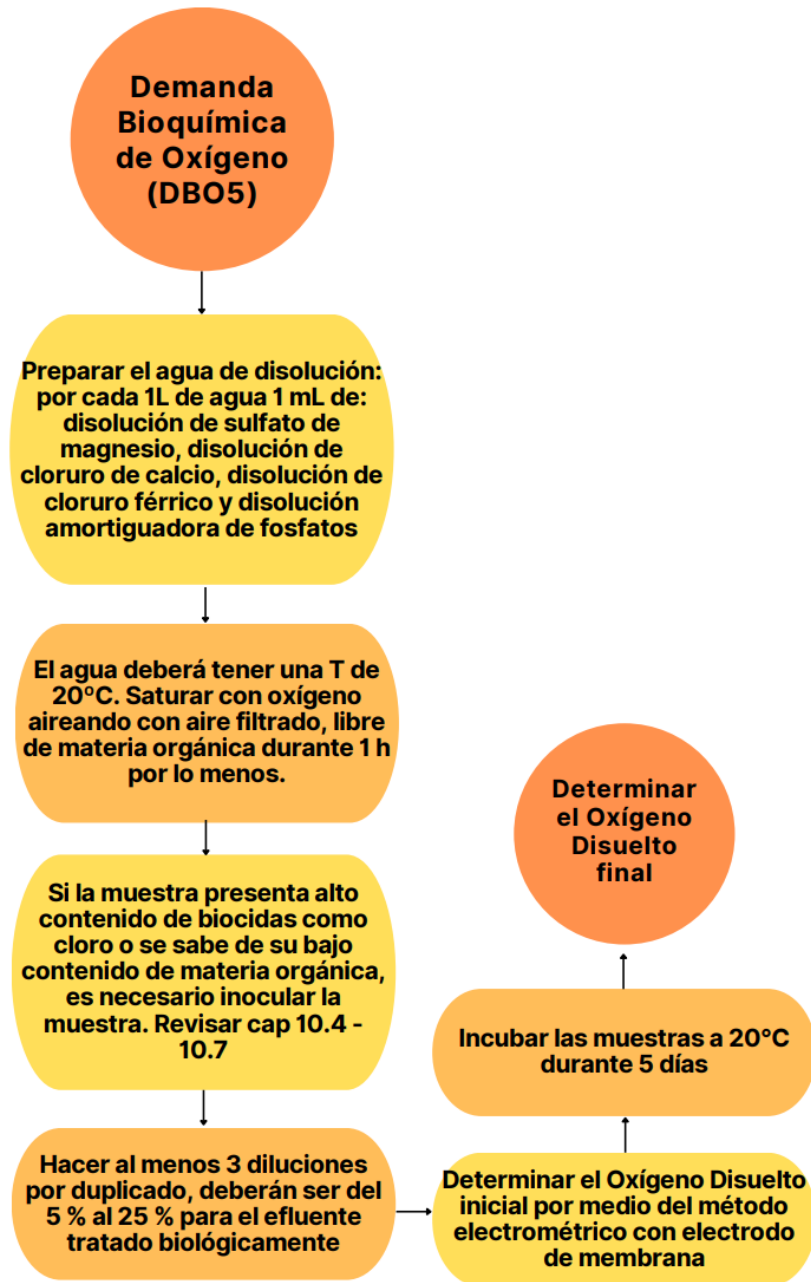


Figura 17. Método de determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅

Fuente: Elaboración propia a partir de [15]

Bajo las indicaciones de la NMX-AA-028-SCFI-2000 para determinar la técnica de dilución al ser una muestra de agua de un efluente con tratamiento biológico el rango de dilución es entre el 5 al 25%, por lo que se utilizaron los siguientes

porcentajes de dilución: 5, 15 y 25% con su respectivo duplicado como se muestra en la *Figura 18*.



Figura 18. Botellas Winkler con diluciones del 5, 15 y 25%

Fuente: Elvira Vera

La ecuación utilizada en caso de emplear una dilución es la siguiente:

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{OD_i \frac{mg}{L} - OD_5 \frac{mg}{L}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}} \quad (3)$$

El porcentaje de dilución de 25% arrojó los valores más significativos, por lo que aplicando la ecuación 3 resulta lo siguiente:

Oxígeno disuelto inicial:

$$1) 25\% = 2.2 \frac{mg}{L}$$

$$2) 25\% = 2.5 \frac{mg}{L}$$

Oxígeno disuelto final:

$$1) 25\% = 0.9 \frac{mg}{L}$$

$$2) 25\% = 0.9 \frac{mg}{L}$$

$$1) DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{2.2 - 0.9}{0.25}$$

$$DBO_5 = 5.2 \frac{mg}{L}$$

$$2) DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{2.5 - 0.9}{0.25}$$

$$DBO_5 = 6.4 \frac{mg}{L}$$

Sólidos Suspendidos Totales

La determinación de los SST se realizó mediante el método gravimétrico, donde se realizó la evaporación y calcinación de la muestra previamente filtrada, después las cenizas fueron pesadas como base de cálculo del contenido de los SST [16]. En la *Figura 19* se muestra el inicio del procedimiento (medición del volumen utilizado). En la *Figura 20* se resume el procedimiento.



Figura 19. Determinación de SST

Fuente: Elvira Vera

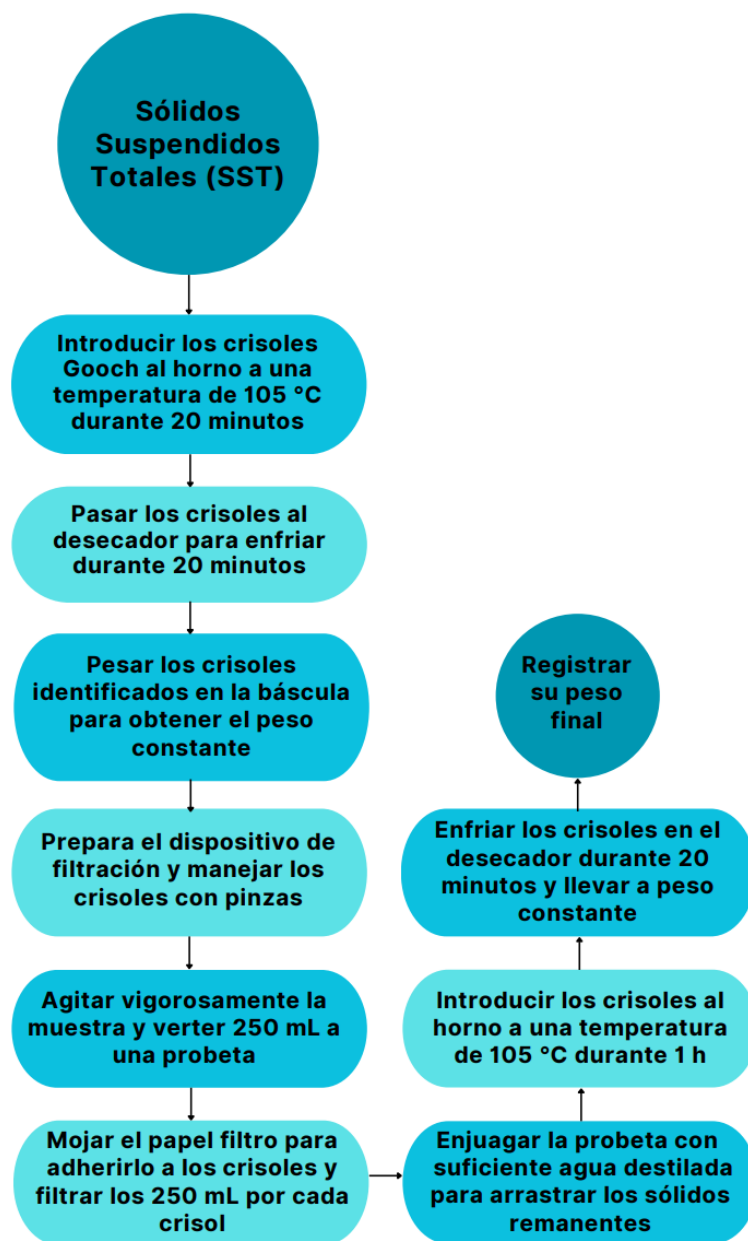


Figura 20. Método de determinación de los Sólidos Suspendidos Totales SST

Fuente: Elaboración propia a partir de [34]

Por último, en la medición de los SST con 2 reproducciones, utilizando un volumen de 250 mL, se empleó la ecuación 4 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Peso constante

	Crisol 1:	Crisol 2:
$m_1 =$	120.0905 g	21.4522 g
$m_i =$	20.0910 g	21.4528 g
$m_f =$	20.0913 g	21.4533 g

$$SST = \frac{(m_f - m_i)}{v} 1\,000\,000 \quad (4)$$

$$Crisol\ 1 = \frac{(20.0913 - 20.0910)}{250\ mL} 1\,000\,000$$

$$SST_1 = 1.2\ mg/L$$

$$Crisol\ 2 = \frac{(21.4533 - 21.4528)}{250\ mL} 1\,000\,000$$

$$SST_2 = 2\ mg/L$$

16. Evaluación de la operación y mantenimiento de planta mediante lista de verificación

Se aplicó una lista modificada (Tabla 7) de “*Guideline for the inspection of wastewater treatment works: Report to the Water Research Commission*” [28] con la intención de conocer los proceso, tareas y actividades de mantenimiento de la planta.

Tabla 7. *Lista de verificación de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento biológico de aguas residuales*

Sedimentación	Si/No	Observaciones
El flujo es adecuado para la sedimentación		
Hay presencia de espuma o lodos flotantes		
Existe capa de grasas o aceites		
El sistema de extracción de lodos está operando		
Hay un programa para el desazolve y se sigue adecuadamente		
El lodo es negro y presenta olores sépticos		
Los aireadores están funcionando, si no ¿por cuánto tiempo han dejado de operar?		
Existe un programa de operación para los aireadores		
¿Qué tan frecuente se realiza la descarga de lodos del primer estanque anaerobio? ¿Qué se hace con el lodo? ¿Hay algún estanque en paralelo donde el influente es desviado mientras ocurre el desazolve?		
Las fallas son registradas y reportadas		

Seguridad Ocupacional		
Se cuenta con barandales de seguridad		
Reacción		
Se monitorea la edad del lodo		
Hay espuma en la superficie		
Visualmente hay buena formación de flóculos		
Se percibe olor a tierra		
El color del lodo es marrón claro		
Se realiza dosificación química ¿Qué químicos?		
Dentro del proceso se realiza un monitoreo de: Demanda Química de Oxígeno (DQO) Nitratos Amonio Oxígeno Disuelto (OD) Sólidos Suspendidos (SS) Sólidos Suspendidos Totales (SS) pH Ortofosfato		
El equipo electrónico y de campo se encuentra calibrado		
Se disponen de los certificados de calibración de los equipos electrónicos y de campo		
Los aireadores funcionan, si no ¿por cuánto tiempo no han estado operando?		
Existe un programa de encendido y apagado de los aireadores		
No hay puntos muertos en la cuenca de aireación		

El flujo hacia los reactores es medido		
No hay ruidos ni vibraciones extrañas relacionadas a alguna de las bombas/motores		
Hay bombas de reserva disponibles si alguna entra a reparación		
Todas las fallas son registradas y reportadas		
Las piezas de repuesto esenciales están disponibles		
Seguridad ocupacional		
Los señalamientos de seguridad son claramente visibles		
Se dispone de equipos de seguridad Barandales adecuados		
Clarificación		
El equipo de extracción de lodo está en funcionamiento. Si no, ¿por cuánto tiempo no ha estado operando?		
El vertedero/canal del efluente está limpio		
Existe un programa de desazolve al que se le da seguimiento		
Seguridad ocupacional		
Se perciben olores inusuales/desagradables		
Se dispone de equipo de seguridad necesario		
Desinfección		
Qué tipo de químicos son dosificados?		
El equipo de dosificación está trabajando correctamente, de lo contrario la desinfección está siendo llevada a cabo de otra forma?		

La persona encargada de llevar el manejo de los procesos ha sido entrenada correctamente. Existe algún certificado que lo pruebe?		
Se está dosificando productos con cloro, el cloro residual está siendo medido en el efluente final?		
El tanque de dosificación está libre de alga		
La calidad del efluente final cumple con los requisitos para autorizar el uso del agua		
Seguridad Ocupacional		
Los químicos utilizados son guardados en un lugar seguro		
El tiempo inactivo de los equipos es registrado		
Se tiene un contrato de mantenimiento con el proveedor del equipo de dosificación		
Señalética en los químicos utilizados en la dosificación son visibles		
El personal cuenta con el correcto Equipo de Protección Personal (EPP)		

Fuente: Modificado de [28]

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

17. Resultados del muestreo

En la toma de muestras no se observó ningún rastro de materia flotante, la conductividad al momento de medición fue de 2.13 mS, lo que equivale a 2130 $\mu\text{S/cm}$, entrando en el rango de conductividad eléctrica de las aguas residuales de 2000 hasta 4000 $\mu\text{S/cm}$ establecido por la Unión Europea. [29] Por otro lado el Oxígeno Disuelto se reportó en 4.6 mg/L. Los niveles de oxígeno disuelto (OD) en aguas naturales y residuales son influenciados por las actividades físicas, químicas y bioquímicas en un cuerpo de agua. El análisis de OD desempeña un papel fundamental en el control del proceso de tratamiento de residuos y en la evaluación de la contaminación del agua. [30] Los valores van desde 0 y 0.25, si es superior a 7 mg/L, el agua es apta para todos los usos, y en el caso de no contener oxígeno disuelto no tiene utilidad alguna para los seres vivos [31].

En la *Tabla 8* se presenta el resto de las características de los parámetros muestreados.

Tabla 8. Hoja de campo

Nombre completo o razón social del usuario: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla								
Nombre del muestreador: Elvira Vera Aguilar					Identificación de la descarga: Descarga final PTAR biológica			
Fecha de inicio del muestreo: 17/05/23					Fecha de final del muestreo: 17/05/23			
Descripción del punto de muestreo: Canal parshall								
Núm. muestra	Tipo de muestra	Hora	Parámetro	Tipo de envase	Volumen	Preservación	pH	T°
1	Simple	1:02 pm	Grasas y aceites	Vidrio	1 L	H2SO4 1:1	7.70	25.3 °C
1	Simple	1:07 pm	Sólidos Suspendidos Totales	Vidrio	600 mL	NA	7.70	25.3 °C
1	Simple	1:10 pm	DBO5	Vidrio	1 L	NA	7.70	25.3 °C
1	Simple	1:15 pm	Coliformes fecales	Bolsa estéril	100 mL	NA	7.70	25.3 °C
1	Simple	1:23 pm	Huevos de Helminto	Botella de plástica	8 L	NA	7.70	25.3 °C

Fuente: [32]

18. Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Con forme a los análisis practicados, el resultado de coliformes fecales es de 324.32 NMP/100 mL en la muestra de la PTAR biológica. Por lo que en comparación al LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997, el valor obtenido es menor a 1 000 NMP/ 100 mL, indicando que el tratamiento biológico actual es óptimo para el cumplimiento de la norma pudiendo hacer el reúso del agua tratada solo en servicios al público con contacto indirecto u ocasional.

Habiendo hecho el conteo de los huevos de Helminto en la cámara Sedwich-Rafter, no se obtuvo ninguna presencia de huevos en el barrido al microscopio en la muestra de 10 L utilizada. Por lo tanto, este parámetro da cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana al tener menos de 5 huevos de Helminto.

Los resultados de los análisis de grasas y aceites revelan que no cumplen con el LMP de 15 mg/L, ya que el valor obtenido fue de 25.55 mg/L. Este hallazgo indica un exceso significativo en la concentración de grasas y aceites, lo cual señala la necesidad de implementar medidas correctivas para garantizar el cumplimiento de la normatividad mexicana para la reutilización de aguas residuales tratadas.

De la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, en ambas reproducciones de la determinación se obtuvo un valor menor a 30 mg/L, por lo que este parámetro da cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana en cuestión.

Por último, los resultados de los Sólidos Suspendidos Totales indican que se encuentran en niveles óptimos, cumpliendo con los estándares establecidos.

En la *Tabla 9* se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las determinaciones realizadas contra los Límites Máximos Permisibles indicados en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 9. Resumen de resultados y valores LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997

Parámetro	Resultados	LMP NOM-003-SEMARNAT-1997	Cumplimiento
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	324.32	1,000	Si cumple
Huevos de Helminto (h/L)	0	≤5	Si cumple
Grasas y aceites (mg/L)	25.55	15	No cumple
DBO ₅ (mg/L)	6.4	30	Si cumple
SST (mg/L)	2	30	Si cumple

Fuente: Elaboración propia respecto a [15]

19. Resultados de la aplicación de la lista de verificación

El llenado de los SBRs se realiza por tiempo o volumen, se cuentan con bombas de reservas en caso de fallas, las fallas son registradas en bitácoras y al taller de mantenimiento, también se cuenta con piezas de repuesto esenciales. Para la etapa de reacción se dosifica un nutriente.

En la etapa de aireación se percibe formación de espuma blanca y olor a tierra, cada aireador opera 14 horas al día, teniendo una operación continua a excepción del momento del mantenimiento, no hay puntos muertos en la cuenca de aireación. En la sedimentación se observa buena formación de flóculos, los lodos llegan a cumplir una edad de 18 días. Seguidamente en la Decantación, el equipo de extracción de lodos opera 5 min al día, también se cuenta con un programa de desazolve anual. Existe un monitoreo de COD, nitratos, amonio, OD, SS, SST, pH y ortofosfatos.

Para la descarga del efluente se verifica diariamente el correcto funcionamiento del equipo de dosificación para una concentración de 1.5 mg/L de hipoclorito y que el canal del efluente se encuentre limpio y libre de algas.

Los equipos utilizados cuentan con certificados de calibración disponibles y con pólizas de servicios, la planta no cuenta con tiempos inactivos. Las personas encargadas de la Planta cuentan con perfiles y evidencias de sus conocimientos. Se cuenta con equipo de protección personal definidos de acuerdo con los análisis de riesgos de la empresa automotriz, barandales en todos los tanques, señaléticas.

Con la finalidad de brindar estrategias de mejora al sistema del tratamiento final de agua residual de la empresa del sector automotriz para el parámetro de Grasas y aceites, y así impulsar el aprovechamiento de su efluente de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, se realizó una revisión de la literatura el cual se presenta a continuación.

20. Solución de problemas para la producción de espuma y nata

La generación de espuma en un reactor secuencial por lotes surge debido a la actividad bacteriana no deseada o a la liberación de productos químicos. La espuma está constituida por aire o burbujas de gas que quedan atrapadas bajo una fina capa de sólidos. Los gases comúnmente presentes en la espuma son resultado de la degradación bacteriana de la DBO e incluyen dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y óxido nitroso (N_2O).

Existen varias condiciones operativas que son responsables de la producción de espuma en un SBR. Estas condiciones incluyen:

- Tasas erráticas de desecho de lodos.
- Crecimiento no deseado de organismos filamentosos productores de espuma.
- Deficiencia de nutrientes.
- Envejecimiento de los lodos, incluida la edad joven de los lodos.
- Descarga repentina de DBO soluble.
- Exceso de tensoactivos.

- Exceso de polímero.
- Floculación viscosa o crecimiento Zoogloeal.
- Exceso de sólidos finos.

La espuma en un SBR puede ser descrita por su textura y color *Tabla 10*.

Tabla 10. Producción de espuma en un SBR

Condiciones operativas contribuyentes	Color y textura
Tasas erráticas de desecho de lodos	Círculos concéntricos de espuma viscosa marrón oscuro y marrón claro viscoso aparecen después de la terminación de la aireación y mezcla.
Organismos filamentosos productores de espuma	Marrón chocolate viscoso
Deficiencia de nutrientes	Gris grasoso (lodos antiguos) o blanco esponjoso (lodos jóvenes)
Envejecimiento de lodos	Con el aumento de la edad de los lodos: blanco esponjoso a blanco nítido, a marrón nítido a marrón oscuro viscoso.
Descarga repentina de DBO soluble	Blanco esponjoso
Exceso de polímero	Blanco esponjoso
Exceso de sólidos finos	Gris similar a pómez

Fuente: [20]

Con el aumento de la edad de los lodos, la espuma se vuelve más viscosa y de un color más oscuro; con la disminución de la edad de los lodos, la espuma se vuelve más esponjosa y de un color más claro.

Cuando el aire y las burbujas de gas escapan de la espuma, esta colapsa. La espuma colapsada a menudo se denomina nata. Es importante no confundir la espuma colapsada con el desarrollo de una nata marrón "escamosa" en la superficie de la decantación. En este último caso, la nata marrón escamosa o el jabón pueden manifestarse tras la muerte de grandes cantidades de bacterias, sin que haya aire ni burbujas de gas atrapados debajo de la nata.

Cuando las bacterias mueren, experimentan autólisis, es decir, se rompen. Debido a la autólisis, muchos de los componentes intracelulares de las bacterias se liberan en la solución. Algunos de los componentes son ácidos grasos. Los ácidos grasos son compuestos orgánicos de cadena corta, como el formiato (CH_3COOH), el acetato (CH_3CHOOH) y el propionato ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$). Cuando los ácidos grasos se combinan con iones de calcio (Ca^{2+}) en la solución, se produce un jabón insoluble. Las bacterias mueren en grandes cantidades por dos razones. Primero, mueren de hambre cuando no hay un sustrato adecuado presente. Segundo, experimentan toxicidad. [20]

20.1 Tasas erráticas de desecho de lodo

Eliminar o desechar con frecuencia cantidades altamente variables de sólidos o sólidos en suspensión en licor de mezcla (MLSS) de un SBR durante varias semanas puede resultar en la formación de "focos" de crecimiento bacteriano joven y antiguo. Debido a que las bacterias jóvenes no generan grandes cantidades de aceites en comparación con las bacterias antiguas, las burbujas de aire y gas atrapadas por los sólidos jóvenes y antiguos dan como resultado la producción de espuma diferente para cada población bacteriana. La espuma producida por las bacterias jóvenes es viscosa y de color marrón claro, mientras que la generada por las bacterias antiguas es viscosa y de color marrón oscuro. Al detener la aireación y la mezcla, se pueden observar círculos concéntricos de espuma marrón claro y marrón oscuro en un SBR. [20]

20.2 Organismos filamentosos productores de espuma

Hay tres organismos filamentosos que producen la espuma característica de color marrón chocolate viscosa, estos organismos son: *Microthrix parvicella*, *Nocardioformes* y el tipo 1863.

La producción de espuma por parte de los organismos filamentosos puede deberse a la secreción de compuestos hidrofóbicos o a la generación de lípidos y

biosurfactantes. Por ejemplo, *Microthrix parvicella* produce compuestos hidrofóbicos que capturan aire y burbujas de gas, generando así espuma. Los *Nocardioformes* vivos producen lípidos que recubren las partículas floculadas y atrapan aire y burbujas de gas, mientras que los *Nocardioformes* muertos experimentan autólisis y liberan biosurfactantes que modifican la tensión superficial del agua residual, facilitando la producción de espuma. [20]

20.3 Deficiencia de nutrientes

Cuando hay deficiencia de nutrientes, las bacterias presentes en las partículas floculadas absorben la DBO soluble. Sin embargo, debido a la ausencia de nitrógeno o fósforo, la DBO soluble no puede degradarse, y se convierte en un polisacárido insoluble que se almacena fuera de las bacterias. Cuando los nutrientes vuelven a estar disponibles, los polisacáridos almacenados se vuelven solubles y se descomponen. Hasta que los polisacáridos se solubilizan, retienen aire y burbujas de gas, dando como resultado la generación de espuma al realizar la mezcla.

La corrección de deficiencias de nutrientes se realiza comúnmente mediante la adición de compuestos químicos que liberan amonio en caso de deficiencia de nitrógeno y ortofosfato en caso de deficiencia de fósforo. Los productos químicos disponibles para abordar una deficiencia de nutrientes en nitrógeno y fósforo se detallan en la *Tabla 11*. [20]

Tabla 11. Compuestos químicos apropiados para la adición de nutrientes

Nutriente faltante	Nombre común	Fórmula
Nitrógeno	Amoníaco anhidro	NH_3
	Amoníaco acuoso	NH_4OH
	Bicarbonato de amonio	NH_4HCO_3
	Carbonato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$
	Cloruro de amonio	NH_4Cl
	Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Fósforo	Fosfato trisódico	Na_3PO_4
	Fosfato disódico	Na_2HPO_4
	Fosfato monosódico	NaH_2PO_4
	Hexametáfosfato de sodio	$\text{Na}_3(\text{PO})_6$
	Tripolifosfato de sodio	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$
	Pirofosfato tetrasódico	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$
	Ácido fosfórico	H_3PO_4
Nitrógeno y/o fósforo	Fosfato de amonio	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Fuente:[20]

20.4 Envejecimiento del lodo

La formación de espuma blanca y esponjosa ocurre en lodos jóvenes cuando la población bacteriana es relativamente pequeña, por ejemplo, $< 1000 \text{ mg/L}$ de MLVSS. Con un tamaño de población reducido, las bacterias no pueden degradar eficazmente los tensoactivos que ingresan al SBR, lo que resulta en la aparición de la espuma blanca y esponjosa. Las condiciones operativas que simulan un lodo joven y permiten el desarrollo de esta espuma a partir de tensoactivos incluyen (1) inhibición o toxicidad, (2) recuperación de la inhibición o toxicidad y (3) desperdicio excesivo de sólidos (MLVSS). Cuando hay una concentración adecuada de MLVSS ($> 1000 \text{ mg/L}$) presente, las bacterias en el licor mezclado pueden degradar los tensoactivos, dando lugar a una espuma blanca y nítida. [20]

21. Mecanismo de reducción de grasas en SBR

Para separar el aceite mezclado del agua, se utilizan en diversas industrias varios tipos de oil skimmer (desnatadores de aceite). [33]

Un oil skimmer se encargará de extraer el aceite del agua sin provocar daños en el equipo utilizado para tal fin. Este oil skimmer rotará de forma constante y eliminará el aceite de una mezcla de agua y aceite gracias a las propiedades adhesivas del aceite hacia el material de la correa.

En ausencia de agitación, el aceite se separa del agua y flota en la superficie, siendo clasificado como LNAPL (líquido no acuoso de fase ligera, por sus siglas en inglés). Aquellos aceites (y otros compuestos) que se hunden en el agua debido a una gravedad específica superior son denominados DNAPL (líquido no acuoso de fase densa).

Por lo general, el aceite tiene una mayor afinidad hacia sí mismo y otros materiales que hacia el agua. Esta afinidad y las disparidades en la tensión superficial entre el aceite y el agua provocan que los aceites se adhieran a un desnatador de aceite. [34]



Figura 21. Oil Skimmer

Fuente: Tomado de [35]

El principio básico de un oil skimmer es que cuando el material absorbente se mueve en el agua contaminada, atrae el aceite del agua y luego se elimina con la ayuda de medios adecuados.

En un oil skimmer de tipo correa (*Figura 21*), se utiliza una correa de material polimérico. El material se elige para que el aceite se adhiera a la correa. La longitud de la correa abierta es de 1800 mm. Está sumergido en líquido hasta 100 mm. A medida que la correa gira a 30 rpm, impulsada por un motor a través de una caja de cambios en agua contaminada, el aceite se adhiere a la correa y se desplaza hacia arriba con la correa.

Luego, el aceite se elimina con la ayuda de una cuchilla delgada que está hecha de chapa metálica con un grosor de 2 mm. La cuchilla está montada en una bandeja en un ángulo de 45° en posición inclinada para facilitar el flujo suave del aceite sobre ella. El aceite eliminado se recoge en el contenedor que se coloca cerca del dispositivo. Se puede adjuntar un panel solar para alimentar el motor de corriente continua, mejorando así la eficiencia energética. [34]

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

El análisis del efluente de la planta biológica de tratamiento de agua residual de la industria automotriz, realizado de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, reveló un cumplimiento satisfactorio en la mayoría de los parámetros medidos. A excepción de las grasas y aceites, sin embargo, se recomienda realizar un análisis más exhaustivo que comprenda un muestreo más robusto que refleje de forma más amplia este fenómeno en la planta. Para atender esta situación también se propone el dispositivo “oil skimmer” como método de reducción de la concentración de este parámetro para el completo cumplimiento de los 5 parámetros de la Norma Oficial Mexicana.

La implementación de una lista de verificación en la PTAR Biológica es una herramienta de soporte esencial para conocer el diseño y las condiciones de operación del tratamiento de aguas residuales. Respecto a los rubros de la

evaluación cualitativa de la lista de verificación ha garantizado la adecuada ejecución de cada etapa del tratamiento, confirmando que todas las actividades y procesos se encuentran en orden, indicando una gestión eficiente y un mantenimiento adecuado de las instalaciones.

En resumen, la búsqueda de estrategias de aprovechamiento de las aguas residuales tratadas refleja un compromiso con la sostenibilidad ambiental por parte de la empresa automotriz establecida en Puebla, Puebla. Cuidar de la eficiencia e implementar nuevas mejoras en la planta de tratamiento de aguas residuales para seguir cumpliendo con las normativas vigentes, contribuye al cuidado del medioambiente en el contexto de la industria automotriz. Estas estrategias no solo buscan cumplir con los requisitos de la Norma Oficial Mexicana, sino también promover el aprovechamiento responsable de los recursos hídricos.

Referencias

- [1] Semarnat, "Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018", Ciudad de México, México: Semarnat, 2019.
- [2] Comisión Nacional del Agua, "Programa Nacional Hídrico 2020-2024". México: Comisión Nacional del Agua, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>
- [3] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. "Aguas subterráneas". Gobierno de México, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterraneas>
- [4] Comisión Nacional del Agua, "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Estructuras tarifarias vol. 54". Ciudad de México, México: Semarnat, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/sgapds-1-15-libro54.pdf>
- [5] UNESCO & ONU-Agua, "Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático". París, Francia: UNESCO, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
- [6] Gobierno de México, "¿Qué es la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible?", México: Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/inafed/articulos/que-es-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible>
- [7] P. T. Espinoza, P. Mijailova y R. Chamy, "Uso seguro del agua para el reúso". Brasil: AIDIS, 2016. [En línea]. Disponible en: https://climatesmartwater.org/wp-content/uploads/sites/2/2018/09/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf
- [8] J. A. Romero Rojas, "Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño". Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.

- [9] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del Agua en México 2019”. Ciudad de México, México: Semarnat, 2019. [En línea]. Disponible: https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- [10] O. X. Cisneros Estrada y H. Saucedo Rojas, “Reúso de aguas residuales en la agricultura”. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016.
- [11] D. J. Rodríguez, H. A. Serrano, A. Delgado, D. Nolasco, y G. Saltiel, “De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en américa latina y el caribe”. Washington, Estados Unidos: Banco Mundial, 2020.
- [12] Bastian, R. AND Dan Murray. “2012 Guidelines for Water Reuse”, Washington, DC: U.S. EPA Office of Research and Development, 2012.
- [13] Prince Flores, J. E., & Espinosa Bouchot, M. “Una mirada a la calidad del agua”, México: Perspectiva IMTA, vol. 3, 2021 [En línea]. Disponible en <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-03>.
- [14] C. M. López-Vázquez, G. B. Méndez, H. A. García, y F. J. C. Carrillo, “Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño”, London: IWA Publishing, vol. 16, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- [15] 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”. publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998.
- [16] F. R. Spellman, “Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations”. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003.
- [17] F. Burton, G. Tchobanoglous, R. Tsuchihashi, H. D. Stensel, and M. & E. Inc, Wastewater Engineering: Treatment and Resource recovery, 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

- [18] Ministerio del Ambiente, “Manual para municipios ecoeficientes”. Perú: ENOTRIA S.A., 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2802-manual-de-municipios-ecoeeficientes>
- [19] S. R. Qasim, G. Zhu, “Wastewater treatment and reuse: Theory and Desing examples”, vol. 1. Dallas, Texas: CRC Press, 2018.
- [20] M. H. Gerardi, “Troubleshooting the sequencing batch reactor”. New Jersey: Wiley, 2010.
- [21] N. Tantak, N. Chandan, y P. Raina, “An introduction to biological treatment and successful application of the AQUA EMBR system in treating effluent generated from a chemical manufacturing unit”, Elsevier, pp. 369-397, 2014, doi: 10.1016/b978-0-08-099968-5.00009-x.
- [22] R. Zhao, H. Zhao, R. Dimassimo, y G. Xu, “Pilot Scale Study of Sequencing Batch Reactor (SBR) Retrofit with Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS): Nitrogen removal and design consideration”, Environmental science, vol. 4, n.o 4, pp. 569-581, Ene. 2018, doi: 10.1039/c7ew00337d.
- [23] Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. “Aguas residuales-Muestreo”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.
- [24] Norma Mexicana NMX-AA-042-2015. “Aguas-Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales. Método de tubos múltiples de fermentación”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de junio de 1987.
- [25] Norma Mexicana NMX-AA-005-2013. “Aguas-Determinación de grasas y aceites-Método de extracción Solhlet”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1980.
- [26] Norma Mexicana NMX-AA-028-2001. “Aguas-Determinación de demanda bioquímica de oxígeno” Método de incubación por diluciones”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 1981.
- [27] Norma Mexicana NMX-AA-034-2015. “Aguas-Determinación de sólidos en agua. Método gravimétrico”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 1981.

- [28] L. A. Boyd, A. M. Mbelu, and S. Africa. W. R. Commission, "Guideline for the inspection of wastewater treatment works". República de Sudáfrica: Report to the Water Research Commission, 2009.
- [29] F. J. García Gallardo, "Minimización de vertidos para el desarrollo sostenible". España: Elearning S.L., 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com.mx/books/edition/Minimizaci%C3%B3n_de_vertidos_para_el_desarr/h3bIDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=valores+de+conductividad+electrica+aguas+residuales&pg=PA20&printsec=frontcover
- [30] R. B. Baird, Eaton Adrew D., y E. W. Rice, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 23.a ed. Washington, Estados Unidos: American Public Health Association, 2017.
- [31] M. A. Capo Martí, "Principios de Ecotoxicología", Madrid: Tébal S.L., 2007. [En línea]. Disponible en https://www.google.com.mx/books/edition/Principios_de_Ecotoxicologia/86oLYbnwn8C?hl=es-419&gbpv=0
- [32] R. F. Gómez, M. Sánchez, "Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Muestreo y preservación de parámetros fisicoquímicos", México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2003.
- [33] T. Pathare, M. Zagade, Pawar Rohan, P. Patil, y A. S. Patil, "Endless Belt Type Oil Skimmer", International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering, vol. 2, n.o 1, pp. 95-100, 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.paperpublications.org/upload/book/Endless%20Belt%20Type%20Oil%20Skimmer-293.pdf>
- [34] V. Shankar Miraje y Joshi, A Review on the oil skimmers for a sugar industry, "International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science", vol. 02, n.o 06, pp. 1243-1245, 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.irjmet.com/uploadedfiles/paper/volume2/issue_6_june_2020/1937/1628083066.pdf

[35] Oil Grabber Model 8 Belt Oil Skimmer | Abanaki Oil Skimmers», Abanaki Oil Skimmers, 14 de julio de 2022. <https://www.abanaki.com/product/oil-grabber-model-8-belt-oil-skimmer/>