

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

***INSTITUTO DE INGENIERÍA***

***MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA***



***OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL DE LA UABC CAMPUS MEXICALI***

***TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:***

***MAESTRO EN INGENIERÍA***

***PRESENTA***

***DIANA ISELA TRASVIÑA MUÑOZ***

***DIRECTORA DE TESIS***

***DRA.SOCORRO ROMERO HERNÁNDEZ***

***Mexicali, B. C.***

***NOVIEMBRE 2011***

## **Agradecimientos**

Se agradece la colaboración del personal técnico y administrativo de la PTAR-UABC, así como el apoyo de CONACYT por la beca otorgada para la realización de esta investigación y de mis estudios de maestría. Además de mi entero agradecimiento a la Dra. Socorro Romero por todo su apoyo y comprensión a lo largo de estos dos años de estudio, además de agradecer a Estela, por su ayuda y dedicación. Al instituto de ingeniería por brindarme la oportunidad de seguir con mis estudios y superarme. A Leo, mi familia y amigos que fueron parte esencial para que yo realizara esta etapa de mi vida.

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el proceso de tratamiento de aguas residuales de la PTAR-UABC Campus Mexicali y establecer y determinar los parámetros óptimos para lograr una operación eficiente que cumpla con los parámetros de calidad para el reuso del efluente. Esta planta consiste de un sistema de lodos activados de aireación extendida. La PTAR-UABC, inicialmente operaba con un caudal mínimo de 1 L/s y con una operación deficiente. Esta planta sufrió daños estructurales a consecuencia del terremoto ocurrido en abril del 2010 en Mexicali, B.C. Las reparaciones llevaron aproximadamente cinco meses, y hasta el mes de septiembre del mismo año se reinició la operación de la planta. El reactor aerobio se inculó con 20 m<sup>3</sup> de lodos activados para agilizar su estabilización. Se estuvo monitoreando la planta y se realizaron análisis para determinar los parámetros de control necesarios, con lo cual se estabilizó y se logró hacer funcionar de manera eficiente. Actualmente, la planta de tratamiento está operando con una eficiencia del 98% de remoción de DBO<sub>5</sub>.

**Palabras clave:** Tratamiento lodos activados, agua residual, tratamiento de agua residual, tratamiento biológico y reuso de agua.

## **Abstract**

The purpose of this study was to evaluate the treatment process of wastewater from the WWTP-UABC Mexicali Campus, to establish control measures to achieve optimal operation. This plant consists of a system of extended aeration activated sludge. The WWTP-UABC, initially operated with a minimum flow of 1 L/s with a poor operation of the treatment plant. This plant suffered structural damage as a result of the earthquake occurred in April of 2010 in Mexicali, B.C. The reconstruction took about five months and was in early September when operations began again. The reactor was inoculated with 20 m<sup>3</sup> of aerobic activated sludge to speed stabilization. The plant was monitored and several analyses were made to determine the control parameters to stabilize the plant and be sure about the good efficiency operation of the plant. Nowadays, the wastewater treatment plant is operating with a 98% of BOD<sub>5</sub> removal.

**Keywords:** Activated sludge treatment, wastewater, wastewater treatment, biological treatment and water reuse.

## Nomenclatura

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción [Unidades]</b>
T	Temperatura [°C]
pH	Potencial de hidrógeno [Unidades]
DBO <sub>5</sub>	Demanda bioquímica de oxígeno [mg/L]
DQO	Demanda química de oxígeno [mg/L]
SST	Sólidos suspendidos totales [mg/L]
SSV	Sólidos suspendidos volátiles [mg/L]
SSLM	Sólidos suspendidos en el licor mixto [mg/L]
SSVLM	Sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto [mg/L]
SSNV	Sólidos suspendidos no volátiles
IVL	Índice volumétrico de lodos [ml/g]
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
UABC	Universidad Autónoma de Baja California
OD	Oxígeno disuelto [mg/L]
N-Total	Nitrógeno total [mg/L]
P	Fósforo [mg/L]
Cl <sub>2</sub>	Cloro [mg/L]
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Q	Caudal [L/s, m <sup>3</sup> ]
T <sub>h</sub>	Tiempo de retención hidráulica
A/M	Tasa de relación alimento-microorganismo
Ppm	Partes por millón
Ppmv	Partes por millón por volumen
ml	Miligramos
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
Mm <sup>3</sup>	Millones de metros cúbicos
L/s	Litros por segundo
mg/L	Miligramos por litro

## Índice

Agradecimientos.....	i
Resumen .....	ii
Abstract.....	iii
Nomenclatura.....	iv
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Objetivo General.....	2
1.3.1 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Hipótesis .....	3
CAPITULO 2 .....	4
MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 Importancia del Recurso Hídrico .....	4
2.1.1 Conservación del agua .....	4
2.1.2 Reuso de aguas residuales tratadas.....	5
2.1.3 Escasez frente a consumo.....	6
2.1.4 Contaminación del agua.....	7
2.2 Disponibilidad de agua en la región.....	8
2.2.1 Baja California ante el cambio climático .....	8
2.2.2 Panorama en Mexicali y su Valle.....	9
2.2.3 Consecuencia del revestimiento del Canal Todo Americano.....	10
2.2.4 Impacto del cambio climático en el recurso hídrico .....	11
2.3 Sistemas de tratamiento de agua residual .....	12
2.3.1 Pre-tratamiento .....	13
2.3.2 Tratamiento Primario .....	13

2.3.3 Tratamiento secundario o biológico .....	13
2.3.4 Tratamiento terciario ó avanzado .....	14
2.4 Sistemas de tratamiento aerobio .....	14
2.4.1 Tratamiento convencional de lodos activados .....	15
2.4.2 Sistemas de lodos activados de aireación extendida .....	16
2.4.3 Estabilización por contacto .....	17
2.4.4 Lagunas de estabilización.....	18
2.4.5 Filtros percoladores .....	19
2.5 Sistemas de tratamiento anaerobio .....	20
2.5.1 Digestión anaerobia.....	20
2.6 Procesos unitarios de tratamiento de agua residual .....	21
2.6.1 Pre-aireación.....	22
2.6.2 Cribado .....	22
2.6.3 Desarenador.....	23
2.6.4 Sedimentación .....	23
2.6.5 Flotación.....	24
2.6.6 Remoción de nutrientes .....	24
2.6.7 Filtración .....	25
2.6.8 Coagulación-Floculación .....	26
2.6.9 Desinfección.....	26
2.7 Proceso de lodos activados .....	26
2.7.1 Parámetros de diseño de los sistemas de lodos activados .....	28
2.7.2 Parámetros fisicoquímicos .....	35
2.8 Sistemas de Tratamiento en México .....	38
2.8.1 Inventario de plantas de tratamiento de aguas por entidad federativa .....	41
2.8.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales en Baja California .....	43
2.9 Inventario de plantas de tratamiento de agua residual instaladas en Baja California. 45	
2.9.1 Mexicali.....	46
2.9.3 Ensenada.....	48
2.9.4 Rosarito .....	49
2.9.5 Tecate .....	50

2.10 Legislación vigente en materia de agua residual en México .....	50
2.10.1 Norma oficial mexicana NOM-001- SEMARNAT- 1996.....	51
2.10.2 Norma oficial mexicana NOM-002- SEMARNAT- 1996.....	54
2.10.3 Norma oficial mexicana NOM-003- SEMARNAT- 1997.....	55
CAPITULO 3 .....	56
MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
3.1 Localización de sitio de estudio y descripción de procesos.....	56
3.2 Muestreo .....	57
3.2.1 Puntos y frecuencia de muestreo.....	57
3.3 Diagnóstico inicial .....	58
3.3.1 Caracterización inicial del agua residual.....	58
3.4 Pruebas de arranque .....	59
3.5 Determinación de parámetros de control .....	60
3.6 Optimización del proceso de la PTAR-UABC .....	60
3.7 Análisis estadístico de datos .....	61
3.8 Rediseño y verificación del estado de las instalaciones y equipo.....	62
3.9 Seguridad del personal.....	62
3.10 Capacitación al personal .....	63
CAPITULO 4 .....	64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	64
4.1 Diagnóstico inicial .....	64
4.1.1 Caracterización inicial del agua residual.....	64
4.2 Pruebas de arranque .....	66
4.2.1 Calidad de agua en el influente .....	66
4.2.3 Calidad de agua en el efluente.....	72
4.3 Parámetros de control operacional y ajustes de la PTAR-UABC .....	74
4.3.1 Edad de lodos .....	74
4.3.2 Purga de lodos .....	75
4.3.3 Tasa de la relación alimento/microorganismo (A/M) .....	76

4.3.4 Tiempo de retención hidráulico.....	76
4.3.5 Índice volumétrico de lodo.....	77
4.3.6 Concentración ideal de SSV en el licor mixto .....	77
4.3.7 Observación microscópica .....	78
4.4 Optimización de los procesos de la PTAR-UABC .....	80
4.4.1 Calidad de agua en el influente durante la etapa de optimización. ....	81
4.4.2 Condiciones de operación del reactor aerobio durante la etapa de optimización	84
4.4.3 Calidad de agua en el efluente durante la etapa de optimización.....	85
4.5 Análisis estadístico de datos .....	89
4.5.1 Comparación de parámetros iniciales y parámetros después de estabilizar la planta.....	89
4.5.2 Comparación de resultados obtenidos de calidad de agua con la normatividad mexicana vigente.....	90
4.6 Rediseño.....	92
4.6.1 Modificación en la estructura del reactor .....	93
4.6.2 Cambios en el diseño del sedimentador .....	94
4.6.4 Construcción de línea de recirculación .....	95
4.6.5 Modificación en las líneas de distribución de aire .....	96
4.6.6 Construcción de escalera para acceder al reactor .....	98
4.6.7 Mantenimiento de cárcamo de bombeo .....	99
4.6.8 Mantenimiento y modificación de la criba de finos.....	100
4.7 Capacitación de personal .....	101
4.7.1 Capacitación al personal para el uso del equipo de detección de cloro y pH ....	101
4.7.2 Uso de la purga de lodos .....	101
4.7.3 Implementación de bitácoras de registro.....	102
Conclusiones.....	v
Propuestas .....	vi
Referencias bibliográficas .....	viii

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación del agua, al igual que para la protección de la salud pública. Un estudio sobre las plantas de tratamiento en México estima que solamente el 5% de las plantas existentes están siendo operadas de manera satisfactoria (1).

La Universidad Autónoma de Baja California ha unido esfuerzos para promover e impulsar la sustentabilidad y reuso del agua en el Campus. En el año de 1999, el Departamento General de Obras e Instalaciones, preocupado por el problema de la contaminación del agua en la UABC y de su deficiente uso, implementó, el proyecto denominado “Programa Integral para el Manejo del Agua” (PIMA), con el propósito de hacer un uso más eficiente del agua en las diversas actividades del campus. En el año 2006, con la colaboración de CESPМ Mexicali, se llevó a cabo la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales denominada PTAR-UABC, la cual opera con un sistema de lodos activados de aireación extendida, con una capacidad para tratar 10 L/s (de acuerdo a especificaciones del fabricante). Como parte de este estudio se hizo una evaluación inicial de la operación de la PTAR-UABC y observamos que la planta estaba operando deficientemente. Además de la baja eficiencia de la planta de tratamiento, podemos mencionar la falta de capacitación del personal y de mantenimiento. También, se encontraron problemas de diseño en la PTAR y una cisterna con capacidad de 184 m<sup>3</sup>, la cual es insuficiente para almacenar el agua tratada, así como de la falta de un sistema adecuado para el riego de las áreas verdes. Esto impide que el agua residual tratada pueda aprovecharse eficientemente, al tener que ser regresada al sistema de alcantarillado cuando la cisterna llega al límite de su capacidad.

Se realizó una caracterización completa de la planta en cada proceso para estimar los parámetros óptimos de operación para obtener un efluente que cumpla con la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-97, la cual establece los límites máximos permisibles para reuso. Una vez que se determinaron los parámetros óptimos de operación, se ajustó la PTAR y se capacitó al personal para lograr mantener la operación eficiente de la planta.

## **1.2 Justificación**

De los resultados obtenidos de una revisión preliminar, se detectaron algunos problemas importantes en la operación de la PTAR-UABC, se observó la falta de capacitación del personal encargado de la planta y la ausencia de mantenimiento técnico. Por otro lado la falta de una cisterna de almacenaje con más capacidad, impide que el agua residual tratada pueda aprovecharse al máximo, por lo que tiene que ser regresada al sistema de alcantarillado cuando la cisterna llega al límite de su capacidad.

Por lo anterior, fue necesario hacer una caracterización completa de la planta en cada proceso para y se determinaron los parámetros óptimos de operación para lograr el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas: NOM002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, aplicando ésta última para descarga y reuso de las aguas residuales.

Una vez establecidos estos parámetros, fue necesario capacitar al personal en los aspectos fundamentales para garantizar mantener la operación óptima de la planta.

## **1.3 Objetivo General**

- Evaluar el tratamiento de la PTAR-UABC para lograr su funcionamiento óptimo.

### **1.3.1 Objetivos Específicos**

- Caracterizar el agua residual
- Evaluar los procesos de tratamiento de aguas
- Determinar los parámetros óptimos de control operacional
- Ajustar parámetros de operación
- Comparar resultados de operación para lograr una buena calidad de agua según límites permisibles de normas mexicanas vigentes

### **1.4 Hipótesis**

Como resultado de una visita de reconocimiento y observación, se detectaron irregularidades en la operación de la planta, lo que sugiere que la planta está operando de manera ineficiente.

## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Importancia del Recurso Hídrico**

El agua es un recurso no renovable, la cual su calidad se ve cada vez más afectada por el aumento de población a nivel mundial y por la falta de concientización en su uso o simplemente por desconocimiento en los beneficios de su reuso. El reuso de las aguas residuales, en países en vías de desarrollo, se ha incrementado en los últimos años, este hecho se asocia principalmente a problemas de escasez de agua (1). Esta problemática, trae consigo no sólo problemas sociales, sino a largo plazo, la extinción de la vida, y es de esta aseveración que el proteger el agua deberá ser un compromiso, pero también una necesidad para las nuevas generaciones. Día a día la demanda sobre los recursos se incrementa, y ese es un camino insostenible. El agua debe ser vista como un bien de la naturaleza, la cual la humanidad deberá usar solo sus excedentes (2). Para lograr tener agua suficiente y de calidad, el hombre deberá aprender a respetar la naturaleza con toda su biodiversidad

##### **2.1.1 Conservación del agua**

La conservación del agua en la actualidad, es punto clave para su preservación, el cual es un recurso no renovable. El tratamiento de las aguas residuales nos brinda una oportunidad para reusar el agua, sin embargo, es importante que nuestro objetivo sea siempre la preservación. Es importante entender que la conservación del agua es un bien para la sociedad y la existencia de la vida, su reuso deberá ser alternativa para devolverla al ciclo hidrológico de la tierra.

La conservación del agua puede tener diferentes significados para diferentes personas, podría interpretarse como la posibilidad de captar agua de lluvia para uso doméstico o en vasos de almacenamiento con la construcción de presas. En la recarga de acuíferos subterráneos, por ejemplo, el usar menos cantidad de agua, cuando sea posible, se

logra ahorrar agua de mejor calidad. El campo de la conservación del agua, es cuestión de reducir la demanda de agua, promoviendo austeridad en los hábitos de consumo, evitando desperdicios, disminuyendo consumos, cobrando las tarifas adecuadas. En pocas palabras, la conservación del agua es la optimización de su uso (3).

### **2.1.2 Reuso de aguas residuales tratadas**

El reuso del agua residual tratada se presenta como una alternativa disponible para disminuir la escasez de este recurso, y juega un papel importante en la planificación y gestión integral del recurso hídrico, debido a que aumenta la conservación del agua y un uso eficiente y sostenible de ésta (1). La alternativa de tratar el agua para después reusarla en nuestras actividades diarias, nos trae grandes beneficios, pero debemos tener en cuenta que para poder tratar el agua, primero que hay que contar con ella, así que la conservación para su uso y posteriormente su tratamiento para su reuso, deberá garantizar primero la resolución de los problemas de desperdicio y abastecimiento de toda la población.

La concientización en el reuso apropiado del agua, nos da una segunda oportunidad para aprovechar el recurso en diferentes aplicaciones de la vida cotidiana. El tratamiento adecuado de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria (4). La Tabla 1, muestra los diferentes usos del agua residual tratada.

**Tabla 1. Aplicaciones para el uso del agua residual tratada**

	<b>Usos</b>
<b>Municipio</b>	Limpieza de vías y andenes Riego de parques y jardines Refrigeración Fuentes decorativas Sistemas contra incendios Suministros alternativos Agua potable
<b>Agricultura Ganadería</b>	Riego Consumo Refrigeración
<b>Paisaje y medio natural</b>	Recuperación de marismas Riego Aguas libres Recuperación de zonas baldías Sistemas contraincendios
<b>Acuicultura</b>	Crecimiento de peces Crecimiento de algas
<b>Caudal ecológico</b>	Ríos y lagos Mantenimiento de marismas
<b>Minería</b>	Arrastres Limpieza
<b>Recarga de aguas subterráneas</b>	Recarga/almacenamiento

### **2.1.3 Escasez frente a consumo**

Debemos tomar en cuenta como sociedad y estar conscientes que para el año 2025, la cantidad de población mundial que vivirá bajo condiciones de estrés hídrico pasará de ser de un 5% a un 31% (5). Partiendo de este dato, debemos tomar en cuenta que la responsabilidad de preservar el recurso hídrico, es tanto de los gobiernos como de la población. El gobierno, por su parte, es responsable de difundir la grave problemática a la que se enfrenta cada región, deberá además, tomar medidas y estrategias que permitan empezar apoyar la implementación de tecnologías con procesos más limpios y de bajo consumo de agua, que indudablemente abrirá el camino para empezar a crear nuevas generaciones con conciencia y respeto no solo del agua, sino la importancia de vivir en armonía con el medio ambiente.

La creación de programas de desarrollo sustentable para preservar el agua, implica tomar en cuenta que al hacer uso de este recurso, se deberá desarrollar tecnología y modelos de producción que no degraden los recursos naturales, los cuales, son imprescindibles para subsistir. Una población consciente de su problemática, ayudará a reducir el consumo promedio de agua, el cual según fuentes, el requerimiento mínimo de agua necesaria para la salud humana (higiene, bebida, etc.) es de 20 litros por día por persona (PNUD, 2006). Sin embargo en un país en vías de desarrollo una persona consume 20 L/día mientras que en la Unión Europea y los Estados Unidos el consumo oscila entre 200 y 600 L/día (5). Otros problemas que enfrentan las sociedades además de la escasez del agua, es la contaminación la misma, los altos costos de captación y conducción del agua y los conflictos generados por los intereses de diferentes usuarios sobre las fuentes (3).

#### **2.1.4 Contaminación del agua**

Una realidad que se ha convertido en una problemática para las sociedades, es la contaminación del agua, que es cada vez más preocupante. La contaminación de los cuerpos de agua, es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero. A finales del año 2001, más de 70% de los cuerpos de agua del país presentaba algún indicio de contaminación (6). Esto nos lleva a pensar que necesitamos una legislación más estricta en términos de descargas de residuos industriales, pero no solo en la industria, si no en los lugares donde se tiene menos regulación y en donde su control es más una situación de valores y buenos hábitos, como es la descarga que se hace a nivel doméstico en todos los hogares. La ignorancia o simple desconocimiento en la descarga de residuos que son tóxicos para el agua o para el medio ambiente, está poniendo en riesgo y comprometiendo su tratamiento.

En general, las aguas residuales contienen aproximadamente un 99.9% de agua y el resto está constituido por materia sólida. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento.

La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas (7). Las fuentes de contaminación del agua se pueden dar por compuestos inorgánicos, materia orgánica, contaminación microbiológica y térmica (8).

## **2.2 Disponibilidad de agua en la región**

La contaminación de los cuerpos de agua, es producto de las descargas de aguas residuales sin tratamiento, ya sea de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero. A finales del año 2001, más del 70% de los cuerpos de agua del país presentaba algún indicio de contaminación (6). Es por eso que, una alternativa real al problema de escasez del agua en nuestra región, es apostar a invertir en plantas de tratamiento y comprometernos a operarlas de manera eficiente, con esto, podremos reducir el uso de agua blanca o potable, al reusar el agua en los espacios verdes del municipio, en la agricultura, ganadería, recarga de acuíferos y almacenamiento.

### **2.2.1 Baja California ante el cambio climático**

Para que exista un equilibrio y para preservar el recurso hídrico, debemos entender la importante relación que existe entre la tasa de crecimiento poblacional y la disponibilidad de agua. En lo que respecta a Baja California, se cuenta con una disponibilidad *natural* de agua de 3,562 Mm<sup>3</sup>, de los cuales el 70% corresponden a aguas superficiales y el 30% a aguas subterráneas. Con respecto a las *aguas superficiales*, el estado cuenta con un escurrimiento anual de 2,470 Mm<sup>3</sup> (75%) provenientes del Río Colorado, conforme a lo establecido en el Tratado Internacional de Límites y Aguas firmado por México y Estados Unidos en el año de 1944. El 25 por ciento restante del agua superficial disponible es aportada por diferentes corrientes, entre los cuales destacan el Río Tijuana y los arroyos Guadalupe, San Vicente, San Simón y Santo Domingo (6). En cuanto a las *aguas subterráneas*, en el estado se estima una recarga media anual de 1,092 Mm<sup>3</sup>, incluyendo 200 Mm<sup>3</sup> de la mesa arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora.

Las actividades agropecuarias consumen la mayor cantidad de agua, tanto en México como en el mundo. En México, la agricultura y la ganadería consumen el 77% del agua disponible, mientras que la industria y la generación de energía, abarcan el 13%, y por último, el consumo doméstico, el 10%. Siendo el sector que más consume, el que más desperdicia, el sector agropecuario (agricultura y ganadería).

### **2.2.2 Panorama en Mexicali y su Valle**

Mexicali, es una región que es clasificada como árida-semiárida, con una población de 936,145 millones de habitantes (9), considerada como una ciudad industrializada con empresas de alto consumo de agua, donde el Río Colorado, es la principal fuente de abastecimiento de agua para el valle de Mexicali. La disponibilidad del recurso hídrico en la región del Valle de Mexicali, se interpreta con una población de 855,962 millones de habitantes (9), el cual se garantiza y se tiene una disponibilidad anual volumétrica total de 2, 250, 234,000 metros cúbicos de agua (9), conforme vaya aumentando la población, esta cifra de disponibilidad de agua se verá reducida en los próximos años. Es decir, el crecimiento no toma en cuenta la escasez del agua ni el deterioro que pueda provocar en los recursos naturales, ni mucho menos, que la repartición de agua sea de manera equitativa para toda la población.

Del volumen total subterráneo, el 74% se localiza en el Valle de Mexicali y la mesa arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora. El 26% del agua subterránea restante, se encuentra en aproximadamente 47 acuíferos de mayor a menor cuantía, destacando la correspondiente a San Quintín, Col. Vicente Guerrero y Maneadero (10). El Río Colorado, permite irrigar la zona agrícola de las dos áreas estatales (aproximadamente 200,000 hectáreas) y la dotación de líquido está asegurada debido al Tratado Internacional de Límites y Aguas firmado el 3 de febrero de 1944 firmado por México y Estados Unidos, con el cual se garantiza anualmente una dotación volumétrica de 1, 850, 234,000 metros cúbicos de agua. Otra fuente de abastecimiento de agua para la región agrícola proviene de la extracción del acuífero subterráneo con un volumen de 700, 000 metros cúbicos y que son bombeados de 725 pozos profundos localizados en el Valle (11).

### **2.2.3 Consecuencia del revestimiento del Canal Todo Americano**

El Canal Todo Americano (AAC, por sus siglas en inglés), es el principal conducto para distribuir el agua a toda la región, incluyendo el Valle de Coachella y el Valle Imperial en California, esta última con nueve ciudades con 142,000 habitantes y 500,000 acres de tierras agrícolas.

En 1955, el gobierno mexicano inició un programa para perforar pozos, pues el volumen asignado en el Tratado era insuficiente para regar la superficie agrícola. Actualmente, se cuenta con 725 pozos para extraer agua del acuífero. En el Valle Imperial, el acuífero no es explotado, debido a la baja de calidad de agua, pero sobretodo, porque no lo requieren. La recarga original del acuífero provenía fundamentalmente de las infiltraciones del Río Colorado. Actualmente, la recarga está directamente relacionada con infiltraciones de canales de riego, el retorno agrícola y las infiltraciones del Río Colorado y el AAC.

Para México, el acuífero representa la única fuente de agua segura, y tal vez la parte más importante de disponibilidad de agua para Baja California. Por esta razón, cualquier acción que afecte su recarga, tal como el recubrimiento del AAC, y la disminución de los escurrimientos naturales del Río Colorado, impactan directamente sobre la cantidad y calidad de agua disponible (12), con alteraciones de alta salinidad que se presentará en las tierras, será un grave problema al que se enfrentará el Valle de Mexicali. Si bien se recibe la cuota de 1, 850, 234,000 m<sup>3</sup>, de acuerdo a lo establecido por el Tratado de 1944, el revestimiento del Canal Todo Americano, dejará de recibir a la región por filtración al acuífero de entre 11% y 14% del total del agua disponible (2).

#### **2.2.4 Impacto del cambio climático en el recurso hídrico**

En estas últimas décadas, el planeta Tierra se ha calentado y lo ha hecho por término medio 0,6-0,7° C, el aumento ha superado con creces 1° C (Piñol *et al.*, 1998; IPCC 1996, 2001), citado por Peñuelas et al (13), el cual se debe principalmente al aumento de concentraciones de gases invernadero en la atmósfera debido a las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación provocando el aumento de la temperatura planetaria.

Por ejemplo, la concentración atmosférica de dióxido de carbono, el más abundante de los gases de efecto invernadero, ha aumentado desde los 220 ppm en la era pre-industrial hasta los más de los 380 ppm que se registran en la actualidad. Su concentración ha alcanzado los mayores valores de los últimos 420.000 años, el periodo del que tenemos información contrastable obtenida del análisis de muestras de hielo (14). Como consecuencia, hay una tendencia hacia una mayor frecuencia de condiciones climáticas extremas, provocando: aumento de tormentas, inundaciones y sequías, erosión de los suelos, aceleración de la extinción de plantas y animales, desplazamiento de las zonas agrícolas, amenaza a la salud pública debido al aumento de estrés hídrico y enfermedades tropicales (5).

Algunos estudios realizados para México indican que los impactos posibles relacionados al cambio climático, como los desastres naturales pueden ser considerables. En el llamado Estudio de País, México (1994-1996) se concluyó que México es y será muy vulnerable al cambio climático (15). Otros resultados muestran que los países en vías de desarrollo son los más vulnerables a condiciones de cambio climático, en general, para estos países se espera una reducción importante en la producción de sus cultivos, un decremento significativo en su disponibilidad de agua, un aumento en el número de personas expuestas a enfermedades como el paludismo y el cólera, así como el aumento en el riesgo de inundaciones, producto de lluvias torrenciales y en el aumento del nivel del mar (IPCC, 2001b) citado por Peñuelas Josep et al (13). En la Figura 1, se muestran los efectos biológicos del cambio climático.

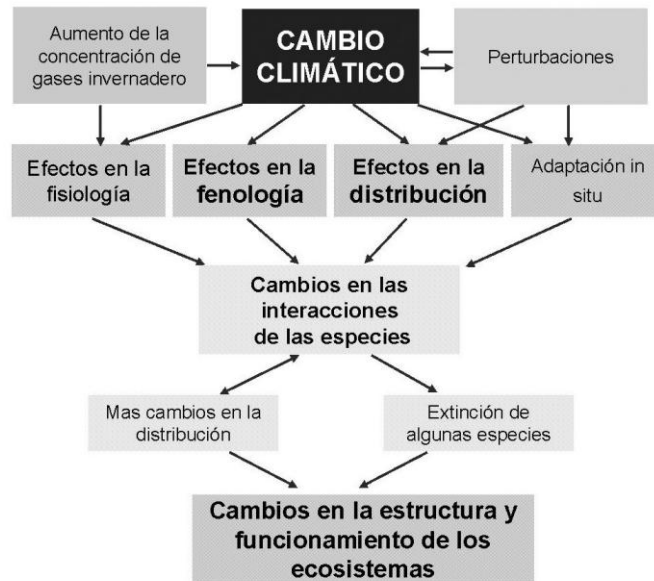


Figura 1. Efectos biológicos del cambio climático.

## 2.3 Sistemas de tratamiento de agua residual

En general, las aguas residuales consisten de dos componentes: un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Típicamente existen dos formas generales de tratar las aguas residuales, por sedimentación y degradación bacteriana. La primera, consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el sólido se deposite en el fondo. Después se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método más común, consisten en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica. Este método, conocido como tratamiento de lodos activados, requiere el abastecimiento de oxígeno a los microorganismos de las aguas residuales para realizar su metabolismo. Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen, el pre-tratamiento; tratamiento primario; secundario o biológico, y terciario o avanzado.

### **2.3.1 Pre-tratamiento**

De muchas maneras, poco o mucho de lo que se desecha en las ciudades, encuentra en su camino al alcantarillado y termina en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Materiales de gran tamaño, como latas, botellas, pedazos de metal, piedras, plásticos y arena, entre otros, hacen su recorrido hasta llegar a los influentes de las plantas de tratamiento, causando problemas y graves daños en las bombas y tuberías. Teniendo esto en cuenta, es evidente la importancia de los equipos utilizados para remover este tipo de materiales lo más eficientemente posible para evitar que estas entren y se deriven a otras partes del sistema (16). La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos (4).

### **2.3.2 Tratamiento Primario**

El objetivo principal del tratamiento primario, se encuentran en los procesos de sedimentación y flotación, estos se llevan a cabo en los tanques conocidos como sedimentadores o clarificadores primarios. En estos procesos, la materia orgánica se introduce al clarificador o sedimentador primario, haciendo sedimentar la materia orgánica, permitiendo a los sólidos sedimentables caer al fondo del tanque. La materia orgánica de menor peso le permite flotar en la superficie del agua, por lo tanto, existe mayor clarificación en el agua (16).

### **2.3.3 Tratamiento secundario o biológico**

En los tratamientos biológicos, una parte fundamental del proceso es el uso de microorganismos que se utilizan para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables en el agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes.

La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo. El tratamiento biológico es uno de los tratamientos más habituales, no solo para tratar aguas residuales urbanas, sino en buena parte para tratar aguas provenientes de la industria (4).

### **2.3.4 Tratamiento terciario ó avanzado**

El tratamiento terciario, conocido también como tratamiento avanzado, es necesario para la eliminación de materia en suspensión después del tratamiento biológico del agua. En esta etapa del tratamiento, la materia en suspensión, puede contener materia disuelta de diferentes características con concentraciones variadas. La remoción implica eliminar microorganismos patógenos, ya que algunos efluentes se utilizan para riego de jardines y parques con contacto al público. Algunos de estos tratamientos van desde la simple cloración hasta otros tratamientos de tecnología avanzada, como son los procesos de rayos ultravioleta, operaciones con membrana y oxidación avanzada, especialmente en el caso de las aguas industriales que pueden o no contener metales pesados u otras sustancias que en los tratamientos simples como la cloración, sería difícil de remover.

## **2.4 Sistemas de tratamiento aerobio**

La digestión aerobia es un proceso en el cual se mezcla lodo digerible proveniente de los lodos de clarificador primario en presencia de aire u oxígeno por un periodo significativo de tiempo, con una mezcla de lodo digerible de la clasificación primaria y el lodo del tratamiento biológico aerobio, el cual se lleva a cabo en el denominado tanque aerobio o tanque de licor mixto, con el resultado de una destrucción de las células y una disminución de sólidos suspendidos volátiles (SSV). El objetivo principal de la digestión aerobia es reducir el total de lodos que se debe purgar posteriormente. Esta reducción es el resultado de la conversión, por oxidación, de una parte sustancial del lodo en productos volátiles ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ) (17).

Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa microbiana floculenta conocida como el lodo activado, se separa del agua residual por asentamiento, por lo general, en recipiente separado, especialmente diseñado. La etapa de separación se conoce también como clarificación, asentamiento o sedimentación. El sobrenadante de la etapa de separación resulta entonces el agua residual tratada y debe estar virtualmente libre de lodos. La mayor parte del lodo asentado en la etapa de separación se regresa a la etapa de aireación para mantener la concentración de los lodos en el tanque de aireación al nivel necesario para un tratamiento efectivo y para que actúe como un inóculo microbiano. Parte de los lodos se extraen para su descarga, y se conocen como lodos activados desechados o excedentes.

#### **2.4.1 Tratamiento convencional de lodos activados**

El tratamiento de las aguas residuales es una práctica resulta fundamental para mantener nuestra calidad de vida, la cual consiste poner en contacto la carga de los lodos en un medio aerobio, normalmente denominado tanque aerobio. En el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, se adsorbe la materia orgánica donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza un recirculación de parte de los lodos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos. En este sistema la relación parámetro A/M se encuentra en un valor óptimo entre 0.3-0.6 kg DBO<sub>5</sub> por kg SSV por día (4). El esquema simplificado de un tratamiento convencional de lodos se muestra a continuación en la Figura 2.

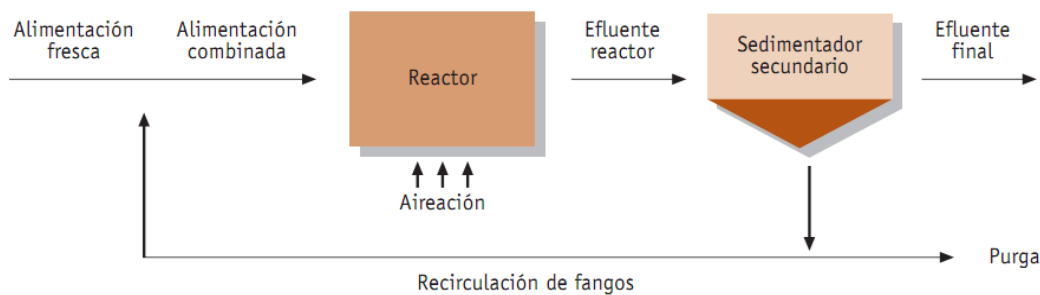


Figura 2. Tratamiento convencional de lodos activados

## 2.4.2 Sistemas de lodos activados de aireación extendida

Este proceso se llama a veces tratamiento a baja tasa y como implica su nombre, su fundamento está en el extremo opuesto del proceso de aireación con una tasa alta. Los niveles de carga de lodos son muy bajos, con una tasa de relación A/M de entre 0.05 y 0.15 kg de DBO<sub>5</sub>/kg de sólidos de lodos por día, y la carga volumétrica de la planta es alrededor de 0.1 a 0.4 kg de DBO/m<sup>3</sup> día. El tiempo de retención hidráulica es de hasta 36 horas, de manera que los lodos están en la fase de respiración endógena, donde la descomposición de los lodos excede el crecimiento de los mismos. El largo tiempo de residencia de los lodos y la baja carga de estos implica una baja actividad de los lodos, y se usan tiempos largos de retención, de uno o dos días, para producir una reducción del 95% en la DBO de las aguas residuales.

La producción de lodos puede ser tan baja como de 0.2 a 0.3 kg de sólidos por kg de DBO eliminada, y como el proceso implica la digestión aerobia de los sólidos de los lodos, microbiana y adsorbida, el requerimiento de oxígeno es casi de 1.25 veces mayor que la DBO aplicada. No obstante, los costos adicionales de aireación, se compensan en el ahorro de manejo de los lodos de desecho. En la Figura 3, se observa un sistema de tratamiento de aireación extendida.

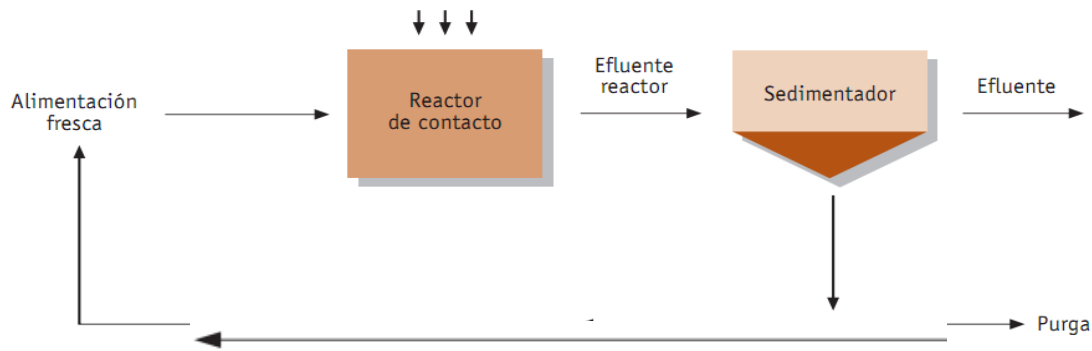


Figura 3. Sistema de tratamiento de aireación extendida

### 2.4.3 Estabilización por contacto

En este proceso biológico, el reactor de aireación se suele trabajar con menores tiempos de residencia pretendiendo que se lleve a cabo sólo la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. En sí la degradación se realiza en una balsa de aireación insertada en la corriente de recirculación de fangos, donde la concentración de fangos es mucho más elevada que en el primer reactor. Es adecuada esta opción cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión (4). El nivel de carga para la estabilización por contacto, aparece entre el extremo inferior del rango convencional y el proceso de aireación prolongada, entre 0.1 a 0.2 kg de DBO/kg de sólidos en los lodos por día (18). En la Figura 4, se ilustra el proceso biológico de estabilización por contacto.

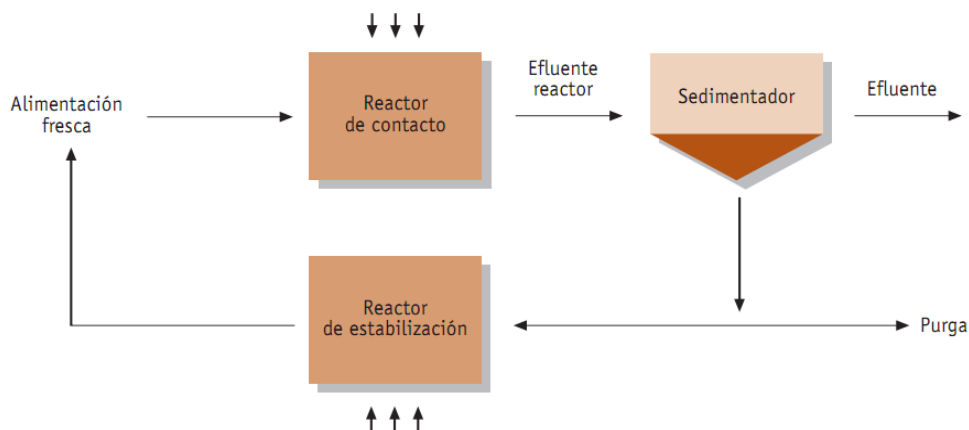


Figura 4. Proceso biológico de estabilización por contacto

#### 2.4.4 Lagunas de estabilización

Los sistemas de lagunas de oxidación se caracterizan por tener de 1 a 1.5 metros de profundidad, ofrecen muchas ventajas; el costo de inversión no es tan grande como otros sistemas de tratamiento, y su instalación deberá estar aislada de zonas residenciales, comerciales y áreas de recreación. En las lagunas de estabilización, la remoción de la materia orgánica (expresada como  $DBO_5$ ) se realiza a través de procesos biológicos aerobios y anaerobios. Dependiendo del proceso predominante, las lagunas son aerobias (de maduración o de pulimento), anaerobias o facultativas (19). Entre algunas de las ventajas que ofrecen las lagunas es que no se requiere de equipos costosos ni de personal altamente capacitado para su operación, son económicas de construir y consumen poca energía. Algunas de las limitantes son los malos olores que producen, el requerimiento de grandes superficies de tierra para construirlas y que solamente se recomienda su instalación para tratar flujos iguales ó menores de 1 millón de galones diario (16). En la Figura 5, se observa la laguna de la planta de aguas residuales de la ciudad de Calexico, California.



Figura 5. Laguna de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Calexico, Ca.

## 2.4.5 Filtros percoladores

Los filtros percoladores son también denominados filtros biológicos o lechos bacterianos. Los filtros percoladores pertenecen al tipo de reactores de crecimiento asistido, el cual consiste en un tanque relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola el agua residual. En estos sistemas, la velocidad de carga orgánica es el parámetro más importante, teniendo rangos de aplicación en la industria desde 30 a 10.000 kgDBO<sub>5</sub>/día y 100m<sup>3</sup> de reactor, siendo los tamaños muy variables desde 2 hasta 10 m de altura (4).

Normalmente el agua residual se distribuye de forma de pulverización uniforme sobre el lecho mediante un distribuidor rotativo al flujo. El agua residual percola en forma ascendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo. La capa del limo que se forma junto al relleno tiene un espesor total comprendido entre 0.1 y 2.0 mm, está formado de una subcapa aerobia y de otra anaerobia (17). En la Figura 6, se puede observar el esquema del proceso de tratamiento de un filtro percolador.

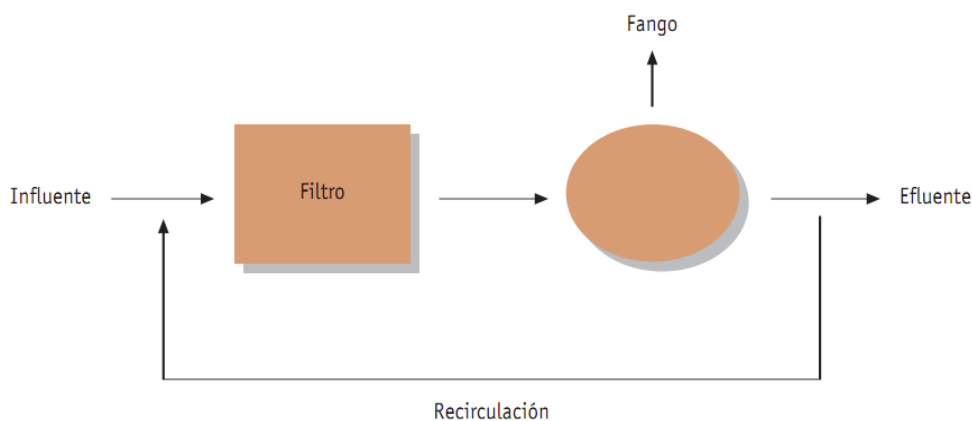


Figura 6. Esquema del proceso de un filtro percolador

## **2.5 Sistemas de tratamiento anaerobio**

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos. Es un proceso complejo en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono.

### **2.5.1 Digestión anaerobia**

Existen diversos tipos de reactores en el tratamiento anaerobio donde se lleva a cabo la degradación microbiana. Estos pueden variar dependiendo de las necesidades y del tiempo de retención hidráulico. Se les denomina de alta carga (4), ya que son los únicos que pueden tratar aguas con una carga orgánica elevada de manera viable. En los tratamientos anaerobios, intervienen grupos distintos de bacterias, que llevan a cabo los siguientes procesos en equilibrio, la cual son hidrólisis, acidogénesis, acidogénesis y metanogénesis. Existen los reactores de contacto (mezcla completa con recirculación de biomasa), reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB), filtro anaerobio (FA) y reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF). En la Figura 7, se observa un diagrama de la degradación anaerobia.

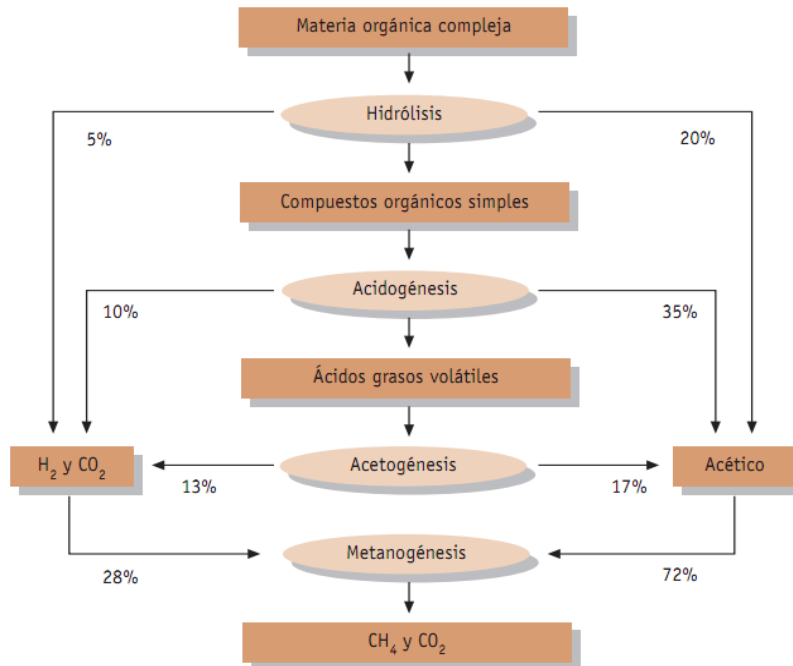


Figura 7. Proceso de degradación anaerobia

## 2.6 Procesos unitarios de tratamiento de agua residual

El grado de tratamiento requerido depende fundamentalmente de los límites del vertido para el efluente. El pre-tratamiento de aguas residuales implica la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de la neutralización u homogenización. El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, ya sea por un tratamiento secundario bien ó directamente o pasando por una neutralización u homogenización. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. En cuanto al tratamiento terciario su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales (17).

### 2.6.1 Pre-aireación

Esta parte del proceso se utiliza para refrescar (oxigenar) el agua residual y separar el aceite y grasa de la misma. Este proceso tiende a incrementar la eficiencia total de remoción de los sólidos y DBO<sub>5</sub> al final del proceso en el efluente (16).

### 2.6.2 Cribado

El cribado también llamado desbrozo o desbaste, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos. La distancia o las aberturas de las rejillas dependen del objeto de las mismas, y su limpieza se hace bien manualmente o mecánicamente. Los productos recogidos se destruyen por incineración, o se tratan por procesos de digestión anaerobia, o se dirigen directamente al vertedero. Las materias sólidas recogidas se suelen clasificar en finos y gruesos (17). En la Figura 8, se observa un sistema de cribado automatizado.



Figura 8. Sistema de cribado de la planta de tratamiento de la ciudad de Calexico, California.

### 2.6.3 Desarenador

En el desarenador involucra remover residuos inorgánicos pesados, como arena y grava proveniente del agua residual. Esto se logra reduciendo la velocidad del agua residual lo suficiente como para que las partículas más pesadas sedimenten en el fondo de los canales o tolvas especialmente diseñados. La arena puede ser posteriormente procesada en una corriente llamada ciclones o clasificadores de granos. La arena o grava usualmente fluye de las tolvas a los ciclones separadores y luego al clasificador. La disposición final de la arena es usualmente enterrándose, la cual puede ser algunas ocasiones desagradable y trabajo costoso (16). En la Figura 9 se observa un equipo desarenador de funcionan con el principio antes mencionado.



Figura 9. Desarenador de la PTAR de la ciudad de Calexico, California

### 2.6.4 Sedimentación

La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaban en el depósito de materias en suspensión.

En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios de los puntos del proceso de tratamiento. En una planta típica de lodos activados, la sedimentación se utiliza en tres fases del tratamiento en los desarenadores, en los clarificadores o sedimentadores primarios, en el cual los sólidos orgánicos se separan y clarificadores o sedimentadores secundarios en los cuales el lodo biológico se separa del efluente tratado (17).

### **2.6.5 Flotación**

Es la operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua, las cuales serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmisible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar”, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua. Los diferentes sistemas de flotación se clasifican como flotación por aire disuelto y flotación por aire inducido (4).

### **2.6.6 Remoción de nutrientes**

La presencia de compuestos de nitrógeno y fósforo en un efluente contamina la corriente de agua que los recibe, y es necesario proceder a la remoción de dichos compuestos en el tratamiento de aguas residuales, ya que los fosfatos y nitratos estimulan la eutroficación. Los nitratos y nitritos son un riesgo para la salud, el amoníaco tiene una alta demanda de oxígeno e interfiere en la cloración y puede ser tóxico para la fauna acuática. Existen varias razones importantes que justifican la eliminación de los compuestos de nitrógeno de las aguas residuales antes de su descarga a los cauces receptores. Estas razones son las siguientes:

- 1) El nitrógeno junto con el fósforo, juega un papel importante como nutriente en el proceso de eutroficación.
- 2) Los compuestos nitrogenados exigen una demanda de oxígeno. Los compuestos orgánicos de nitrógeno en las aguas residuales, bajo condiciones ambientales favorables, se convierten en nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ). A veces el  $\text{N-NH}_4^+$  se oxida a nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ) y finalmente a nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ).

Los compuestos de nitrógeno se presentan en las corrientes residuales como amoníaco, nitratos y nitritos, compuestos orgánicos solubles y materia orgánica y materia orgánica en suspensión o en forma de partículas (17).

### **2.6.7 Filtración**

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de tierra de diatomeas, arena y antracita. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa. Los sistemas de filtración se clasifican en sistemas de gravedad ó de presión (4).

### **2.6.8 Coagulación-Floculación**

Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Es una operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbana y potable como en industriales (industria alimenticia, pasta de papel, textiles, etc.). Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide, como lo son las sales de  $Fe^{3+}$ , Sales de  $Al^{3+}$ , polielectrólitos (4).

### **2.6.9 Desinfección**

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública, sobre todo, si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua. Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos, los cuales se incluye le conoce como procesos de oxidación química, dentro de los cuales se utiliza la cloración y ozonación (17).

## **2.7 Proceso de lodos activados**

El proceso de los lodos activados es quizá el proceso biológico de más amplio uso para el tratamiento de aguas residuales, orgánicas e industriales. Han surgido variaciones del sistema básico durante algunos años, las cuales confieren al tratamiento una versatilidad que le permite adaptarse a un amplio campo de circunstancias operacionales (18). Los objetivos principales del tratamiento biológico son estabilizar la materia orgánica, coagular y remover los sólidos coloidales que no sedimenten y que se encuentren en las aguas residuales domésticas y en las de los tanques sépticos.

Dependiendo de las circunstancias locales se pueden incluir otros objetivos tales como la remoción de nutrientes, como el nitrógeno y fósforo, así como de rastros de compuestos orgánicos.

En el nivel más fundamental, el tratamiento biológico comprende:

- 1) La conversión de la materia orgánica carbonácea disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares.
- 2) La formación de flóculos biológicos compuestos de materia celular y de los coloides orgánicos presentes en las aguas residuales, y
- 3) La subsecuente remoción de dichos flóculos por medio de sedimentación por gravedad.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que si el tejido celular producido no se retira por precipitación, éste ejercerá una DBO en las aguas residuales y el tratamiento será incompleto (20). En la Figura 10, se observa la recirculación de lodos de la planta de tratamiento de lodos activados de la ciudad de Calexico, California.



**Figura 10. Lodos activados de la recirculación del proceso de tratamiento de lodos activados.**

### 2.7.1 Parámetros de diseño de los sistemas de lodos activados

El monitoreo de los parámetros de operación en los sistemas de lodos activados se debe realizar de manera continua y es de vital importancia que estos se adecuen a las necesidades de cada planta de tratamiento. Los parámetros de operación bajo los cuales se debe operar una planta, dependerán del tipo de proceso y operación de cada planta, incluso en las plantas donde se cuenta con el mismo tipo de tratamiento, las necesidades son distintas, cada planta deberá ajustar los parámetros de operación como mejor convengan para llegar al tratamiento más adecuado. En la Tabla 2, se observa un comparativo de los diferentes sistemas de lodos activados y sus parámetros de diseño.

**Tabla 2. Comparativo de parámetros de diseño en los sistemas de lodos activados**

<b>Tiempo de proceso</b>	<b>Tiempo de retención (horas)</b>	<b>Edad de lodos (días)</b>	<b>SSLM (mg/L)</b>	<b>Recirculación (fracción)</b>	<b>F/M (kgDBO<sub>5</sub>/Kg SSVLM/día)</b>	<b>Carga Volumétrica (KgDBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d)</b>
<b>Convencional</b>	4-8	5-15	1500-3000	0.25-0.5	0.2-0.4	0.3-0.6
<b>Mezcla completa</b>	4-8	5-15	2500-4500	0.25-1.0	0.2-0.6	0.8-2.0
<b>Estabilización /Contacto</b>	0.5-1	5-15	1000-3000	0.2-1.0	-	-
<b>Aireación extendida</b>	15-36	20-30	3000-6000	0.75-1.5	0.05-0.15	0.1-0.4

### 2.7.1.1 Determinación de la concentración SSV en el licor mixto

El proceso de lodos activados es un proceso de tratamiento biológico de agua residual que utiliza microorganismos para acelerar la degradación de materia orgánica. Cuando el lodo activado es incorporado al sistema, los microorganismos crecen y se reproducen de la materia orgánica presente en el agua residual, dejando un efluente parcialmente limpio. Para funcionar eficientemente, la biomasa de microorganismos necesita un balance continuo de comida (A/M) y oxígeno (16).

A la concentración de sólidos en suspensión en el tanque de aireación se le conoce como sólidos suspendidos en el *licor mezclado*. Sin embargo, algunos de los sólidos en suspensión pueden ser inorgánicos y un parámetro más usual es el contenido del material combustible presente, conocido como sólidos suspendidos volátiles ó SSV, como una indicación de la concentración microbiana. Esto indicará, la cantidad de materia orgánica presente y su proporción o concentración dependerá de las condiciones de operación de la planta y la carga orgánica que se encuentre en el influente de cada planta en términos de la DBO<sub>5</sub> (18). Para conocer la cantidad de concentración de sólidos en el licor mixto se deberá utilizar la ecuación 1:

$$SSVLM = \frac{(SSVLM \times 10^6)}{(Vm)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

SSVML: sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (mg/L)

Vm: volumen de la muestra (mL)

10<sup>6</sup>: factor de conversión

### 2.7.1.2 Edad de lodos

La edad de lodos se define como la relación de la masa sólidos suspendidos volátiles en el sistema a la producción neta de biomasa. Controlando la edad de lodos, se controla la velocidad de crecimiento de la biomasa en el sistema, cuanto menor sea la edad de los lodos, mayor será la velocidad de crecimiento específico (16). La edad de lodos se calcula con la ecuación 2.

$$\theta_c = \frac{(SSVLM \times V_t)}{(Q \times SST)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$\theta_c$ : edad de lodos

SSVLM: sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (kg)

Q: flujo de entrada (m<sup>3</sup>/día)

V<sub>t</sub>: volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

SST: sólidos suspendidos totales en el influente (mg/L)

### 2.7.1.3 Recirculación de lodos

En los sistemas de lodos activados se acostumbra mantener una relación de recirculación entre 0.75-1.5 (21). Esta relación puede determinarse de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{Q_r}{Q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$\alpha$ : recirculación de lodos

Q<sub>r</sub>: caudal de recirculación (m<sup>3</sup>/s)

Q: caudal del influente (m<sup>3</sup>/s)

### 2.7.1.4 Tiempo medio de retención celular

Otro enfoque utilizado para el control de los sólidos es el tiempo medio de retención celular (TRMC), o denominado también como el tiempo de retención de sólido. El TRMC deseado en las plantas convencionales de lodos activados es de 4 a 15 días (16).

$$TRMC = \frac{SSTLM}{SST_w + SST_{ef}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

SSTLM: sólidos suspendidos totales en el sistema (kg)

SST<sub>w</sub>: sólidos suspendidos totales purgados del sistema (kg/día)

SST<sub>ef</sub>: sólidos suspendidos totales en el efluente (kg)

### 2.7.1.5 Tiempo de retención hidráulico

El agua residual debe permanecer en el clarificador el tiempo suficiente para permitir que las partículas sólidas sedimenten. La relación entre el tiempo de retención y la tasa de sedimentación de las partículas es muy importante (16). El tiempo de detención se calculó usando estos dos factores; cantidad de flujo diario y volumen del tanque. El tiempo de retención hidráulico se calcula con la Ecuación 5.

$$Th = \frac{(Vt)}{(Q)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

Th: tiempo de retención hidráulico

Vt: volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

Q: flujo de entrada (m<sup>3</sup>/día)

### 2.7.1.6 Tasa de relación alimento/microorganismo (A/M)

El proceso de lodos activados es un tratamiento biológico de las aguas residuales que utiliza microorganismos para acelerar la descomposición de la materia orgánica. Cuando el lodo activado es agregado al agua residual en el tanque aerobio, los microorganismos se alimentan y crecen dentro del proceso. Mientras los organismos crecen y se reproducen, se va removiendo la materia orgánica, dejando el agua residual parcialmente limpia. Para que esto suceda eficientemente, la biomasa de los microorganismos (concentración de sólidos), necesita un equilibrio tanto del alimento (alimento/microorganismo) como del oxígeno suministrado (16)

De acuerdo a lo indicado en la literatura, la determinación de la tasa de relación (A/M), dependerá del tipo de sistema y de las características únicas de cada planta, que van desde 0.05-0.7 kg de DBO<sub>5</sub> por cada kg SSVLM. La ecuación para el cálculo de la relación alimento/microorganismo se determina utilizando la Ecuación 6.

$$A/M = \frac{(Q \times DBO_5)}{(V \times SSVLM)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Q: flujo de entrada (m<sup>3</sup>/día)

DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno compuesta en el influente (kg/día)

V: volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

SSVLM: sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto (kg)

### 2.7.1.7 Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Este cálculo es de mucha utilidad e indica cuando ha habido cambios en las características del lodo y su capacidad para sedimentar en el clarificador secundario o final, cualquier IVL alto arriba de los 200 ml/gr, indica que algo en el reactor aerobio no está bien, pudiendo existir un crecimiento excesivo de microorganismos denominados *filamentosos*, impidiendo una buena sedimentación, o la falta de microorganismos que afecten la densidad del lodo. El IVL se expresa como el volumen en mL ocupado por 1 gramo de sólidos en suspensión del licor mezclado, después de 30 minutos de sedimentación en una probeta graduada de 1000 ml. Los rangos de IVL apropiados para cada planta es determinado en el momento que el efluente final está en su mejor condición con respecto a los SST y la DBO<sub>5</sub> removida, incluida la turbidez del agua. En la Figura 11, se observa el procedimiento para la determinación del índice volumétrico de lodos.

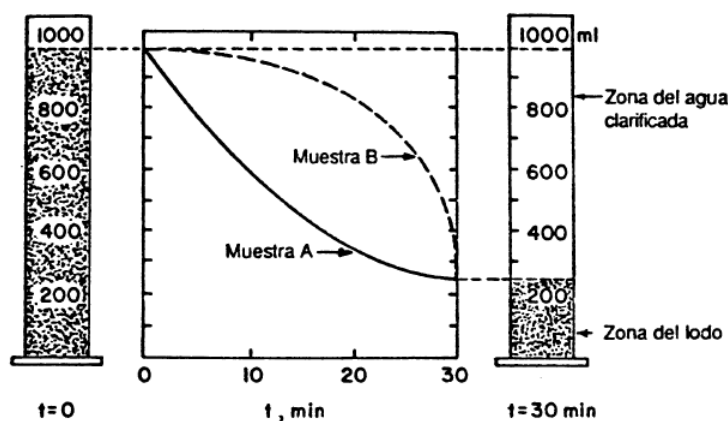


Figura 11. Determinación del Índice Volumétrico de Lodos.

El IVL se expresa de la siguiente manera:

$$IVL = \frac{(SD/Vm)}{(SSLM)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

IVL: Índice volumétrico de lodos (mL/g)

SD: sólidos sedimentables en 30 min

Vm: volumen de la muestra (mL/L)

SSLM: sólidos suspendidos totales en el licor mixto (mg/L)

### 2.7.1.8 Purga de lodos

Aunque teóricamente la producción de lodo en el proceso de aireación extendida es nula, en la práctica esto no sucede así ya que parte del lodo no es biodegradable y en consecuencia se acumula y la cantidad neta de lodo debe purgarse (17). La cantidad de lodos que se deberán purgar en los sistemas de aireación extendida o prolongada, dependerá estrictamente de las necesidades de cada planta y de la concentración de sólidos suspendidos volátiles que se desee mantener en el reactor aerobio.

$$Purga = \frac{SST}{(TMRC)} - SST_{ef} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

SST: sólidos suspendidos bajo aireación en el sistema (kg)

TMCR: tiempo medio de retención celular (días)

SST<sub>ef</sub>: sólidos suspendidos totales en el efluente (kg/día)

## **2.7.2 Parámetros fisicoquímicos**

La medición de los parámetros fisicoquímicos son muy importantes ya que permite determinar bajo qué condiciones la planta está operando para conocer la calidad de efluente, ó bien realizar modificaciones en el proceso para mejorar la eficiencia de la planta que cumpla en los intervalos que marca la legislación vigente.

### **2.7.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua y como resultado de la acción oxidación bioquímica aerobia. La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales: materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por organismos aeróbicos; nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoniaco, y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas (nitrosomas y nitrobacter). En las aguas residuales domésticas, casi toda la demanda de oxígeno se debe a materiales orgánicos carbónicos (17). Los rangos comunes de  $DBO_5$  que se presentan en los influentes de las plantas de tratamiento convencionales de lodos activados que tratan agua residual doméstica, van desde 150 a 400 mg/L, y para los efluentes se encuentran de 10 a 20 mg/L (17).

### **2.7.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno, es utilizada como una medida de oxígeno equivalente de la materia orgánica contenida en una muestra que es susceptible a la oxidación mediante un oxidante químico fuerte. Para muestras provenientes de origen específico, la DQO puede ser relacionada empíricamente con la DBO [28]. El ensayo de la determinación de DQO al dicromato se utiliza ampliamente para establecer la contaminación de materia orgánica en aguas residuales (17).

### 2.7.2.3 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales, corresponden a la combinación de los sólidos suspendidos volátiles (materia orgánica) y sólidos suspendidos no volátiles (materia fija o inorgánica) en suspensión, y se obtienen en la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca en la estufa a 103-105°C (16).

Los sólidos suspendidos totales, se calculan con la suma de sólidos suspendidos volátiles y los sólidos suspendidos no volátiles. Para conocer la concentración de sólidos suspendidos totales, se deberá utilizar la siguiente ecuación.

$$SST = (SSV + SSNV) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

SSV: sólidos suspendidos volátiles (mg/L)

SSNV: sólidos suspendidos no volátiles (mg/L)

### 2.7.2.4 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los sólidos volátiles en suspensión corresponden a los lodos biológicos y se interpreta en términos de materia orgánica, constituidos por una población heterogénea de microorganismos. La determinación experimental de los SSV se lleva a cabo midiendo la pérdida de peso de los sólidos totales en suspensión después de la incineración en una mufla a 550 °C.

Esta pérdida de peso corresponde principalmente a los sólidos en suspensión no volátiles. Su naturaleza es distinta a los lodos biológicos, estando constituidos por materia inerte tanto orgánica como inorgánica (17). El cálculo, se expresa de la siguiente manera.

$$SSV = (SST - SSNV) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

SST: sólidos suspendidos totales (mg/L)

SSNV: sólidos suspendidos no volátiles (mg/L)

#### **2.7.2.5 Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto es un parámetro esencial en los tratamientos biológicos aerobios ya que los microorganismos requieren de energía para poder realizar sus funciones vitales. La cantidad de oxígeno que se suministra al tanque de aireación debe de ser suficiente para que los microorganismos puedan respirar y se pueda oxidar la materia orgánica. En los procesos de lodos activados la mayor parte del consumo de energía de los aireadores es para transferencia de oxígeno, mientras que las instalaciones grandes, como los sistemas de lagunaje con aireación, la mayor parte del consumo de potencia es para mantener niveles adecuados de turbulencia (17).

#### **2.7.2.6 Temperatura**

El efecto de la temperatura en los tratamientos aerobios es un factor importante en la oxidación y acumulación de biomasa, una alta temperatura produce una tasa de crecimiento rápido de microorganismos y más capacidad de almacenamiento de residuos en

el organismo de las células con menor oxidación. Por lo tanto, mayor actividad biológica resultará en más producción de lodos.

Los sistemas de lodos activados se ven altamente influenciados por los cambios de temperatura. Durante el verano, las plantas de lodos activados pueden operar de manera satisfactoria con cierta concentración de biomasa y suministro de oxígeno, pero en invierno, estas condiciones cambian requiriendo menos oxígeno y más cantidad de biomasa. Usualmente el cambio de la temperatura no es significativo hasta que los cambios bajan o suben más de 6 °C. Durante los meses más fríos de invierno, se deberán incrementar los sólidos bajo aireación (biomasa) para proveer más microorganismos para degradar la materia orgánica presente (16).

#### **2.7.2.7 pH**

Existen una serie de sustancias tóxicas que inhiben o impiden los procesos biológicos. Este tipo de sustancias, pueden causar una desaceleración o la muerte de los microorganismos y generar problemas en la calidad del efluente. Por lo tanto, se deberá monitorear y controlar la entrada del agua residual tanto al inicio como al final del proceso, el intervalo recomendado va desde los 6.8 a 8.0, aunque el nivel óptimo de pH en el influente dependerá de cada planta (16).

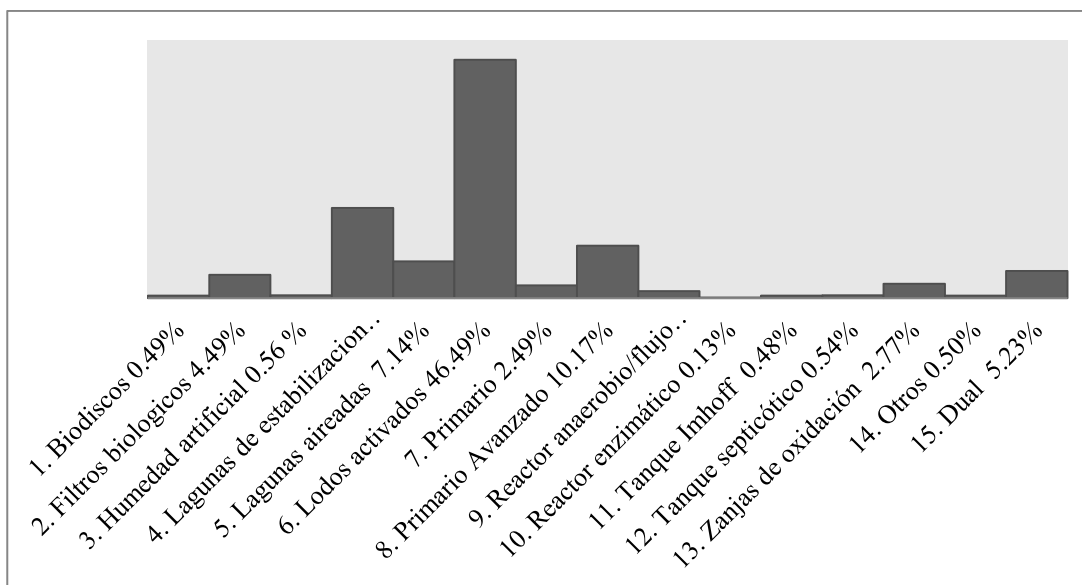
### **2.8 Sistemas de Tratamiento en México**

En México, el crecimiento de la instalación de plantas de tratamiento va en aumento, esto nos lleva a la necesidad de construir plantas eficientes que operen de manera óptima procesos que permitan cumplir con las normas ambientales vigentes. En el país existe un volumen considerable de aguas residuales que son vertidas sin tratamiento en el suelo y aguas superficiales, tanto en zonas urbanas como rurales, generando un riesgo para

la población y el medio ambiente. Teniendo en cuenta esto, en México, se dio lugar a la promulgación de leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, siendo como objetivo el prevenir y controlar la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos. Esto permitió crear apoyos técnicos y económicos a los gobiernos municipales para la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales permitiendo así reducir el nivel de contaminación y aumentar la cantidad de agua tratada en el país. Y es así como el estado mexicano creó un marco jurídico que se encarga de regular las descargas a los cuerpos receptores a través de las normas mexicanas 001, 002 y 003 de SEMARNAT (6).

En el año 2009, se estableció como meta nacional alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales del 43.5%, equivalente a un caudal total tratado de 92.2 m<sup>3</sup>/s, lo que implicaba incrementar en 7.1 m<sup>3</sup>/s las aguas tratadas en el ejercicio. De acuerdo con la información que recaba la CONAGUA a través de sus organismos de cuenca y direcciones locales, hasta diciembre de 2009 existían en el país 2,029 plantas en operación formal, 196 más que en el ejercicio anterior, con una capacidad total instalada de 121 m<sup>3</sup>/s. Las 2,029 plantas en operación procesan un caudal de 88.1 m<sup>3</sup>/s, equivalente al 42.1% del total de las aguas residuales generadas y colectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipales, estimado en 209 m<sup>3</sup>/s. De las plantas en operación incorporadas al inventario, 60 corresponden a instalaciones nuevas que entraron en operación durante el año 2009, con una capacidad instalada de 3.2 m<sup>3</sup>/s y 1.9 m<sup>3</sup>/s en operación, más 136 plantas de tratamiento ya existentes incorporadas al inventario por las entidades prestadoras de servicio (6). En la Tabla 3, se observa los principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, clasificadas por caudal tratado.

**Tabla 3. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado.**



Esto significa que la cobertura se incrementó en 13.1%, representando un caudal adicional de 28.5 m<sup>3</sup>/s. En la presente administración el incremento ha sido de 13.7 m<sup>3</sup>/s, lográndose una cobertura de tratamiento a diciembre de 2009 del 42.1%. La meta establecida para el año 2012 es tratar el 60% del volumen total de aguas residuales colectadas en los sistemas formales de alcantarillado del país (6). En la Tabla 4 se observa la evolución en la cobertura del tratamiento de agua residual en México, durante el periodo 2000 al 2009.

**Tabla 4. Evolución en la cobertura de tratamiento, 2000-2009.**

Año	Evolución en la cobertura de tratamiento. 2000-2009.									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Incremento de caudal (m <sup>3</sup> /s)		4.9	5.3	4.1	4.3	7.3	2.6	4.9	4.3	4.5
Porcentaje	23.0%	25.2%	27.7%	29.7%	31.5%	35.0%	36.1%	38.3%	40.2%	42.1%

### **2.8.1 Inventario de plantas de tratamiento de aguas por entidad federativa**

La distribución de las plantas de tratamiento municipales en operación por entidad federativa, al igual que para las plantas potabilizadoras, a diferencia de años anteriores, en esta ocasión sólo se reporta la infraestructura en operación porque es la que incide, a través del caudal tratado, en los indicadores de cumplimiento y el avance de metas. Se puede observar que en el año 2009, once estados lograron tratar más del 60% del caudal colectado en los sistemas de alcantarillado, tres estados más que el año anterior. En dicho cuadro se observan variaciones de un año a otro en el porcentaje de cobertura de tratamiento. Diferencias que pueden tener su origen en la variación del volumen de aguas recolectadas y/o en las condiciones de operación de las plantas de tratamiento. El método más utilizado en el país es el de lagunas de estabilización, aplicado en 707 plantas, equivalentes al 34.8% del total de las mismas. Le sigue el de lodos activados que se aplica en 546 plantas, 26.9% del total. En tercer lugar figura el proceso de RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), que se utiliza en 129 plantas, que equivalen al 6.3% del total (6).

El inventario de las plantas de tratamiento de aguas presentado en esta investigación, fue el de plantas del 2008 por la Comisión Nacional del Agua, correspondiente a la publicación de Estadísticas del Agua en México del año 2010. En la Tabla 5, se observa el caudal de aguas residuales municipales tratadas por entidad federativa.

**Tabla 5. Caudal de aguas residuales municipales tratadas por entidad federativa, 2009.**

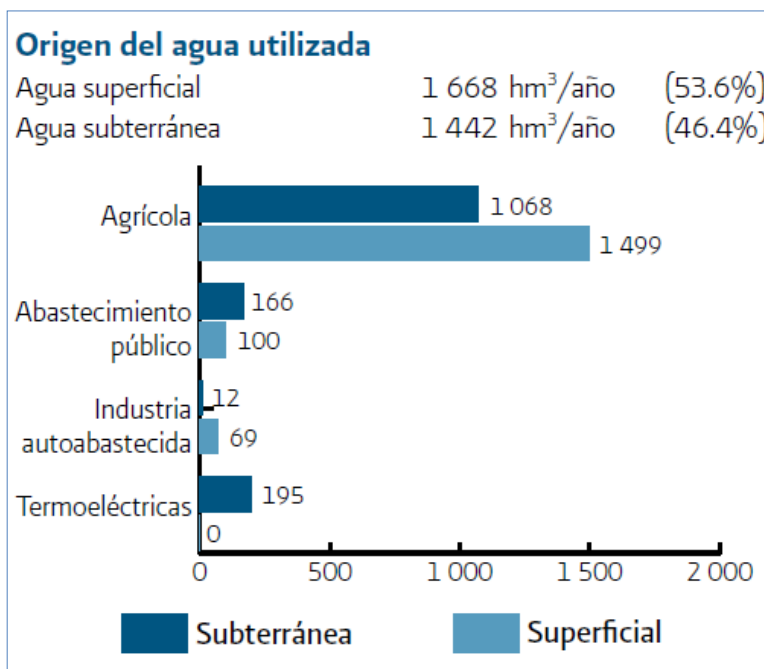
Entidad Federativa	En operación		
	Nº de Plantas	Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /s)	Caudal tratado (m <sup>3</sup> /s)
Aguascalientes	115	4.23	3.47
Baja California	27	6.99	5.26
Baja California Sur	18	1.20	0.84
Campeche	13	0.10	0.06
Chiapas	24	1.51	1.36
Chihuahua	119	8.72	5.93
Coahuila de Zaragoza	21	4.97	3.87
Colima	57	1.54	1.00
Distrito Federal	27	6.48	3.12
Durango	167	3.5	2.67
Guanajuato	60	5.79	4.31
Guerrero	40	2.00	1.22
Hidalgo	13	0.33	0.28
Jalisco	96	3.77	3.49
México	78	7.09	5.19
Michoacán de Ocampo	25	3.56	2.47
Morelos	32	1.60	1.21
Nayarit	63	2.03	1.23
Nuevo León	61	13.24	11.65
Oaxaca	66	1.51	0.99
Puebla	69	3.02	2.43
Querétaro de Arteaga	67	1.12	0.72
Quintana Roo	29	2.08	1.60
San Luis Potosí	21	2.12	1.74
Sinaloa	136	5.28	4.51
Sonora	76	4.45	3.09
Tabasco	72	1.85	1.31
Tamaulipas	39	5.61	4.05
Tlaxcala	52	1.23	0.87
Veracruz de Ignacio de la Llave	92	5.43	3.17
Yucatán	13	0.08	0.07
Zacatecas	45	0.55	0.46
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>1 833</b>	<b>113.02</b>	<b>83.64</b>

## 2.8.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales en Baja California

El estado de Baja California, tiene una población de 3, 122,570 habitantes, con una precipitación de 177 mm por año. De la cantidad total de habitantes, 2, 914,528 habitantes corresponden a la población urbana y 208, 042 corresponden a la zona rural. Una proyección realizada, estima que en el 2030, Baja California contará con 5, 082, 349 habitantes (6).

Conforme a los datos generales indicados en el documento de la comisión nacional del agua, en Baja California el origen y porcentaje del agua superficial utilizada corresponde a 1,668 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a un 53.6%, el cual una cantidad de 1,499 hm<sup>3</sup> es utilizada por el sector agrícola, 100 hm<sup>3</sup> abastece al público en general, y el 69 hm<sup>3</sup> restante es autoabastecida. Referente a la utilización del agua subterránea, con un total 1,442 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a un 46.4%, el 1, 068 hm<sup>3</sup> se utiliza para fines agrícolas, 166 hm<sup>3</sup> al público, 12 hm<sup>3</sup> le corresponde a la industria y el 195 hm<sup>3</sup> es utilizada por el sector industrial, como se observa en la Figura 6.

Tabla 6. Origen y cantidad del agua superficial y subterránea utilizada.



En el inventario de plantas de tratamiento de agua residual en Baja California a diciembre del 2008, indica, que Baja California cuenta con 106 plantas de tratamiento en operación, el cual solo 27 plantas de tratamiento, tratan agua residual municipal, y el restante 179 corresponden al tratamiento de aguas industriales. La capacidad total instalada en las aguas residuales municipales es de 6.985 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal tratado de 5.262 m<sup>3</sup>/s. Para el tratamiento de aguas industriales, la capacidad instalada es de 0.673 m<sup>3</sup>/s y un caudal tratado de 0.151 m<sup>3</sup>/s. En la Tabla 7, se observa el inventario de plantas de tratamiento en México hasta diciembre del 2008 (6).

Tabla 7. Inventario de plantas de tratamiento a diciembre del 2008.

<b>Plantas de tratamiento (a diciembre de 2008)</b>	
<b>Potabilizadoras municipales</b>	
Número en operación	26
Capacidad instalada	10.699 m <sup>3</sup> /s
Caudal potabilizado	5.311 m <sup>3</sup> /s
<b>Aguas residuales municipales</b>	
Número en operación	27
Capacidad instalada	6.985 m <sup>3</sup> /s
Caudal tratado	5.262 m <sup>3</sup> /s
<b>Aguas residuales industriales</b>	
Número en operación	179
Capacidad instalada	0.673 m <sup>3</sup> /s
Caudal tratado	0.151 m <sup>3</sup> /s

El inventario de tratamiento por proceso de las veintisiete plantas de tratamiento de aguas residuales que existen en Baja California, se distribuyen de la siguiente manera: 4 zanjas ó lagunas de oxidación, 9 lagunas aireadas, 2 plantas con sistemas de filtros biológicos y por último 1 planta de tratamiento primario avanzado (6).

Como se puede observar en la Figura 12, el proceso de tratamiento que más se utiliza es el de lodos activados seguidos de las lagunas aireadas, este inventario que se representa la distribución de los procesos de las plantas de tratamiento que publicó la Comisión Nacional del Agua, corresponde a la publicación actualizada realizada en la estadística del agua (EAM) del año 2010.

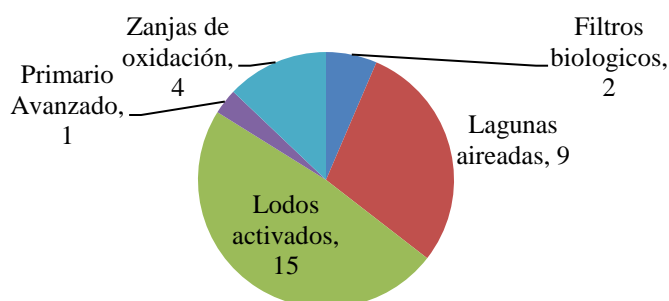


Figura 12. Inventario de distribución de los diferentes proceso de tratamiento en Baja California.

## 2.9 Inventario de plantas de tratamiento de agua residual instaladas en Baja California

Al concluir el año 2007 existían registradas en el país, 1 710 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 106 266.7 L/s, las que daban tratamiento a 79 294 L/s, equivalentes al 38.3% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Al cierre de 2008, el registro de plantas en operación se incrementó a 1 833 instalaciones, con una capacidad instalada de 113 024.0 L/s y caudal tratado de 83 639.6 L/s, que significa el 6.35% en cuanto a capacidad instalada y de 5.48% en caudal tratado, lo que permitió alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales del 40.2% en el ejercicio. Para 2009, la meta es incrementar a 92 200 L/s el caudal de aguas residuales tratadas y con ello alcanzar una cobertura de tratamiento del 43.5% a nivel nacional (6).

## 2.9.1 Mexicali

En la Tabla 8, se presentan las plantas instaladas en la ciudad de Mexicali y su valle. Como se puede observar, Mexicali cuenta con siete plantas de tratamiento en operación. El proceso de lagunas de estabilización o aireadas el más utilizado para tratar el agua residual, seguido del tratamiento de lodos activados (6).

Tabla 8. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Mexicali, B.C.

Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Tratado	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
CIUDAD MORELOS (CUERVOS)	CIUDAD MORELOS	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	30	12.1	INFILTRACION AL SUBSUELO	FORMALMENTE EN OPERACIÓN EL 31 DE AGOSTO/2007
GUADALUPE VICTORIA (KM.. 43)	GUADALUPE VICTORIA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	70	26.7		INICIÓ OPERACIÓN EN 2007
MEXICALI	MEXICALI (LAS ARENITAS)	LAGUNAS AIREADAS	840	717.8		INICIO OPERACIÓN EN 2006
MEXICALI	PLANTA U.A.B.C.	LODOS ACTIVADOS	10	0.4	PARA RIEGO DE AREAS DEPORTIVAS Y JARDINES	PLANTA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
MEXICALI	TERMOELÉCTRICA AZTECA (INTERGEN)	LODOS ACTIVADOS	640	326.0	USO INDUSTRIAL	GENERACIÓN DE VAPOR EN CALDERAS
MEXICALI	ZARAGOZA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	1300	913.8	RÍO NUEVO	PASA A PROCESO DE LAGUNAS
ALGODONES	LOS ALGODONES	LAGUNAS AIREADAS	20	5.9	DREN CULIACÁN	INICIA OPERACIONES JULIO 2007

## 2.9.2 Tijuana

En la Tabla 9, se presentan las plantas instaladas en la ciudad de Tijuana. La ciudad de Tijuana cuenta con diez plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo el proceso para el tratamiento de aguas más utilizado el de lodos activados. Tijuana, a su vez, cuenta con plantas de tratamiento construidas y operadas por fraccionamientos particulares con descargas al océano pacífico a los ríos y arroyos de la misma (6).

**Tabla 9. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tijuana, B.C.**

Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Tratado	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
SAN ANTONIO DEL MAR	SAN ANTONIO DEL MAR	LODOS ACTIVADOS	2.5	3.3	RIEGO Y AL OCÉANO PACÍFICO	FRACCIONAMIENTO PARTICULAR
TERRAZAS DEL VALLE	VISTA DEL VALLE	LODOS ACTIVADOS	10	3.8		INICIÓ OPERACIÓN EN 2007
TIJUANA	BINACIONAL O PITAR	PRIMARIO AVANZADO	1100	1053.8	OCÉANO PACIFICO	INCUMPLIMIENTO DE NORMAS DE CALIFORNIA, PROPUESTA PARA TRATAMIENTO SECUNDARIO EN MEXICO
TIJUANA	ECOPARQUE	FILTROS BIOLOGICOS O PERCOLARORES	5	3.7	RIESGO AREAS VERDES	PLANTA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
TIJUANA	FRACC. EL REFUGIO	LODOS ACTIVADOS	25	32.3	ARROYO TRIBUTARIO (RIO TIJUANA)	PLANTA DE FRACCIONAMIENTO PARTICULAR
TIJUANA	FRACC. SANTA FE	LODOS ACTIVADOS	30	5.4	REUSO DE AREAS VERDES	FRACCIONAMIENTO PARTICULAR OPERADA POR URBI
TIJUANA	FRACCIONAMIENTO VILLA DEL PRADO	LODOS ACTIVADOS	10	11.6		INICIO OPERACIÓN MARZO 2008
TIJUANA	MONTE LOS OLIVOS	LODOS ACTIVADOS	460	230	RIO TIJUANA	SE DESCARGA EN RIO TIJUANA, SE CONDUCE AL OCEANO
TIJUANA	PORTICOS DE SAN ANTONIO	LODOS ACTIVADOS	15	7.4	ARROYO SIN NOMBRE	PLANTA DE FRACCIONAMIENTO PARTICULAR TRANSFERIDA AL ORGANISMO OPERACIÓN
TIJUANA	SAN ANTONIO DE LOS BUENOS	LAGUNAS AIREADAS	1100	966.3	OCEANO PACIFICO	REGULAR, EN BUENAS CONDICIONES

### 2.9.3 Ensenada

En la Tabla 10, se presenta el inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Ensenada, la cual solamente cuenta con 3 plantas de tratamiento, dos de ellas son de procesos de lodos activados y la restante es una zanja de oxidación.

Las observaciones realizadas por la Comisión Nacional del agua, muestran que dos de las tres plantas instaladas, se encuentran deterioradas y con falta de mantenimiento.

**Tabla 10. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ensenada, B.C.**

<b>Localidad</b>	<b>Nombre de la planta</b>	<b>Proceso</b>	<b>Capacidad Instalada (L/s)</b>	<b>Caudal Tratado</b>	<b>Cuerpo receptor o reuso</b>	<b>Observaciones</b>
ENSENADA	EL GALLO	LODOS ACTIVADOS	250	133	ARROYO EL GALLO	LAS INSTALACIONES METÁLICAS ESTÁN DETERIORADAS
ENSENADA	EL NARANJO	ZANJAS DE OXIDACIÓN	500	326.8	ARROYO EL GALLO/OCEANO PACIFICO	SE AMPLIO DE 60 A 120 L/S
RODOLFO SANCHEZ T. (MANEADERO)	HOGARES DEL PUERTO	LODOS ACTIVADOS	8.0	2.3	RIEGO AGRICOLA	FALTA MANTENIMIENTO (DETERIORADA)

## 2.9.4 Rosarito

En la Tabla 11, se presenta el inventario de plantas instaladas en la ciudad de Rosarito, la cual cuenta con tres plantas de tratamiento de aguas residuales. La planta con mayor capacidad de 95 L/s, tiene un proceso de lagunas estabilización y su descarga se realiza al arroyo Huahuatay. La planta de tratamiento de zanjas de oxidación tiene una capacidad de 70 L/s y actualmente se realizan trabajos para su ampliación, su descarga se realiza al océano. La planta con menor capacidad, de 2.6 L/s, cuenta con un proceso de lodos activados, su descarga se utiliza para el riego de áreas verdes y océano pacifico (6).

**Tabla 11. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Rosarito, B.C.**

<b>Localidad</b>	<b>Nombre de la planta</b>	<b>Proceso</b>	<b>Capacidad Instalada (L/s)</b>	<b>Caudal Tratado</b>	<b>Cuerpo receptor o reuso</b>	<b>Observaciones</b>
PLAYAS DE ROSARITO	PLAYAS DE ROSARITO	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	95	126.8	ARROYO HUAHUATAY	NINGUNA
PLAYAS DE ROSARITO	PUERTO NUEVO	LODOS ACTIVADOS	2.6	3.8	RIEGO DE AREAS VERDES/OCEANO PACIFICO	PRETRATAMIENTO CON PRODUCTOS QUIMICOS
PLAYAS DE ROSARITO	ROSARITO NORTE	ZANJAS DE OXIDACIÓN	70	73.1	OCEANO PACIFICO	SE REALIZAN TRABAJOS DE AMLIACION

## 2.9.5 Tecate

En la Tabla 12, se presenta el inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en la ciudad de Tecate, la cual solamente cuenta con una planta con un proceso biológico de bio-torres, tiene una capacidad de 200 L/s y su descarga se realiza al arroyo Tecate (6).

Tabla 12. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tecate, B.C.

Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Tratado	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
TECATE	TECATE	BIOLÓGICO	200	171.2	ARROYO TECATE	FILTROS BIOLÓGICOS SE CONVIRTIERON AL PROCESO DE BIOTORRE

## 2.10 Legislación vigente en materia de agua residual en México

En México se ha legislado en materia de agua desde hace más de cinco décadas. La ley actual aboga la de 1972 que tenía, como las anteriores, un carácter predominantemente normativo y administrativo. La Ley de Aguas Nacionales vigente contiene cambios sustanciales relativos a la administración del agua, el papel de la autoridad y la responsabilidad de los usuarios respecto de este recurso. Es además una ley coercitiva que establece sanciones y penalidades para los infractores. La Ley de Aguas Nacionales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1° de diciembre de 1992 señala que “La autoridad y administración en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes corresponde al Ejecutivo Federal quien la ejercerá directamente o a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA)”.

Las descargas de las distintas actividades económicas y de los municipios no deben rebasar los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes que se establecen en función de dos elementos: El tipo de cuerpo receptor y el uso posterior que se haga del agua. Todas estas atribuciones hacen que la CONAGUA sea una dependencia con un poder político que está por encima del que tienen varias secretarías de estado; sus atribuciones - consideradas excesivas desde varios puntos de vista- le permiten actuar como juez y parte en todo lo que tenga que ver con el recurso agua.

Actualmente se cuenta con la vigencia de tres normas sobre descarga de agua residual, que protegen los cuerpos receptores:

- NOM-001-SEMARNAT-1996
- NOM-002-SEMARNAT-1996
- NOM-003-SEMARNAT-1996

Sólo las dos primeras tienen alguna aplicación a la actividad pecuaria; en el primer caso cuando se descarga a un cuerpo de agua o terreno propiedad de la nación y, en el segundo, cuando las granjas se localizan en zonas urbanas o periurbanas (22).

### **2.10.1 Norma oficial mexicana NOM-001- SEMARNAT- 1996**

Esta norma, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Su objetivo es proteger la calidad de las aguas y bienes nacionales, revertir su deterioro y posibilitar los usos posteriores del agua. Su uso es de aplicación federal, esto es, rige en todo el territorio nacional. A diferencia de las normas anteriores, la NOM-001-SEMARNAT-1996, regula el cuerpo receptor y no la actividad que realiza la descarga (22). Las descargas de las distintas actividades económicas y de los municipios no deben rebasar los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes que se establecen en función de dos elementos: el tipo de cuerpo receptor y el uso posterior que se haga del agua.

En lo que respecta a la toma de muestras compuestas, esta norma, establece que para conformar el volumen de las muestras compuestas, el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser el proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma. El promedio mensual será el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (promedio diario). En la Tabla 13, se presenta el procedimiento para la frecuencia de muestreo simple y compuesto (22).

**Tabla 13. Frecuencia de muestreo simple y compuesto.**

HORAS POR DIA QUE OPERA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA	NUMERO DE MUESTRAS SIMPLES	INTERVALO ENTRE TOMAS DE MUESTRAS SIMPLES (HORAS)	
		MINIMO N.E.	MAXIMO N.E.
		Menor que 4	Mínimo 2
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

La utilización del agua residual destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma limitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras, tendrán un riego no restringido. Para la utilización del agua residual, se restringe el riego solamente para verduras y legumbres que se consumen crudas. Además, establece que para las concentraciones de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros, no deberán exceder el valor indicado como límite máximo establecido en esta norma, el rango permisible de potencial de hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades (23). En la Tabla 14, se puede observar los límites permisibles de contaminantes básicos referidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tabla 14. Límites máximos permisibles de contaminantes básicos.

**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP)**

Potencial de hidrógeno (pH)	Entre 5 y 10 unidades
Coliformes fecales <sup>17</sup>	1,000 promedio mensual 2,000 promedio diario
Huevos de helminto	5 huevos por litro en riego restringido 1 huevo por litro en riego no restringido

Para determinar la contaminación de patógenos se tomará como indicador a los coliformes fecales, el límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente (23).

Los límites máximos permisibles para los contaminantes básicos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Límites máximos permisibles de contaminantes que regula la norma 001.

<b>CONTAMINANTES QUE REGULA LA NOM-001-SEMARNAT-1996</b>		
<b>Básicos</b>	<b>Metales pesados y cianuros</b>	<b>Patógenos y Parásitos</b>
Potencial hidrógeno (pH)	Arsénico	Coliformes fecales
Temperatura	Cadmio	Huevos de helminto
Grasas y aceites	Cianuro	
Materia flotante	Cobre	
Sólidos sedimentables	Mercurio	
Sólidos suspendidos totales	Cromo	
Demanda bioquímica de oxígeno	Níquel	
Nitrógeno total	Plomo	
Fósforo total	Zinc	

## 2.10.2 Norma oficial mexicana NOM-002- SEMARNAT- 1996

Esta norma, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales al alcantarillado urbano y municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como de proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.

La NOM-002-SEMARNAT-1996, regula la descarga de aguas residuales de los procesos que resultan de la producción de un bien o un servicio comercializable (24). Límites máximos permisibles (LMP) son los siguientes:

- a) Potencial hidrógeno (pH) se establece entre 5.5 y 10 unidades.
- b) Temperatura: máximo 40° C
- c) Materia flotante debe estar ausente
- d) Demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales
- e) Los LMP para otros parámetros básicos y metales pesados

En la Tabla 16, se presentan los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos por la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Tabla 16. Límites máximos permisibles de contaminantes establecidos.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (mg/L)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (ml/l)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

### 2.10.3 Norma oficial mexicana NOM-003- SEMARNAT- 1997

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso. En el caso de que el servicio al público se realice a terceros, estos serán responsables del cumplimiento de la presente norma, desde la producción del agua tratada hasta su uso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma. Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 17, la materia flotante deberá estar ausente en el agua residual tratada, de acuerdo al método de prueba establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-006 [32].

Tabla 17. Límites máximos permisibles de contaminantes.

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO <sub>5</sub> mg/l	SST mg/l
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

El agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola. Además, las entidades públicas responsables del tratamiento de las aguas residuales que reusen en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de las aguas tratadas en términos de la presente norma y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente (24).

## CAPITULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización de sitio de estudio y descripción de procesos

El presente estudio se realizó en la PTAR de la Universidad Autónoma de Baja California, en la ciudad de Mexicali, ubicada en los campos deportivos de la misma. Se realizaron tres etapas de trabajo de recolección de muestras y se llevo a cabo una caracterización inicial para determinar en base a que parámetros fisicoquímicos y de control estaba operando la planta, seguida de la etapa de determinación de parámetros de control óptimos y finalmente se realizó la etapa de ajustes de parámetros de operación de la PTAR-UABC de acuerdo a los establecidos en las normas mexicanas para reuso de agua residual tratada.

La PTAR-UABC Campus Mexicali, consiste en un sistema de lodos activados de aeración extendida, conocido como un sistema donde la oxidación es total, esto quiere decir, que existe una conversión de toda la materia orgánica en gaseosa o compuestos inorgánicos solubles (5). En la Figura 13 se presenta un diagrama de los procesos unitarios de la planta de tratamiento.

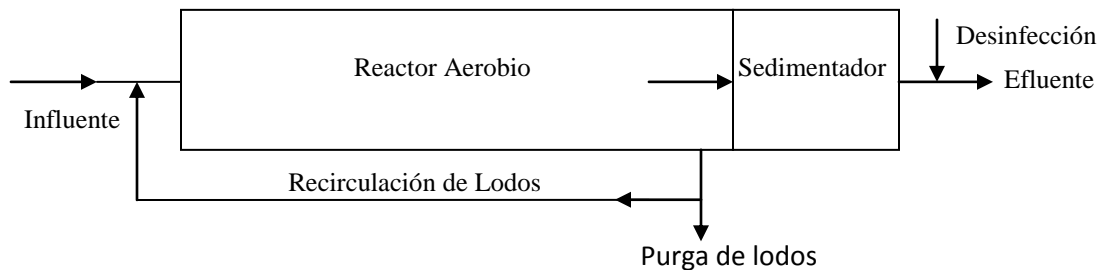


Figura 13. Tren de tratamiento de la PTAR-UABC.

## 3.2 Muestreo

Se eligió un punto de muestreo para cada proceso unitario de la planta, con el propósito de obtener muestras representativas e interpretar resultados de una manera correcta y más precisa para poder realizar la caracterización del agua residual. Se realizaron toma de muestras para análisis de muestras simples y monitoreo compuesto.

### 3.2.1 Puntos y frecuencia de muestreo

Los puntos de muestreo que se establecieron en cada proceso unitario de la planta, se indican en el diagrama del tren de tratamiento que se muestra en la Figura 14. Los puntos corresponden al influente, reactor aerobio y efluente. Este muestreo se realizó en tres campañas de colección y análisis de muestras para la caracterización de agua residual y ajuste de los procesos.

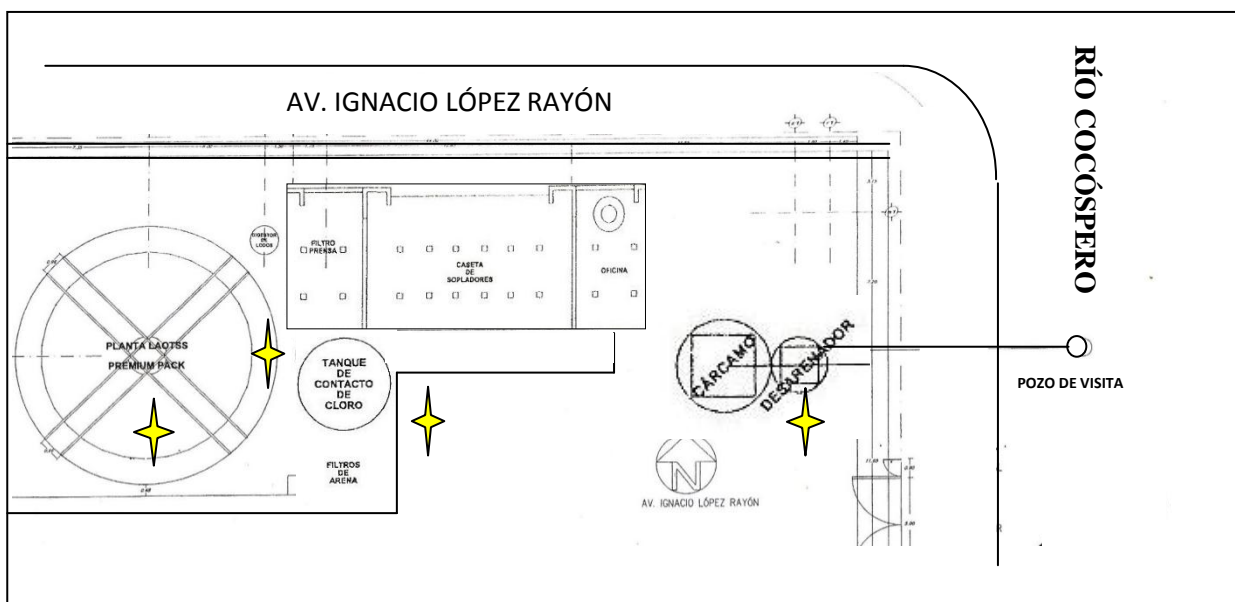


Figura 14. Puntos de muestreo establecidos en la PTAR-UABC.

### 3.3 Diagnóstico inicial

Al inicio del estudio, se hizo una campaña de muestreo de un total de tres campañas, para determinar los parámetros en los cuales la planta estaba operando. En la primera campaña de muestreo, se realizaron análisis fisicoquímicos iniciales para establecer un punto de partida hacia la mejora del proceso y ajustes de parámetros operacionales en cada proceso unitario.

Además en esta etapa, se evaluó el funcionamiento de la PTAR-UABC en cada proceso unitario, desde el cárcamo de bombeo en la entrada del agua residual hasta la salida del agua en el efluente final. Se realizaron análisis fisicoquímicos para conocer la eficiencia en términos de la DBO<sub>5</sub> y remoción de sólidos suspendidos totales.

#### 3.3.1 Caracterización inicial del agua residual

La caracterización inicial correspondió a la primera campaña de muestreo para determinar bajo que parámetros de control iniciales se encontraba operando la planta. Los parámetros fisicoquímicos analizados en esta campaña de muestreo realizado para la caracterización del agua residual en los distintos procesos de la planta, se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros operacionales y fisicoquímicos analizados para la caracterización inicial.

Influente	Reactor aerobio	Efluente
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)	N/D*
SST (mg/L)	SSV (mg/L)	N/D*
pH (unidades)	pH (unidades)	pH (unidades)
T (°C)	T (°C)	T (°C)
----	T <sub>R</sub> (hrs)	----

\*N/D: No determinado

La realización pruebas de caracterización fisicoquímicas en el laboratorio de química ambiental del Instituto de Ingeniería de la UABC, se llevaron a cabo mediante los siguientes análisis de muestreo, de acuerdo a lo que marca la literatura (16). En la Tabla 19, se presentan los métodos con los cuales se realizaron los análisis para la caracterización del agua residual.

**Tabla 19. Análisis de muestro para la caracterización de agua residual.**

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
pH	Electrométrico
T (°C)	Electrométrico
DBO (mg/L)	DBO <sub>5</sub>
SST	Gravimétrico
Sólidos Sedimentables	Gravimétrico
Metales Pesados	Absorción atómica
Nitrógeno amoniacal	Kjeldahl
Nitrógeno orgánico	Kjeldahl
P	Colorimétrico
Cl <sub>2</sub>	Colorimétrico
E.Coli	Colilert
OD	Método Winkler
Grasas y aceites	<i>Soxhlet</i>

### 3.4 Pruebas de arranque

Posterior al diagnóstico y caracterización inicial, en el mes de abril del 2010, a consecuencia del terremoto, se tuvo que vaciar por completo la planta por completo e iniciar su reparación, la cual duró alrededor de 5 meses. Posterior a la reparación, el reactor aerobio se inoculó y entro en operaciones el mes de septiembre del mismo año.

Se realizó una segunda campaña de muestreo que duró alrededor de tres meses, en esta campaña de muestreo, se observó la curva de crecimiento de lodos en el reactor aerobio, para posteriormente realizar nuevamente la caracterización del agua residual en los distintos procesos de la planta.

### 3.5 Determinación de parámetros de control

La determinación de los parámetros operacionales fue fundamental para la optimización de la planta, la cual permitió ajustar cada proceso que compone a la planta de tratamiento de lodos activados de la UABC, Campus Mexicali. En la Tabla 20, se presentan los parámetros de control determinados para lograr una optimización adecuada.

**Tabla 20. Parámetros de control determinados en la PTAR-UABC.**

Parámetros	Unidades
F/M	tasa de relación
IVL	gr/l
Edad de lodos	días
Purga de lodos	m <sup>3</sup>
T <sub>h</sub>	hrs

### 3.6 Optimización del proceso de la PTAR-UABC

Los resultados de las pruebas de caracterización de agua residual fueron resultado de la tercera campaña de muestreo que duró aproximadamente 2 semanas. En conjunto con la determinación de parámetros operaciones nos encaminó al objetivo inicial de este proyecto: Optimizar la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-UABC, al finalizar las tres etapas de muestreo y análisis se realizó un ajuste de los parámetros y la capacitación al personal para la operación adecuada de la PTAR. En la Tabla 21, se presentan los análisis fisicoquímicos que se realizaron para la optimización del agua residual en los tres puntos de muestreo de cada operación unitaria.

**Tabla 21. Análisis fisicoquímicos realizados para la optimización del agua residual.**

Influente	Reactor aerobio	Efluente
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
SST (mg/L)	SST (mg/L)	SST (mg/L)
T (°C)	SSV (mg/L)	T (°C)
pH (unidades)	T (°C)	pH (unidades)
Metales Pesados (mg/L)	pH (unidades)	N-orgánico (mg/L)
N-orgánico (mg/l)		N-amoniacal (mg/L)
N-amoniacal (mg/L)		N-Total (mg/L)
N-Total (mg/L)		Fósforo total (mg/L)
Fósforo total (mg/L)		Coliformes fecales (mg/L)
Grasas y aceites		Grasas y aceites
		Metales Pesados (mg/L)

### 3.7 Análisis estadístico de datos

Los resultados obtenidos de los análisis de agua residual realizados, fueron comparados con los criterios de calidad de agua de las normas mexicanas vigentes.

Esto fue muy útil para identificar si la descarga de la PTAR-UABC cumplía con los límites máximos permisibles que establece la NOM-003-SEMARNAT-1997, para el reuso de agua residual en riego de áreas verdes, y la NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles para descarga en alcantarillado. Los datos que se presentan en la Tabla 22, corresponden a los límites máximos permisibles de contaminantes de estas dos normas mexicanas, con tipo de reuso en la categoría de servicios al público con contacto directo.

Tabla 22. Límites máximos permisibles, de acuerdo con la normatividad mexicana vigente.

Parámetro	NOM-002- SEMARNAT-1996*		NOM-003- SEMARNAT-1997
	PD	PM	PM
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	30	60	20
SST (mg/l)	40	60	20
pH (unidades)	5.5-10	5.5-10	N/E
T (°C)	40	40	N/E
<i>E.Coli</i> (NMP/100 ml)	1000-2000	1000-2000	240
Nitrógeno total	15	25	N/E
Fósforo total	N/E	N/E	N/E
Grasas y aceites (mg/l)	50	75	15
S. Sedimentables (ml/l)	5	7.5	N/E
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente

En la Tabla 23, se presentan los límites máximos permisibles para metales pesados en la NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 23. Límites máximos permisibles para metales pesados.

Parámetro (Metales totales)	NOM-003-SEMARNAT-1997*			NOM-002-SEMARNAT-1996*		
	Límites máximos permisibles en mg/L			Límites máximos permisibles en mg/L		
	Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo	Promedio Mensual	Promedio diario	Instantáneo
Cadmio	0.2	0.4	N/E	0.5	0.75	1
Cobre	4.0	6.0	N/E	10	15	20
Níquel	2.0	4.0	N/E	4	6	8
Plomo	0.5	1	N/E	1	1.5	2
Cromo	1	1.5	N/E	0.5	0.75	1
Mercurio	0.01	0.02	N/E	0.01	0.015	0.02
Cianuro	2.0	3.0	N/E	1	1.5	2.0
Arsénico	0.2	0.4	N/E	0.5	0.75	1
Zinc	10	20	N/E	6	9	12

N/E: No se especifica

### 3.8 Rediseño y verificación del estado de las instalaciones y equipo

Se verificó el estado general de los equipos, con el propósito de dar mantenimiento a los componentes dañados. Se estableció un plan de mantenimiento preventivo y correctivo, para su buen uso y así garantizar el funcionamiento adecuado y duración de los equipos y de la planta en su conjunto.

### 3.9 Seguridad del personal

Se encontraron condiciones de trabajo inseguras las cuales representaban un riesgo de sufrir accidentes para los operadores de la planta. Estas condiciones se eliminaron a través de un plan de identificación de condiciones inseguras, algunas condiciones fueron modificadas en el rediseño de la planta y otras en el cambio de hábitos en la forma de trabajar de los operadores.

### **3.10 Capacitación al personal**

Uno de los mayores obstáculos que se presentaron en este proyecto, fue la falta de capacitación de personal, desde los inicios de la operación de la planta los trabajadores operaron la planta de manera empírica al desconocer el funcionamiento de un proceso biológico de lodos activados. Durante el tiempo que duró este proyecto, se les explicó el porqué de cada cambio y la manera correcta de realizarlo.

Los operadores contaban con equipo que jamás habían utilizado, incluso cuando esto les facilitaría el trabajo, por lo que se les impartieron talleres para capacitarlos en el uso de dichos equipos. Otro aspecto es que la PTAR-UABC, no cuenta con el equipamiento necesario para que los operadores puedan realizar las mediciones de rutina para la buena operación de la planta. Solamente se encontraron equipos de medición de cloro residual y cloro libre y un equipo para la medición de pH. También se les impartió un curso de capacitación sobre los principios básicos del tratamiento biológico del agua residual.

## **CAPITULO 4**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 Diagnóstico inicial**

Para evaluar el funcionamiento de la PTAR-UABC se realizó un monitoreo del agua en los diferentes procesos. A lo largo del estudio, se realizaron tres campañas de muestreo para el análisis fisicoquímico del agua residual.

Mediante el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y con la caracterización del agua, se detectaron deficiencias en los procesos para el tratamiento del agua y problemas desconocimiento en la operación de la planta, además de problemas de diseño. Las pruebas en la caracterización inicial nos permitieron conocer más de cerca los problemas de la PTAR, tanto de operación como de diseño.

Desde los inicios de la operación de la PTAR-UABC, se trató un caudal aproximado de 1 L/s, por lo que dentro de los objetivos de la optimización de la planta, se buscaba aumentar la cantidad de agua a tratar hasta un 50% de su capacidad. En esta segunda etapa de pruebas, se hizo la compra e instalación del medidor de flujo en la entrada del sistema, lo que facilitó las mediciones y cálculos para la optimización de la planta.

##### **4.1.1 Caracterización inicial del agua residual**

Las pruebas para determinar bajo que parámetros estaba funcionando la PTAR, se realizaron en la primera campaña de muestreo. Los resultados de los análisis de laboratorio se realizaron a principios del año 2010. Nos fue difícil determinar algunos parámetros por la falta de equipo y material en el laboratorio que posteriormente se fueron adquiriendo. Las pruebas restantes no pudieron realizarse debido a que la planta fue purgada por completo por el daño estructural que sufrió ocasionado por el terremoto del mes de abril de ese mismo año.

Se encontró una baja concentración de SSV en el reactor aerobio y una tasa de relación alimento/microorganismo (A/M) muy por debajo de los valores recomendados por la literatura (19), ocasionando como consecuencia un levantamiento de sólidos en el sedimentador, causando el arrastre y obstrucción de sólidos en los filtros de arena, obligando al operador a realizar retro lavados cada media hora.

El tiempo de retención hidráulico ( $T_h$ ), estaba por arriba de 5 días, equivalente a 120 horas, siendo el ideal mencionado en la literatura para plantas de lodos activados con aireación extendida, de 18 a 36 hrs (17). Debido a esto los lodos presentaban características de lodo viejo con baja eficiencia de sedimentación, al realizar la prueba de microorganismos presentes en los lodos activados, se encontró sólo un tipo de microorganismo multicelular presente, denominado *Rotífero*, el cual es una indicación de turbiedad y lodo activado viejo con un alto MCRT (5). En la Tabla 24, se presentan los resultados de la caracterización inicial del agua residual correspondientes a la primera campaña de muestreo y análisis.

**Tabla 24. Resultados de la caracterización inicial del agua residual**

<b>Parámetro</b>	<b>Influyente</b>	<b>Reactor</b>	<b>Efluente</b>
<b>DBO (mg/L)</b>	321	N/A	ND
<b>SST (mg/L)</b>	265	2050	ND
<b>SSV (mg/L)</b>	N/A	1436	N/A
<b>O.D (mg/L)</b>	N/A	ND	N/A
<b>pH</b>	7.6	ND	7.7
<b>T (°C)</b>	31.7	ND	30.95
<b>F/M</b>	N/A	0.03	N/A
<b>T<sub>R</sub> (hrs)</b>	N/A	138	N/A

## **4.2 Pruebas de arranque**

En la segunda campaña de muestreo, después de la reparación de la planta, se inicio con el arranque de la planta durante el mes de septiembre de 2010. Con lo cual fue necesaria la inoculación del reactor aerobio con lodo activado de una planta con el mismo proceso, para acelerar el crecimiento de la biomasa. Se observó la curva de crecimiento de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el licor mixto, hasta llegar de manera gradual a la concentración deseada de 2500 mg/L. Se modificaron los parámetros de control uno a la vez, con el objetivo de evitar cualquier cambio brusco en la tasa de relación alimento/microorganismo que afectara el desequilibrio en el sistema.

En esta etapa del estudio, aun no se contaba con un medidor de flujo en la entrada de planta, por lo que fue difícil saber la cantidad precisa del flujo que estaba siendo tratado. Sin embargo, la experiencia de los operadores en el manejo de las válvulas, nos permitió establecer un flujo de entrada aproximado de 1 L/s.

Mediante un monitoreo del agua, se tomaron muestras para el análisis en el influente, reactor aerobio y efluente. Se obtuvieron datos importantes para determinar los parámetros de control óptimos, mejorar la calidad y eficiencia de remoción de sólidos en el efluente.

### **4.2.1 Calidad de agua en el influente**

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el influente mostraron los rangos comunes de contaminación observados en las plantas de tratamiento de agua residual doméstica. Los rangos comunes encontrados en una planta con un sistema de lodos activados para los SST y DBO son de 150- 400 mg/l (16). En la Tabla 25, se presentan los resultados obtenidos en los análisis realizados al influente.

Tabla 25. Promedio de los resultados obtenidos en los análisis realizados al influente.

Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre	Promedio
<b>Análisis</b>				
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	223	234	175	211
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l)	---	324	---	324
Temperatura (°C)	32	29	26	29
pH (unidades)	7.5	7.6	7.7	7.6

La concentración promedio de SST registrados en el influente fue de 211 mg/l, sin embargo se presentaron concentraciones de hasta 466 mg/l, las cuales se pueden observar en la Figura 15, esto indica una carga alta de contaminación en la entrada del sistema (16), viéndose afectada la calidad del efluente.

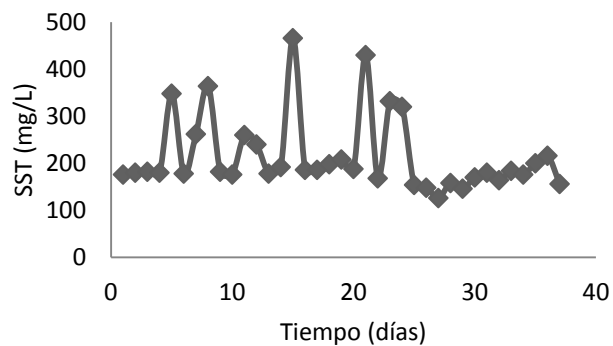


Figura 15. Curva de la concentración de sólidos suspendidos totales en el influente.

Los resultados de las mediciones de pH que se realizaron en campo, muestran en promedio 7.6 unidades, lo cual indica que la composición de agua residual mantiene un pH neutro. Este valor de pH es adecuado, pues en la literatura se recomienda un intervalo de pH recomendado de 6.8 a 8.0 unidades, para evitar la muerte y toxicidad de microorganismos (16).

En la PTAR-UABC se detectaron niveles de pH 8.0 unidades en la entrada del sistema, lo cual significó la muerte de microorganismos en términos de reducción de biomasa, lo cual se recomendó a los operadores cerrar el flujo de entrada al sistema, hasta registrar un pH en la composición de agua residual cercano a las 7.5 unidades, y así evitar afectar la calidad del efluente, al reducir la concentración y capacidad de los microorganismos de tratar el agua residual por medio de la degradación de materia orgánica. En la Figura 16, se presenta la curva de concentración de pH en el influente, donde se puede observar claramente el aumento de pH hasta de 8.2 unidades.

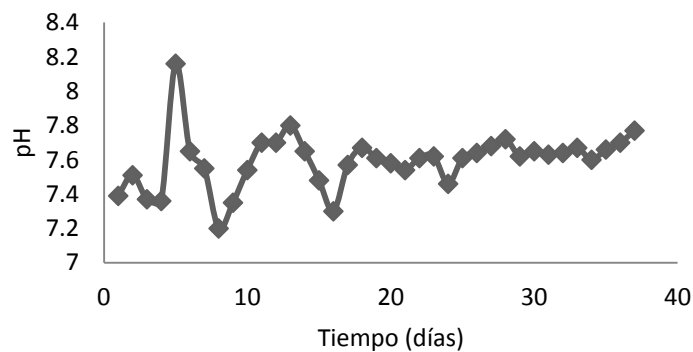


Figura 16. Curva de pH en el influente.

#### 4.2.2 Calidad de agua en el reactor aerobio

Las pruebas de arranque de la planta, en el reactor aerobio se hizo una inoculación de lodos activados. La curva de crecimiento de lodos activados fue en aumento, el flujo se mantuvo con un caudal en la alimentación de entre 2-3 L/s., mientras que la relación F/M determinada fue de 0.1. Cabe mencionar que en esta etapa todavía no se hacía pasar el agua por los filtros ni a cloración y aún así se obtuvieron porcentajes altos de remoción de SST (ver Figura 4). En esta gráfica se puede observar una remoción promedio de SST por arriba del 80%. Los valores más bajos de eficiencia de remoción en el sistema, fueron causados por los cambios abruptos en la alimentación y purga de lodos que se tuvieron que realizar por las reparaciones de las canaletas en el tanque aerobio durante el mes de septiembre.

En los sistemas de lodos activados de aireación extendida, los parámetros de control varían con respecto a los sistemas de lodos activados convencionales. La PTAR-UABC cuenta con un sistema de lodos activados de aireación extendida, el cual para este tipo de plantas el tiempo de retención hidráulica recomendado es de 18 a 36 hora, con una tasa de relación A/M de 0.1 y respecto a la concentración de SSLM, se recomienda una concentración entre 2000 a 6000 mg/l, sin embargo este cálculo puede variar en cada planta (16). En la Tabla 26, se presentan los resultados obtenidos de los análisis realizados y parámetros calculados.

**Tabla 26. Resultados promedio obtenidos de las pruebas realizadas al reactor aerobio.**

<b>Mes Parámetros</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Octubre</b>	<b>Noviembre</b>	<b>Promedio</b>
SSLM (mg/l)	706	904	2066	1164
SSVLM (mg/l)	482	589	1469	798
IVL (ml/gr)	66	68	84	72
OD (mg/l)	2.0	4.1	0.9	2.58
Temperatura (°C)	31.8	28.6	25.9	28.9
pH (unidades)	6.8	6.7	6.8	6.8

Durante esta fase, la curva de crecimiento de lodos fue exponencial. Sin embargo, debido a algunos problemas con la nivelación de las canaletas y en el sedimentador, se bajó el nivel del agua 1.40 m en el reactor, para poder trabajar en su reparación, dando como consecuencia fluctuaciones en la curva de crecimiento de la concentración de lodos activados. Al finalizar la reparación de las canaletas en el sedimentador, se llevó a cabo el llenado del reactor nuevamente hasta el nivel máximo, provocando una dilución de la concentración de los SST en el reactor. En la Figura 17, se puede observar la curva de crecimiento de concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto con tendencia ascendente. El crecimiento de los SSVLM fue exponencial con un valor de 2500 mg/l.

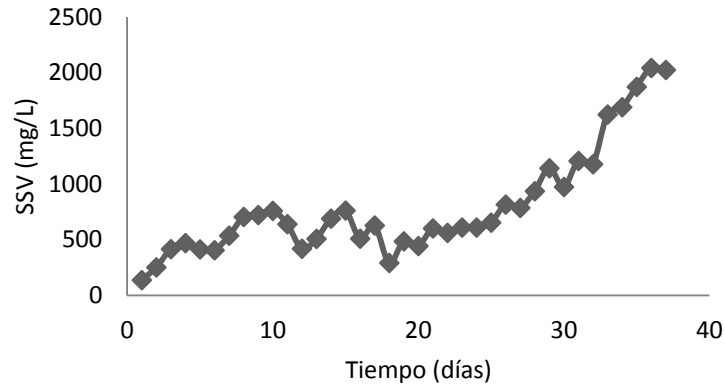


Figura 17. Curva del crecimiento de la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor mixto.

Como se puede observar en la Figura 18, al inicio de la inoculación el pH se encontraba a una concentración promedio de 7.4. Conforme la cantidad de SSVLM fue creciendo, observamos que el pH fue disminuyendo hasta 6.2 unidades y una mayor turbiedad en el agua del clarificador, sin embargo, la calidad del efluente no se vio muy afectada, manteniéndose en los límites máximos permisibles.

Algunos autores mencionan que este fenómeno en las plantas de tratamiento de aireación extendida ocurre cuando hay un proceso de nitrificación a un grado relativamente apreciable con la conversión del nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos, presentándose una doble cantidad de carga orgánica, con una relación A/M muy débil y mayor requerimiento de aire. Un problema asociado a la nitrificación es la caída del pH en el sistema debido a la formación de ácido nítrico. El pH puede descender hasta valores de alrededor de 4.5, en cuyo caso el proceso biológico puede verse seriamente afectado (17).

En algunas casos se agrega cal al reactor aerobio para mantener un pH neutro, sin embargo, la causa raíz de la caída del pH, es debida a que los compuestos nitrogenados exigen una demanda de oxígeno importante, en consecuencia, se consume el oxígeno disuelto presente en las aguas receptoras, causando de esta forma un efecto perjudicial sobre el medio que las rodea, reduciendo la flora y fauna presente, proliferando los microorganismos de la nitrificación denominados: *nitrosomas* y *nitrobacter* (17).

En el caso de la PTAR-UABC, se tomó la decisión de reducir la concentración de oxígeno disuelto a 1.5 mg/l, al evitar la sobre aireación, se redujo el crecimiento de los microorganismos que producen la nitrificación y se logró mantener un pH más estable alrededor de 6.2 unidades.

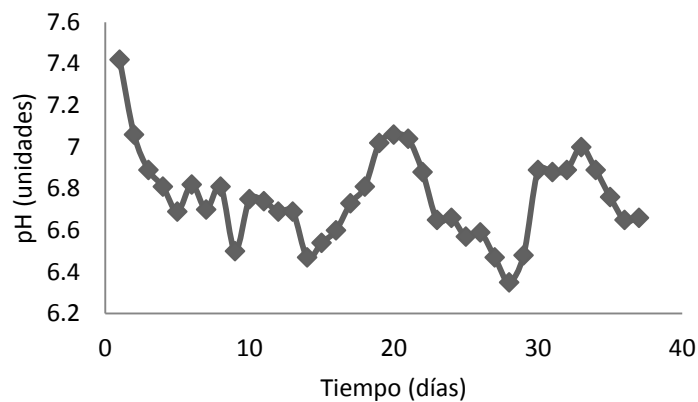


Figura 18. Curva de PH en el reactor aerobio.

La cantidad de oxígeno que se suministra al tanque de aireación debe de ser suficiente para que los microorganismos puedan respirar y se pueda oxidar la materia orgánica. El nivel de oxígeno disuelto recomendado para procesos aerobios continuos, va desde los 0.5-4.0 mg/l (17), más sin embargo, esto dependerá del comportamiento de cada sistema. Por lo que la concentración de oxígeno disuelto que se mantuvo en el reactor aerobio de la PTAR-UABC fue alrededor de entre 1.5 a 3 mg/l, conforme se iba incrementando o decreciendo la concentración de sólidos suspendidos volátiles, la concentración de oxígeno se ajustó a los niveles deseados. En la Figura 19, se presentan la curva de concentración de oxígeno disuelto en el reactor aerobio.

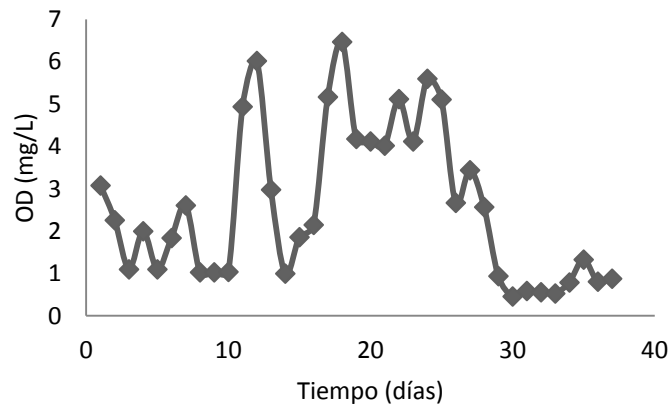


Figura 19. Curva de concentración de oxígeno disuelto en el reactor aerobio.

### 4.2.3 Calidad de agua en el efluente

De los resultados de las pruebas realizadas al efluente, se observó en promedio una buena calidad de efluente, obteniéndose una concentración promedio de SST de 26 mg/l y una concentración de DBO<sub>5</sub> de 7 mg/l. Estos resultados fueron obtenidos de las muestras de agua tomadas antes sin pasar el agua por el proceso de filtración y cloración. Los resultados se pueden observar en la Tabla 27.

Tabla 27. Promedio de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al efluente.

Mes Análisis	Septiembre	Octubre	Noviembre	Promedio
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	26	32	16	26
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l)	----	7	----	7
T (°C)	31.1	28.2	25.6	28.5
pH (unidades)	7.6	7.1	7.3	7.2

Como se puede observar en los resultados mostrados en la Figura 20, se obtuvieron datos por arriba de los 20 mg/l de SST, lo cual rebasaba el límite máximo permisible de descarga, debido a cambios de diseño de la planta. Se tuvieron que hacer purgas de lodo constantemente cuando se requería, por lo que se vio afectada la capacidad de degradación de materia orgánica y la calidad del efluente, reportando hasta 92 mg/l. En la Figura 20, se observa la curva de concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente.

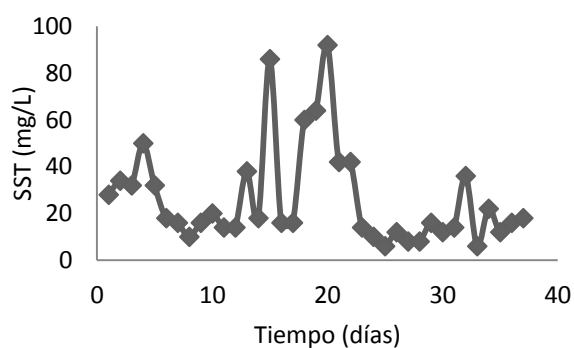


Figura 20. Curva de la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente.

Debido a que los constantes cambios en el diseño de la planta durante las pruebas de arranque, se obtuvieron pocos datos de  $DBO_5$ , durante los tres meses que duraron las pruebas de arranque, mostrando un promedio de  $DBO_5$  de 7.4 mg/l. En la Figura 21, se presenta la curva de concentración de  $DBO_5$  en el efluente final.

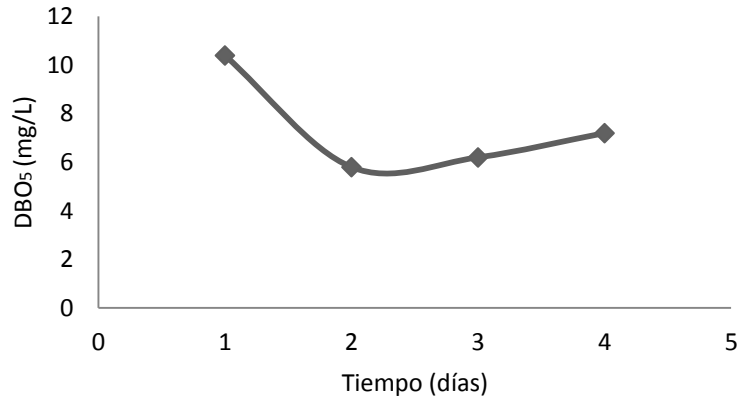


Figura 21. Curva de la concentración de DBO<sub>5</sub> en el efluente final.

### 4.3 Parámetros de control operacional y ajustes de la PTAR-UABC

La determinación de los parámetros operacionales representa una parte esencial muy importante para realizar una optimización adecuada. Los ajustes de la PTAR se realizaron tomando en cuenta los datos obtenidos de análisis de laboratorio y de los valores obtenidos de los cálculos de los parámetros de control óptimo.

#### 4.3.1 Edad de lodos

La edad de lodos recomendada para plantas de tratamiento de lodos activados con sistemas de aireación extendida es de 20 a 60 días (17), para la PTAR-UABC, se obtuvo una edad de lodos aproximada de 22.81 días, como valor óptimo.

### 4.3.2 Purga de lodos

Para determinar el porcentaje de purga de lodos en el sistema, se calculó la tasa de crecimiento de sólidos suspendidos totales en el reactor aerobio durante aproximadamente 2 semanas. Teniendo en cuenta que se deseaba mantener una concentración de SSV de 2500 mg/L en el reactor aerobio, se observó que el comportamiento del crecimiento de la concentración se mantuvo alrededor de los 2500 solamente por 15 días, a partir de este tiempo, la concentración de SSV se incrementó hasta aproximadamente 3000 mg/L, se pudo observar que cuando se alcanzó esta concentración de SSV se incrementaron los sólidos suspendidos en el efluente, por lo que se decidió mantener la concentración de SSV de 2500 mg/L, ya que se observó que con esta concentración de sólidos en el reactor, mejoraba la calidad del agua en el efluente.

Además se observó que al aumentar la concentración de SSV por arriba de los 2500 mg/L, se redujo la capacidad de tratamiento de los microorganismos al aumentar la edad de lodos, afectando la calidad del efluente y el IVL (índice volumétrico de lodos), el cual debe mantenerse alrededor de los 100 mL/g, para lograr una buena sedimentación de lodo en el sedimentador o clarificador.

Después del incremento de la concentración de SSV a 3000 mg/l, se procedió a la purga de 500 mg/l de lodo para reducir los lodos a la concentración deseada. Como ya antes se mencionó, se logró mantener una concentración de IVL de aproximadamente 100 mL/gr, los resultados que se presentan en la Tabla 28, muestran que cuando la concentración de SSLM aumentaba, hubo cambios en el IVL y calidad del efluente, que aunque se siguen considerando buenos, es importante realizar la purga de lodos, para evitar que la edad de lodos aumente en el reactor aerobio.

Tabla 28. Resultados de IVL, SSV, SST en el reactor aerobio, y SST en el efluente.

Test	IVL (mL/g)	SSLM (mg/L)	SSVLM (mg/L)	SST(mg/l) (efluente)
28-Mar-11	80	3518	2520	4
29-Mar-11	87	3232	2282	4
30-Mar-11	78	3450	2436	3
31-Mar-11	92	3784	2668	3
01-Abr-11	99	3548	2558	3
04-Abr-11	<b>84</b>	<b>4174</b>	<b>2982</b>	<b>4</b>
05-Abr-11	<b>48</b>	<b>4130</b>	<b>2852</b>	<b>5</b>
06-Abr-11	<b>59</b>	<b>4266</b>	<b>2960</b>	<b>8</b>
07-Abr-11	66	3788	2642	6
08-Abr-11	52	3858	2670	7

### 4.3.3 Tasa de la relación alimento/microorganismo (A/M)

La tasa de relación A/M recomendado para sistemas de aireación extendida en términos de DBO es de 0.05 a 0.10 kg DBO/ kg de SSVLM (16). Con el objetivo de tener una A/M más representativa, la concentración de la DBO<sub>5</sub> utilizada para calcular la A/M, fue el resultado de la DBO<sub>5</sub> compuesta en un intervalo de 12 horas, obteniéndose una relación A/M de 0.05

### 4.3.4 Tiempo de retención hidráulico

Inicialmente se trató de ajustar un flujo de entrada a la PTAR de 5 L/s, considerando que el fabricante indica una capacidad máxima de 10 L/s. Sin embargo al manejar este flujo, se sobrecargaron los sopladores y la planta se desestabilizó, presentándose re-suspensión de sólidos en el clarificador, por lo que se fue bajando el flujo de entrada y se observó que cuando se ajustó a 3 L/s, se obtuvieron buenos resultados en el tratamiento de agua. De ahí que se decidió ajustar un flujo máximo de tratamiento de 3 L/s.

Por problemas de diseño encontrados los sopladores, el tiempo de retención que se tuvo que ajustar al caudal máximo, aunque siendo el recomendado para sistemas de aireación extendida es de 15-36 hrs, la calidad del efluente cumplió con las expectativas para ser reusada, por lo que el tiempo de retención que se obtenido fue de 46 hrs.

#### **4.3.5 Índice volumétrico de lodo**

Considerando que el rango de IVL recomendado es de 50 a150 mL/g, se obtuvieron mejores resultados en la calidad del efluente cuando el IVL estaba alrededor de los 100 mL/g, por lo que se estableció como el parámetro deseado en el sistema. En promedio se obtuvo una sedimentación de 278 mL y un valor de IVL de 104 mL/g, se calculó sustituyendo la Ecuación 7.

#### **4.3.6 Concentración ideal de SSV en el licor mixto**

La concentración ideal de SSV en el licor mixto, expresado como (SSVLM) dependerá estrictamente de cada proceso y de la carga orgánica en el influente de cada planta de tratamiento. Para determinar la concentración de SSV deseada en el licor mixto, se estimaron los kg de DBO<sub>5</sub> por día que entran en el sistema, basados en una relación A/M de 0.05 kg DBO/día por 1 kg de SSVLM. Se calcularon los kg de DBO<sub>5</sub> agregados al licor mixto por día. El valor de DBO estimado fue de 66.82 kg de DBO<sub>5</sub>/día

Se calculó la concentración de SSVLM bajo aireación en kg, basados en 0.05 kg DBO<sub>5</sub>/día por 1 kg SSVLM, tomando en cuenta los kg de DBO<sub>5</sub> en el influente, obteniéndose un valor de 1336.4 kg

Se calculó la concentración de SSVLM deseada expresados en mg/L, la siguiente ecuación:

$$SSVLM \left[ \frac{mg}{L} \right] = \frac{(SSVLM)}{(V_t)}$$

Donde:

SSVLM= sólidos suspendidos bajo aireación (kg)

V<sub>t</sub>= volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

Sustituyendo:

$$SSVLM \left[ \frac{mg}{L} \right] = \frac{(1336.4 \text{ kg}) \left( \frac{1000000 \text{ mg}}{1 \text{ kg}} \right)}{(496.776 \text{ m}^3) \left( \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right)}$$

$$SSVLM \left[ \frac{mg}{L} \right] \approx 2690$$

#### 4.3.7 Observación microscópica

El examen microscópico del lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambia continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos. De estos, las bacterias son probablemente las más importantes, encontrándose en todos los tipos de tratamiento biológico (17).

Al inicio de esta investigación se realizaron varios exámenes microscópicos, encontrando la presencia únicamente de los microorganismos identificados como *rotíferos*, los rotíferos son microorganismos multicelulares con cilios rotativos en la cabeza y cola bifurcada que les permite moverse y atrapar comida al mismo tiempo, la cola la utilizan para unirse a las partículas sólidas para su alimentación. Los rotíferos consumen grandes

cantidades de bacteria y flóculos de lodos y su tamaño se encuentra en el rango de 400 x 600 micrones y se pueden observar en los microscopios con una magnificación de 100x (16).

Así mismo, los rotíferos son una indicación de un lodo activado viejo con una edad de lodos muy alta y usualmente están asociados con un efluente turbio (16), por lo que fue necesario purgar y eliminar los lodos viejos y realizar una inoculación con lodos activados frescos en el reactor aerobio, para lograr la siembra y crecimiento de una población heterogénea y de esta manera lograr mejorar la calidad del efluente.

Aunque esta acción de cualquier forma fue necesaria ya que con el terremoto se destruyó el reactor se vació el sistema. En las Figuras 22 y 23, se presentan fotografías de la población de microorganismos antes y después de la inoculación del reactor aerobio, observándose una población de microorganismo más heterogénea.



**Figura 22. Examen de la observación microscópica en reactor aerobio antes de la inoculación.**

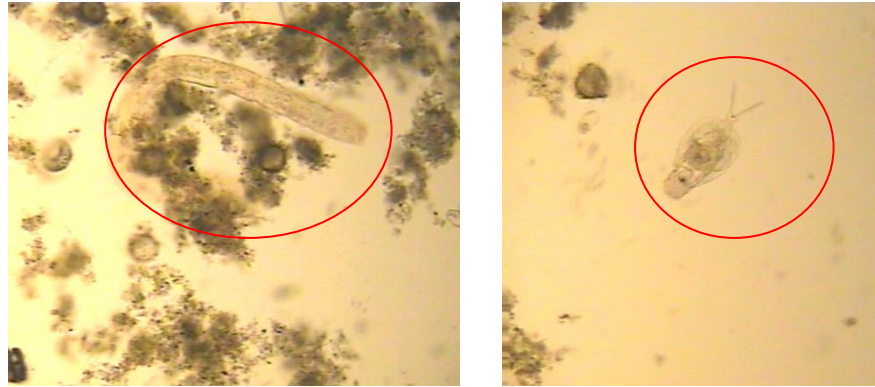


Figura 23. Examen de la observación microscópica en reactor aerobio después de la optimización.

#### 4.4 Optimización de los procesos de la PTAR-UABC

Esta etapa corresponde a la tercera campaña de muestreo y análisis que se llevó a cabo en la época de invierno durante aproximadamente dos semanas. Las pruebas se realizaron en los tres diferentes puntos establecidos: influente, reactor aerobio y efluente.

Al inicio de este estudio, se encontró que la planta estaba tratando un caudal aproximado de 1 L/s, por lo que dentro de los objetivos de la optimización se buscaba aumentar el volumen de agua a tratar hasta un 50% de su capacidad. En la tercera campaña de pruebas, se hizo la adquisición del medidor de flujo y se instaló en la entrada del sistema, facilitando las mediciones de flujo y los cálculos para optimizar los procesos de la planta.

Conforme se realizaron las últimas pruebas para la optimización final de la planta, se fue incrementando y ajustando un flujo por arriba de los 3 L/s hasta llegar a un flujo de 5 L/s, lo que corresponde al 50% de su capacidad, ajustándose todos los parámetros necesarios para su óptimo funcionamiento, como la relación A/M. Esto significó el aumento de biomasa en términos de sólidos suspendidos volátiles en el reactor aerobio por lo que representaba una mayor demanda de concentración de oxígeno disuelto al tener un mayor volumen de biomasa. Después de unos días, se empezó a observar niveles de presión muy altos en los sopladores, casi al límite de su capacidad, lo cual nos obligó reducir la concentración de biomasa y por consiguiente el flujo de entrada de 3 L/s.

Los resultados de las pruebas que se muestran a continuación, se determinaron con un caudal de entrada de 3 L/s.

#### 4.4.1 Calidad de agua en el influente durante la etapa de optimización.

Los resultados de las pruebas realizadas al influente durante la optimización de la PTAR-UABC, se muestran en las Tablas 29 y 30, los cuales mostraron un comportamiento similar a las pruebas de arranque, ya que la composición de los caudales de entrada al sistema, no varían mucho, a excepción cuando entra material tóxico.

Tabla 29. Resultados de las pruebas realizadas al influente PTAR-UABC.

Análisis	SST (mg/L)	pH	T°C	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DBO <sub>5</sub> compuesta (mg/L)
28-Mar-11	184	7.83	23.45	276	
29-Mar-11	224	7.66	23.83	295	
30-Mar-11	212	7.77	29.07	284	162
31-Mar-11	234	7.66	25.64	290	
01-Abr-11	230	7.61	25.06	377	
04-Abr-11	194	7.53	24.98	372	
05-Abr-11	172	7.63	25.12	266	
06-Abr-11	218	7.64	24.90	207	282
07-Abr-11	264	7.60	25.30	353	
08-Abr-11	172	7.78	23.78	231	
Promedio	<b>210</b>	<b>7.67</b>	<b>25.11</b>	<b>295</b>	<b>222</b>

Tabla 30. Resultados de los análisis realizados al influente PTAR-UABC.

Análisis	N-Orgánico	N-Amoniacal	N-Total	Grasas y aceites	Fósforo total
28-Mar-11	22.4	65.5	87.5	60.3	9.3
29-Mar-11	23.0	55.4	78.3	52.9	9.4
30-Mar-11	23.0	58.8	81.8	44.3	9.8
31-Mar-11	25.2	54.1	79.3	35.6	9.5
01-Abr-11	26.1	51.3	77.4	32.4	9.6
04-Abr-11	14.3	40.4	54.7	46.8	6.4
05-Abr-11	16.5	53.8	70.3	46.1	7.4
06-Abr-11	16.8	51.5	68.3	45.4	8.6
07-Abr-11	19.6	40.0	59.6	22.4	8.4
08-Abr-11	15.4	26.3	41.7	16.0	7.4
Promedio	<b>20.3</b>	<b>49.7</b>	<b>69.9</b>	<b>40.2</b>	<b>8.6</b>

En las Tablas 31 y 32, se presenta los resultados obtenidos de los análisis de muestras compuestas realizadas al influente PTAR-UABC. En total, se realizaron dos campañas de muestreo compuesto, uno en marzo y otro en el mes de abril. Aunque la norma solo exige límites permisibles en la descarga, estas pruebas se realizaron para conocer la remoción total en el sistema.

**Tabla 31. Resultados obtenidos de los análisis realizados al influente.**

Análisis	N-Orgánico	N-Amoniaco	N-Total	Fósforo total
30-Mar-11	20.5	40.1	60.6	8.1
06-Abr-11	12.9	51.8	64.7	7.5
Promedio	<b>16.7</b>	<b>46</b>	<b>62.7</b>	<b>7.8</b>

**Tabla 32. Resultados obtenidos metales pesados realizados al influente.**

Fecha	Resultados (mg/L)					
	<b>Cadmio</b>	<b>Cobre</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Níquel</b>	<b>Plomo</b>	<b>Zinc</b>
28-Mar-11	N.D.	0.06	<0.0025	< 0.1*	< 0.1*	0.20
29-Mar-11	N.D.	0.02	<0.0025	< 0.1	< 0.1	0.22
30-Mar-11	N.D.	0.10	<0.0025	< 0.1	< 0.1	0.24
31-Mar-11	N.D.	0.05	N.D.	< 0.1	N.D.	0.30
01-Abr-11	N.D.	0.08	<0.0025	< 0.1	< 0.1	0.28
04-Abr-11	N.D.	0.06	N.D.	< 0.1	< 0.1	0.25
05-Abr-11	N.D.	0.07	<0.0025	< 0.1	< 0.1	0.28
06-Abr-11	<0.02	0.08	<0.0025	< 0.1	< 0.1	0.23
07-Abr-11	N.D.	0.05	<0.0025	< 0.1	N.D.	0.28
08-Abr-11	N.D.	0.05	N.D.	N.D.	N.D.	0.22
Promedio	<b>&lt;0.02</b>	<b>0.06</b>	<b>&lt;0.0025</b>	<b>&lt; 0.1</b>	<b>&lt; 0.1</b>	<b>0.25</b>

En la Figura 24, se observa que la concentración promedio de SST es de 210 mg/L en el influente, lo cual es una indicación de que la concentración se mantuvo estable, sin afectar al sistema.

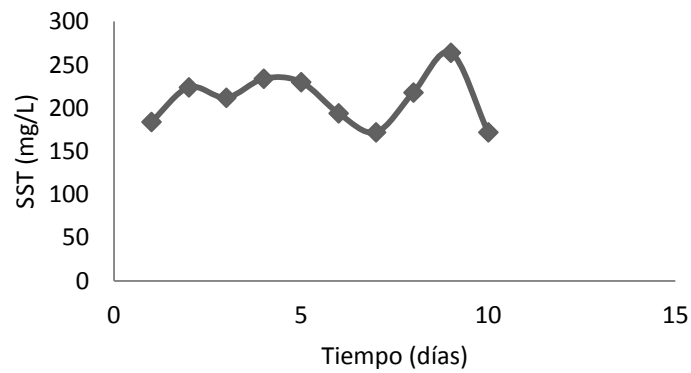


Figura 24. Curva de la concentración de SST en el influente.

Los resultados de DBO<sub>5</sub> promedio en el influente de muestras simples dieron como resultado 295 mg/L, lo cual se mantiene dentro del intervalo encontrado en las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas (16). Mientras que los resultados obtenidos para la DBO<sub>5</sub> promedio de muestras compuestas fue de 222 mg/L. En la Figura 25, se presenta la curva de concentración de DBO<sub>5</sub> simple en el influente.

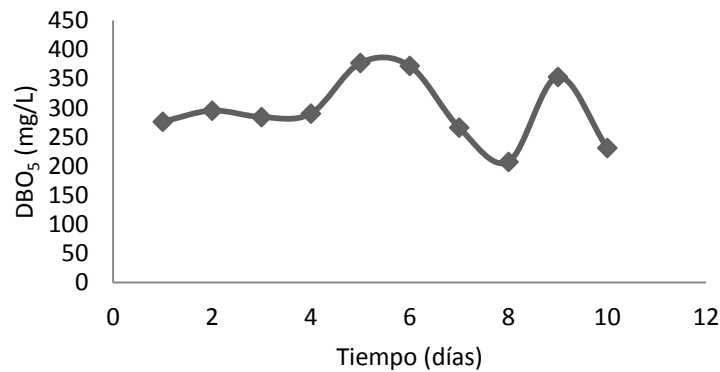


Figura 25. Curva de la concentración de DBO5 simple en el influente.

Durante las pruebas de ajuste se realizó un muestreo de 12 hrs, para obtener una muestra compuesta en el influente, con el objetivo de analizar la DBO<sub>5</sub> y obtener valores promedio para determinar la tasa de relación de A/M más confiable, obteniéndose una DBO<sub>5</sub> de 258 mg/l. En la Tabla 33, se presenta el horario de la toma de muestras, así como el flujo registrado.

**Tabla 33. Muestra compuesta de 12 hrs para la DBO<sub>5</sub> realizada al influente.**

<b>Tiempo</b>	<b>Flujo, l/s</b>	<b>Vol muestra, mL</b>
06:00 a.m.	3.0	1000 ml
07:00 a.m.	3.0	1000 ml
08:00 a.m.	3.0	1000 ml
09:00 a.m.	3.0	1000 ml
10:00 a.m.	3.0	1000 ml
11:00 a.m.	3.0	1000 ml
12:00 p.m.	3.0	1000 ml
01:00 p.m.	3.0	1000 ml
02:00 p.m.	3.0	1000 ml
03:00 p.m.	3.0	1000 ml
04:00 p.m.	3.0	1000 ml
05:00 p.m.	3.0	1000 ml
<b>Total muestra compuesta</b>		<b>12, 000 ml</b>

#### **4.4.2 Condiciones de operación del reactor aerobio durante la etapa de optimización**

En la Tabla 34, se presentan los valores operacionales en el reactor que se determinaron después de realizar los ajustes en la operación de la planta.

Tabla 34. Resultados de las pruebas realizadas al reactor aerobio de la PTAR-UABC.

Fecha	IVL (ml/gr)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	OD (mg/L)	T °C	pH
28-Mar-11	80	3518	2520	2.50	21.89	6.81
29-Mar-11	87	3232	2282	1.42	22.65	6.92
30-Mar-11	78	3450	2436	1.57	23.28	6.91
31-Mar-11	<b>92</b>	3784	2668	2.84	23.88	6.85
01-Abr-11	<b>99</b>	3548	2558	1.55	24.58	6.81
04-Abr-11	84	4174	2982	3.11	24.71	6.63
05-Abr-11	48	4130	2852	3.35	24.74	6.72
06-Abr-11	59	4266	2960	3.09	25.02	6.78
07-Abr-11	66	3788	2642	3.08	24.57	6.65
08-Abr-11	52	3858	2670	3.90	23.50	6.64
Promedio	<b>74</b>	<b>3775</b>	<b>2657</b>	<b>2.64</b>	<b>23.88</b>	<b>6.77</b>

Como se puede observar en la Figura 26, se mantuvo una concentración deseada de 2500 mg/l de SSV en el reactor aerobio, lo que favoreció a una buena degradación de materia orgánica y buena calidad de efluente.

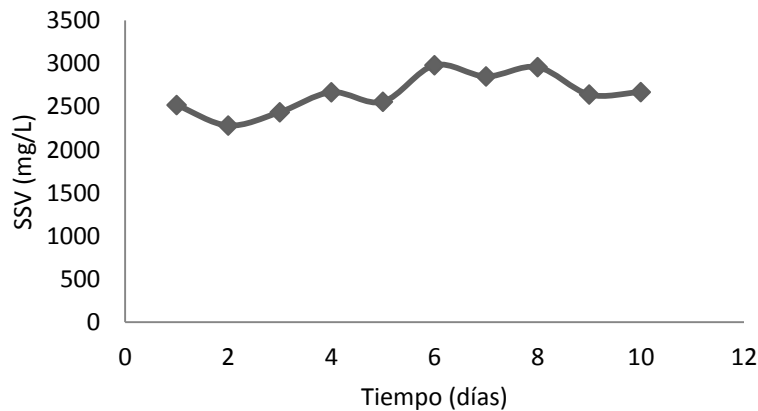


Figura 26. Curva de la concentración de SSV en el reactor aerobio.

#### 4.4.3 Calidad de agua en el efluente durante la etapa de optimización

Finalmente, los resultados obtenidos en el efluente mostraron una excelente calidad, lo cual nos permitió concluir que los parámetros de operación calculados fueron los óptimos para obtener una buena calidad de agua en el efluente, obteniéndose una DBO<sub>5</sub> promedio de

4.6 mg/L, que cumple con las normas oficiales mexicanas vigentes. Los resultados se presentan en las Tablas 35 y 36.

**Tabla 35. Resultados de las pruebas realizadas al efluente de la PTAR-UABC.**

Fecha	SST (mg/L)	pH	T°C	DBO (mg/L)
28-Mar-11	4	7.04	21.89	4.6
29-Mar-11	4	7.24	23.73	4.7
30-Mar-11	3	7.37	23.98	4.8
31-Mar-11	3	7.25	24.61	4.2
01-Abr-11	3	7.27	27.69	4.6
04-Abr-11	4	7.10	24.89	4.0
05-Abr-11	5	7.13	23.98	4.9
06-Abr-11	8	7.05	24.75	6.2
07-Abr-11	6	7.00	23.54	4.1
08-Abr-11	7	7.03	19.74	3.8
Promedio	<b>5</b>	<b>7.15</b>	<b>23.88</b>	<b>4.6</b>

**Tabla 36. Resultados obtenidos de los análisis realizados al efluente.**

Fecha	N-Orgánico [mg/L]	N-Amoniaco [mg/L]	N-Total [mg/L]	Grasas y aceites [mg/L]	Fósforo total [mg/L]
28-Mar-11	3.4	N.D.	3.4	11.0	5.5
29-Mar-11	2.5	N.D.	2.5	9.1	5.7
30-Mar-11	5.6	N.D.	5.6	10.0	6.0
31-Mar-11	2.0	N.D.	2.0	8.8	6.4
01-Abr-11	0.2	N.D.	0.3	2.8	5.9
04-Abr-11	1.1	N.D.	1.1	2.1	5.1
05-Abr-11	0.5	N.D.	0.5	2.4	6.3
06-Abr-11	0.9	N.D.	0.9	5.1	5.8
07-Abr-11	0.5	N.D.	0.5	7.7	7.2
08-Abr-11	0.5	N.D.	0.5	2.3	6.6
Promedio	<b>1.72</b>	<b>N.D</b>	<b>1.73</b>	<b>6.12</b>	<b>6.05</b>

En las Tablas 37, se presentan los resultados de los análisis de muestras compuestas realizados al efluente, para determinar las concentraciones de nitrógeno orgánico, amoniacal, total y concentraciones de fósforo.

**Tabla 37. Resultados obtenidos del análisis de nitrógeno y fósforo.**

Fecha	N-Orgánico [mg/L]	N-Amoniaco [mg/L]	N-Total [mg/L]	Fósforo total [mg/L]
30-Mar-11	1.7	N.D.	1.7	6.2
06-Abr-11	0.4	N.D.	0.4	6.7
Promedio	<b>1.1</b>	<b>N.D.</b>	<b>1.1</b>	<b>6.5</b>

En la Tabla 38, se presentan los resultados obtenidos de los análisis de para la determinación de metales pesados de muestras compuestas en el efluente

**Tabla 38. Resultados obtenidos de metales pesados.**

Fecha	Resultados (mg/L)					
	<b>Cadmio</b>	<b>Cobre</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Níquel</b>	<b>Plomo</b>	<b>Zinc</b>
28-Mar-11	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	0.06
29-Mar-11	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
30-Mar-11	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	< 0.1	0.09
31-Mar-11	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	0.08
01-Abr-11	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
04-Abr-11	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
05-Abr-11	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
06-Abr-11	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	0.09
Promedio	<b>N.D.</b>	<b>0.02</b>	<b>N.D.</b>	<b>N.D.</b>	<b>&lt; 0.1</b>	<b>0.08</b>

En la Figura 27, se observa la curva de concentración de DBO<sub>5</sub> en el influente, lo cual muestra una concentración promedio de 4.6 mg/L, cumpliendo con la norma mexicana, para reuso de agua residual tratada que indica un LMP de 20 mg/L.

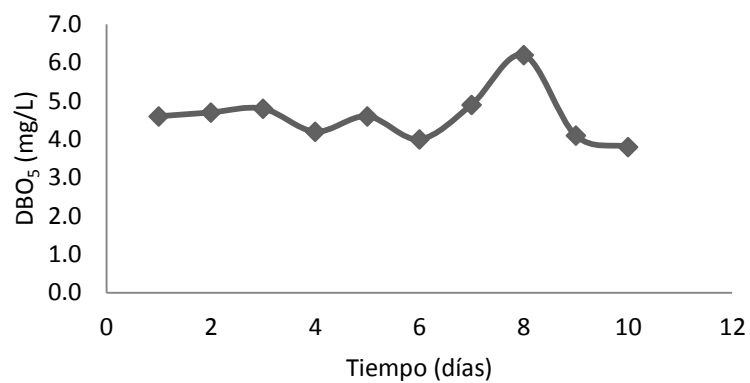


Figura 27. Curva de la concentración de DBO5 en el efluente.

En la Figura 28, se presenta la curva de concentración de SST en el efluente, obteniéndose una concentración promedio de 5 mg/L.

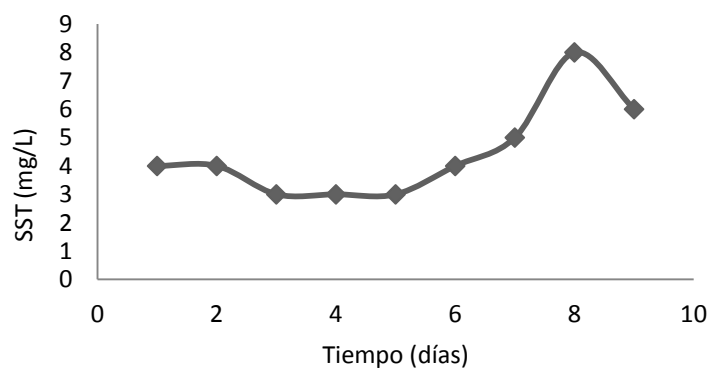


Figura 28. Curva de la concentración de SST en el efluente.

## 4.5 Análisis estadístico de datos

Los parámetros que se eligieron para evaluar la eficiencia de la planta es la DBO. A pesar de que hubo fluctuaciones en la etapa de pruebas de arranque, se obtuvieron porcentajes de remoción arriba del 98 % en función de la DBO.

### 4.5.1 Comparación de parámetros iniciales y parámetros después de estabilizar la planta

En la Tabla 39, se muestra un análisis comparativo entre los parámetros de operación recomendados, los encontrados al inicio y los obtenidos después de la optimización de la PTAR. Se puede observar que el tiempo de retención encontrado era demasiado alto con respecto al valor recomendado en la literatura, por lo que este valor se fue ajustando en las pruebas de arranque. Otro parámetro que estaba fuera de los valores recomendados es la tasa de relación A/M, la cual se encontró inicialmente con un valor de 0.03 de A/M, ajustándose a valores de entre 0.5 a 1.0.

Con respecto a la concentración inicial encontrada de los SSVLM de 2050 mg/L, en la optimización se ajustó a 2600 mg/L, que fue el valor óptimo estimado para el buen funcionamiento de la planta.

Tabla 39. Análisis comparativo de datos iniciales y la optimización de procesos.

Parámetros	Valores recomendados	Encontrado	Optimización
Q inicial (L/s)	Min 1-Máx 10	1.0	3.0
IVL (ml/gr)	5-150	272	74
T <sub>h</sub> (hrs)	18-36	137	46
SSVLM (mg/L)	2000-6000	2050	2657
A/M	0.05-0.10	0.03	0.05
OD (mg/)	1.0-3.0	N/D	2.64
DBO <sub>5</sub> efluente (mg/L)	20-30	N/D	4.6

#### 4.5.2 Comparación de resultados obtenidos de calidad de agua con la normatividad mexicana vigente

Los valores promedio obtenidos en la optimización de la PTAR-UABC muestran niveles de calidad que cumplen la normatividad vigente tanto para su descarga al alcantarillado como para su reuso. En la Tabla 40, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de la optimización de la PTAR-UABC.

Los análisis relacionados a la detección de *E.Coli*, no fueron realizados, ya que actualmente el laboratorio del Instituto de Ingeniería, se encuentra en proceso de compra de equipo y materiales para la realización y acreditación de esta prueba por el organismo de acreditación EMA (Entidad Mexicana de Acreditación). Los análisis bacteriológicos que se realizaron, fue la detección de Coliformes Fecales, mediante la prueba de Colilert, el cual se encuentra aprobado por la EPA (Environmental Protection Agency), para la detección de Coliformes Fecales, el cual indica que el LMP deberá ser de 0 NMP/100 ml.

Tabla 40. Comparación de resultados obtenidos con la normatividad mexicana vigente.

Parámetro	Resultados de la optimización PTAR-UABC	NOM-002-SEMARNAT-1996*		NOM-003-SEMARNAT-1997
		PD	PM	PM
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	4.6	30	60	20
SST (mg/l)	5.0	40	60	20
pH (unidades)	7.1	5.5-10	5.5-10	N/E
T (°C)	23.9	40	40	N/E
E.Coli (NMP/100 ml)	-----	1000-2000	1000-2000	240
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	0	0	0	0
Nitrógeno total	1.73	15	25	N/E
Fósforo total	6.05	N/E	N/E	N/E
Grasas y aceites (mg/l)	6.12	50	75	15
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Los resultados anteriormente obtenidos, demuestran que en la optimización de la PTAR-UABC, se obtuvo una eficiencia de tratamiento del 98.4%, en términos de remoción de DBO<sub>5</sub>, en la Figura 29, se presenta la curva de porcentaje de eficiencia.

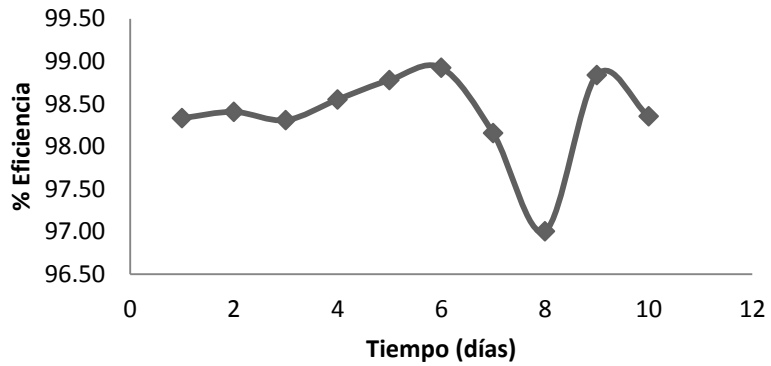


Figura 29. Curva de porcentaje de eficiencia de la PTAR en términos de BOD5.

La eficiencia de remoción obtenida en términos de remoción de SST fue del 97.7%, la cual se presenta en la Figura 30.

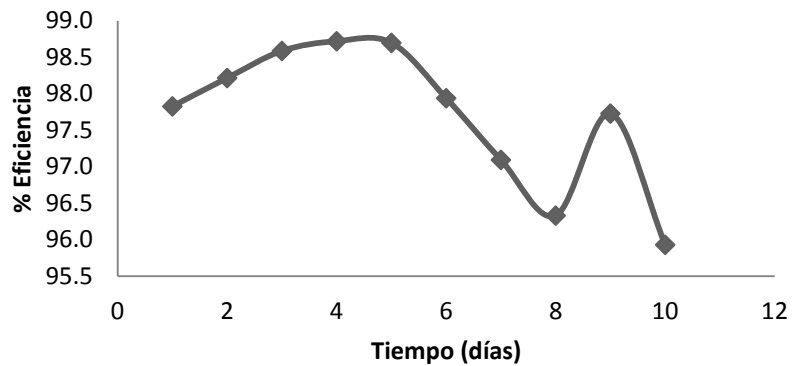


Figura 30. Curva de porcentaje de eficiencia de la PTAR en términos de SST.

En la Figura 31, se presentan dos fotografías que muestran la calidad del efluente obtenido después de la optimización de la PTAR-UABC. La primera fotografía fue tomada en el punto de descarga, después de haber pasado por la filtración y cloración

correspondientes; la segunda fotografía fue tomada en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UABC, esta muestra al igual, fue colectada en el punto de descarga para posteriormente realizarle las pruebas correspondientes.



Figura 31. Calidad de agua del efluente PTAR-UABC.

## 4.6 Rediseño

Al inicio de esta investigación, la PTAR-UABC sufrió daño estructural a consecuencia del terremoto ocurrido en abril del 2010 en Mexicali, B.C., las reparaciones llevaron aproximadamente cinco meses y hasta el mes de septiembre se iniciaron operaciones nuevamente. Al iniciar las operaciones, nos percatamos de problemas en el diseño de la planta que eran fundamentales para el buen funcionamiento de la planta, con el apoyo administrativo se hicieron cambios importantes que mejoraron el tratamiento del agua residual.

#### 4.6.1 Modificación en la estructura del reactor

Primeramente, se llevó a cabo la reparación y mantenimiento técnico de la planta. El tanque aerobio se recubrió con un material anticorrosivo para evitar su desgaste y ayudar a aumentar la vida útil de la planta. Como se puede observar en la primera fotografía de la Figura 32, el tanque aerobio estaba profundamente dañado por la corrosión, ya que inicialmente no se le dio un recubrimiento adecuado y con el movimiento telúrico se abrió mezclándose el agua del reactor con el sedimentador, por lo que se tuvo que vaciar la planta y empezar con su reparación. Además se hizo la extensión de una mampara alrededor del tanque, ya que como los niveles de oxígeno disuelto se incrementaron, lodos del reactor brincaban hacia el sedimentador por la turbulencia creada, por lo que esta acción tomada resolvió este problema, se inoculó el reactor aerobio con 20 m<sup>3</sup> de lodos activados de una planta similar para lograr tener una estabilización y crecimiento de microorganismos de una manera más rápida.

En la Figura 32, se observa el antes y después de las reparaciones al tanque aerobio.



Figura 32. Antes y después de los daños ocasionados por el terremoto.

#### 4.6.2 Cambios en el diseño del sedimentador

Los cambios que se le hicieron al sedimentador, consistieron en nivelar las canaletas que se encuentran sobre el sedimentador. El problema de nivelación impedía que el agua clarificada del sedimentador escurriera libremente a la canaleta, ocasionado a la vez estancamiento del agua; por lo que se incrementaba el crecimiento de algas en esta área de la planta. Al realizar los cambios y nivelar las canaletas, se pudo notar una mejora en la sedimentación y aspecto de lodos en el reactor aerobio, como se presenta en la Figura 33.



Figura 33. Cambios en la nivelación de las canaletas del sedimentador.

#### 4.6.3 Instalación de medidor de flujo

Los medidos de flujo en las plantas de tratamiento, son fundamentales para realizar cálculos y optimar la planta, la falta de un medidor de flujo. Particularmente en la PTAR-UABC, dificultó realizar los cálculos necesarios para el buen funcionamiento, de la misma. Se obtenía un valor aproximado del caudal de entrada en el sistema, por lo que inicialmente, todos los cálculos fueron basados en estimaciones de flujo. Se informó a la administración acerca de la importancia de contar con un medidor de flujo electrónico para hacerla funcionar correctamente.

El administrador del campus se mostró siempre muy interesado y dispuesto a apoyar en la mejora de la planta por lo que se proporcionó los recursos financieros para la adquisición e instalación de un equipo de medición de flujo. En la Figura 34, se muestra el medidor de flujo.



Figura 34. Medidor de flujo de la PTAR-UABC

#### 4.6.4 Construcción de línea de recirculación

En las plantas con sistemas de tratamiento de lodos activados, como parte del proceso cuentan con corrientes de recirculación de lodos activados, que recogen los lodos sedimentados del clarificador y se incorporan nuevamente en el sistema, de manera, que la alimentación inicial se combina con el lodo reciclado y entra al reactor nuevamente como alimentación combinada (17).

El diseño de la PTAR carecía de esta línea de recirculación de lodos, según el manual, la recirculación de lodos se daba por medio de una recirculación hidrostática, por la forma cónica del tanque aerobio, sin embargo, a lo largo de los dos años de estudio, se

observó que la recirculación hidrostática operaba de manera muy deficiente, por lo que se decidió construir la línea de recirculación de lodos activados, el cual mejoró la calidad del sobrenadante del sedimentador. En la Figura 35, se muestra una ilustración de la recirculación de lodos instalada en la parte inferior del tanque aerobio.



Figura 35. Recirculación de lodos de la PTAR-UABC

#### **4.6.5 Modificación en las líneas de distribución de aire**

La PTAR-UABC cuenta con tres líneas de distribución de aire, que suministran aire al reactor aerobio. Al inicio del proyecto, observamos que la configuración de los sopladores en el reactor, no respondía a las necesidades de la planta.

En la configuración inicial, los sopladores 2 y 3, están conectados en serie, se suministra aire al desnatador y al tanque de cloros, estos a su vez, están conectados a las membranas de la orilla del reactor cercanas al sedimentador. El soplador 1, suministraba aire a las membranas de la parte del centro del reactor cercanas a la dona de distribución.

El problema se hizo notar, cuando se aumentó la carga de biomasa en el reactor y se necesitaba aumentar la concentración de oxígeno disuelto en el reactor. Los sopladores 1 y 2 no alcanzaban a suministrar el oxígeno requerido para airear esa cantidad de biomasa, por lo que se requirió poner en marcha los sopladores 2 y 3 y apagar el soplador 1. Pero debido

a la carga tan grande de aire que suministraron estos dos sopladores y a la cercanía de las membranas al sedimentador por su mal diseño, los sólidos se empezaron a suspenderse dentro del sedimentador hasta llegar a la parte de arriba. En la Figura 36, se presenta la configuración inicial de los sopladores encontrados en los planos originales de la planta.

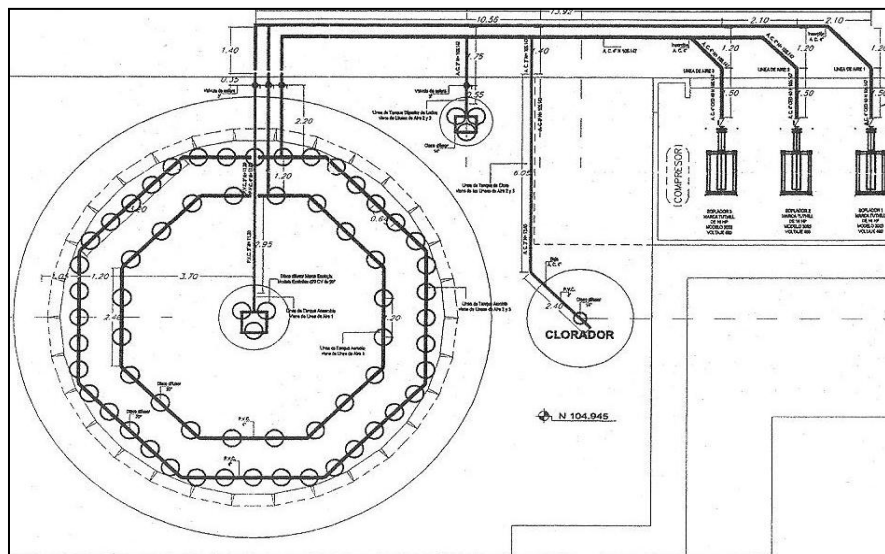


Figura 36. Configuración inicial de la línea de distribución de aire.

Este problema se resolvió con la conexión en serie de los sopladores 1 y 2, que suministran aire en la parte central del tanque. El soplador 3, solamente mantiene un suministro de aire menor para seguir alimentando aire al desnatador y tanque de cloro. En la Figura 37, se presentan el cambio en la configuración de las líneas de distribución de aire.



Figura 37. Configuración actual de las líneas de distribución de aire.

#### 4.6.6 Construcción de escalera para acceder al reactor

Se encontraron también aéreas de oportunidad, para mejorar la seguridad de los operadores. Un tema que surgió como una urgencia, fue la construcción de una nueva escalera más segura para los trabajadores, ya que la escalera inicialmente instalada, carecía de seguridad y era casi imposible subir equipo para realizar mediciones. En los meses de verano, debido que prácticamente la escalera era vertical, y no tenía ninguna área de descanso al subir, los operadores tenían que subir con guantes para evitar quemarse. Cualquier reparación que se requería arriba en el reactor era muy complicada por su difícil acceso. En la Figura 38, en la imagen 2, se puede ver la escalera nueva, la cual fue construida con medidas para un acceso seguro y fácil al tanque de la PTAR-UABC.



Figura 38. Antes y después de la construcción de la escalera.

#### 4.6.7 Mantenimiento de cárcamo de bombeo

Como parte del mantenimiento preventivo de la planta; se limpió el cárcamo de bombeo, lo cual se debe realizar periódicamente, para evitar que se tape por la acumulación de sólidos. Sin embargo desde que la planta se entregó no se le había hecho ningún tipo de mantenimiento, el cárcamo de bombeo se encontraba obstruido por falta de mantenimiento, se recomendó a los trabajadores hacer la limpieza al cárcamo por lo menos una vez por mes. En la Figura 39, se ilustra el cárcamo de bombeo, se muestra claramente la acumulación de sólidos.



Figura 39. Cárcamo de bombeo de la PTAR-UABC

#### 4.6.8 Mantenimiento y modificación de la criba de finos

Al aumentar el caudal a tratar en la PTAR-UABC, implicó la entrada de una mayor cantidad de sólidos de obstrucción al sistema, por lo que la criba de finos empezó tener problemas al taparse en un lapso de 2 horas al arrastrar mayor cantidad de sólidos, lo que provocaba que el agua se derramara por la parte superior de la criba y el agua caía directamente al reactor con sólidos flotantes. Se consideró la compra de una criba automatizada, pero por cuestiones de falta de presupuesto, únicamente se modificó la criba ya existente. La modificación de la criba consistió únicamente en abrir la parte de las orillas del tamizado y dejarla sin soldar, para poder removerla periódicamente y tener un fácil acceso a su limpieza cuando sea requerido. En la Figura 40, se presenta una ilustración de la criba de finos, ubicada en la parte superior del tanque aerobio.



Figura 40. Mantenimiento y modificación de la criba de finos de la PTAR-UABC.

## **4.7 Capacitación de personal**

Uno de los mayores obstáculos que se presentaron en este proyecto, fue la falta de capacitación del personal. Desde los inicios de la operación de la planta los trabajadores operaron la planta de manera empírica al desconocer el funcionamiento de un proceso biológico de lodos activados. Durante el tiempo que duró este proyecto, se les explicó el porqué de cada cambio y la manera correcta de operar la planta. Los operadores contaban con equipo de laboratorio, que jamás habían utilizado, incluso cuando esto les facilitaría el trabajo. En la PTAR-UABC, se encontraron equipos de medición de cloro residual y libre, además de un equipo para la medición de pH. Se les explicó a detalle el funcionamiento de un proceso biológico y las necesidades que implica su mantenimiento.

### **4.7.1 Capacitación al personal para el uso del equipo de detección de cloro y pH**

Se impartió a los operadores, capacitación sobre el uso del equipo de detección de cloro, se les impartió a 2 de los 3 operadores en total, por falta de disponibilidad. El curso duró aproximadamente 4 horas, en el cual se les explicó de manera detallada el concepto de cloro residual y libre, así como la utilización del equipo. Esto permitió obtener una medición más precisa del cloro libre, descargado en el tanque de cloros.

Respecto a la medición de pH, se utilizaba un método no muy preciso, el cual, solamente registraba un potencial de hidrógeno en un intervalo muy reducido, lo que hacía imposible detectar y cortar la alimentación a cambios bruscos de pH en la entrada al sistema, por lo que se cambió al equipo de medición de pH portátil, que facilita la detección de pH.

### **4.7.2 Uso de la purga de lodos**

Como parte de la capacitación del personal que opera la planta, se capacitó a los operadores sobre el manejo adecuado de la purga de lodos. Esta capacitación, fue fundamental para la operación eficiente de la planta, ya que el operador realizaba la purga del lodo al azar o cuando existía una suspensión de sólidos en el sedimentador a causa del

lodo floculento. Por lo que se hizo un experimento que duró dos semanas, y en base a la concentración deseada, se determinó la producción neta de lodos diaria para conocer la cantidad de lodo a purgar de manera intermitente. En la Figura 41, se presenta una ilustración de la válvula de purga de lodos ubicada en la parte inferior del tanque aerobio.



Figura 41. Válvula de purga de lodos de la PTAR-UABC.

#### **4.7.3 Implementación de bitácoras de registro**

Al inicio de este proyecto, se carecía de algunos registros de datos acerca de la operación de la PTAR, por lo que se estableció el uso de bitácoras de registro de datos, lo cual fue muy importante para lograr una comunicación entre los operadores. Se crearon diferentes bitácoras, dentro de las cuales, la bitácora de actividades diarias, jugó un papel muy importante en la operación de la planta para los operadores. Se estableció que al finalizar el turno de cada operador, deberán registrar cualquier movimiento o cambio en el sistema, con el objetivo mantener informados a los demás operadores.

Las otras bitácoras que se implementaron, fueron la bitácora de pH, en donde deben hacerse los registros de pH en el influente cada hora, para conocer posibles descargas tóxicas a la planta y estar en posibilidades de cerrar el flujo de entrada a tiempo, antes de entrar al sistema, para evitar daños en la planta y principalmente para evitar la muerte de los microorganismos en el reactor aerobio.

La bitácora de registro de personal, permitió lograr un control de las personas que entran, salen y el motivo de su visita, con una mayor seguridad en la planta. Además se modificaron algunas bitácoras ya en uso conforme se fueron incorporando nuevas actividades a realizar por parte de los operadores, como la medición de cloro libre y residual.

## Conclusiones

Como parte de la realización de este proyecto se hicieron algunas modificaciones en la PTAR-UABC por problemas de diseño en el sedimentador y en el reactor. Se logró subir la capacidad de agua residual tratada de 1 L/s a 3 L/s, con un porcentaje de remoción del 98.4%, en términos de DBO<sub>5</sub>. Este valor indica que se logró obtener una buena eficiencia de la planta. Las pruebas de arranque realizadas en cada proceso nos permitieron establecer los parámetros de control óptimos para mejorar la eficiencia en el tratamiento. Se identificaron diversas áreas de oportunidad para mejorar el funcionamiento, como lo fue el hecho de que se hizo la instalación del medidor de flujo en la entrada del proceso y la modificación de la criba para un mejor mantenimiento de la misma. Se ajustaron los parámetros de diseño y se logró una para una optimización adecuada de los procesos, los cuales se compararon y cumplieron con los límites permisibles de las normas mexicanas vigentes.

La continúa capacitación a los operadores, permitió darles herramientas para una mejor toma de decisiones a la hora de resolver problemas de operación de la planta, sin olvidar que es importante que para que puedan desarrollar bien sus funciones, es necesario brindarles el equipo y los materiales necesarios para un buen mantenimiento o operación.

En este estudio, pudimos observar la importancia que recae en las plantas de tratamiento, como un bien no solo para la universidad, al tener la oportunidad de crear un campus sustentable.

## Propuestas

En el campus, aún se utiliza agua blanca para regar, por lo que se propone construir la línea morada para conducir el agua restante a las áreas verdes del campus y remplazarla el agua blanca para riego por agua residual tratada. En la Figura 42, se presenta una fotografía tomada en los campos deportivos de la universidad, donde se observa que aun teniendo agua tratada para regar, se sigue utilizando agua blanca como agua de riego.



Figura 42. Llaves de riego de áreas verdes con agua blanca.

La UABC campus Mexicali, cuenta con una cisterna de almacenamiento para el agua residual tratada, ubicada en los campos deportivos, con una capacidad de  $184 \text{ m}^3$ . La PTAR de la UABC, tiene una capacidad de  $259.2 \text{ m}^3/\text{día}$ , por lo cual la cisterna se llena en 17 hrs. Los  $75.2 \text{ m}^3$  de agua tratada restante regresa al alcantarillado.

Sin embargo, la utilización total del agua tratada no depende de la administración de la planta, si no de la administración del calendario de actividades deportivas de la universidad, por lo que cuando no hay riego, la cisterna no se vacía hasta que existe la necesidad de regar los campos, lo que obliga a la administración de la planta, devolver el agua tratada nuevamente hacia el alcantarillado.

Al final de este estudio, se nos dio conocimiento de la existencia de dos cisternas más dentro del campus, la primera ubicada en la facultad de idiomas, con capacidad aproximada de 184 m<sup>3</sup>, similar a la que se encuentra en los campos deportivos. La segunda cisterna se encuentra ubicada cerca de la alberca olímpica, con una capacidad aproximada de 10 m<sup>3</sup>, por lo que se propone lo siguiente:

1. Expandir el riego de las áreas verdes en todo el campus para lograr la sustentabilidad del agua en el mismo, al reemplazar la línea de agua blanca por línea morada.
2. Siembra de árboles nativos de bajo consumo de agua.
3. Se propone la venta de agua residual tratada al municipio para riego de áreas verdes de los camellones aledaños al campus, y utilizar los recursos recabados como sustento para el mantenimiento de planta.
4. Se propone establecer un sistema de riego organizado en los campos deportivos que beneficie a ambas partes.
5. Eliminar el riego por inundación y modificarlo con un sistema de riego automatizado.
6. Se recomienda la compra de equipo de monitoreo y análisis
7. Seguir con la capacitación continua a los operadores de la planta.
8. Invertir recursos para análisis mensuales básicos para lograr que la planta siga funcionando adecuadamente.

## Referencias bibliográficas

1. **J.Manga.** *Reuso de las aguas residuales.* un recurso hidrico disponible, Ingenieria y Desarrollo, Barranquilla : Universidad del Norte, julio 2001, págs. 12-21.
2. **www.agua.org.mx** . La naturaleza: la primera dueña del agua, Centro Virtual de Informacion del agua.. [En línea]
3. **Garduño, H y Arreguín, F.** *Efficient Water Use.* Uruguay : UNESCO-ROSTLAC, 1994, pág. 379.
4. **Rodríguez, Antonio.** *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.* Madrid : Universidad de Alcalá de Henares, 2006.
5. **Peñuela, Gustavo** *Manual de Tecnología Sostenible en Tratamiento de Aguas.* s.l. : TECSPAR, Universidad Politecnica de Catalunya. ISBN: 978-958-44-5307-5.
6. **www.conagua.gob.mx.** Comision Nacional del agua. [En línea] 2003.
7. **Rojas, Ricardo** *Gestion Integral de Tratamiento de Aguas residuales.* Sistemas de tratamiento de aguas residuales, s.l. : CEPIS/OPS-OMS, 2002.
8. **Garcia Espigares, M y Perez Lopez, Ja.** *Aspectos Sanitarios del estudio de las aguas.* Servicio de Publicaciones, Granada : Universidad de Granada, 1985.
9. **www.INEGI.gob.mx.** *Instituto Nacional de Estadistica y Geografia e Informatica.* [En línea] Censo de Poblacion y Vivienda, 2010.
10. **Romero H, Socorro.** Una alternativa hacia la sustentabilidad del agua en la region fronteriza Mexicali, Mexico-Imperial. *Contaminacion del medio ambiente en Baja California: el aprovechamiento del agua residual tratada.* s.l. : Porrúa, 2006, 8.
11. **Sanchez, M.V.** El revestimiento del Canal todo americano: competencia o cooperacion por el agua en la frontera Mexico-Estados Unidos. 2004.
12. **Barajas Aguilar, Ismael.** Binational water and management planning. *The US-MEXICAN border Environment.* San Diego : San Diego State University Press, 2003.
13. **Peñuelas, Josep.** *Efectos del cambio climatico sobre los ecosistemas terrestres: Observacion, experimentacion y simulacion.* Barcelona : s.n., 2002, Global Change Biology, págs. 531-544.
14. **Gracia, C.A** *El cambio climatico y la reduccion de la reserva de agua en el bosque mediterraneo.* s.l. : Asociacion española de ecologia terrestre, Mayo de 2002, Ecosistemas 11.
15. **Conde, Cecilia.** *Impactos del cambio climatico en la agricultura en Mexico.* s.l. : Climate Research, 1997, pág. 123.

16. **Kenneth, Kerri D.** A field Study Training Program. [ed.] Inc University Enterprises. *Operation of wastewater treatments plants*. Sacramento : California State University, 2008.
17. **Ramalho, R.S.** [ed.] Editorial Reverté. Quebec : Laval University: Faculty of Science Engineering.
18. **Winkler, Michael A.** *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. s.l. : Limusa, 2009.
19. **Reynolds, Kelly A** *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica..* Identificación del problema, 2002 : De la Llave.
20. **Crites, Ron.** *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. s.l. : Mc Graw Hill, 2000.
21. **Giraldo Valencia, Luis Fernando y Restrepo Marulanda, Isabel Cristina.** *Arranque y operación de un reactor experimental de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. Sede Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2003.
22. **Legislación ambiental:** Integración por zonas de ganadería y de la agricultura especializada. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. Mexico : Universidad Autónoma de Mexico, Swiss College of Agriculture (FAO), 2002, 8.
23. **NOM-001-SEMARNAT-1996.** *Limites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. s.l. : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
24. **NOM-002-SEMARNAT-1997.** *Limites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal*. s.l. : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
25. **Greenberg, Arnold E, Clesceri, Leonore S y Enton, Andrew.** *Standard Method for the examination of wastewater*. 1992.
26. **NOM-003-SEMARNAT-1997.** *Limites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúnen en servicios al público*. s.l. : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
27. **Rodríguez, Manuel Gil.** *Modelo dinámico del proceso secundario de depuración de aguas residuales urbanas*. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Madrid, España : Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Universidad Politécnica de Madrid, 1998, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 14, págs. 4, 525-538.