

*Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Ingeniería
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería*

*Programa:
Maestría en Ingeniería*

*“Evaluación de la PTAR de la Escuela de Ingeniería y
Negocios -UABC, campus Guadalupe Victoria”*

T E S I S

*Para obtener el grado de:
Maestra en Ingeniería*

*Presenta:
Yersinia Olvera Vidal*

*Dra. M. Socorro Romero Hernández
Directora de Tesis*

Mexicali, B.C., 2012

*Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Ingeniería
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería*



*Programa:
Maestría en Ingeniería*

*“Evaluación de la PTAR de la Escuela de Ingeniería y
Negocios -UABC, campus Guadalupe Victoria”*

T E S I S

*Para obtener el grado de:
Maestra en Ingeniería*

*Presenta:
Yersinia Olvera Vidal*

*Dra. M. Socorro Romero Hernández
Directora de Tesis*

Mexicali, B.C., 2012



Agradecimientos

Agradecemos al Instituto de Ingeniería de la UABC, por facilitarme los recursos necesarios por medio de CONACYT para la realización de este estudio.

A las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios de la UABC Campus Guadalupe Victoria, por brindarme todas las facilidades para realizar este estudio en la PTAR.

A la Dra. Ma. Socorro Romero Hernández por haber sido mi directora de tesis, por todas sus atenciones y aportaciones para la realización de este proyecto.

Al Dr. Benjamín Valdez Salas Director del Instituto de Ingeniería de la UABC por todo su apoyo y atenciones brindadas.

A la Ingeniera Química Luz Estela Salazar por su apoyo en el laboratorio.

A la Ingeniera Química Carolina Espinoza por su apoyo en la capacitación para técnicas en microbiología.

A los investigadores Dr. German Cuevas y Dr. Eric Houbbron por sus aportaciones y mejoras para el presente proyecto.

A mis profesores del posgrado MYDCI, y a mis amigos por sus aportaciones.

Al QFB. Wenceslao Orozco Reynoso por ayudarme siempre en todo momento y por todas sus atenciones siendo él parte fundamental para poder realizar mi tesis.

Dedicatoria

Un agradecimiento especial a mi familia quienes siempre han estado a mi lado en todo momento y me han demostrado su apoyo incondicional, gracias por forjarme a ser la persona que soy. Con cariño a mis padres **Efrén Olvera** y **Sandra Luz Vidal**.

**Evaluación de la PTAR de la
Escuela de Ingeniería y
Negocios - UABC, campus
Guadalupe Victoria**

ÍNDICE ANALÍTICO

	Páginas
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE FOTOGRAFIAS	ii
LISTA DE TABLAS	iii
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Localización del sitio de estudio	6
1.3 Planteamiento del problema y justificación del estudio	6
1.4 Hipótesis	8
1.5 Objetivo general	8
1.5.1 Objetivos específicos	8
CAPÍTULO 2	10
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Contaminantes y composición del agua residual	13
2.2 Parámetros físicos del agua	16
2.2.1 Parámetros químicos del agua	18
2.3 Tratamiento de aguas residuales	27
2.4 Tipos de tratamiento de aguas residuales	28
2.4.1 Tratamiento primario	29
2.4.2 Tratamiento secundario	29
2.4.2.1 Sistema de tratamiento biológico	31
2.4.2.2 Tratamiento de lodos activados (proceso aerobio)	31
2.4.2.3 Elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados	33

2.4.2.4 Tratamiento de lodos activados de aireación extendida	36
2.4.2.5 Microbiología del proceso	37
2.4.2.6 Curva de crecimiento de microorganismos	41
2.4.3 Tratamiento terciario	43
2.4.3.1 Eliminación de sólidos en suspensión	44
2.4.3.2 Adsorción en carbón activado	44
2.4.3.3 Ósmosis inversa	45
2.4.3.4 Procesos de oxidación química (cloración y ozonificación)	45
2.4.3.5 Eliminación de fósforo	47
2.5 Parámetros de operación	48
2.6 Reutilización del agua residual	50
 CAPÍTULO 3	 52
3. MÉTODO	52
3.1 Diagnóstico de la PTAR Guadalupe Victoria	53
3.2 Caracterización de la calidad del agua residual de la PTAR	53
3.3 Diseño y construcción de la PTAR a nivel piloto	53
3.4 Toma de muestras	53
3.4.1 Elaboración de formatos y bitácoras	54
3.4.2 Identificación de muestras	54
3.4.3 Preservación de muestras	54
3.5 Análisis del laboratorio	55
3.5.1 Análisis fisicoquímicos	55
3.5.2 Análisis bacteriológicos	56
3.5.3 Análisis microscópico	56
3.6 Mediciones de campo	57
3.7 Análisis de datos	57

CAPÍTULO 4	59
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1 Diagnóstico inicial de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria	60
4.1.1 Caracterización físico-química del agua residual	64
4.1.2 Caracterización bacteriológica	66
4.1.3 Resultados medición de parámetros en campo	68
4.2 Situación actual de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria	71
4.3 Diseño y construcción de la PTAR con un sistema de lodos activados de aireación extendida a nivel piloto	74
4.3.1 Evaluación del funcionamiento de la PTAR piloto	76
4.3.2 Análisis de campo	79
4.3.3 Análisis de sólidos	80
4.3.4 Análisis bacteriológicos	82
4.3.5 Análisis de concentración de materia orgánica	84
4.3.6 Frotis microbiológico	86
4.3.7 Dosificación de cloro	86
4.3.8 Fósforo total y fosfatos	88
4.3.9 Nitrógeno total, N. Amoniacal, Nitritos y Nitratos	89
4.3.10 Parámetros de operación	90
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
Anexos	103

Figuras

Figura 1. Ubicación de la Cd. Guadalupe Victoria, en el Km 43 donde se realizó el estudio	6
Figura 2. Etapas del tren de tratamiento biológico de lodos activados	36
Figura 3. Ilustración de las cuatro fases presentes en la curva de crecimiento	42
Figura 4. Reactor continuo para desinfección por cloro	47
Figura 5. Diagrama de proceso de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria	60
Figura 6. Resultados del análisis de sólidos y DBO_5 comparando los SDT y DBO_5 con los LMP de la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)	68
Figura 7. Resultados de cloro total en el efluente PTAR- Guadalupe Victoria	73
Figura 8. Diagrama ilustrativo de la PTAR piloto	75
Figura 9. Resultados de parámetros medidos in situ en el reactor 1	79
Figura 10. Resultados de parámetros medidos in situ en el reactor 2	80
Figura 11. Comportamiento de la concentración de SST y SSV en el reactor	81
Figura 12. Concentración de sólidos sedimentables del reactor biológico	82
Figura 13. Análisis de DBO_5 del agua influente en el transcurso del proyecto	85
Figura 14. Porcentaje de remoción DBO_5 de influente y efluente del sistema del año 2011 y 2012	85
Figura 15. Fósforo total y fosfatos de los diferentes puntos del proceso	89
Figura 16. Diferentes compuestos nitrogenados de ciertos puntos del proceso	90

Esquemas

Esquema 1. Transformaciones del nitrógeno	22
Esquema 2. Diagrama ilustrativo de los tipos de tratamiento general de agua residual	35

Ecuaciones

Ecuación 1. Compuestos de amonio	18
Ecuación 2. Inestabilidad de carbonato de magnesio	18
Ecuación 3. Nitratos como fertilizante	20
Ecuación 4. Conversión de nitrógeno atmosférico en proteínas	20
Ecuación 5. Compuestos de amonio para la producción de proteínas	21
Ecuación 6. Conversión de bacterias en amoníaco	21

Ecuación 7. Nitrógeno amoniacal en equilibrio	23
Ecuación 8. Balance de bacterias (coliformes)	46
Ecuación 9. Porcentaje de desinfección	47
Ecuación 10. Relación Alimento/Microorganismos A/M	48
Ecuación 11. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	49
Ecuación 12. Tiempo Medio de Retención Celular (TMRC) o edad de lodos	49
Ecuación 13. Índice Volumétrico del Lodo (IVL)	49

Fotografías

Foto 1. Digestor primario	61
Foto 2. Reactor 1	62
Foto 3. Tanque Clarificador	63
Foto 4. Tanque de contacto (cloración)	63
Foto 5. Cisterna efluente	64
Foto 6. Laguna de agua residual provocada por los desbordamientos del tanque efluente	65
Foto 7, Foto 8. Influyente. Quiste de Amoeba	70
Foto 9. Reactor. Rotífero joven	70
Foto 10, Foto 11. Reactor. Quiste de parasito	70
Foto 12. Foto 13. Efluente. Algas	70
Foto 14. Efluente. Materia orgánica	70
Foto 15. Estructura del sistema de tratamiento biológico	76
Foto 16. Arranque de la PTAR a nivel escala con agua cruda de la PTAR-UABC Gpe. Victoria	77
Foto 17. Reactor 2 de la PTAR piloto, después de adicionarle el inóculo	77
Foto 18. Parte trasera del sedimentador con sus dos fases	78
Foto 19. Muestra 10^{-1} <i>E. coli</i>	82
Foto 20. Muestra directa <i>E. coli</i>	82
Foto 21. Dilución 10^{-1} C. totales	83
Foto 22. Muestra directa C. totales	83
Foto 23. Muestra directa <i>E. coli</i>	83
Foto 24. Botellas winkler para el análisis de DBO ₅	84
Foto 25. Frotis del reactor rotíferos jóvenes (40x)	86
Foto 26. Frotis del reactor ciliados adheridos (40x)	86

Foto 27. Frotis del reactor parasito (100x)	87
Foto 28. Muestra clorada	88
Foto 29. Muestra filtrada con carbón activado	88
Foto 30. PTAR-UABC Guadalupe Victoria	103
Foto 31. Cárcamo de almacenamiento	104
Foto 32. Bombas sumergibles	104
Foto 33. Panel PLC	105
Foto 34. Centro de carga	105
Foto 35. PLC de motobombas	105
Foto 36. Centro de carga	105
Foto 37. Motobombas	106
Foto 38. Tanque hidroneumático	106
Foto 39. Sedimentador con una gruesa capa de algas	109
Foto 40. Demasías del tanque efluente causando una laguna	110
Foto 41. Fugas de la PTAR	111
Foto 42. Situación actual de la PTAR	111

Tablas

Tabla 1. Nomenclatura general del estudio	9
Tabla 2. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias. Modificación propia de la fuente: <i>(Metcalf & Eddy, 1997)</i>	15
Tabla 3. Principales tipos de tratamiento biológico	30
Tabla 4. Tipos de filamentos presentes en TRC bajo y TRC alto	41
Tabla 5. Dosis típicas de cloro en desinfección	46
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua residual analizados en el laboratorio	55
Tabla 7. Parámetros bacteriológicos del agua residual analizados en laboratorio	56
Tabla 8. Parámetros de campo y metodología del agua residual analizados in situ	57
Tabla 9. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en aguas para reuso Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)	58
Tabla 10. Resultados de los análisis de campo y laboratorio para la caracterización del agua residual	67
Tabla 11. Resultados del muestreo de los días 27 al 30 de septiembre del 2010, para análisis bacteriológicos	69

Tabla 12. Parámetros de campo de los diferentes puntos de muestreo	72
Tabla 13. Cargas orgánicas típicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas (A/M)	91
Tabla 14. Parámetros de operación de la PTAR piloto y su eficiencia, como lo indica * <i>Ramalho, 2003</i> los intervalos para aireación extendida	92
Tabla 15. Composición típica del agua residual doméstica	93

Anexos

Anexo 1. Descripción detallada de los componentes que conforman la PTAR-UABC Guadalupe Victoria	103
Anexo 2. Solicitud de información faltante de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria enviado a la constructora	107
Anexo 3. Resultados de Coliformes fecales del Laboratorio Sinaloa	112
Anexo 4. Oficio de revisión de Reporte ejecutivo del diagnóstico inicial de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria	113
Anexo 5. Oficio de la entrega del reporte ejecutivo	114

Resumen

En el presente estudio se evaluó el funcionamiento de la PTAR-UABC Campus Guadalupe Victoria. Se realizó un diagnóstico de los distintos procesos de la PTAR. Para ello se recolectaron muestras de agua del influente, reactor y efluente para realizarles análisis fisicoquímicos y bacteriológicos.

Del estudio se concluye que se encontraron varios problemas de operación y diseño en la PTAR. Se observaron fugas de agua en las tuberías de la PTAR, ocasionándole como consecuencia salpicaduras al personal los cuales pudieron haber sido causa de patogenicidad. La planta no cuenta con el personal calificado para operarla, ya que no se les dio la capacitación adecuada. La compañía constructora no cumplió con las condiciones establecidas de diseño y se vio reflejado en los desbordamientos que presentaron las diferentes áreas de la planta por la falta de regulación del flujo. Los resultados de los análisis de laboratorio y campo dieron por debajo de lo que marca la literatura.

Debido a los problemas ya mencionados se optó por diseñar y construir una PTAR a nivel piloto, con un sistema de lodos activados de aireación extendida con las mismas características técnicas de la PTAR Guadalupe Victoria, utilizando el agua influente de la planta en estudio la cual se evaluó en un periodo de 7 meses. Se obtuvieron resultados muy satisfactorios, con un porcentaje de remoción de DBO_5 de un 99.13%, teniendo un promedio de 2 mg/L de DBO_5 en el efluente y una concentración de 43 NMP/100 ml de Coliformes fecales, ambos cumpliendo con la norma de reuso NOM-003-SEMARNAT-1997. Se ajustó la dosificación de cloro siendo éste de 0.28 ml de hipoclorito de sodio al 1.84% por cada litro de agua efluente, dando como cloro residual libre 1.2 ml/L de Cl_2 . Se obtuvieron parámetros de operación dentro de los intervalos recomendados como lo marca la literatura.

En base a un reporte ejecutivo que se les entregó a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus Guadalupe Victoria, tomaron la decisión de no recibir la PTAR a la constructora, sirviendo también para gestionar recursos económicos para la construcción de una nueva PTAR que funcione eficientemente y cumpla con los estándares de vertido vigentes en áreas verdes.

Palabras clave: Tratamiento de agua residual, tratamiento con lodos activados, reuso de agua residual tratada, tratamiento biológico, riego con agua residual tratada.

Abstract

In this research the operation of the waste water treatment plant of the UABC-Campus Guadalupe Victoria was evaluated. A diagnostic was made from the different parts of the process. In order for this to happen we collected water samples from the influent, reactor and effluent. They were analyzed in the laboratory for bacterial, physical and chemical contaminates.

From this study we the conclusion was made that the waste water treatment process had several issues in design and operation. We observed water leaks from some pipes of the wastewater treatment plant causing contamination to the workers of the plant. Also, they do not have qualified personal to operate the plant. The construction company did not complete the established conditions of the design and it showed on the overflow that was present on most of the treatment process. The results of the laboratory analysis were lower than the standards to operate a waste water treatment plant.

Due to the problems shown before the decision was made to design and build a pilot waste water treatment plant with a system of activated sludge of extended aeration with the same technical characteristics of the waste water treatment plant of UABC-Campus Guadalupe Victoria. Also, using the waste water generated by this campus as influent of the pilot WWTP. This plant was put in operation and observed and analyzed for seven months. We came up with very positive results. A percent of the BOD₅ demand of 99.13%, having an average of 2 mg/L of BOD₅ in the effluent and a bacterial concentration of 43 MPN/100 ml of sample water. Both parameters complying with the Mexican Norm NOM-003-SEMARNAT-1997. The bleach concentration was adjusted at 0.28 ml of sodium hypochlorite at 1.84 % of concentration for every liter of water from the effluent showing residual chlorine of 1.2 ml/L. Obtaining parameters that comply with the standards of the literature.

Based on an executive report given to us to the authorities of the School of Engineering and Business and the Campus Guadalupe Victoria, they took the decision not to receive the waste water treatment plant from the construction company. Also they managed and received financial resources to build a new waste water treatment plant that complies with the quality standards.

Key words: Waste water treatment, activated sludge treatment, waste water recycling, biological treatment, irrigation of the waste water treatment.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El alto consumo de agua potable y la gran contaminación han causado efectos muy nocivos en el medio ambiente. La mayor parte del agua que se encuentra en el planeta es agua salada y el mínimo porcentaje de agua es dulce. El ciclo natural del agua cada año se ve más afectado, por todos los trastornos que se generan con la contaminación.

“El agua en su uso se carga de sustancias, que le confieren propiedades perjudiciales para la salud de los organismos superiores, de modo que ha de ser descontaminada, en tal extensión que al ser devuelta a los causes receptores, su impacto sea de mínima perturbación en el cauce natural receptor. El agua residual tratada es una alternativa para un mejor aprovechamiento del recurso y bajar los altos índices de contaminación a los cuerpos receptores. La tecnología para depurar las aguas continúa renovándose en investigación y desarrollo, con nuevas aportaciones de procedimientos, materiales e instrumentación que mejoran los procesos de descontaminación existentes” (Rodríguez, 2005)¹

“Algunos problemas de contaminación se atribuyen directamente a las deficiencias de operación, mantenimiento y a la falta de los debidos incentivos para alentar la conservación y recuperación del recurso. Las mejoras en la eficiencia operativa y en la recuperación de recursos producen altos rendimientos y beneficios desde el punto de vista económico para las empresas” (Barrera, 2005)²

Por ello es necesario impulsar la instalación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARS) y la capacitación de personal para una operación adecuada que permita obtener agua residual tratada con una buena calidad para su reutilización. “El proceso de lodos activados tiene la ventaja de producir una alta calidad de efluentes para una explotación razonable de mantenimiento y de costos” (NESC, 2003)³. Actualmente es una condición básica el tratamiento de aguas procedentes de usos urbanos o industriales ya que se generan grandes volúmenes de agua residual que contaminan los mares, lagos o canales de agua cuando no es tratada antes de verterla.

Hay la necesidad de cumplir y realizar “normas más estrictas para proteger la salud pública. En cualquier caso, estos estudios se consideran necesarios para garantizar la aplicación eficaz y segura de la reutilización de las aguas residuales, ya que esto aumentará la confianza” (*WHO EMRO, 2006*)⁴ en la comunidad.

Por lo anterior consideramos importante su “determinación y clasificación en los efluentes para así proponer un adecuado uso y manejo de este recurso que se oriente a la productividad sostenible y al aprovechamiento racional de los recursos naturales” (*Ortiz, 2009*)⁵

En diferentes partes de México las universidades están aplicando sus conocimientos en la investigación de diversos tipos de tratamiento y puesta en marcha de sus propias plantas de tratamiento de agua residual.

González (2009)⁶, menciona algunas alternativas para la valoración y reaprovechamiento del agua en las universidades, ya que en la Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco en el 2005, se tuvieron severos problemas de suministro de agua. Se racionó el uso del agua, se concentró el uso de sanitarios en el zonas de mayor afluencia de la comunidad universitaria, se alteró, por más de un mes, la vida académica y el funcionamiento de la Unidad, percibiendo la vulnerabilidad de la institución frente a este problema. Por lo que se tomaron estrategias para operar la planta piloto de tratamiento de aguas residuales, establecieron un programa de información, reporte, detección y atención de fugas. Iniciaron cambios de muebles sanitarios de operación manual por los de operación automática, iniciaron una campaña de concientización y transformación de la percepción del uso del agua en la unidad. Consolidaron un grupo de trabajo enfocado a la atención de esta problemática.

Osnaya (2012)⁷, argumenta que en la Universidad de la Sierra Juárez, Ixtlán de Juárez Oaxaca, se tenía un tratamiento de aguas residuales por medio de fosas sépticas, por lo que debido al crecimiento de la población estudiantil, el flujo y la carga orgánica se creó un sistema de tratamiento de aguas residuales de humedales artificiales, el cual

permitirá cumplir con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. También se espera que el agua obtenida después del tratamiento sea de suficiente calidad para poder ser usada en distintas actividades de la institución como lo es la jardinería.

Medina (2005)⁸, trabajó con un reactor UASB (por sus siglas en ingles upward-flow anaerobic sludge blanket), que significa reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, es una tecnología de efectividad comprobada en varios países de Latinoamérica, de climas tropicales y subtropicales. Construido para depurar aguas residuales domésticas del Barrio Catedral, Tarija - Bolivia. Sus eficiencias de remoción de materia orgánica lo hacen competitivo y de más bajo costo que las cámaras sépticas y los tanques Imhoff, de amplia utilización en nuestro medio, para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Dio a conocer los primeros resultados de la puesta en marcha y la operación del UASB, con el fin de acumular información y experiencias sobre la tecnología.

Los estudios planteados anteriormente sirvieron de antecedentes para darnos cuenta de los diferentes trabajos que se han realizado en universidades con distintos sistemas de tratamiento de agua residual. Los cuales sirvieron de guía para la realización de este trabajo de investigación, ya que abarcaron temáticas relacionadas a la calidad de las aguas y la optimización del funcionamiento de las PTARS, problemática de gran relevancia en la actualidad.

En Baja California el reuso y aprovechamiento de las aguas residuales es un factor especial para garantizar el vital líquido, por ello Mexicali está a la vanguardia en la construcción de PTARS en universidades ya que se han construido en instituciones como la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), el Instituto Tecnológico de Mexicali (ITM) y CETYS Universidad, con la finalidad de reutilizar el agua tratada y disminuir los costos económicos destinados a este recurso. Lo cual deja una gran satisfacción no sólo a docentes y alumnos, sino a toda una comunidad de formar parte al contribuir en la protección del ambiente.

La UABC campus Mexicali cuenta con varias PTARS instaladas, entre las que se encuentra la PTAR–UABC Guadalupe Victoria. Esta planta tiene el proceso biológico de lodos activados con aireación extendida, con una capacidad de $3 \text{ m}^3/\text{d}$, conformada por siete tanques cilíndricos de diferentes capacidades volumétricas, fabricados con polietileno de alta densidad con tapa, registro para inspección y tapón para drenado. El sistema de tratamiento consta de: un tanque digestor primario, dos tanques de aireación, un tanque clarificador, un tanque de contacto (cloración), un digestor aeróbico de lodos y un tanque cisterna (efluente).

Las pruebas de arranque de la planta se realizaron en julio de 2010 por personal de la constructora, la operaron por un periodo de 2 meses mostrando desde entonces fugas el sistema y sin haber realizado análisis de laboratorio para el cumplimiento de la norma de reuso, por lo que tampoco se había realizado la entrega oficial de la planta a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios del campus UABC-Guadalupe Victoria.

1.2 Localización del sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en el Valle de Guadalupe Victoria Km 43, en la Escuela de Ingeniería y Negocios del campus UABC-Guadalupe Victoria.

El Ejido Guadalupe Victoria o Km 43, oficialmente denominada Cd. Guadalupe Victoria el 1 de diciembre de 1997 por Eugenio Elorduy Walther presidente municipal de Mexicali, es una localidad y delegación del Municipio de Mexicali, Baja California, México. Se encuentra localizada geográficamente en las coordenadas: $32^{\circ}17'14.96'' \text{ N}$ y $115^{\circ}06'29.89'' \text{ O}$, aproximadamente a unos 43 Km de la Ciudad de Mexicali, capital del estado. En la figura 1 se muestra un mapa con la ubicación del sitio de estudio.



Figura 1. Ubicación de la Cd. Guadalupe Victoria, en el Km 43 donde se realizó el estudio

1.3 Planteamiento del problema y justificación del estudio

El mayor porcentaje de las PTARS están mal diseñadas porque no cumplen con la “fiabilidad como factor en la elección de los procesos de tratamiento” (Metcalf y Eddy, 1997)⁹, o en algunas ocasiones la operación de los sistemas de tratamiento de agua residual, se realiza de manera empírica, “sin tomar en consideración los parámetros que sirvieron de base para el diseño, y que en la mayoría de los casos son los que se deberían utilizar para la operación del sistema” (Torrescano, 2009)¹⁰ ocasionando con esto deficiencias de tratamiento del diseño.

Se ha observado que una vez puesta en marcha una PTAR, difícilmente opera adecuadamente, casi siempre es debido a problemas en el diseño y/o mala operación y falta de mantenimiento obteniéndose como consecuencia, una mala remoción y un efluente de mala calidad.

En Mexicali, se han instalado varias PTARS de lodos activados en instituciones educativas de nivel superior. Estas instituciones están comprometidas con el medio ambiente, por lo que tienen el reto de tratar el agua residual que generan, no sólo para cumplir con las normas para descarga sino con las normas para reuso en sus áreas verdes, “los que riegan con aguas residuales tratadas o sin tratar requieren llevar a cabo algunos muestreos preliminares para evaluar el impacto que tendrán las mismas en el entorno” (*EPA Guidelines, 2009*)¹¹. Al reutilizar el agua estamos refiriéndonos a que se trata de un tipo de contacto directo, donde los trabajadores utilizan el agua en diferentes actividades.

Se realizaron visitas a la PTAR del Campus UABC-Guadalupe Victoria para hacer un reconocimiento de las instalaciones, procesos y equipos que la conforman ya que “la evaluación técnica de un sistema de tratamiento de aguas residuales consiste en el seguimiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua, con el fin de determinar su comportamiento o evolución a través del sistema” (*Willz et al., 2010*)¹²

Para ello se realizó un diagnóstico el cual consistió en mediciones de campo y muestreos de los diferentes puntos de la planta como lo son el influente, reactor y efluente, los cuales fueron analizados en el laboratorio con su respectiva metodología. En base a todos los resultados obtenidos de estos análisis iniciales, se pudo observar que la planta presentaba serios problemas de operación y de diseño, por consecuencia deficiencia de remoción de ciertos contaminantes. No se contaba con personal calificado debido a que operaban la PTAR los mismos guardias de seguridad del campus. Se encontraron diversas fugas en ciertos equipos, lo cual pudiera ser indicativo de que no se le dio la capacitación adecuada al personal.

1.4 Hipótesis

La PTAR del campus UABC - Guadalupe Victoria no está cumpliendo con los límites máximos permisibles para reuso, debido a una mala operación y/o diseño de la planta lo que puede generar problemas de salud pública.

1.5 Objetivo General

- Evaluación del diseño y operación del sistema de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria.

1.5.1 Objetivos Específicos

- Hacer un diagnóstico a la PTAR-UABC Guadalupe Victoria.
- Evaluar el funcionamiento de la PTAR.
- Construir un sistema de lodos activados a nivel piloto.
- Determinar los parámetros óptimos para la depuración de agua residual de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria a nivel piloto.

Se presenta en la tabla 1 la nomenclatura que se menciona en el presente estudio.

Tabla 1. Nomenclatura general del estudio

Símbolo	Descripción	[Unidades]
T	Temperatura	[°C]
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	[mg/L]
DQO	Demanda Química de Oxígeno	[mg/L]
pH	Potencial de Hidrógeno	[Unidades]
SS	Sólidos Suspendidos	[mg/L]
SSLM	Sólidos Suspendidos en Licor Mixto	[mg/L]
SDT	Sólidos Disueltos Totales	[mg/L]
PTARS	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	-
UABC	Universidad Autónoma de Baja California	-
NMP	Número Más Probable	-
O.D.	Oxígeno Disuelto	[mg/L]
S. Sedimentables	Sólidos Sedimentables	[mg/L]
N-Total	Nitrógeno Total	[mg/L]
P	Fósforo	[mg/L]
Cl	Cloro	[mg/L]
N-NH ₃	Nitrógeno Amoniacal	[mg/L]
ST	Sólidos Totales	[mg/L]
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles	[mg/L]
SST	Sólidos Suspendidos Totales	[mg/L]
C. T.	Coliformes Totales	[NMP]
C. F.	Coliformes Fecales	[NMP]
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>	[NMP]
UASB	Reactor Anaerobio de Lodos con Flujo Ascendente	-
I. V. L	Índice Volumétrico de los Lodos	[ml/g]
T. R. M. C.	Tiempo de Residencia Media Celular	Días
T. R. H	Tiempo de Retención Hidráulica	Días
A / M	Alimento / Microorganismo	d ⁻¹
σ	Desviación estándar	-

CAPÍTULO 2

Marco teórico

La falta de acceso a agua potable puede considerarse como uno de los mayores problemas en la actualidad. “A pesar de que se ha declarado el agua un derecho humano, actualmente el número de personas que carecen de acceso a agua potable y a sistemas de saneamiento supera los 2600 millones” (*Aguado, 2010*)¹³. A esto hay que unir el incremento constante de la demanda de agua, parejo al incremento de la población, y la producción de enormes cantidades de aguas residuales que deben tratarse convenientemente con el objetivo de combatir enfermedades y asegurar el abastecimiento de este bien/derecho.

“En el siglo XX, la población mundial se triplicó y los usos de los recursos de agua aumentó en un factor de 6. Los usos más importantes de agua son para beber y para la producción de alimentos. Los niveles del agua subterránea están cayendo y todos los tipos de cuerpos de agua, incluyendo ríos, lagos y océanos se están volviendo cada vez más contaminados” (*Stovall, 2007*)¹⁴, “es por ello, que el uso de tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales es fundamental para avanzar hacia una mayor y mejor distribución y empleo del agua, desde su captación, tratamiento y reutilización” (*Aguado, 2010*)¹³

“Aunque, como se ha dicho anteriormente el problema de la contaminación de agua no es técnicamente un problema difícil, el campo es de gran amplitud y de suficiente complejidad como para justificar el que diferentes disciplinas deben conjuntarse para conseguir óptimos resultados con un costo mínimo. Una aproximación sistémica a la reducción de contaminación de las aguas exige la participación de disciplinas distintas: ciencias aplicadas e ingeniería” (*Ramalho, 2003*)¹⁵

“La búsqueda de nuevos procesos para el tratamiento de aguas residuales que faciliten la obtención de efluentes que cumplan con la calidad para ser reutilizados, está impulsando a los grupos de investigación y empresas involucradas en este sector a desarrollar tecnologías que les permita cumplir con este objetivo” (*Cuevas y Tejero, 2002*)¹⁶

El tratamiento de aguas residuales actualmente lleva consigo tantos procesos de tratamiento y equipos, operaciones unitarias y que se hizo evidente que, sobre todo, la ingeniería química tiene una participación prioritaria en la resolución de los problemas de aguas residuales. El concepto de prioridades unitarias, desarrollado fundamentalmente en la ingeniería química a lo largo de los últimos 50 años, constituye la llave de la aproximación científica a los problemas de diseño que se encuentran en el tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales municipales actuales ya no son las aguas residuales o aguas negras de antes. Prácticamente todos los municipios de zonas industrializadas deben manejar una combinación de aguas residuales domésticas e industriales. Los problemas técnicos y económicos que llevan consigo tales tratamientos obligan en muchos casos a hacer tratamientos separativos (segregación) de aguas industriales, antes de su descarga en el alcantarillado municipal.

La composición de las aguas residuales verdaderamente domésticas ha cambiado con la entrada en el mercado de una serie de productos nuevos, ahora accesibles a las amas de casa tales como detergentes biodegradables y otros. Así pues, tratar las aguas residuales domésticas de una forma óptima requiere modificaciones del enfoque tradicional.

“Para el tratamiento tanto de las aguas residuales domésticas como industriales hay que empezar a considerar nuevas tecnologías, nuevos procesos y en general nuevas líneas de tratamiento, así como modificación de las antiguas. Puede considerarse que solamente en los últimos años el diseño de estas plantas de tratamiento ha evolucionado de ser meramente empírico a tener una sólida base científica. Además, la investigación fundamental en nuevos procesos de tratamiento tales como ósmosis inversa y electrodiálisis sólo recientemente se han convertido en algo verdaderamente accesible” (*Ramalho, 2003*)¹⁵

Muchos sistemas naturales están siendo considerados con el propósito del tratamiento del agua residual y control de la contaminación del agua. “El interés en los sistemas naturales está basado en la conservación de los recursos asociados con estos sistemas, como opuesto al proceso de tratamiento convencional de aguas residuales que es intensivo respecto al uso de energía y químicos” (*Llagas et al., 2006*)¹⁷. “La capacidad depuradora de los humedales se basa, a grandes rasgos, en dos mecanismos: 1. La utilización de los nutrientes disueltos en el agua por los productores primarios (macrófitos y microorganismos). 2. La sedimentación de las partículas que lleva el agua, al atravesar lentamente amplias superficies” (*Pérez et al., 2000*)¹⁸. “Entre las ventajas que tienen estos sistemas frente a los tratamientos convencionales, están sus reducidos costos de operación y la baja generación de subproductos no deseados” (*Ramírez et al., 2009*)¹⁹

Ramalho, 2003¹⁵ menciona las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales las cuales son:

- (1) Aguas domésticas o urbanas
- (2) Aguas residuales industriales
- (3) Escorrentías de usos agrícolas
- (4) Pluviales

2.1 Contaminantes y composición del agua residual

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías:

- a) Químicos
- b) Físicos
- c) Biológicos

“Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno como resultado de la utilización del existente en el proceso de la degradación biológica de dichos compuestos. La disminución de oxígeno disuelto lleva a perturbaciones indeseables del medio y de la biota en ella asentada. En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos el resultado más importante en su posible efecto tóxico, más que la disminución en oxígeno” (*Ramalho, 2003*)¹⁵

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recolección como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medioambiental.

“El análisis y la elección de los procesos de tratamiento es uno de los aspectos más importantes del diseño de las plantas de tratamiento” (*Metcalf y Eddy, 1997*)⁹, ya que “cada planta es única, así que para estabilizarla y hacerla funcionar correctamente se necesita conocer la caracterización del agua influente” (*Loaiza et al., 2010*)²⁰, para así poder hacer ajustes en el sistema de tratamiento seleccionado.

En la tabla 2 se presentan las características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias. Las cuales son indispensables para el proceso de la planta.

Tabla 2. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias.
Modificación propia de la fuente: (Metcalf y Eddy, 1997)⁹

Características	Procedencia
Propiedades físicas;	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, de degradación natural de materia orgánica.
Olor	Agua residual de descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, Aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.
Constituyentes químicos;	
Orgánicos;	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales y aceites	Aguas residuales domésticas e industriales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas e industriales.
Inorgánicos;	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y residuales domésticas.
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.
Gases;	
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Descomposición de residuos domésticos.
Contribuyentes biológicos;	
Plantas	Cursos de agua y PTAR.
Protistas;	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas.

2.2 Parámetros físicos del agua

Turbidez

“La turbidez o turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. Los valores de turbidez sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad de agua” (Romero, 2009)²¹

Color

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc. “El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente; debido a esto, su remoción puede lograrse con ayuda de un coagulante de una sal de ión metálico trivalente como el Al^{3+} o el Fe^{3+} .

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales” (Romero, 2009)²¹. La determinación de color es importante para evaluar las características del agua, la fuente de color y la eficiencia del proceso utilizado para su remoción; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción es, por tanto, objeto esencial del tratamiento.

Olor y sabor

“Los olores y sabores en el agua con frecuencia ocurren juntos y en general son prácticamente distinguibles. Muchas pueden ser las causas de olores y sabores en el agua; entre los más comunes se encuentran materia orgánica en solución, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles, aceites, productos de

cloro, diferentes especies de algas, hongos, etc.” (Romero, 2009)²¹. “Uno de los compuestos que contribuye en gran medida a la generación de malos olores es el sulfuro de hidrógeno (H₂S) que es un producto natural de la descomposición anaerobia de la materia orgánica, muy frecuentemente encontrado en drenajes y en plantas de tratamiento de aguas residuales y de lodos de desecho” (Morgan et al., 2005)²²

La determinación de olor y el sabor en el agua es útil para evaluar la calidad de la misma y su aceptabilidad por parte del consumidor, para el control de los procesos de una planta y para determinar muchos casos la fuente de contaminación.

Temperatura

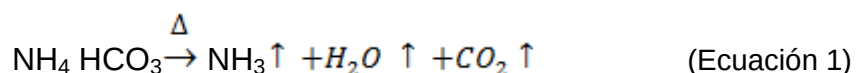
La determinación exacta de la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento y análisis de laboratorio, puesto que, por ejemplo, el grado de saturación de OD, la actividad biológica y el valor de saturación con carbonato de calcio se relacionan con la temperatura.

Sólidos

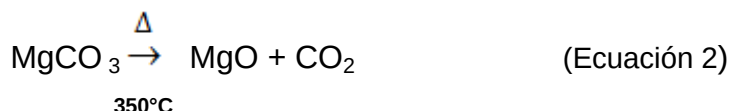
Se clasifica toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos, como materia sólida. “En ingeniería sanitaria es necesario medir la cantidad del material sólido contenido en una gran variedad de sustancias líquidas y semilíquidas que van desde aguas potables hasta contaminadas, aguas residuales, residuos industriales y lodos producidos en los procesos de tratamiento.

- **Sólidos totales;** se define como sólidos la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado de una muestra a 103°C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto (sólidos en suspensión).
- **Sólidos disueltos (o residuo filtrable);** son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos.

- **Sólidos suspendidos (residuo no filtrable o material no disuelto);** son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado.
- **Sólidos volátiles y sólidos fijos;** esta determinación se suele hacer en aguas residuales y lodos con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ la materia orgánica se oxida a una velocidad razonable, formando CO_2 y H_2O que se volatizan; sin embargo, la interpretación no es exacta puesto que la pérdida de peso incluye también pérdidas debidas a descomposición o volatilización de ciertas sales minerales. Los compuestos de amonio, se volatizan completamente durante la ebullición. Ver ecuación 1:



Otros, como el carbonato de magnesio, no son estables” (Romero, 2009)²¹. Ver ecuación 2:



2.2.1 Parámetros químicos del agua

Alcalinidad

“La alcalinidad del agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones de hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-). En aguas naturales, la alcalinidad se debe generalmente a la presencia de tres clases de compuestos: bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos” (Romero, 2009)²¹

Acidez

La acidez de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar bases, como su capacidad para reaccionar con iones hidróxido, como su capacidad para ceder protones o como medida de su contenido total de sustancias ácidas. La determinación de la acidez es de importancia en ingeniería sanitaria debido a las características corrosivas de las aguas ácidas, así como el costo que suponen la remoción y el control de las sustancias que producen corrosión. “El factor de corrosión en la mayor parte de las aguas es el CO_2 , especialmente cuando está acompañado de oxígeno, pero en residuos industriales es la acidez mineral. El contenido de CO_2 es, también, un factor fundamental para la estimación de la dosis de cal y soda en el ablandamiento de aguas duras. La causa más común de acidez en aguas es el CO_2 , el cual puede estar disuelto en el agua como resultado de las reacciones de los coagulantes químicos usados en el tratamiento o de la oxidación de la materia orgánica, o por disolución del dióxido de carbono atmosférico.

El CO_2 se combina con el agua para formar un ácido débil, inestable ácido carbónico, el cual se descompone muy fácilmente. Por ello todo el CO_2 , aún el combinado, se considera como CO_2 libre” (Romero, 2009)²¹

Dureza

“Se consideran como aguas duras a aquellas que requieren grandes cantidades de jabón para generar espuma y producen incrustaciones en las tuberías de agua caliente, calentadores, calderas y otras unidades en las cuales se incrementa la temperatura del agua. En términos de dureza, las aguas se pueden clasificar de la siguiente manera:

0-75 mg/L	Blanda
75-150 mg/L	Moderadamente dura
150-300 mg/L	Dura
>300 mg/L	Muy dura

La dureza se expresa en mg/L como CaCO_3 .

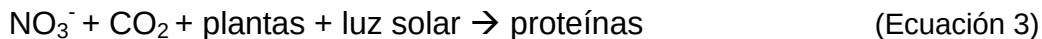
Causas de dureza. En la práctica, se considera que la dureza es causada por iones metálicos divalentes, capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones” (Romero, 2009)²¹

Grupo del nitrógeno

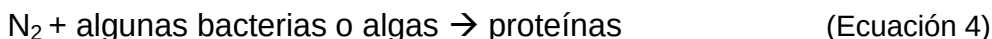
La química del nitrógeno es compleja a causa de los diversos estados de valencia que puede asumir este elemento y al hecho de que los cambios en la valencia los pueden hacer organismos vivos. Los cambios de valencia efectuados por las bacterias pueden ser positivos o negativos, según si las condiciones son aeróbicas o anaeróbicas. Las formas de mayor interés, en nuestro caso son:

- Nitrógeno amoniacal
- Nitrógeno de nitritos
- Nitrógeno de nitratos
- Nitrógeno orgánico

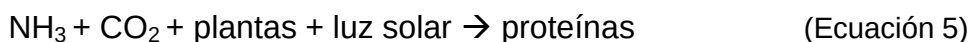
Los nitratos sirven para fertilizar las plantas y son convertidos en proteínas. Ver ecuación 3:



El nitrógeno atmosférico también es convertido en proteínas por las bacterias fijadoras del nitrógeno y por ciertas algas. Ver ecuación 4:



Los compuestos de amonio suministran amoníaco a las plantas para elevar la producción de proteínas. Ver ecuación 5:



Los animales y los seres humanos usan las proteínas de las plantas para su subsistencia. Los compuestos del nitrógeno no utilizados son arrojados en los excrementos. Éstos, y la materia remanente de animales muertos y plantas, son convertidos en amoniaco por las bacterias. Ver ecuación 6:



En la orina existe el nitrógeno principalmente como urea, la cual es hidrolizada rápidamente por la ureasa en carbonato de amonio.

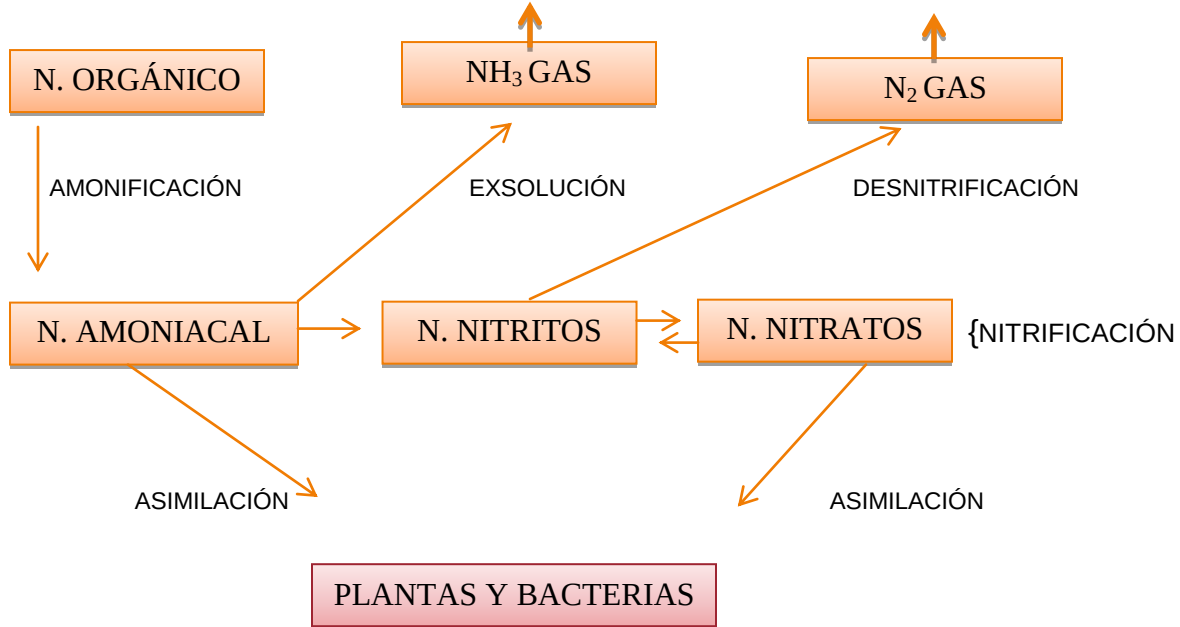
El amoníaco producido por la acción bacterial sobre la urea y las proteínas puede ser usado directamente por las plantas. Si hay un exceso de los requerimientos de las plantas, tal exceso es oxidado por las bacterias nitrificantes. El primer grupo, conocido como las formadoras de nitrito, convierte amoníaco en nitritos en condiciones aeróbicas.

El segundo grupo, las nitro bacterias, oxida los nitritos para formar nitratos. Los nitratos formados sirven como fertilizantes para las plantas. El proceso se conoce como nitrificación y se usa como primera etapa en el tratamiento de aguas residuales que contienen nitrógeno amoniacal, cuando se requiere remoción biológica de nitrógeno.

En condiciones anaeróbicas, los nitratos son reducidos a nitritos y éstos a gas nitrógeno por las bacterias. El proceso se conoce con el nombre de desnitrificación y se supone que ocurre en dos pasos sucesivos: la reducción inicial de los nitratos en nitritos y la de estos en nitrógeno gaseoso. En suelos la reducción a gas nitrógeno

representa una pérdida de fertilizante: en plantas de lodos activados constituye muchas veces un problema serio a producir un levantamiento de los lodos. En tratamientos de aguas residuales que requieren remoción de nitrógeno se usa para dicho propósito. Los resultados para todas las formas del nitrógeno se expresan en mg/L de nitrógeno-N.

En aguas residuales es conveniente visualizar también las trasformaciones del nitrógeno, a medida que transcurre el tiempo, “en condiciones aeróbicas, el nitrógeno amoniacal es oxidado en nitritos y éstos en nitratos, los cuales son el producto final de la descomposición del nitrógeno orgánico” (Romero, 2009)²¹. Ver esquema 1 donde se observan las transformaciones del nitrógeno.



Esquema 1. Transformaciones del nitrógeno

De acuerdo con el ciclo del nitrógeno, una concentración alta en nitrógeno orgánico es característica de una polución fresca o reciente. El amoníaco es el producto inicial en la descomposición del nitrógeno orgánico.

“La fijación del nitrógeno y su aplicación en la agricultura han estado en curso desde hace muchos siglos, desde antes incluso de que fuera reconocida como la fijación del nitrógeno” (*Dietrich et al., 2005*)²³ siendo éste un nutriente esencial para el suelo.

Determinación del nitrógeno amoniacal

“Se considera nitrógeno amoniacal todo el nitrógeno que existe como ión amonio o en equilibrio. Ver ecuación 7:



Determinación del nitrógeno de nitritos

El nitrógeno de nitritos raras veces aparece en concentraciones mayores de 1 mg/L, aun en efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Su presencia indica, por lo regular, procesos activos biológicos en el agua, ya que es fácil y rápidamente convertido en nitrato.

Determinación del nitrógeno de nitrato

Uno de los métodos empleados es el ácido fenoldisulfónico: los nitratos reaccionan con este ácido para producir un compuesto que en solución alcalina es de color amarillo y obedece a la ley de Beer” (*Romero, 2009*)²¹

Determinación de nitrógeno orgánico

Todo el nitrógeno presente en compuestos orgánicos puede considerarse nitrógeno orgánico. El contenido de nitrógeno orgánico de un agua incluye el nitrógeno de aminoácidos, aminas, polipéptidos, proteínas y otros compuestos orgánicos del nitrógeno. El procedimiento analítico es el método Kjeldhal. “En un efluente de aguas residuales urbanas, el nitrógeno se presenta principalmente como nitrógeno orgánico o amoniacal (20% de la DBO₅) y en una proporción muy inferior, nitritos y nitratos” (*Siles et al., 2008*)²⁴

Determinación de Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK)

El método del NTK es el mismo usado para la determinación de nitrógeno orgánico, excepto que se omite el paso inicial del procedimiento, o sea la remoción de nitrógeno amoniacal. El NTK es igual al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal.

Fósforo

El fósforo es un elemento especial en el crecimiento de las plantas y animales. Actualmente se considera como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, pero un exceso de fósforo produce un desarrollo exorbitado de plantas, el cual es causa de condiciones inadecuadas para ciertos usos benéficos del agua. “El empleo de detergentes, los cuales contienen grandes cantidades de fósforo, ha aumentado el contenido de fósforo en las aguas residuales domésticas y ha contribuido al problema de incremento del mismo en fuentes receptoras. Las formas de importancia del fósforo en aguas son:

- Ortofosfatos
- Polifosfatos: pirofosfatos, tripolifosfatos y metafosfatos
- Fosfatos orgánicos

La forma de ortofosfato predominante depende del pH: en aguas residuales domésticas es el HPO_4^{-2} . Los polifosfatos pueden interpretarse como polímeros de ácido fosfórico a los cuales se les ha removido el agua. Todos los polifosfatos se hidrolizan gradualmente y dan como resultado ortofosfatos” (Romero, 2009)²¹. La química de los compuestos orgánicos de fósforo es muy compleja se sabe que su descomposición conduce ortofosfatos. En aguas residuales crudas existen las tres formas: por ello, la mejor manera de controlar el fósforo es mediante el ensayo de fósforo total.

Fosfatos orgánicos

Constituidos por muchos tipos de compuestos fósforo (P) orgánico, incluidos fosfolípidos, fosfatos azucarados, nucleótidos, fosforamidas, etc.

Importancia de la determinación de fósforo

Teniendo en cuenta la importancia del fósforo como nutriente, su determinación es necesaria en estudios de polución, así como de procesos químicos y biológicos de purificación y tratamiento de aguas residuales.

“La descarga de 1 g de fósforo en un lago puede producir la formación de más de 100 g de biomasa (materia orgánica), la cual puede representar una DBO de 150 g de oxígeno para su oxidación aeróbica completa, además de los problemas de eutrofización y crecimiento de fitoplancton. El fósforo como fosfato es un nutriente de los microorganismos en el tratamiento biológico de aguas residuales. En la evaluación de los nutrientes requeridos para la actividad, algunos autores prefieren el ensayo de ortofosfatos en vez del fósforo total, en aguas residuales domésticas varía normalmente entre 1 y 15 mg/L de fósforo” (Romero, 2009)²¹

Oxígeno disuelto (OD)

La determinación de OD es muy importante en ingeniería ambiental por cuanto es el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular. La determinación de OD sirve para cuantificar DBO. El OD se presenta en cantidades variables y bajas en el agua: su contenido depende de la concentración y estabilidad del material orgánico presente y es un factor muy importante en la autopurificación de ríos. “El oxígeno libre en solución, especialmente cuando está acompañado de CO₂, es un agente de corrosión importante del hierro y el acero. Los nitritos constituyen la interferencia más común en efluentes tratados biológicamente y en muestras incubadas para análisis de DBO” (Romero, 2009)²¹

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

“La oxidación microbiana o mineralización de la materia orgánica es una de las principales reacciones que ocurren en los cuerpos naturales de agua y constituye una de las demandas de oxígeno, ejercida por los microorganismos heterotróficos, que hay que cuantificar. Uno de los ensayos más importantes para cuantificar la concentración de materia orgánica de aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días.

La DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días y a 20°C. En aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a cinco días representa en promedio a un 65 a 70% del total de la materia orgánica oxidable” (Romero, 2009)²¹

La muestra para el análisis, deberá de contener los nutrientes necesarios como lo son, nitrógeno y fósforo para el desarrollo de microorganismos, eliminando cualquier sustancia tóxica que contenga la muestra. En las aguas residuales domésticas, normalmente no se tiene problemas con la nitrificación debido a que este proceso se lleva después de los 5 días, siendo realizado este ensayo en estos días su incubación. Sin embargo, en efluentes de PTARS si el contenido de bacterias nitrificantes es elevado, éstas tienen una demanda adicional de oxígeno siendo causa de la nitrificación u oxidación de uno de los compuestos de nitrógeno no oxidado.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

“La demanda química de oxígeno es un parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte” (Romero, 2009)²¹

Este ensayo se considera que es más útil para operación debido a su rapidez al realizarse, teniendo más desventaja la DBO₅ por su periodo de incubación y por las diferentes variables que presenta este ensayo biológico.

2.3 Tratamiento del agua residual

“En el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos.

- a) Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación” (*Marsilli, 2005*)²⁵
- b) “Tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, ya sea directamente o pasando por una neutralización u homogenización” (*Ramalho, 2003*)¹⁵
- c) “Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO.
- d) Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos” (*Marsilli, 2005*)²⁵

“Existen diversos métodos de tratamiento o depuración que permiten disminuir notablemente la DBO o DQO final del efluente” (*Navarro y Palladino, 2009*)²⁶, “para los efluentes que van a estar sometidos a tratamientos biológicos una parte considerable de la demanda de oxígeno puede deberse a la nitrificación” (*Ramalho, 2003*)¹⁵

2.4 Tipos de tratamientos de aguas residuales

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento depende de un cierto número de factores, entre los que se incluyen: a) Características del agua residual, b) Calidad del efluente de salida requerido, c) Costo y disponibilidad de terrenos, d) Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro. Se enlistan los diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales como los describió Ramalho, 2003¹⁵

Tratamiento primario

- Cribado o desbrozo
- Sedimentación
- Flotación
- Separación de aceites
- Homogeneización
- Neutralización

Tratamiento secundario

- Lodos activados
- Aireación prolongada (proceso de oxidación total)
- Estabilización por contacto
- Otras modificaciones del sistema convencional de lodos activados: aireación por fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro
- Lagunaje con aireación
- Estabilización por lagunaje
- Filtros biológicos (percoladores)
- Discos biológicos
- Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros (sumergidos)

Tratamiento terciario

- Microtamizado
- Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)
- Precipitación y coagulación
- Adsorción (carbón activado)
- Intercambio iónico
- Ósmosis inversa
- Electrodiálisis
- Cloración y ozonización
- Procesos de reducción de nutrientes
- Otros

2.4.1 Tratamiento primario

Los pretratamientos de aguas residuales implican 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 una neutralización u homogeneización. Los tipos fundamentales de tratamiento primarios son: el cribado o desbrozo, la sedimentación, la flotación, la neutralización y homogeneización.

2.4.2 Tratamiento secundario

La expresión tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. En la tabla 3 se ilustran los principales tipos de tratamiento biológico.

Tabla 3. Principales tipos de tratamiento biológico. Modificación propia de la fuente: Grupotar²⁷, Escuela Internacional de Ingeniería del agua de Andalucía

Procesos aerobios	Cultivo en suspensión	Lodos activados	Convencional	Flujo pistón
				Mezcla completa
				Alimentación escalonada
			Contacto de estabilización	
			Aireación prolongada	
			Canales de oxidación	
			Doble etapa	
			Oxígeno puro	
	Nitrificación			
	Lagunas aerobias	Aireadas		
		Sin airear		
	Estabilización aerobia de lodos			
	Cultivos fijos	Lechos bacterianos	Alta carga	
			Baja carga	
		Sistemas biológicos rotativos (SBR biodiscos)		
		Reactores de lecho compacto		
	Cultivos mixtos (soportes en suspensión)	Reactores de lecho móvil		
Procesos anóxicos	Desnitrificación con cultivo en suspensión			
	Desnitrificación con cultivo fijo			
	Desnitrificación con cultivo mixto			
Procesos anaerobios	Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia		
	Cultivo fijo	Laguna aerobia		
		Filtros anaerobios		
Procesos aerobios-anaerobios	Nitrificación – Desnitrificación			
	Lagunas facultativas			
	Lagunas de maduración			
	Lagunas anaerobias facultativas			

2.4.2.1 Sistemas de tratamiento biológico

“Dentro de los sistemas de tratamiento biológicos, éstos se pueden clasificar según el estado de los microorganismos los cuales pueden ser; cultivos en suspensión, cultivos fijos y procesos combinados y según el metabolismo microbiano en sistemas aeróbicos, sistemas anóxicos (microorganismos anaerobios), sistemas facultativos” (*Metcalf y Eddy, 1997*)⁹. Es importante aclarar que todos los procesos biológicos que se emplean en el tratamiento del agua residual, tienen su origen en fenómenos y procesos que se producen en la naturaleza.

“Los objetivos del tratamiento biológico son tres: a) Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas, b) Reducir su contenido en nutrientes, y c) Eliminar los patógenos y parásitos. Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas” (*Marsilli, 2005*)²⁵. “Entre los procedimientos de tratamiento de agua residual tradicionales están los sistemas de lodos activados (biomasa en suspensión)” (*Navarro y Palladino, 2009*)²⁶

2.4.2.2 Tratamiento de lodos activados (proceso aerobio)

“La ingeniería y la tecnología del sistema de lodos activados están razonablemente establecidos, como sistemas ampliamente implementados para la remoción biológica de carbono, nitrógeno y/o fósforo” (*Castillo et al., 2011*)²⁸. El proceso de lodos activados ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace aproximadamente un siglo. El diseño de las plantas de lodos activados se llevó a cabo fundamentalmente de una forma empírica. Sólo al comienzo de los años sesenta se desarrolla una solución más racional para el diseño del sistema de lodos activados. Este proceso nació de la observación realizada hace mucho tiempo de que si cualquier agua residual, urbana o industrial, se somete a aireación durante un periodo de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento.

El examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian 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 éstos las bacterias son probablemente las más importantes, encontrándose en todos los tipos de procesos de tratamiento biológico” (Ramalho, 2003)¹⁵

“Muchos problemas se pueden desarrollar en la operación de lodos activados que afectan negativamente a la calidad del efluente con origen en los componentes de ingeniería, hidráulica y microbiológicos del proceso. El verdadero (corazón) del sistema de lodos activados es el desarrollo y mantenimiento de un entorno mixto de un cultivo de microorganismos (lodos activados) que tratan las aguas residuales y que pueden ser manejados” (Richard et al., 2003)²⁹ con diferentes concentraciones para una buen tratamiento biológico.

“Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa” (Méndez et al., 2004)³⁰. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema.

Con este tipo de plantas de tratamiento se obtiene una importante reducción de la DBO, nitrógeno, fósforo y todos los componentes orgánicos; esto porque tales elementos son degradados por los microorganismos para alimentarse y crear nuevas colonias de bacterias.

2.4.2.3 Elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados

“El método de tratamiento mediante lodos activados se desarrolló por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y es el método más comúnmente usado para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales en los países desarrollados” (Montoya, 2012)³¹. Para entender mas este proceso, se hace una descripción de los elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados.

a) Pretratamiento: Es la primera sección del tratamiento, en el cual se lleva acabo el desbaste de sólidos gruesos, mediante un cribado grueso, posteriormente un desarenador el cual su función es proporcionarle al flujo de agua la velocidad adecuada para que sedimenten las partículas de mayor densidad por ejemplo, la arena y la graba, también se requiere de un cribado fino para las partículas más diminutas las cuales fueron pasadas por el cribado grueso y así evitar entren al proceso.

b) Reactor biológico: “Estructura donde las aguas residuales y los microorganismos (incluyendo retorno de los lodos activados) son mezclados. Se produce reacción biológica” (Arana, 2009)³², es aquí donde los microorganismos interactúan con la materia orgánica influente (DBO), y con los lodos recirculados los cuales les proporciona los nutrientes y las condiciones necesarias para su mayor reproducción celular y así se lleve un mejor tratamiento biológico.

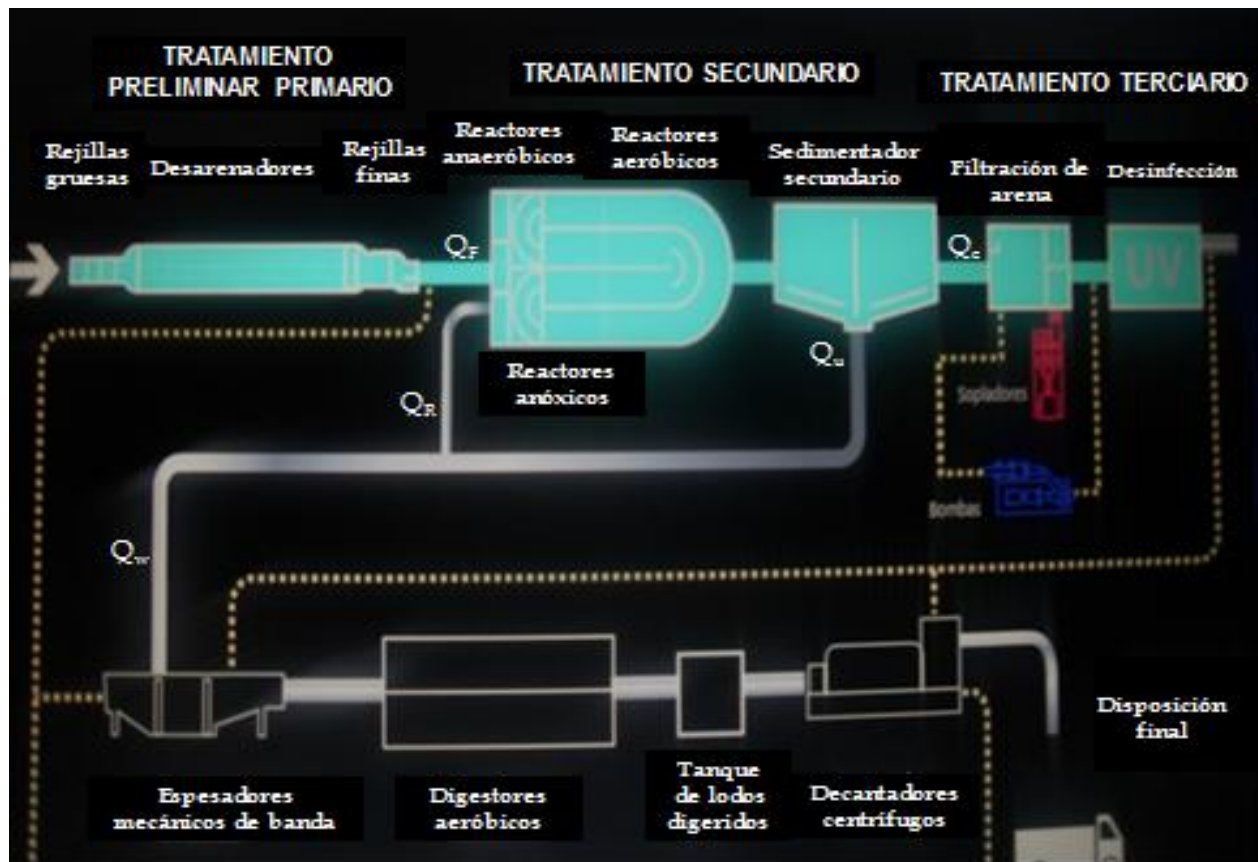
c) Tanque sedimentador: El vertido del licor mezclado proveniente del reactor biológico pasa a este tanque, mediante una tubería que viene en dirección descendente para así mediante la fuerza de gravedad estos vayan descendiendo obteniéndose dos fases, en la parte inferior se forma una cámara de sólidos suspendidos, los cuales con ayuda de brazos mecánicos son removidos a la circunferencia del sedimentador para evitar el compactamiento de los mismos, posteriormente la segunda fase es el agua clarificada.

d) Equipo de aireación: La selección de equipo de aireación es una tarea crítica en el proceso de diseño de una planta de lodos activados o de un lagunaje aireado. En términos de costo es la partida mecánica de mayor incidencia. Los aireadores normalmente utilizados pueden clasificarse en: 1) unidades de difusión de aire, 2) aireadores de turbina, y 3) aireadores superficiales. En el caso de los difusores de membrana fina están formados por sopladores electromecánicos los cuales proporcionan aire, el cual es inyectado por difusores de membrana que forman una burbuja fina de forma ascendente para así poder proporcionar oxígeno a las bacterias y puedan reproducirse. También realizan la función de mezcladores.

e) Sistema de recirculación: El principal propósito de la recirculación de lodos es poder mantener una relación de microorganismos adecuado en el proceso biológico, el cual funciona de la siguiente manera: el vertido del reactor biológico pasa al sedimentador el cual una fracción de los sólidos sedimentados son regresados al reactor biológico para así mantener una concentración de lodo maduro y joven y se mantenga una constante de crecimiento adecuada.

f) Purga de lodos: Se representa como el exceso de lodo que se requiere ser eliminado el cual es obtenido en menor proporción de la misma tubería de recirculación para después ser digerido, tratado y finalmente ser dispuesto en un confinamiento adecuado.

En el esquema 2 se ilustran los diferentes elementos básicos del tratamiento de lodos activados.



Esquema 2. Diagrama ilustrativo de los tipos de tratamiento general de agua residual

Definición de símbolos utilizados en el esquema 2:

- Q_F : Alimentación inicial
- Q_R : Recirculación
- Q_O : Alimentación combinada
- Q_W : Purga
- Q_U : Descarga del clarificador

En el tratamiento biológico de lodos activados se llevan a cabo varias etapas, de manera general se ilustran los tres tipos de tratamiento más comunes, ver figura 2

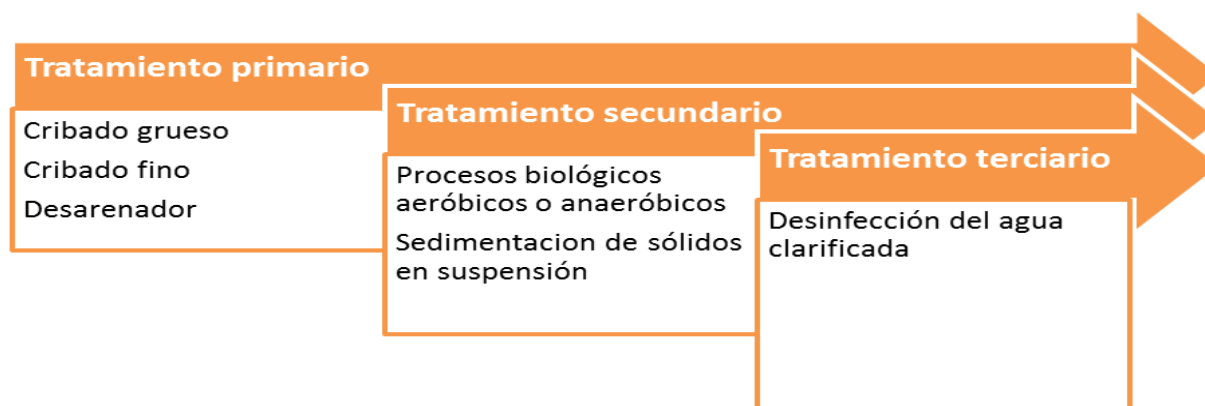


Figura 2. Etapas del tren de tratamiento biológico de lodos activados

2.4.2.4 Tratamiento de lodos activados de aireación extendida

“Existen cuatro características básicas que distinguen la aireación prolongada del proceso convencional de lodos activados:

1. *Mayor tiempo de retención en el reactor.*
2. *Cargas orgánicas menores.*

$\frac{1}{\theta_c}$, θ_c del proceso convencional de lodos activados.

3. *Mayores concentraciones de sólidos biológicos en el reactor.* Estos valores varían entre 3,500 y 5,000 mg/L en la aireación prolongada frente a 2,000 – 3,000 mg/L del proceso convencional de lodos activados.
4. *Mayor consumo de oxígeno en el proceso de aireación prolongada.* Para el tratamiento de aguas residuales urbanas, indica para el proceso de aireación prolongada un consumo de oxígeno aproximadamente doble del requerido para el proceso de lodos activados convencional” (Ramalho, 2003)¹⁵

El concepto de lodos activados en su modalidad de aireación prolongada o extendida es una variante simplificada del sistema convencional de lodos activados. “El tamaño del tanque de aireación propio de la modalidad de aireación extendida también le proporciona al sistema mejor capacidad de respuesta ante variaciones de caudal y carga orgánica. La aireación extendida provee suficiente tiempo de contacto en el interior del tanque para favorecer una excelente estabilización de los lodos reduciendo así su volumen y facilitando su manejo posterior” (*Ramalho, 2003*)¹⁵

“Especies que forman flóculos comparten la característica de la formación de un polisacárido extracelular (baba) de capa, también llamada un glicocalix. Este material, que consta de polisacáridos, proteínas y fibras de celulosa, a veces, (cementos) para las bacterias y éstas forman una floculación. La formación de flóculo se produce en menores tasas de crecimiento y en niveles más bajos de nutrientes, fundamentalmente hambrientas o en condiciones estacionarias de crecimiento. Especies de formación del flóculo pueden crecer en una forma dispersa y no sedimentables, si la tasa de crecimiento es demasiado rápido” (*Richard et al., 2003*)²⁹

Los flóculos formados en el tanque de oxidación biológica, pasan al tanque de sedimentación, debido a que adquieren mayor peso, por gravedad precipitan al fondo de este tanque y el agua se clarifica por flujo ascendente, recolectándose el agua clara en otro tanque, mientras que los flóculos que pasaron al fondo, una parte se recircula nuevamente a los tanques de oxidación biológica para mantener el equilibrio.

2.4.2.5 Microbiología del proceso

Para proyectar un sistema de lodos activados correctamente, es necesario comprender la importancia de los microorganismos dentro del sistema. En la naturaleza, el papel clave de las bacterias es descomponer la materia orgánica producida por otros microorganismos vivos. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son los causantes de la descomposición de la materia orgánica en el influente.

“En el reactor, o tanque de aireación, las bacterias aerobias o facultativas utilizan parte de la materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis de la materia orgánica en forma de células nuevas. En general, las bacterias que intervienen en el proceso de lodos activados incluyen los géneros *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Archromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, y las dos bacteria nitrificantes más comunes, los *Nitrosomas* y las *Nitrobacter*” (Metcalf y Eddy, 1997)⁹

“La nitrificación demanda oxígeno y los microorganismos nitrificantes se caracterizan por ser muy sensibles a las condiciones ambientales, crecer lento y ser relativamente intolerantes a bajas concentraciones de oxígeno” (Droppelmann y Oettinger, 2009)³³. “Adicionalmente se pueden presentar diversas formas filamentosas tales como *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Lecicothrix*, y *Geotrichum*” (Metcalf y Eddy, 1997)⁹. En tanto que las bacterias son los microorganismos que realmente degradan el residuo orgánico del influente, las actividades metabólicas de otros microorganismos son, igualmente, importantes en el sistema de lodos activados, por ejemplo: los protozoos y rotíferos ejercen una acción del refinado de los efluentes.

Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen cualquier partícula biológica pequeña que no haya sedimentado. Del mismo modo que es importante que las bacterias descompongan el residuo orgánico tan pronto como sea posible, también lo es el que formen un flóculo adecuado, puesto que este punto constituye un requisito previo para la separación de los sólidos biológicos en la instalación de sedimentación.

Se ha observado que cuando se aumenta el tiempo medio de retención celular mejoran las características de sedimentación del flóculo biológico. En el caso de las aguas residuales domésticas, los tiempos medios de retención celular necesarios para conseguir una buena sedimentación oscilan entre 3 y 4 días.

“Aunque se obtenga una excelente formación de flóculos, el efluente del sistema podría tener un alto contenido de sólidos biológicos, como consecuencia de un mal diseño de la unidad de sedimentación secundaria, mal funcionamiento de los dispositivos de aireación, o por la presencia de organismos filamentosos como el *Sphaerotilus*, los *E.coli* u hongos” (Metcalf y Eddy, 1997)⁹

En el tratamiento de lodos activados se tienen varias causas de las cuales se pueden originar microorganismos filamentosos. Richard, 2003³¹ presenta una clasificación de las causas más importantes que pueden generar la producción de microorganismos filamentosos.

CAUSAS

1. Baja concentración de O.D

2. Baja A/M

3. Septicidad

4. La grasa y aceite

5. Deficiencia de nutrientes

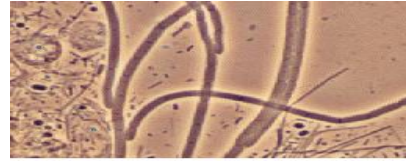
6. Un pH bajo

FILAMENTOS

Sphaerotilus natans

Concentración de tipo1701

Haliscomenobacterhydrophila



S. natans (1000X)

tipo 0041

tipo 0675

tipo 1851

tipo 0803

tipo 021N

Thiothrixlyll

Nostocoidamelimicola, II, III

tipo 0914

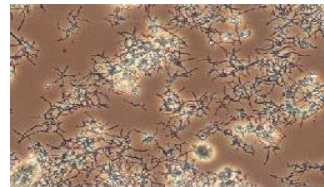
tipo 0411

tipo 0961

tipo 0581

tipo 0092

Nocardia spp.



Nocardia Foam (200X)

Microthrix parvicell

tipo1863

Nitrógeno: tipo 021N

Thiothrixlyll

Fósforo: *NostocoidalmicolaIII*

Haliscomenobacterhydrophila

Natans Sphaerotilus

Hongos

En la tabla 4 se presenta una descripción de Velázquez (2002)³⁴, acerca de la predominancia de protozoarios y otros organismos filamentosos en condiciones de TRC (tiempo de residencia celular) fijadas, ya que éstos son los que nos indican en que estado se encuentra el reactor biológico.

Tabla 4. Tipos de filamentos presentes en TRC bajo y TRC alto

TRC bajo (10 a 20 días)		
<u>Protozoarios</u>	<u>Filamentosos</u>	<u>Características</u>
Rotíferos 0% Ciliados fijos 13% Ciliados libres 87%	Tipo 0914 Tipo 0041 Thiothrix Tipo 021N Tipo 0092 Tipo 1701	- Baja carga orgánica - Deficiencia de nutrientes - Baja A/M - Zonas anaerobias con presencia de sulfuros - Deficiencia de oxígeno - Viscosidad
TRC alto (30 a 40 días)		
<u>Protozoarios</u>	<u>Filamentosos</u>	<u>Características</u>
Rotíferos 4% Ciliados fijos 20% Ciliados libres 76%	Tipo 0914 Tipo 0041 Thiothrix	- Baja carga orgánica - Deficiencia de nutrientes - Baja A/M - Zonas anaerobias con presencia de sulfuro

2.4.2.6 Curva de Crecimiento de microorganismos

“En un cultivo por lote, la concentración de biomasa incrementa con el paso del tiempo, como se observa en la figura 3, la cual es característica. La fase lag es un periodo de adaptación en el cual las células se aclimatan al nuevo medio y después de esta fase, el crecimiento exponencial persiste hasta que alguno de los nutrimentos esenciales disminuye en el medio o hasta que algún producto es acumulado e inhibe el crecimiento de los microorganismos. Las células entran en una fase en la cual ya no hay crecimiento, o fase estacionaria, que es seguida por una fase de declinación o muerte.

La velocidad de crecimiento en un reactor, por ejemplo, el cambio en la concentración de biomasa con respecto al tiempo, dx/dt , depende de la concentración de biomasa (x) viable presente a cualquier tiempo” (Sandoval, 2006)³⁵

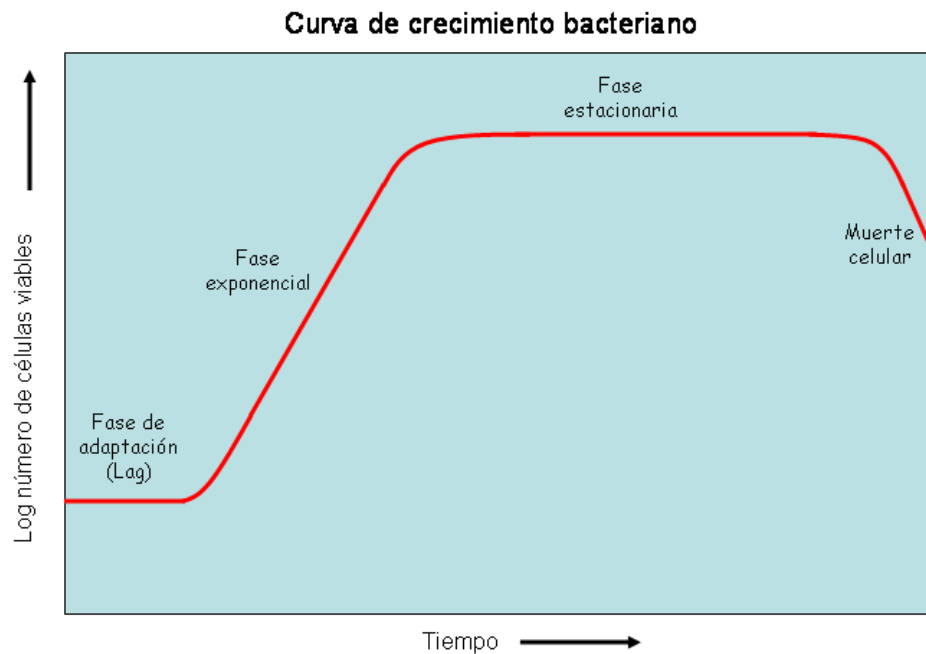


Figura 3. Ilustración de las cuatro fases presentes en la curva de crecimiento

1. **“Fase de adaptación:** Latencia. Consiste en la aclimatación y adaptación de los microorganismos.
2. **Crecimiento exponencial de los microorganismos:** Hay exceso de materia orgánica y de nutrientes. A medida que se genera biomasa, empieza a escasear el alimento disponible. Se detiene el crecimiento exponencial.
3. **Fase de crecimiento estacionario:** Se detiene el crecimiento exponencial, no hay incremento ni decremento del número de microorganismos. La relación A/M está equilibrada. La cantidad de alimento disponible está en equilibrio con la masa de microorganismos (“A” es suficiente frente al número de microorganismos presentes).

4. **Fase de muerte o respiración endógena**: La relación A/M es baja. Hay déficit de alimento. Predomina la muerte de microorganismos. Éstos aportan los nutrientes necesarios para que los microorganismos vivos los aprovechen” (*Guía Ambiental, 2010*)³⁶

Debido a los prolongados tiempos de tratamiento, (los lodos activados de aireación extendida, operan en la zona de respiración endógena de la curva de crecimiento), los flóculos biológicos se encuentran suficientemente estabilizados como para ser dispuestos directamente, luego de disminuir su contenido de agua. Esto es, debido a que en este tipo de sistemas, el poco alimento, los obliga a consumir parte de su material de reserva.

2.4.3 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario (al que se conoce también como tratamiento avanzado) es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional.

“Los tipos de tratamiento terciario son: a) Separación de sólidos en suspensión, b) adsorción en carbón activado (separación de compuestos orgánicos), c) intercambio iónico, d) ósmosis inversa, e) electrodiálisis, f) oxidación química (cloración y ozonización, g) métodos de eliminación de nutrientes (eliminación de nitrógeno y fósforo), para la purificación de aguas residuales” (*Ramalho, 2003*)¹⁵. Muchos de estos procesos, actualmente no se emplean demasiado en el tratamiento de aguas residuales, pero su empleo a mayor escala está previsto conforme las exigencias de calidad de los efluentes se hagan más estrictas en el futuro. Descripción de los procesos de tratamiento terciario más comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas residuales.

2.4.3.1 Eliminación de sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en las operaciones convencionales de tratamiento primario y secundario pueden constituir una parte importante de la DBO de los efluentes de las PTARS. Se dispone de los siguientes procesos para la eliminación de estos sólidos en suspensión:

1. *“Filtración:* Se utiliza normalmente la filtración para conseguir rendimientos de eliminación de sólidos en suspensión de hasta el 99%. Los materiales de relleno de los filtros más empleados son: arena, antracita y tierra de diatomeas.
2. *Coagulación:* se lleva a cabo utilizando sulfato de alúmina, polielectrólitos, cal y otros reactivos químicos” (Ramalho, 2003)¹⁵

2.4.3.2 Adsorción en carbón activado

“Adsorción es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales.

En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente de moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas. Debido a que las fuerzas residuales son elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

El sólido (por ejemplo, el carbón activado) se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente. Los carbonos activados, bien granulares, o bien en forma de polvos, se han implementado profusamente como adsorbentes en las plantas

de tratamiento de agua para eliminar los olores y sabores que producen los contaminantes” (Ramalho, 2003)¹⁵

2.4.3.3 Ósmosis inversa

“Aunque los fenómenos osmóticos se conocen desde hace más de 200 años, los primeros experimentos relacionando la presión osmótica con la temperatura y la concentración del soluto se llevaron a cabo al final del siglo pasado por Pfeffer. Las primeras membranas semipermeables utilizadas en la ósmosis fueron procedentes de tejidos animales (por ejemplo, vejiga de cerdo). Más tarde se desarrollaron membranas sintéticas, siendo actualmente las más empleadas las de acetato de celulosa” (Ramalho, 2003)¹⁵

2.4.3.4 Procesos de oxidación química (cloración y ozonificación)

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Algunos efluentes industriales que normalmente se cloran antes de su descarga a las aguas receptoras son los procedentes de las plantas de azúcar de caña, de azúcar de remolacha, de centrales lecheras, de las fábricas de pasta y papel, de las plantas textiles, de las de curtido, de las petroquímicas, de las farmacéuticas y de las de acabado superficial de los metales (cromado, electrodeposición, etc.). Los objetivos de la cloración se resumen en:

1. *“Desinfección.* Fundamentalmente el cloro es uno de los desinfectantes, debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
2. *Reducción de la DBO.* El cloro produce una reducción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
3. *Eliminación o reducción de colores y olores.* Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro. La

capacidad oxidante del cloro se emplea para el control del olor y la eliminación del color en muchos tratamientos industriales.

4. *Oxidación de los iones metálicos.* Los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (por ejemplo, ferroso a férrico y manganoso a mangánico)
5. *Oxidación de los cianuros a productos inocuos.* El cloro se emplea para oxidar los cianuros a productos inocuos. Esto se lleva a cabo en un medio alcalino con valores de pH superiores a 8.5" (Ramalho, 2003)¹⁵

En la desinfección se utiliza una cámara de contacto continuo en la que se suponen condiciones de equilibrio y de mezcla completa. Normalmente, se colocan pantallas interceptando el camino del flujo. En la tabla 5 se muestran las dosis típicas de cloro implementadas en la dosificación de diferentes tipos de efluentes.

Tabla 5. Dosis típicas de cloro en desinfección (Ramalho, 2003)¹⁵

Efluente de	Intervalo de dosificación (mg/L)
Aguas residuales sin tratar (precloración)	6-25
Sedimentación primaria	5-20
Planta de precipitación química	2-6
Filtro precolador	3-15
Lodo activo	2-8
Filtro múltiple seguido de planta de lodos activados	1-5

El balance de bacterias (coliformes) conduce a la ecuación 8:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Acumulacion de} \\ \text{coliformes} \\ \text{en el reactor} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Aumento} \\ \text{debido al flujo} \\ \text{afluente} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Disminucion} \\ \text{debido al flujo} \\ \text{efluente} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Eliminacion} \\ \text{de} \\ \text{coliformes} \end{array} \right] \quad (\text{Ecuación 8})$$

En la figura 4 se muestra la ilustración de un reactor continuo para desinfección por cloro y en la ecuación 9 el porcentaje de desinfección.

Donde; N_0 y N_e = Recuentos de bacterias (coliformes por 100 ml) en el afluente y N_e en el efluente. Q_0 y V = Caudal y volumen del reactor respectivamente.

$$\frac{N_0 - N_e}{N_0} \times 100 = \% \text{ DESINFECCIÓN} \quad (\text{Ecuación 9})$$

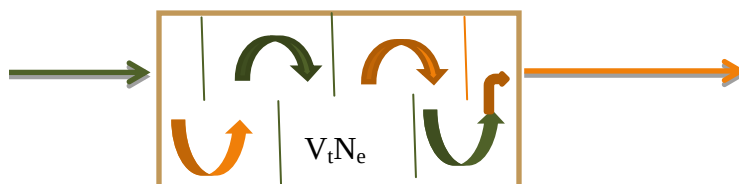


Figura 4. Reactor continuo para la desinfección por cloro (Ramalho, 2003)¹⁵

La oxidación química con ozono es un método muy efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en estos factores:

1. El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
2. La tendencia a la formación de espuma en las aguas residuales se produce después del tratamiento de ozono.
3. La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
4. El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido a sus fines. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática.

2.4.3.5 Eliminación de fósforo

La eliminación de nutrientes (compuestos de fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales es una operación importante, debido a que estos productos juegan un papel crítico en la eutrofización. Se ha acentuado el interés en la eliminación del fósforo últimamente por dos razones; (1) el fósforo es el nutriente más crítico, y (2) los procesos de eliminación de nitrógeno son menos eficaces y más caros.

“El proceso de lodos activados, aunque pensados primariamente para la separación de compuestos orgánicos, puede utilizarse en la eliminación tanto del fósforo como del nitrógeno, ya que las células biológicas contienen aproximadamente el 2% de fósforo y el 12% de nitrógeno en peso. En una planta municipal típica de lodos activados, el crecimiento microbiano es responsable de una reducción de 10 a 30% del fósforo en el afluente, dependiendo de la edad de lodos utilizada en la operación. Aproximadamente 1.0 mg/L de fósforo es eliminado por cada 100 mg/L de la DBO₅ soluble separada. Sin embargo, en algunas plantas de tratamiento biológico, se logran eliminaciones de fósforo superiores a las requeridas para la síntesis de biomasa. Los términos «asimilación en exceso» y «separación incrementada de fósforo» son utilizados para describir este fenómeno.

Los agentes de precipitación más empleados en la eliminación del fósforo son Fe³⁺ como (FeCl₃), Ca²⁺ (como cal), Al³⁺ (como alumbre, Al₂(SO₄)₃ · 16H₂O) y combinaciones de Fe³⁺ y cal” (Ramalho, 2003)¹⁵

2.5 Parámetros de operación

Relación Alimento/Microorganismos A/M: Para una operación conveniente del sistema de lodos activados, es necesario que los microorganismos tengan la cantidad adecuada de alimento, poco o demasiado alimento causa problemas de sedimentación en el clarificador.

Para determinar la relación A/M expresada como gramos de DBO por gramos de SSVLM, según Torrescano, 2009¹⁰ ver la ecuación 10:

$$A/M = ((DBO \text{ (mg/L)} \times (Q, \text{ m}^3/\text{día})) / 1000 * TS, \text{ Kg} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): Es el tiempo que las bacterias están en contacto con el agua residual, es un factor importante de diseño y operación. Se debe

tener suficiente tiempo para que las bacterias asimilen la materia orgánica que contiene el agua residual. Si el tiempo de retención es muy corto no se removerá toda la materia orgánica y la DBO del efluente será alta, ver ecuación 11:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde V es el volumen del sistema de cultivo (L) y Q el caudal de agua que ingresa (L/h).

Tiempo Medio de Retención Celular (TMRC) o edad de lodos: Se refiere al tiempo en promedio que los microorganismos permanecen en el proceso de tratamiento, otro término, algunas veces usado y que significa lo mismo, es: edad de lodo (c). Para trabajar con este método, se deberá determinar el TMRC con el cual trabaja mejor la planta y tratar de mantener este valor, ver ecuación 12:

La ecuación para calcular el TMRC según Torrescano, 2009¹⁰ es:

$$TMRC = \frac{(\text{kg SSVLM en el tanque de aeración})}{(\text{kg SSV en el lodo desechado/día}) + (\text{kg SSV en el efluente / día})} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Índice Volumétrico del Lodo (IVL): La información obtenida de la prueba de sedimentación se usa para calcular el IVL, ver ecuación 13:

IVL = Volumen del lodo sedimentado en una probeta de 1 L, después de 30 min (ml/L) dividido por la concentración de SSTLM y este resultado multiplicado por 1000

$$IVL = (S. \text{ Sedimentables}) / (SSTLM) * (1000) \quad (\text{Ecuación 13})$$

2.6 Reutilización del agua residual

En Estados Unidos el costo de agua es un servicio relativamente barato y como resultado las economías del tratamiento de aguas residuales son bastante críticas. En principio y utilizando procesos de tratamiento bastante sofisticados se puede llegar a obtener agua potable de las aguas residuales. La consideración de aspectos económicos, sin embargo, evita el que se pueda llegar a la aplicación y la consecuente utilización de muchos métodos de tratamiento disponibles.

“Al evaluar un proceso de tratamiento de aguas residuales específico es importante estimar la relación costo / beneficio entre el beneficio derivado del tratamiento para obtener agua de una calidad específica y el coste en conseguir este grado de calidad” (*Ramalho, 2003*)¹⁵, en Singapur este sistema se utiliza desde 2003, el agua reciclada la han bautizado como NEWater.

En Windhoek, la capital de Namibia, el reciclado funciona con éxito desde hace años. En Estados Unidos, varias poblaciones han puesto en marcha este sistema o tienen previsto hacerlo. “El condado de Orange (California) puso en marcha en 2008 el sistema de reciclado de aguas residuales para consumo humano más puntero y grande del mundo: es capaz de producir unos 265 millones de litros al día para abastecer a su medio millón de habitantes. El agua mejora los límites mínimos sanitarios estatales y federales, según sus responsables” (*Fernández, 2010*)³⁷, “aunque existe entre el público un sentimiento generalizado de rechazo a la reutilización directa de agua recuperada para consumo humano, que hace muy difícil la adopción de dicho uso en las condiciones actuales” (*Romero, 2009*)²¹

“Los beneficios de la reutilización de las aguas grises incluyen un menor uso de las aguas frescas, un menor caudal a las fosas sépticas o plantas de tratamiento, una purificación altamente efectiva, una solución para aquellos lugares en donde no puede utilizarse otro tipo de tratamiento, un menor uso de energía, la posibilidad de sembrar plantas donde no hay otro tipo de agua, o la recuperación de nutrientes que se pierden” (*Fernández, 2006*)³⁸

Ahora bien, los sistemas de reutilización de aguas no pueden utilizarse en cualquier lugar, puesto que es necesario un espacio suficiente que permita desarrollar el proceso del tratamiento del agua y que reúna las condiciones climáticas adecuadas.

Hay que tener en cuenta que aunque las aguas grises normalmente no son tan peligrosas para la salud o el medio ambiente como las aguas negras, provenientes de los retretes, poseen cantidades significativas de nutrientes, materia orgánica y bacterias, por lo que si no se realiza un tratamiento eficaz previo a su descarga o reutilización, causan efectos nocivos a la salud, contaminación del medio y mal olor.

CAPÍTULO 3

Método

3.1 Diagnóstico de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

El diagnóstico inicial consistió en visitas a la PTAR-UABC Guadalupe Victoria para hacer un reconocimiento de las instalaciones, procesos y equipos que la conforman. También se estuvieron haciendo mediciones de campo y se tomaron muestras de diferentes puntos del proceso como lo son: influente, reactor y efluente. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio Químico – Ambiental del Instituto de Ingeniería.

3.2 Caracterización de la calidad del agua residual de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Se realizó un monitoreo de la planta, en el que se realizaron muestreos simples, mediciones en campo, análisis de laboratorio y frotis del agua proveniente de los diferentes puntos del proceso de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria como los son el influente, reactores y efluente.

3.3 Diseño y construcción de una PTAR a nivel piloto

Para continuar con la evaluación de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria se construyó un sistema de lodos activados a nivel piloto para determinar los parámetros óptimos para la depuración de agua residual, utilizando el agua proveniente de la planta UABC Guadalupe Victoria como influente. Se continuó con la caracterización del agua, realizando muestreos simples de los diferentes puntos del proceso como el influente, reactor y efluente para ser analizados en el laboratorio de Químico - Ambiental, también se realizaron mediciones de campo.

3.4 Toma de muestras

Se efectuó la recolección de muestras de agua siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Mexicana: (NMX-AA-003-1980)³⁹. Se realizó primeramente una evaluación preliminar, mediante monitoreo de campo y muestreos simples, de los diferentes puntos del proceso como el influente, reactor y

efluente. Se hicieron análisis de: DBO₅, sólidos (suspendidos, disueltos, totales, sedimentables, suspendidos volátiles y suspendidos totales), bacteriológicos, cloro residual y frotis. Para los parámetros: coliformes fecales, materia flotante, DBO₅, SST, fueron al menos cuatro muestras simples tomadas en días representativos al mes, como lo marca la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de Químico - Ambiental.

3.4.1 Elaboración de formatos y bitácoras

Para poder realizar el monitoreo de campo se procedió a elaborar bitácoras correspondientes de los diferentes procesos de la planta y dar capacitación para su llenado adecuado.

3.4.2 Identificación de las muestras

Se tomaron las precauciones necesarias para que en cualquier momento fuera posible identificar las muestras. Se emplearon etiquetas pegadas y se numeraron los frascos, anotando la información en una hoja de registro. Las etiquetas tenían como mínimo esta información:

1. Identificación de la descarga
2. Número de muestra
3. Fecha y hora de muestreo
4. Punto de muestreo
5. Temperatura de la muestra

3.4.3 Preservación de muestras

La toma de muestras para el análisis de *E. coli*, Coliformes fecales y totales, fueron recolectadas en bolsas esterilizadas con un volumen de 250 ml del efluente, a las cuales se les adicionó tiosulfato de sodio para la inhibición del cloro y después fueron trasladadas en una hielera, para la preservación de la muestra a una temperatura de 4 °C, realizándoles los análisis correspondientes. Estos análisis se

efectuaron en un periodo no mayor a 6 horas después del muestreo en el laboratorio de Químico - Ambiental.

Para los diferentes análisis como lo son la DBO₅, sólidos (SSV, SST, SDT y SS), sólidos sedimentables, compuestos nitrogenados, fósforo total, fosfatos, y el cloro residual, realizando éste último de inmediato, se recolectaron en frascos de plásticos polipropileno de alta densidad con volumen de 1 litro y se preservaron en una hielera a 4 °C, para ser trasladados al Laboratorio Químico - Ambiental donde se realizaron los análisis correspondientes.

3.5 Análisis de laboratorio

Consistieron en análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y frotis microbiológicos observados en el microscopio, realizados en el laboratorio de Químico - Ambiental.

3.5.1 Análisis Fisicoquímicos

Se determinaron los parámetros que aparecen en la tabla 6, en la cual se especifica el método y la técnica metodológica utilizada.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos del agua residual analizados en laboratorio

Parámetro de laboratorio Fisicoquímicos:	Técnica metodológica en el laboratorio	Método
DBO	DBO ₅	(NMX- AA-028-SCFI-2001) ⁴¹
SS	Gravimétrica	(NMX- AA-034-SCFI-2001) ⁴²
SDT		
SSV		
SST		
Cl Residual	Colorimétrico	(NMX- AA-100- 1987) ⁴³
Nitrógeno Total Kjeldahl	Kjeldahl	(NMX-AA-026-SCFI-2010) ⁴⁴
Nitritos	Espectrofotométrico	(NMX-AA-099-SCFI-2006) ⁴⁵
Nitrógeno Amoniacal	Kjeldahl	(NMX-AA-026-SCFI-2001) ⁴⁴
Nitratos	Espectrofotométrico	(NMX-AA-079-SCFI-2001) ⁴⁶
Fósforo Total	Colorimétrico	(NMX-AA-029-SCFI-2006) ⁴⁷

3.5.2. Análisis bacteriológicos

Se determinó la concentración de coliformes totales y fecales por el método: Número Más Probable (NMP), establecida en la Norma Mexicana (NMX-AA-42-1987)⁴⁸. Es una técnica que consiste en utilizar tubos de fermentación múltiple en diluciones. También se realizó la determinación de la concentración de *E. coli* y coliformes totales por el método “Colilert-18®^{12, 15, 16}” (IDEXX, 2005)⁴⁹, aprobado por la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), para el análisis biológico de aguas residuales y para lodos de aguas residuales. Como se observa en la tabla 7

Tabla 7. Parámetros bacteriológicos del agua residual analizados en laboratorio

Parámetro de laboratorio Bacteriológicos:	Técnica metodológica en el laboratorio	Método
Coliformes Totales	NMP	(Colilert -18® ^{12, 15, 16}) ⁴⁹
Coliformes Totales	NMP	(NMX-AA-42-1987) ⁴⁸
Coliformes Fecales	NMP	(NMX-AA-42-1987) ⁴⁸
<i>E. coli</i>	NMP	(Colilert -18® ^{12, 15, 16}) ⁴⁹

3.5.3 Análisis microscópico

Se realizaron frotis de aguas provenientes de los diferentes puntos del proceso para realizar una mejor caracterización del agua residual de la planta. Estos frotis fueron observados al microscopio (Micron, 2005 Westover scientific), con el cual se obtuvieron fotografías y se realizó una caracterización de microorganismos presentes en el sistema.

3.6 Mediciones en campo

En la tabla 8 se muestran los parámetros medidos en campo los cuales fueron: Temperatura (T), pH, oxígeno disuelto (OD), los cuales se midieron con un equipo multiparámetro marca YSI Environmental Modelo-556, también se realizaron sólidos sedimentables de muestras tomadas del reactor biológico.

Tabla 8. Parámetros de campo y su metodología analizados in situ

Parámetros de campo	Técnica metodológica en el laboratorio	Método	Medición en campo con sonda YSI Environmental (MOD-556)
pH	Electrométrico	(NMX-AA-008-SCFI-2011) ⁵⁰	X
T °C	Electrométrico	(NMX-AA-007-SCFI-2000) ⁵¹	X
S. Sedimentables (ml/L)	Imhoff	(NMX- AA-004-SCFI-2000) ⁵²	
OD (mg/L)	Electrométrico	(NMX-AA-012-SCFI-2001) ⁵³	X

3.7 Análisis de datos

- Se realizó un análisis estadístico de los resultados del estudio, utilizando programa estadístico Excel.
- Se compararon los resultados con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana: (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰, que se ilustran en la tabla 9

Tabla 9. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en aguas para reuso. Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰

	PROMEDIO MENSUAL				
TIPOS DE REUSO	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y aceites mg/L	DBO ₅ 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

Resultados y discusión

4.1 Diagnóstico de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Esta planta consiste en un sistema biológico de lodos activados de aireación extendida, la cual trata el agua residual doméstica proveniente exclusivamente de la UABC campus Guadalupe Victoria. En el anexo 1 se describe detalladamente el sistema de tratamiento instalado en la PTAR-UABC Guadalupe Victoria.

Sistema de la PTAR

Se presenta en la figura 5, un diagrama de las unidades que conforman el sistema de la planta de tratamiento. Se compone de un tanque digestor anaerobio primario, dos tanques de aeración extendida (reactores biológicos), un tanque clarificador, un tanque de contacto (cloración), un digestor aeróbico de lodos y un tanque cisterna (efluente).

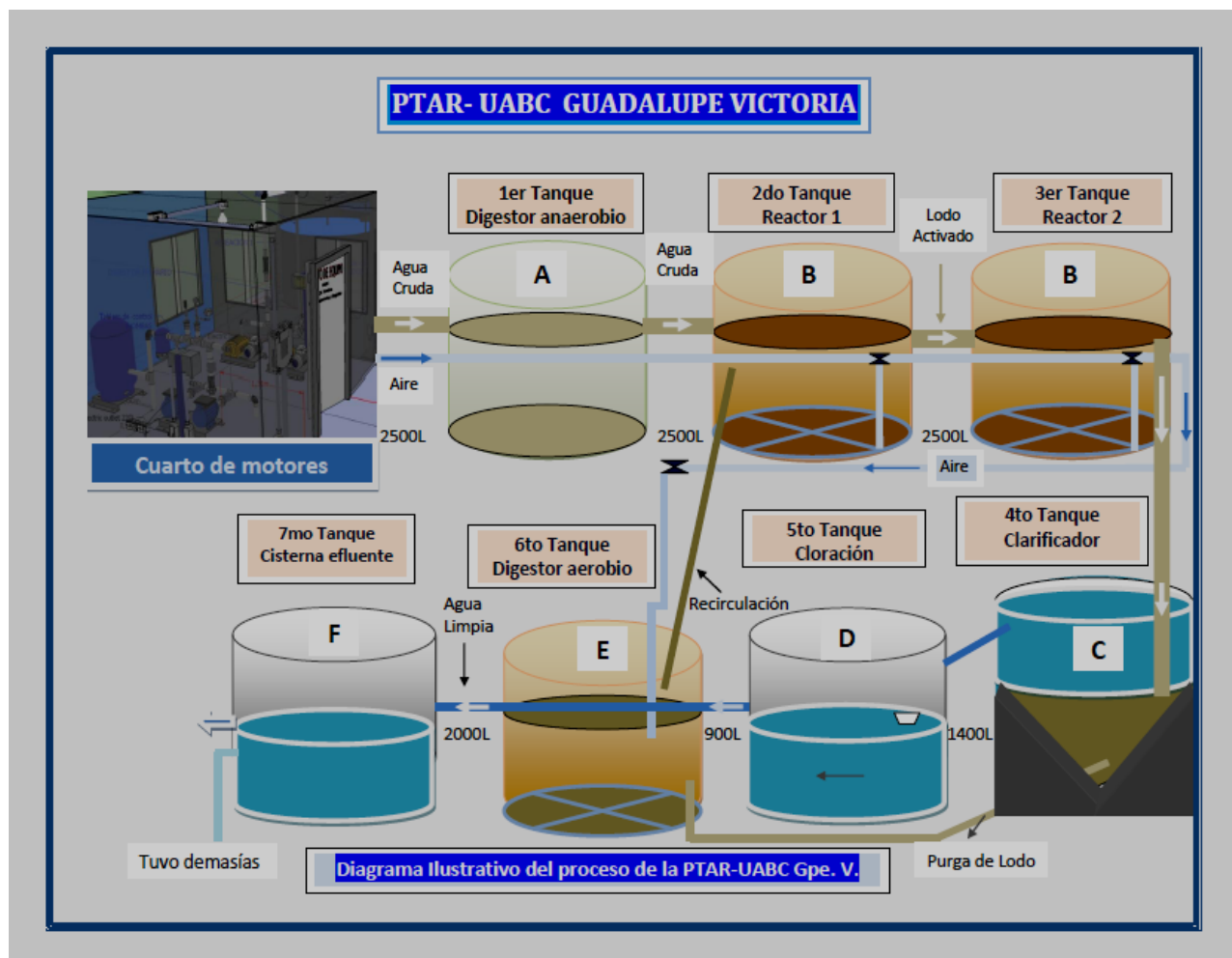


Figura 5. Diagrama de proceso de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

El proceso de tratamiento de agua residual, en base al manual de operación que entregó la constructora de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria 2010⁵⁴, se describió por áreas del sistema. Para comparar la descripción de la planta ver la ilustración de la figura 5

- A. **Digestor anaeróbico.** El influente crudo entra al tanque digestor primario anaeróbico en donde es retenido para permitir la separación primaria y la digestión de los sólidos flotantes. Así se reduce más del 35% de la carga orgánica (DBO) y los sólidos en suspensión antes de entrar a la zona de aireación (ver foto 1).



Foto 1. Digestor primario

- B. **Reactores biológicos.** Después de haber pasado el tiempo de retención en el tanque digestor primario, el agua negra ingresa a la zona de aireación extendida. Aquí es donde se lleva a cabo el tratamiento biológico donde los microorganismos degradan la materia orgánica (ver foto 2)



Foto 2. Reactor 1

C. **Clarificador.** Cuando el ciclo de aireación ha sido completado, los lodos activados son descargados por gravedad hasta el fondo cónico del tanque clarificador, donde se asientan completamente. No hay agitación, ni circulación que interfiera con la acción clarificadora. Los lodos son regresados por medio de un reductor de aire al primer tanque de aireación, para continuar su degradación. Un reductor neumático se encarga de retornar al tanque digestor primario las natas que se acumulan en la superficie del tanque clarificador. En éste la mampara colocada antes del rebosadero del tanque evita que cualquier flotante salga del mismo hacia el tanque de desinfección (ver foto 3)



Foto 3. Tanque Clarificador

D. Cloración. La etapa final del tratamiento es el proceso de desinfección, el cual cumple con las regulaciones locales para producir agua tratada para riego, reuso sanitario o reuso total. El efluente clarificado entra al tanque de desinfección, el cual está dimensionado para proveer el tiempo adecuado de contacto con el desinfectante. La desinfección se hace con cloro y posteriormente el efluente desinfectado pasa por los equipos de filtración (ver foto 4).



Foto 4. Tanque de contacto (cloración)

E. Digestor aerobio. Después de la sedimentación, mediante una válvula de purga de lodos pasa hacia un digestor aeróbico y ésta posteriormente pasa al reactor primario para seguir degradando la materia orgánica.

F. Cisterna efluente. Aquí es donde se almacena el agua desinfectada y se observaron irregularidades debido a que se le colocó un tubo como demasías con el fin de sacar el excedente de agua la cual era demasiada y generaba una laguna el cual podría generar un foco de infección. En la foto 5 se muestra una imagen de la cisterna efluente, (Manual de operación de la constructora de la PTAR Gpe. Victoria, 2010)⁵⁴



Foto 5. Cisterna efluente

4.1.1 Problemática que presenta la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Uno de los problemas que presentó la planta es la carga orgánica debido a que no tenía un flujo de entrada constante, por lo que perjudica el proceso de lodos activados. Cuando la cisterna se vacía, la bomba sumergible de bombeo no cuenta con electro niveles de agua y ésta pudiera llegar a calentarse y quedar fuera de operación.

El cárcamo de almacenamiento primario no se encontró en las condiciones óptimas, no tenían guías para darle mantenimiento a las bombas, el cual exponía a los trabajadores. La operación de la planta no cumplía con los parámetros óptimos de la normatividad y tenía muchas deficiencias de diseño, por lo que presentó fugas y desbordamientos como se observa en la foto 6, que muestra una laguna formada por los desbordamientos del tanque efluente del sistema, la cual pudo ser factor de patogenicidad por no tener la Seguridad e Higiene adecuada.



Foto 6. Laguna de agua residual provocada por los desbordamientos del tanque efluente

Debido a todos los problemas encontrados en el diagnóstico se estableció comunicación con la compañía que diseñó la planta, para hacer de su conocimiento acerca de los problemas de diseño, construcción y de operación encontrados en la planta. Se observaron fugas de agua en las tuberías de la PTAR, ocasionándole como consecuencia salpicaduras al personal las cuales pudieron haber sido causa de patogenicidad. La planta no contaba con el personal calificado para operarla, debido a que no se les había dado la capacitación adecuada.

Se le solicitó la información de diseño faltante a la constructora, ya que no se había realizado la entrega oficial a las autoridades de la UABC de la Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria, el cual consistió en lo siguiente: Se solicitó toda la

información de los parámetros de diseño indispensables para los cálculos del proceso. Se realizó una descripción de la PTAR por áreas del sistema (ver anexo 1) y se enlistaron las dudas que se tuvieron cuando se realizó el diagnóstico (ver anexo 2)

Las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria mostraron interés en la realización de este estudio ya que no se les había realizado la entrega de un manual de operación por parte de la constructora, estableciendo los parámetros óptimos para el buen funcionamiento de la misma tanto del proceso como de mantenimiento, siendo éste uno de los factores importantes para el momento del arranque y de su estabilización.

4.1.2 Caracterización físico-química del agua residual

Las características de las aguas residuales son determinadas a partir de una secuencia de procedimientos que incluyen mediciones puntuales, colección de muestras y análisis e interpretación de resultados obtenidos. El conjunto de estas actividades podemos describirlas como una caracterización cuantitativa y cualitativa cuyos datos son relacionados para calcular los parámetros de operación de la planta.

En tabla 10 se presentan los resultados de las concentraciones promedio obtenidas de los análisis de laboratorio y mediciones hechas en campo para la caracterización del agua residual doméstica de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria. Se observa que las condiciones en las que operaba Guadalupe Victoria no eran las adecuadas, debido a que los parámetros operacionales se encontraban por debajo de los intervalos recomendados en la literatura. En consecuencia, el sistema de lodos activados no realizaba su función como tal, observándose que operaba a expensas del uso de grandes volúmenes de cloro durante el proceso de desinfección.

Tabla 10. Resultados de los análisis de campo y laboratorio para la caracterización del agua residual

Parámetros	Influyente	Reactor	Efluente
DBO ₅ (mg/L)	238	-	19
S. Sedimentables (ml/L)	-	3	-
T (°C)	29	33	31
OD (mg/L)	-	4	-
pH	7.9	6.9	6.98
Cl residual (ml/L Cl ₂)	-	-	8.6
Coliformes totales (NMP)	-	-	1337.17
<i>E. coli</i> (NMP)	-	-	1028.57
SST (mg/L)	3	5	-
SSV (mg/L)	2	15	-

El pasado 29 de septiembre de 2010, se efectuó un muestreo simple y se analizaron los ST, SST, SSV y SDT, analizados mediante la Norma Mexicana: (NMX-AA-034-SCFI-2001)⁴², se observa que los SST tienen una baja concentración en los reactores, encontrándose concentraciones de sólidos sedimentables de 3 ml/L. Al respecto Metcalf y Eddy, (1997)⁹ argumentan que es importante que las bacterias formen un flóculo adecuado, puesto que éste punto constituye un requisito previo para la separación de los sólidos biológicos en la instalación de sedimentación, se obtuvieron concentraciones en promedio de 238 mg/L de DBO₅ en el influente, por lo que entra dentro de los parámetros de los que establece la literatura, los resultados se muestran en la figura 6

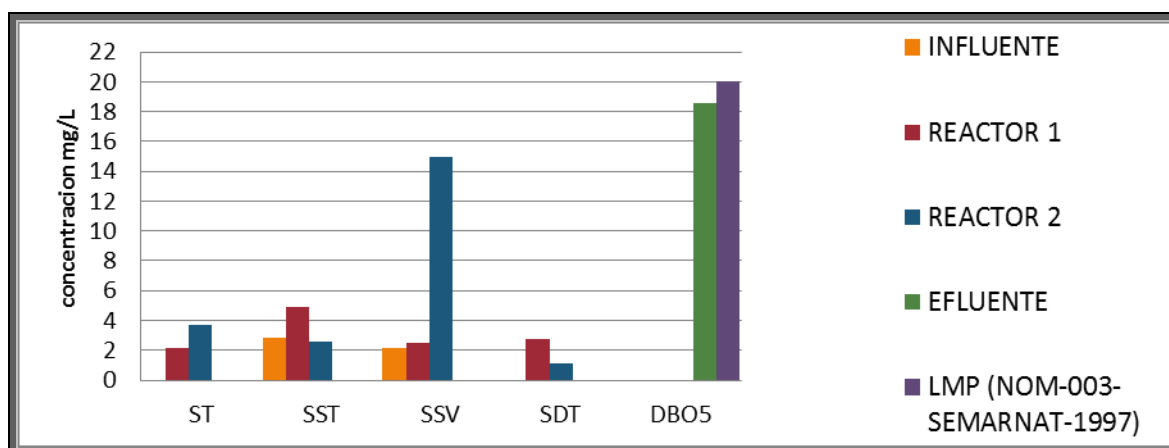


Figura 6. Resultados del análisis de sólidos y DBO₅ comparando los SDT y DBO₅ con los LMP de la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰

Nota: los resultados fueron obtenidos de la recolección de muestras simples del día 29 de Septiembre del 2010

4.1.3 Caracterización bacteriológica

Se realizó una evaluación del estado inicial de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria, cuyos resultados obtenidos se muestran en la tabla 11. Estos resultados corresponden a la primera campaña de muestreo de diferentes puntos del proceso de la PTAR, para lo cual se realizó un muestreo simple por 4 días seguidos. Se muestran los resultados de los análisis de coliformes totales y *E. coli* por el método Colilert-18®^{12, 15, 16} (Colilert, 2005)⁴⁹, aprobado por la “Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), para el análisis biológico de aguas residuales y para lodos de aguas residuales” (EPA, 2009)¹¹

El sistema de desinfección se realizaba mediante pastillas de hipoclorito de calcio el cual no era regulado adecuadamente por lo que se obtuvieron días discontinuos dando en el efluente concentraciones de *E. coli* y coliformes totales por arriba del rango establecido en las normas para reuso del agua, siendo éste un problema importante de salud pública ya que con esa calidad se estaba regando en las áreas verdes del campus.

Tabla 11. Resultados del muestreo de los días 27 al 30 de septiembre de 2010, para análisis bacteriológicos haciendo comparación con la (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰

Análisis bacteriológicos NMP			
Fecha	Muestra	Coliformes totales	<i>E. coli</i>
27- 09-2010	Efluente	1011.2	>2419.6
28-09-2010	Efluente	1732.9	1011.2
29-09-2010	Efluente	>2419.6	648
30-09-2010	Efluente	185	35.5
*NOM-003-SEMARNAT-1997			<240 NMP C. fecales

Metcalf y Eddy, 1997⁹ indican que es importante evaluar el comportamiento de los diferentes microorganismos para caracterizar correctamente el sistema biológico. Por lo cual se tomaron muestras de agua en el influente, reactor y efluente, para realizar algunos frotis.

En las fotos 7 y 8 se muestran los resultados de los frotis de muestras tomadas en el influente, donde se puede observar la presencia de quistes de una amoeba, cuya presencia es común en este tipo de sistemas. En las fotos 9, 10, 11 podemos observar rotíferos jóvenes presentes en muestras de agua tomadas del reactor biológico. Los rotíferos, son necesarios para la degradación de la materia y es indicativo de que se encuentran en la fase de crecimiento, pero se observa escasa materia orgánica lo que nos indica que está en muy baja concentración la biomasa en el sistema, debido a que el sistema no presentaba las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos.

En las fotos 10 y 11 se muestran quistes de parásitos, los cuales están degradando la materia orgánica. En la fotografía 12 y 13 se observan algas indicando que hubo arrastre del sedimentador hacia la cisterna del efluente, provocando problemas en la limpieza del mismo. En la foto 14 se observan restos de materia orgánica en el efluente, los cuales son indicativos de problemas en la operación.

Influente

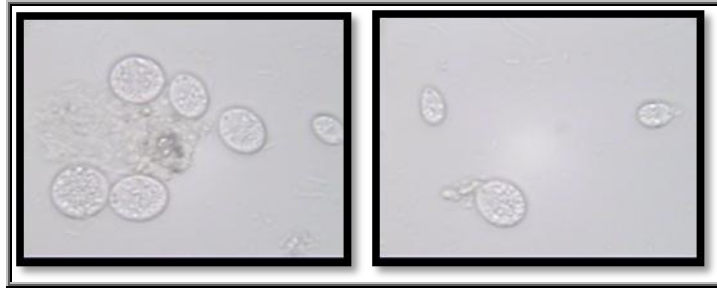


Foto 7. Quiste de Amoeba **Foto 8.** Quiste de amoeba

Reactor

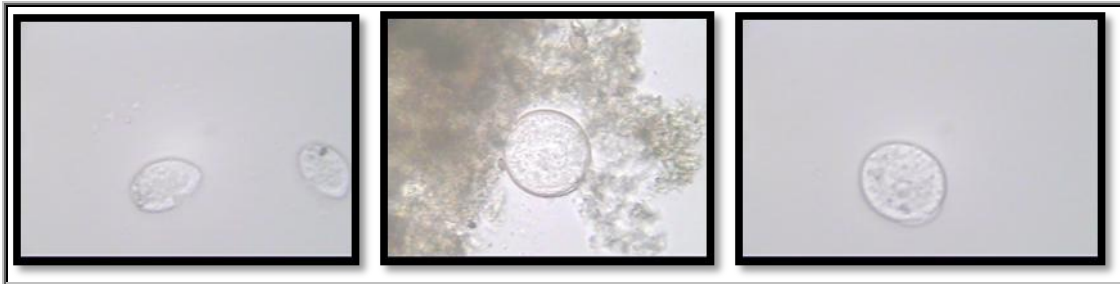


Foto 9. Rotíferos jóvenes **Foto 10.** Quiste de parásito **Foto 11.** Quiste de parásito

Efluente



Foto 12. Algas

Foto 13. Algas

Foto 14. Materia orgánica

4.1.4 Resultados de medición de parámetros en campo

En la tabla 12 se hace una comparación de los resultados obtenidos del diagnóstico con la literatura como lo indica *Ramalho, 2003*¹⁵. En donde se muestran los parámetros de campo que se obtuvieron del análisis puntual de los diferentes puntos de muestreo, como podemos observar la concentración de sólidos sedimentables es casi nula teniendo un promedio de 3 ml/L estando muy por debajo del rango ideal corroborando la poca biomasa que existía en el sistema.

Uno de los problemas detectados es que las válvulas de aire estaban siendo forzadas un 90% teniendo una sobre aeración en los reactores ya que estaba por arriba de los intervalos y no se pudo controlar a una aireación ideal, no se tenía una dosificación de cloro y es debido a que no se les capacitó al personal de la planta ni se les dejó un sistema específico de cloración por lo que hay variaciones. Se utilizaron pastillas de hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio dando por consecuencia altas concentraciones de cloro residual.

En la temperatura se encontró un poco elevada debido a las condiciones de la entidad. El pH se encuentra ligeramente dentro del rango, pero se observa cierta acidez debido a que se desechaban químicos provenientes del laboratorio del mismo campus.

Tabla 12. Parámetros de campo de los diferentes puntos de muestreo comparándolo con los intervalos que menciona Ramalho 2003¹⁵

Fecha	Solidos sedimentables ml/L		Oxígeno disuelto mg/L		Desinfección por cloración	Cloro residual ml/L Cl ₂	Temperatura ° C				pH			
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 1	Tanque 2			Tanque 1	Tanque 2	Influyente	Efluente	Tanque 1	Tanque 2	Influyente	Efluente
27-09-10	5	/	6.51	6.83	Remanente de 1 G.	17.8	32.51	31.93	28.73	32.50	6.28	5.97	7.5	7.16
28-09-10	2.5	4	2.42	6.31	Vacía	11.1	33.30	32.98	29.9	29.26	7.6	6.6	7.7	6.5
29-09-10	3	3	3.01	6.50	1 pastilla/día	5.5	32.88	32.55	29	32.26	7.07	6.07	8.26	7.07
30-09-10	3	2	4.04	7.07	Vacía	0	33.64	33.38	28.40	30.20	7	6.64	8.25	7.20
Promedio	3.3	3	4	6.6	-	8.6	33	32.7	29	31	6.9	6.3	7.9	6.98
*IDEAL	50-100 ml/L		1.5-3 ml/L		-	0.2-1.5 mg/L	10-20 ° C				6.5 – 8.5			

Fuente: resultados obtenidos del muestreo simple realizado del 27 al 30 de septiembre de 2010

En la figura 7 se muestran los resultados de un muestreo puntual de los días del 27 al 30 de septiembre de 2010 analizados por la NMX-AA-108-SCFI-2001⁵⁵, donde se puede observar que el sistema sobrepasa los límites máximos permisibles para cloro residual, siendo un ejemplo claro que la PTAR Guadalupe Victoria estaba siendo forzada por la cloración y no por el sistema biológico de lodos activados.

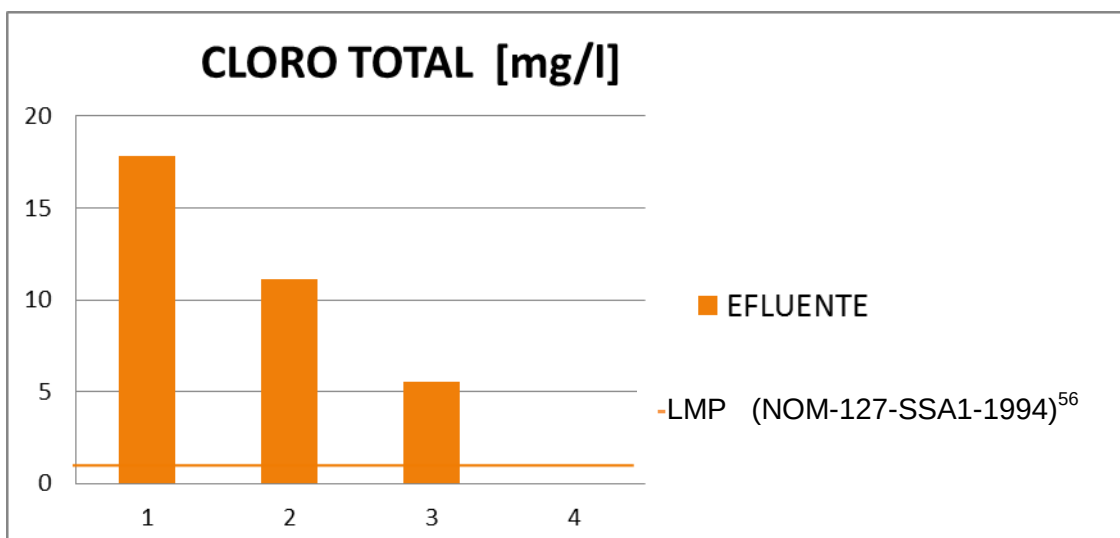


Figura 7. Resultados de cloro total en el efluente PTAR-UABC Guadalupe Victoria

4.2 Situación actual de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Ante toda la problemática planteada se entregó un reporte ejecutivo del diagnóstico de la planta a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria, el cual sirvió de base para que las autoridades decidieran suspender la operación de la PTAR y a su vez avalar que la planta contaba con muchas deficiencias de diseño y construcción por lo que se deberían de gestionar los recursos económicos para rediseñarla, realizándose un oficio firmado por el Dr. Benjamín Valdez Salas Director del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, solicitando el oficio el Vicerrector de la UABC Campus Mexicali, M.C. Miguel Ángel Martínez Romero, (ver anexo 4 y 5) lo que condujo a la gestión y obtención de los recursos económicos para la construcción de una nueva PTAR.

Se les recomendó a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus Guadalupe Victoria, que realizaran esporádicamente llenados de pipas del agua que se encuentra en el cárcamo de almacenamiento, debido a que no cuentan con sistema de alcantarillado y se llena cada tercer día. Evitando así mandar el agua residual a la zanja provisional que ellos hicieron y para evitar los problemas de salud que pudiera causar la exposición del agua sin tratar.

4.3 Diseño y construcción de una PTAR con un sistema de lodos activados de aireación extendida a nivel piloto

Con el fin de determinar los parámetros óptimos de operación de la PTAR en estudio, se diseñó y construyó una planta de tratamiento de agua residual con un sistema de lodos activados a nivel piloto con diferentes aforos y con las mismas características técnicas que la PTAR de Guadalupe victoria, con la finalidad de continuar evaluando el sistema a escala. Se describirá la planta piloto por cada unidad que la conforman. En la figura 8 se ilustra el diagrama de la planta piloto.

1) **Influente:** Aquí es donde se alimenta la planta con agua residual proveniente de la PTAR Guadalupe Victoria, la cual se alimentaba con diferentes gastos de agua debido a que se necesitaba regular para tener un buen control del sistema, logrando estabilizarla con un gasto de 25 L/d para después por goteo ser enviada al reactor anóxico.

2) **Zona anóxica:** A la PTAR piloto se le adaptó una zona anóxica la cual se remplazó por el digestor anaeróbico de la planta en estudio, con la finalidad de evaluar la nitrificación y desnitrificación, teniendo una capacidad máxima de 26.5 litros contando con un agitador mecánico para proporcionarle movimiento y para que se realizaran los procesos ya mencionados.

3) **Reactores biológicos:** El tratamiento secundario consiste de dos reactores biológicos de aireación extendida con una capacidad de 53 litros cada uno y dos comunicaciones entre cada reactor. A estos reactores se les suministra aire mediante un soplador pequeño el cual expulsa burbujas finas para proporcionarle oxígeno y movimiento a las bacterias para que estas tengan las condiciones necesarias para su reproducción y puedan realizar la biodegradación de la materia orgánica.

4) **Sedimentador:** El agua proveniente de la salida del segundo reactor biológico es enviado al sedimentador el cual tiene una capacidad máxima de 30 litros, siendo éste el que le permite a la biomasa sedimentarse por gravedad, obteniéndose dos fases la

clarificada y la sedimentada, teniendo dos válvulas: a) Recirculación con un gasto de 3 L/d y b) Exceso de lodos con un gasto de 4 L/d

Estas válvulas se aforaron y se ajustaron los gastos conforme mejor operó la planta.

5) **Efluente:** Se le agregó al sistema un tanque con capacidad de 40 L para la cloración y disposición final del agua, con el fin de obtener un efluente que cumpla con los límites máximos permisibles para la norma de reuso.

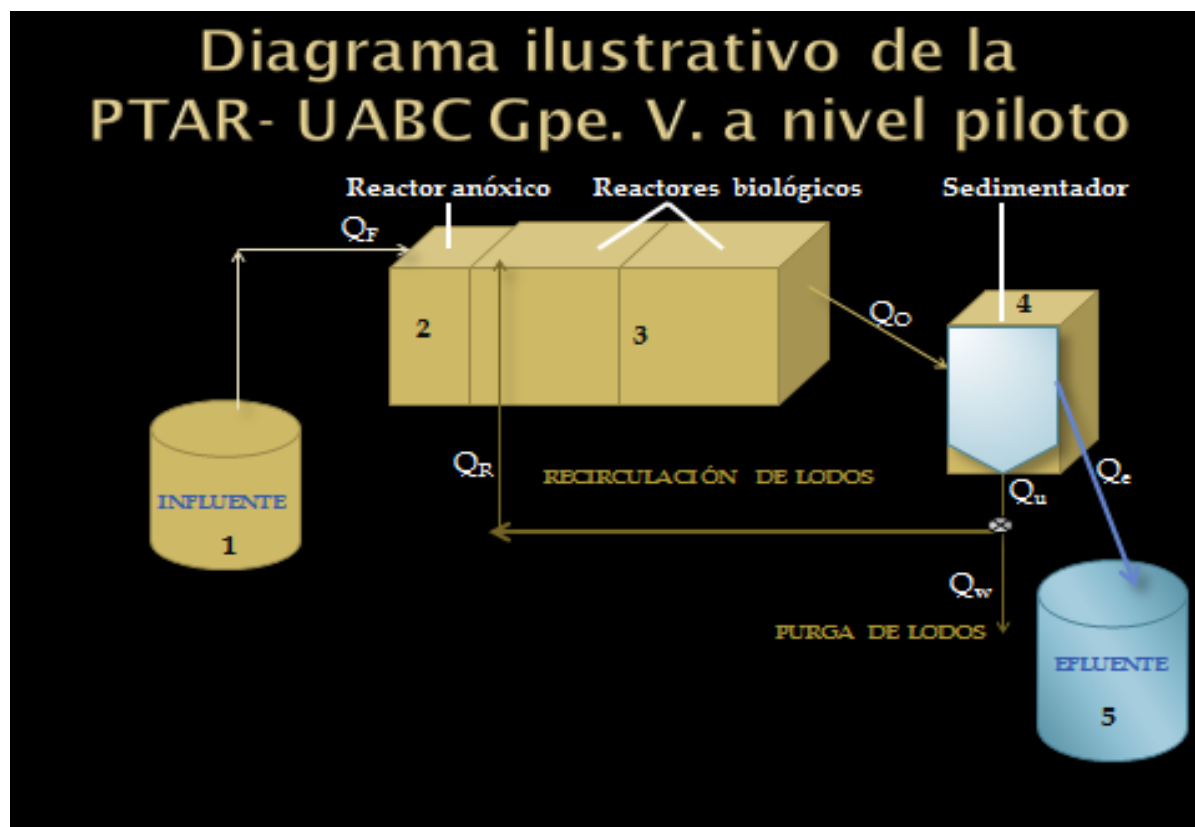


Figura 8. Diagrama ilustrativo de la PTAR piloto. Modificación propia de la fuente:
(Ramalho, 2003)¹⁵

Definición de símbolos utilizados en la figura 8:

Q_F : Alimentación inicial

Q_R : Recirculación

Q_O : Alimentación combinada

Q_e : Efluente final

Q_W : Purga

Q_u : Descarga del clarificador

En la foto 15 se muestra la estructura del tratamiento biológico antes del arranque del sistema.

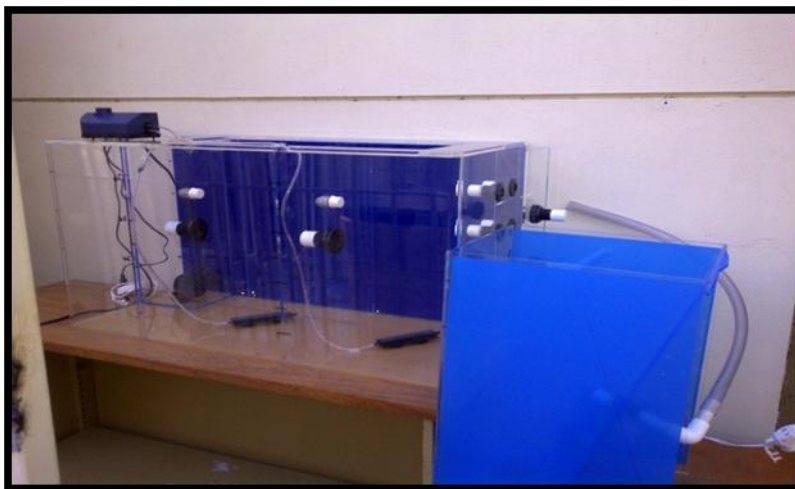


Foto 15. Estructura del Sistema de tratamiento biológico

4.3.1 Evaluación del funcionamiento de la PTAR piloto

En la foto 16 se muestra cuando se comenzó el arranque siendo realizado el día 5 de octubre de 2011. Se alimentó con 45.5 litros a cada reactor con agua cruda proveniente de la cisterna de almacenamiento de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria, se mantuvo aireada sin alimentación por 2 semanas para que se generará cierta cantidad de biomasa en el reactor y después se operó todo el sistema con alimentación de agua cruda, el sedimentador, cloración y su disposición final.



Foto 16. Arranque de la PTAR a nivel escala con agua cruda de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Para darle rapidez al crecimiento bacteriológico se inocularon los dos reactores con 5 litros de biomasa a cada uno manteniéndolos aireados para facilitar el crecimiento bacteriológico. En la foto 17 se puede observar una parte del reactor, en el cual se observó el cambio de color café claro a café oscuro, siendo esto un indicativo de la rápida generación de biomasa.

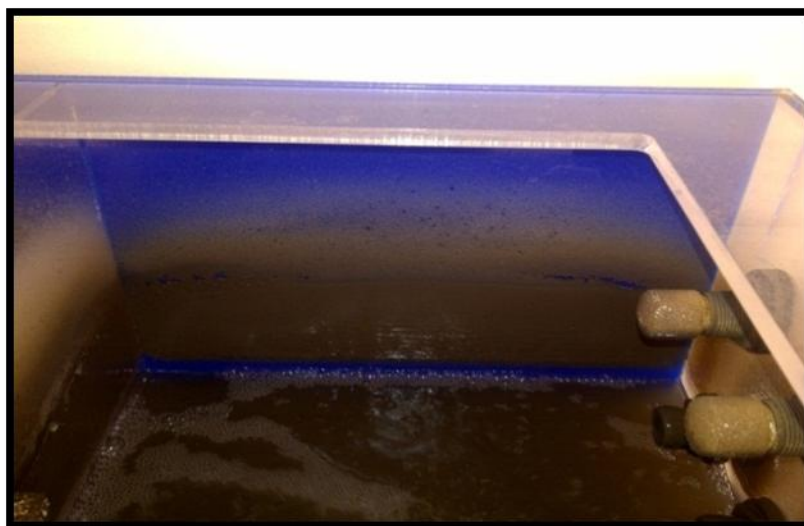


Foto 17. Reactor 2 de la PTAR piloto, después de adicionarle el inóculo

En el sistema el reactor 2 está conectado a un sedimentador el cual tiene una capacidad máxima de 30 litros y está diseñado para proporcionarle las características principales para que por gravedad la biomasa pueda sedimentar formando dos fases la clarificada y la cama de lodos. Aquí es donde el flóculo al haber adquirido sus propiedades con un “diámetro de 50 a 2000 micras” (Rodríguez, 2005)¹ sedimenta de tal forma que no flota siendo éste un factor muy importante para que pueda clarificarse el agua y pase al tratamiento terciario sin arrastre de sólidos. Esto se logró con los ajustes de operación necesarios en base a los datos obtenidos de los cálculos de parámetros óptimos operacionales para depuración de este tipo de agua.

Como se puede ver en la foto 18 el clarificador en la parte final tiene una cama de lodos que conforme aumenta la concentración de sólidos expresada en biomasa, ésta a su vez incrementa, regulándolos con los diferentes parámetros de operación que se calculan con las concentraciones de sólidos en todas sus formas, DBO₅, IVL, TRMC, TRH, A/M, flujos de influente y efluente.

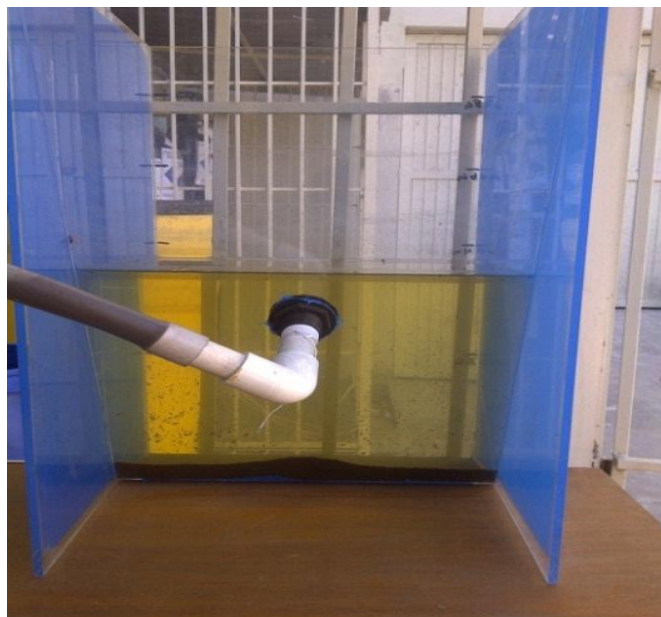


Foto 18. Parte trasera del sedimentador con sus dos fases

4.3.2 Análisis de campo

Como parte de las actividades de evaluación del sistema piloto de tratamiento de lodos activados, se monitoreo la T, OD, pH y sólidos sedimentables.

En la figura 9 se observa el comportamiento de los diferentes parámetros del reactor 1 conforme se realizó el arranque de la planta piloto, se mantuvo una concentración promedio de OD de 4.8 mg/L, la literatura recomienda un intervalo de 2 a 3 mg/L, sin embargo al inicio se mantuvo en esos niveles para facilitar el crecimiento de los microorganismos. Se mantuvo una temperatura promedio de 15° C y un pH promedio de 5.28

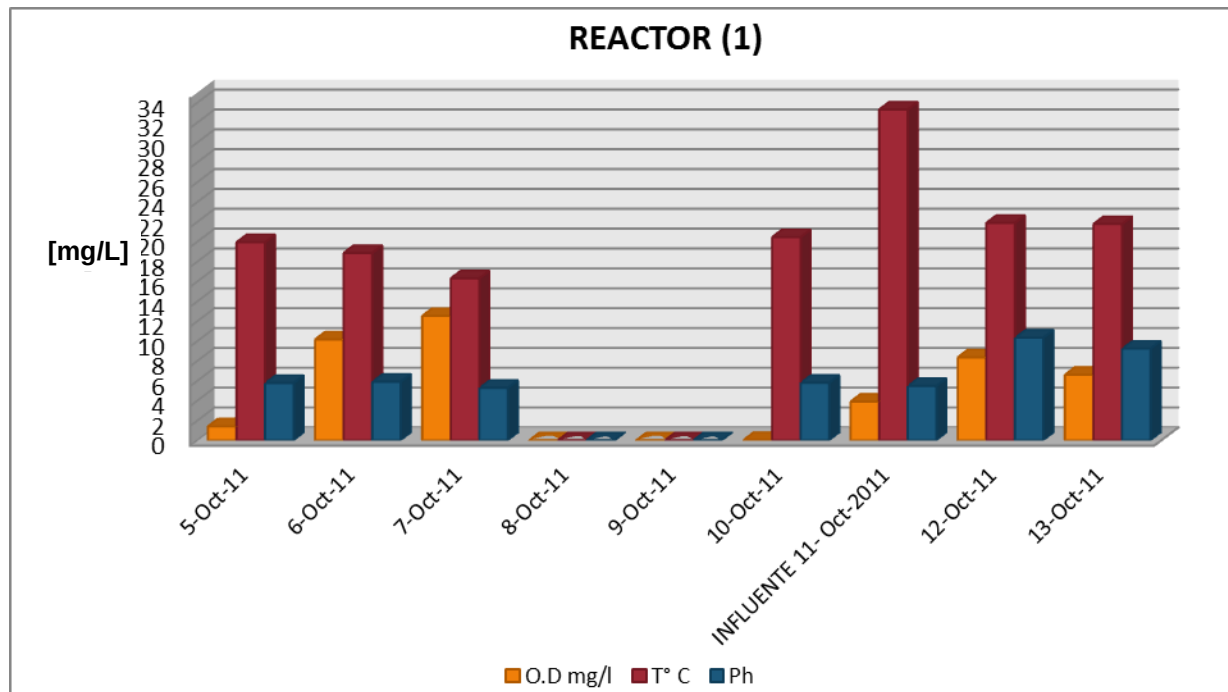


Figura 9. Resultados de parámetros medidos in situ en el reactor 1

En la figura 10 se pueden ver los resultados de los diferentes parámetros del monitoreo en campo mostrando un ligero aumento en la concentración promedio de OD siendo de 4.78 mg/L y un aumento en la T promedio de 2° C.

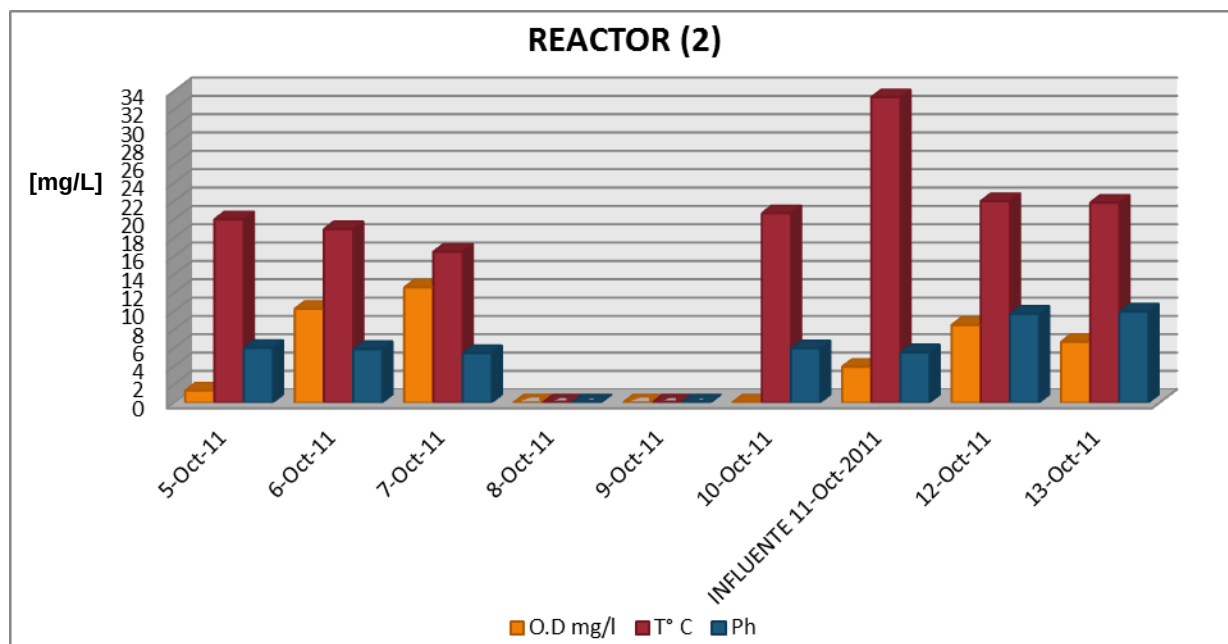


Figura 10. Resultados de parámetros medidos in situ en el reactor 2

4.3.3 Análisis de sólidos

En la figura 11 se observa el comportamiento de los sólidos al iniciar el arranque de la planta éstos van aumentando la concentración, también se obtuvo un pico alto respecto a la concentración de los SST lo cual nos indica que después del inóculo de biomasa proveniente del reactor de la PTAR-UABC, hubo un crecimiento exponencial de biomasa, siendo ésto debido a las condiciones óptimas para su crecimiento, ya que “uno de los factores esenciales en el proceso de lodos activados es la floculación efectiva del lodo, con la subsecuente sedimentación rápida y la compactación que permite que los SSVLM del efluente del reactor se separen rápidamente en el clarificador secundario” (Pacheco et al., 2003)⁵⁷

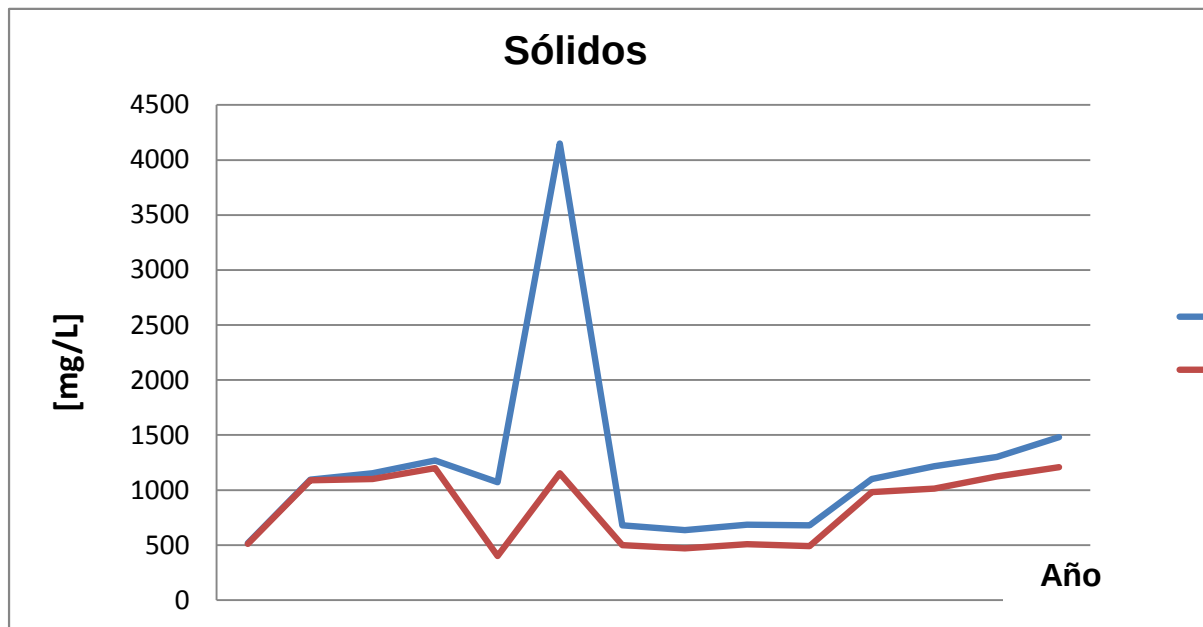


Figura 11. Comportamiento de la concentración de SST y SSV en el reactor

En la figura 12 se muestran las concentraciones de sólidos sedimentables tomados en un cono Imhoff, siendo éste uno de los parámetros de rutina en la operación ya que es de vital importancia para realizar los ajustes necesarios en el sistema. Se observa como los sólidos sedimentables en el 2012 hay un incremento a 150 ml/L debido a que se realizó el inculo de biomasa a los reactores biológicos, posteriormente se mantuvo en promedio 140 ml/L.

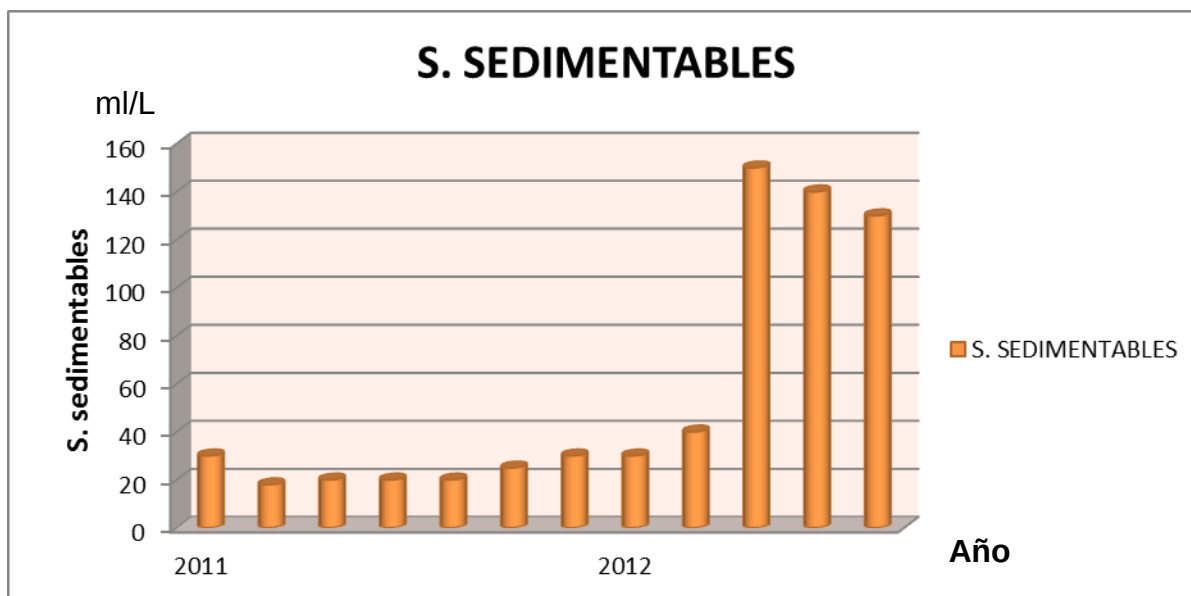


Figura 12. Concentración de sólidos sedimentables del reactor biológico

4.3.4 Análisis bacteriológicos

Uno de los parámetros de medición para evaluar el sistema son los coliformes totales y fecales los cuales están normalizados por SEMARNAT para el reuso del agua, ya que agrupan toda la familia coliforme incluyendo en la misma a *E. coli*, indicadora de materia fecal por lo que se realizaron muestreos en el efluente del sedimentador el día 5 de noviembre de 2011. La foto 19 es de una charola colilert con una dilución de 10^{-1} dando como resultado una concentración de 30.9 NMP en 100 ml de *E. coli* y 166 NMP en 100 ml de coliformes totales, en la foto 20 es de una charola colilert de una muestra directa, con una concentración de 178 NMP en 100 ml de *E. coli* y 960.6 NMP en 100 ml de coliformes totales.



Foto 19. Muestra 10^{-1} *E.coli*



Foto 20. Muestra directa *E. coli*

El día 16 de noviembre de 2011 se tomó una muestra puntual del efluente del sedimentador para análisis bacteriológico. En la foto 21 se muestra una charola colilert con una dilución de 10^{-1} con una concentración de 6.3 NMP en 100 ml, cabe mencionar que no se ha realizado la desinfección y aun así estábamos teniendo resultados por debajo de los obtenidos en el diagnóstico inicial en la PTAR-UABC Guadalupe Victoria contando ellos con sistema de desinfección.

En la foto 22 se ilustra una muestra directa, dando como resultado 238 NMP en 100 ml de coliformes totales y la foto 23 se observa el resultado obtenido de una muestra directa bajo la exposición a rayos UV, observando un verde fluorescente ya que sólo las que fermentan tienen esta capacidad para cambiar de color, dando una concentración de *E.coli* de 39.3 NMP en 100 ml.

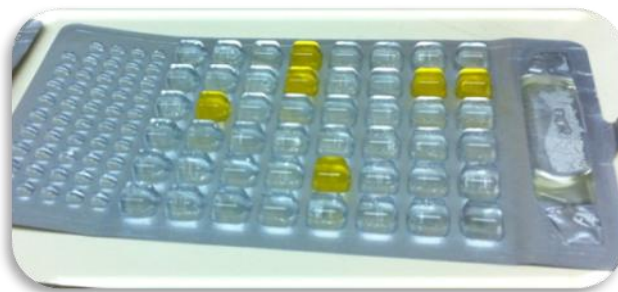


Foto 21. Dilución 10^{-1} C. totales

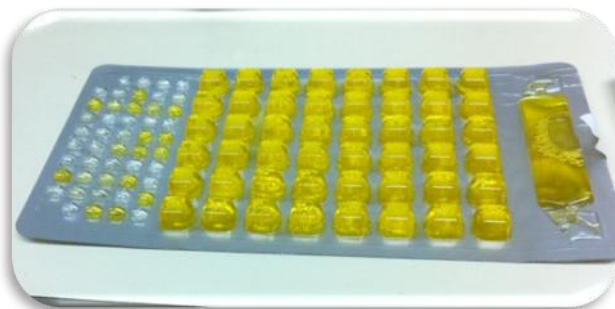


Foto 22. Muestra directa C. totales

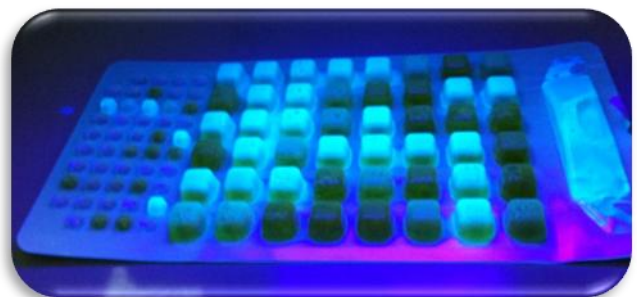


Foto 23. Muestra directa *E. coli*

Continuando con la evaluación de coliformes fecales se mandaron hacer análisis a un laboratorio externo. Los análisis bacteriológicos, fueron de un muestreo puntual del día 03 de mayo de 2012, se obtuvo como resultado: **43 NMP/100 ml** de coliformes fecales (anexo 3) siguiendo los lineamientos de la norma: NMX-AA-042-1987, estando dentro de los límites máximos permisibles de <240 NMP/100 ml de coliformes fecales de la norma de reuso con contacto directo, demostrando que se obtuvo agua que cumple con los estándares señalados y teniendo agua de calidad en el efluente.

4.3.5 Análisis de concentración de materia orgánica

La DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días y a 20°C, en botellas winkler como se observa en la foto 24 que contienen muestras del influente y efluente.



Foto 24. Botellas winkler para el análisis de DBO_5

En la figura 13 se muestra el comportamiento de la DBO_5 a partir de que se empezó a evaluar el agua influente de la PTAR en estudio manteniéndose un promedio de 213 mg/L de DBO_5 siendo una concentración adecuada para el tratamiento biológico.

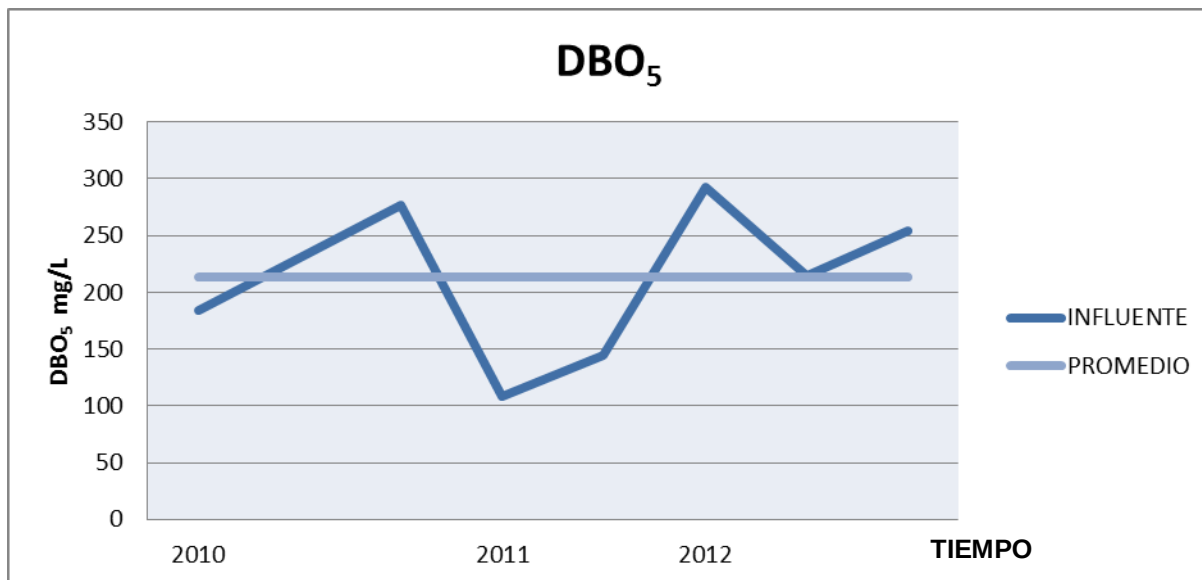


Figura 13. Análisis de DBO₅ del agua influente en el transcurso del proyecto

En la figura 14 podemos ver el promedio de 2011 y 2012 del porcentaje de remoción de DBO₅ influente contra el DBO₅ efluente teniendo una remoción de 99.1% DBO₅ el 2011 y 99.14% de DBO₅ el 2012, cumpliendo el efluente con la norma de reuso estando por debajo de los límites máximos permisibles para contacto directo, y mostrando en ambos años un buen porcentaje de remoción lo que nos indica que la planta piloto operó eficientemente.

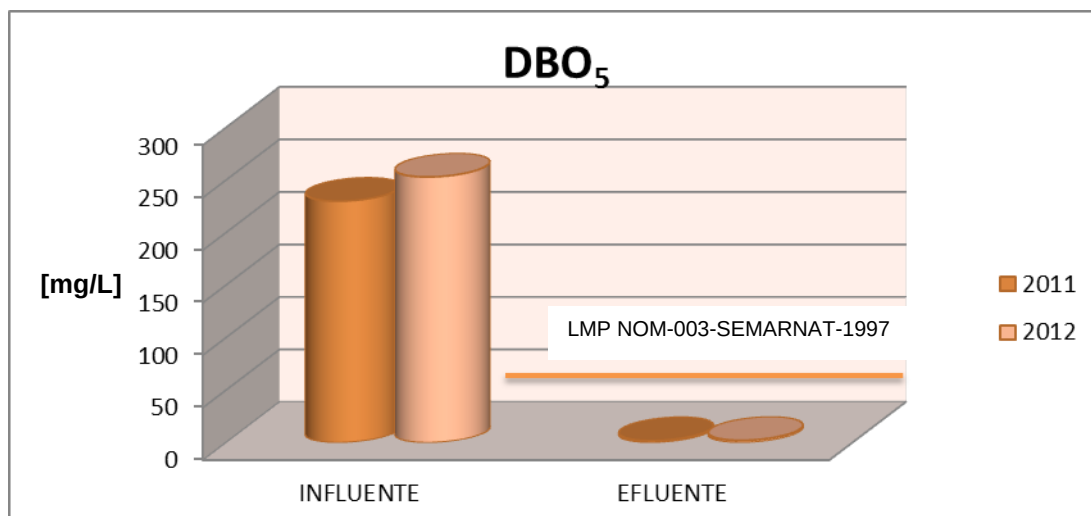


Figura 14. Porcentaje de remoción DBO₅ de influente y efluente del sistema del año 2011 y 2012

4.3.6 Frotis microbiológicos

Se realizaron frotis con una muestra puntual del reactor biológico de la planta piloto con la finalidad de observar al microscopio que tipo de población microbiana se estaba desarrollando, ya que éstos son indispensables para el monitoreo del sistema y parte de su caracterización. Observándose en la foto 25 del muestreo puntual del día 13 de octubre de 2011, que había abundante materia orgánica con presencia de rotíferos jóvenes alimentándose de la misma, lo cual es indicativo de las buenas condiciones del reactor. En la foto 26 del muestreo puntual del día 25 de octubre de 2011, se observaron protozoos (ciliados adheridos), los cuales se anclan de la materia orgánica para que puedan alimentarse de bacterias.

La foto 27 corresponde a muestra tomada el día 27 de octubre de 2011, y se observa la presencia de un parásito junto con un protozoo (ciliado libre). Las fotos muestran una variedad de microorganismos los cuales son indispensables en el sistema ya que ellos son los que ayudan a degradar la materia orgánica, ciertos microorganismos son indicativos de un arranque de una planta ya que tenemos una variedad de microorganismos jóvenes. Cuando en nuestro sistema tenemos microorganismos muy maduros y filamentosos es indicativo que tenemos problemas de operación, lo adecuado es que exista una cierta relación de ambos microorganismos para que nuestro sistema opere eficientemente.

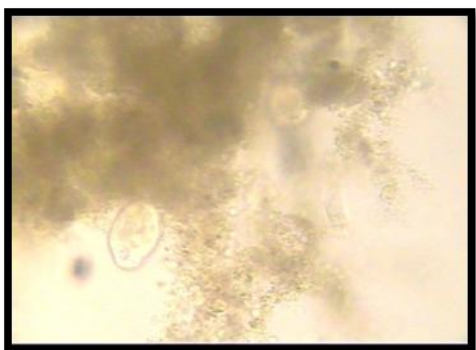


Foto 25. Frotis del reactor rotíferos jóvenes



Foto 26. Frotis del reactor ciliados adheridos

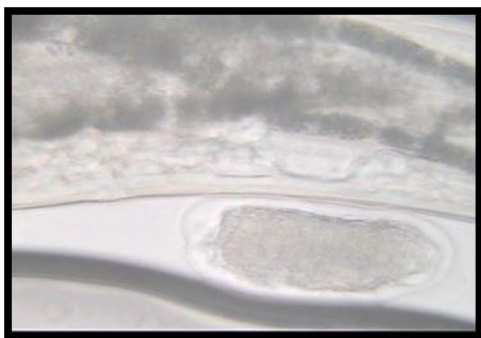


Foto 27. Frotis del reactor parasito (100x)

4.3.7 Dosificación de cloro

Se evaluó el sistema de dosificación de cloro en el efluente de la planta piloto para cumplir con el tratamiento de aguas residuales con todos los procesos indispensables y en éstos incluye la desinfección. Se tomaron muestras de 100 y 300 ml con la finalidad de hacer pruebas para ajustar la dosis óptima de desinfección y sin sobrepasar el cloro residual como lo establece la norma NOM-127-SSA1-1994⁵⁶

Se ajustó la dosificación de cloro a 0.1 ml de cloro al 1.84% de hipoclorito de sodio en 350 ml de muestra del efluente, obteniendo 1.2 ml/L Cl_2 residual libre, por lo tanto por cada litro de agua residual efluente se utilizará 0.28 ml de hipoclorito de sodio al 1.84%

Se observó que el agua efluente de la planta piloto mantuvo a lo largo del estudio un color amarillo paja como se observa en la foto 28, el primer vaso contiene agua efluente de la planta sin clorar y el segundo contiene cloro, donde se observa una reducción del color amarillo pero aún muestra turbiedad en el agua, posteriormente se realizó una prueba colorimétrica, obteniéndose 30 unidades de color platino cobalto y se hizo la prueba utilizando 0.2 g de carbón activado en 50 ml de muestra efluente sin clorar agitándose por 5 minutos y se filtro obteniendo un agua transparente y con 10 unidades platino cobalto sin turbiedad como se observa en la foto 29, se realizó la prueba de filtrar la muestra después de la cloración en un filtro con carbón activado

para poder remover el color amarillo y dio una mejor apariencia el agua como se puede ver en el primer vaso de la foto 29



Foto 28. Muestra clorada



Foto 29. Muestra filtrada con carbón activado

4.3.8 Fósforo total y fosfatos

Se ha demostrado que a altas concentraciones de fósforo total (P) o fosfatos es debido al empleo de detergentes. En la figura 15 podemos observar que las concentraciones de fósforo total estuvieron en el intervalo de 1-15 mg/L de (P) como lo establece Romero (2009)²¹ pero muestra una alta concentración de fosfatos ya que sobrepasa a los 5 mg/L de (P).

Esto corrobora que debido a que el agua residual doméstica era exclusiva de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus Guadalupe Victoria. Se observó que se utilizaba con mucha frecuencia los detergentes debido a la ardua limpieza de los baños sanitarios los cuales se hacían dos veces por día y llegaba en grandes concentración al cárcamo de almacenamiento, por lo que se observaron concentraciones elevadas de fosfatos. “Cuando el fósforo no es removido de las aguas residuales y éste llega en concentraciones relativamente altas a los cuerpos de aguas, este nutriente permite el

crecimiento y desarrollo de una gran cantidad de algas y otros microorganismos” (Reyes-Luz, 2011)⁵⁸, es por eso lo importante del monitoreo de este parámetro.

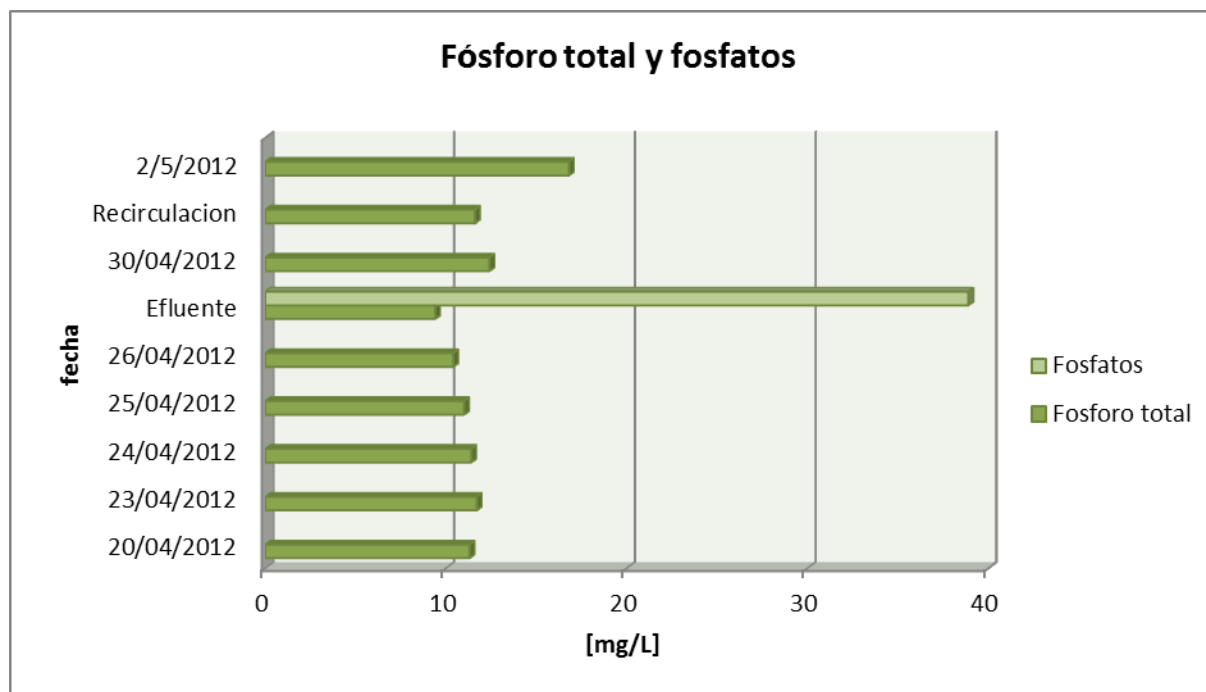


Figura 15. Fósforo total y fosfatos de los diferentes puntos del proceso

4.3.9 Nitrógeno Total, Nitrógeno Amoniacal, Nitritos y Nitratos

“En las aguas residuales, la materia nitrogenada se puede encontrar en forma orgánica e inorgánica. La fracción inorgánica está representada por el nitrógeno amoniacal, que puede estar de forma libre como amoníaco (NH_3) o ionizada como ión amonio (NH_4^+)” (Cuevas, 2002)⁵⁹. En el transcurso de la evaluación de PTAR en estudio, se observó que lo que había en mayor proporción en el cárcamo de almacenamiento era de orina, debido a las necesidades con mayor demanda de los estudiantes y trabajadores de la Escuela de Ingeniería y Negocios Guadalupe Victoria. El agua influente de la PTAR piloto era proveniente de este cárcamo de almacenamiento.

En la orina existe el nitrógeno principalmente como urea, la cual es hidrolizada rápidamente por la ureasa en amoníaco. Se analizó el nitrógeno en la mayoría de sus formas, siendo del reactor en mayor proporción, del efluente y de la línea de

recirculación del sedimentador hacia el reactor, observando en la figura 16 que la mayoría de los parámetros entran en el rango promedio establecido en la literatura el único que sobrepasa las concentraciones es el nitrógeno total Kjeldahl (NTK) ya que éste combina el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico. Como lo menciona *González, (2008)*⁶⁰ el nitrógeno genera efectos negativos, como la reducción de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en aguas receptoras y su consecuente toxicidad para la vida acuática, la disminución de la efectividad del proceso de desinfección.

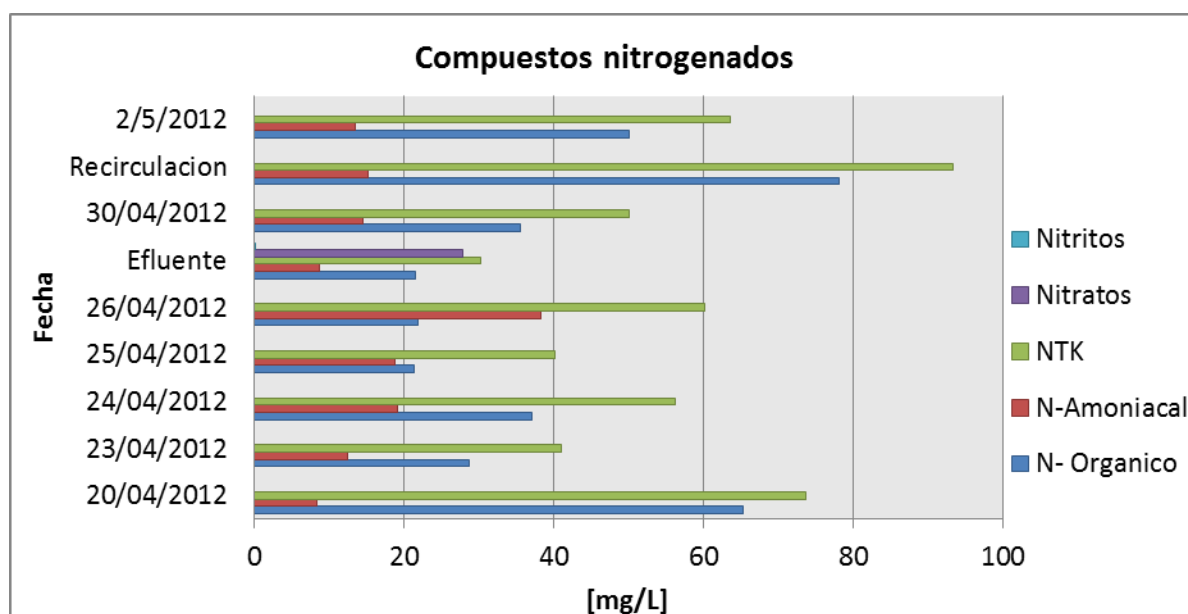


Figura 16. Diferentes compuestos nitrogenados de ciertos puntos del proceso

4.3.10 Parámetros de operación

“Muchos problemas se pueden desarrollar en la operación de lodos activados que afectan adversamente la calidad del efluente con orígenes en la ingeniería, componentes hidráulicos y microbiología del proceso” (*Ramírez et al., 2009*)¹⁹

Para lograr mantener el buen funcionamiento de una PTAR deben de llevarse a cabo algunos análisis del laboratorio de tal forma que sean de rutina y así se evalúen los diferentes puntos del proceso de la planta.

Basado en los resultados de estos análisis se hicieron cálculos para diferentes parámetros de inventarios de los lodos (IVL, TRH, TRMC) o relaciones de alimento-microorganismo (A/M o comúnmente conocido con sus siglas en inglés como F/M), de éstos dependió de que se hicieran ajustes de operación para satisfacer los requerimientos de sus diferentes destinos. En el periodo de estabilización de la planta piloto se hicieron los cálculos de rutina para obtener los parámetros de operación alimentándolos con los resultados de los análisis que se le hicieron a los diferentes puntos del proceso.

En la tabla 13 se presentan los valores de A/M para las aguas residuales domésticas tomando en cuenta dos estaciones del año, donde se hace una comparación de la relación A/M de la planta piloto obtenida en promedio el 2012, observando que están dentro de los rangos según Sergio Rolim (2000)⁶¹. A valores bajos de la relación A/M la cantidad de alimento presente (sustrato) en el sistema no es suficiente para mantener el crecimiento de los microorganismos. Por tal razón, estos últimos entran en respiración de fase endógena y el flóculo es disperso, ya que tiene la característica de una mala sedimentación.

Tabla 13. Cargas orgánicas típicas para el tratamiento de aguas residuales domésticas (A/M)

Proceso	Kg de DBO por día/ kg de SSVLM		Kg de DBO por día/ kg de SSTLM	
	Templado	Caliente	Templado	Caliente
Lodos activados convencionales	0.40 – 0.70	0.70 – 0.90	0.30 – 0.50	0.50 – 0.70
Aireación extendida	0.10 – 0.20	0.20 – 0.30	0.05 – 0.10	0.10 – 0.15
Aireación extendida piloto	0.11	-	0.09	-

Fuente: Sistemas de lagunas de estabilización “Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío” (Sergio Rolim 2000)

Se realizaron promedios de las diferentes variables de operación de la planta piloto y su eficiencia durante el periodo 2011 y el 2012, calculándose el IVL, A/M, O.D, TRH, TRMC, pH, T y la eficiencia de remoción.

Se observa en la tabla 14 que en el año 2011 presenta parámetros muy diferentes en comparación al 2012, cabe mencionar que en el primer periodo se realizó el arranque de la planta piloto y conforme el 2012 se logró mantener las condiciones necesarias para poder tener los parámetros adecuados y lograr que la planta llegara a su estado de estabilización. Se calculó la desviación estándar a los parámetros de operación.

En los dos periodos (2011 y 2012) se obtuvieron buenos porcentajes de remoción de DBO₅ pero al unir los demás parámetros nos damos cuenta que algunos parámetros no entran en el rango promedio como lo establece la literatura, se tiene que encontrar un equilibrio en el que el sistema para que opere adecuadamente. No necesariamente tiene que ser cumpliendo con los rangos, ya que se ha observado que las plantas encuentran su equilibrio con intervalos un poco bajos o altos a lo establecido, solo se tiene que evitar que el proceso se salga de control de lo contrario se necesitarán realizar ajustes de operación.

Tabla 14. Parámetros de operación de la PTAR piloto, su eficiencia y la desviación estándar. Comparándolos con los intervalos para aireación extendida como lo indica * Ramalho, 2003¹⁵

Año piloto	IVL ml/g	F/M d⁻¹	OD mg/L	TRH Días	pH	TRMC Días	T °C	Eficiencia de remoción % DBO₅
2011	15	0.03	5.7	9.46	6.63	13.5	21.18	99.16
σ	3.13	5.96 ⁻³	4.66	6.81	3.49	6.85	8.75	
2012	100	0.11	3	2.75	6.02	13.7	25.5	99.14
σ	53.35	0.016	1.56	1.78	0.50	0.65	1.92	
Ideal *Ramalho	50-100	0.1-0.25	2-3	1	6.5-8.5	5-15	10-20	99.9

En la tabla 15 se hace una descripción de la composición del agua residual doméstica como lo menciona Metcalf y Eddy, 1997⁹. Se señaló de color amarillo los intervalos en los que entraban los valores de la planta piloto, estando dentro de las concentraciones media y fuerte. El fósforo y nitrógeno se encuentran en el rango fuerte el cual nos

indica que por ser agua exclusivamente del campus está ligeramente elevada la concentración debido a su composición ya que contiene más volumen de orina.

“En la literatura, la eliminación de nitrógeno y fósforo las eficiencias pueden variar dependiendo de la composición del medio y las condiciones ambientales, tales como; la concentración inicial de nutrientes, intensidad de la luz, relación nitrógeno / fósforo, luz / oscuridad” (Zhang et al., 2012)⁶²

Tabla 15. Composición típica del agua residual doméstica

Constituyente	Concentración		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos, en total	1200	700	350
Disueltos, en total	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos, en total	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentables (ml / L)	20	10	5
DBO ₅ (20 °C)	300	200	100
Carbono orgánico total (COT)	300	200	100
DQO	1000	500	250
Nitrógeno	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Fósforo	20	10	6
Orgánico	5	3	2
Inorgánico	15	7	4
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como Ca CO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

Fuente: Tratamiento de la aguas residuales Metcalf y Eddy, 1997⁹

Conclusión

Se realizó un diagnóstico inicial en la PTAR-UABC Guadalupe Victoria donde se observaron ciertos inconvenientes en el diseño y en la operación de la planta. Se encontró que la planta presentaba fugas en la tubería de recirculación de lodos y en la tubería de la bomba del efluente, también se presentaron desbordamientos en los tanques del reactor, en el digestor anaeróbico y en la cisterna efluente, ocasionando que se generara una laguna de agua residual con olores fétidos y entorpeciendo el acceso a la planta a los trabajadores, exponiéndolos a los contaminantes presentes en este tipo de agua.

Se observó en el manual de operación que entregó la constructora, que los equipos y el diseño no eran los mismos al que estaba instalado. Los sopladores estaban sobredimensionados y no podía regularse la aireación, los difusores del reactor biológico en el diseño son de burbuja fina y en la planta estaba modificado ya que tenía instalado tubería de pvc con perforaciones, el cual no le proporcionaba las condiciones óptimas a los microorganismos para el proceso biológico.

Se observó que el sistema de lodos activados de aireación extendida estaba siendo forzado por el sistema de cloración, observándose que operaba a expensas del uso de grandes volúmenes de cloro durante el proceso de desinfección. El cloro residual dio en promedio 8.6 ml/L de Cl_2 , rebasando los límites máximos permisibles de la norma, el cual no tenía el sistema adecuado de dosificación y esto ocasionó que hubiera concentraciones de 1028.57 NMP/100 ml de *E.coli* en el efluente.

Los reactores no contaban con la suficiente biomasa ya que los análisis de laboratorio y campo daban resultados muy por debajo de lo que marca la bibliografía (Metcalf & Eddy, 1997), dando mediciones de sólidos sedimentables en promedio de 3 ml/L y concentraciones de SST en promedio de 5 mg/L, estos resultados aún estando en pruebas de arranque no son representativos, ni lograron subir las concentraciones

después de inocularse biomasa a los reactores. Esto habla del mal manejo en operación por parte de la constructora.

Debido a todos los problemas encontrados en la PTAR en estudio, se estableció comunicación con la compañía que diseñó la planta, para hacer de su conocimiento los problemas de diseño, construcción y operación encontrados en la planta. Limitándose a contestar que la persona encargada de la construcción tenía toda la información y que no tenía conocimiento de las modificaciones realizadas por la constructora, evadiendo todo tipo de responsabilidad.

En base al reporte ejecutivo y a las recomendaciones que se les hicieron a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus Guadalupe Victoria, tomaron la decisión de suspender la operación de la planta y para seguir evaluando el funcionamiento del sistema de lodos activados de aireación extendida, se diseñó y construyó una PTAR a nivel piloto.

Mediante la evaluación de la PTAR piloto se obtuvieron resultados muy satisfactorios ya que se establecieron los parámetros óptimos de operación y se logró obtener cierta biomasa en el reactor con las mejores condiciones. En base a los resultados de laboratorio la DBO_5 en promedio fue de 238 mg/L, lo cual indica que cuanta con una concentración adecuada para un sistema de lodos activados. Se obtuvieron porcentajes de remoción de DBO_5 de un 99.13% y con concentraciones de Coliformes fecales en el efluente de 42 NMP/100 ml sobrepasando las expectativas y cumpliendo ambos análisis con los estándares establecidos en la normatividad de reuso y de contacto directo.

La finalidad de sustituir el digestor anaeróbico de la planta en estudio por la parte anóxica en la PTAR piloto, fue para evaluar la nitrificación y desnitrificación en el sistema. Por lo que se recomienda que se adapte también la parte anóxica en la futura PTAR que se instale en la Escuela de Ingeniería y Negocios UABC campus Guadalupe Victoria, ya que se detectaron parámetros que pudieran llegar a causarle problemas en

la futura planta, debido a que la PTAR piloto rebasó los intervalos promedio de fósforo total y nitrógeno total, por la composición del agua proveniente del mismo campus ya que se genera en mayor proporción orina y por consecuencia le facilita el crecimiento de algas en el sistema, el cual pudiera perjudicar el tratamiento biológico, en caso de que se utilice éste tipo de tratamiento.

Como pulimiento adicional en el efluente se realizó la dosificación de cloro siendo éste de 0.28 ml de hipoclorito de sodio al 1.84% por cada litro de agua efluente, dando como cloro residual libre 1.2 ml/L de Cl_2 , recomendando poner un sistema de filtración con carbón activado para remover el color amarillo dado que fue una característica del agua efluente de la planta.

Se recomienda a las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus Guadalupe Victoria, que en base a este estudio se tengan en cuenta las diferentes sugerencias y se tome en consideración los recursos económicos que se gestionaron para la mejor decisión en la elección de la futura PTAR. Haciendo énfasis que es importante tener un sistema de tratamiento de aguas residuales eficiente en todos sus procesos, para que así puedan implementar un programa de capacitación al personal que opere la PTAR, logrando obtener un efluente que cumpla con la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997)⁴⁰ de reuso de agua.

Referencias bibliográficas

- [1] **Rodríguez, M., (2005).** *Procesos de descontaminación de aguas, cálculos avanzados informatizados*, Thomson editores Spain, Madrid España, 263 páginas.
- [2] **Barrera, V., (2005).** *Variabilidad de la calidad del agua y su impacto en los proyectos de optimización del funcionamiento de plantas de tratamiento de agua residual*. Universidad Yacambu.
- [3] **NESC, (2003).** *Small Community Wastewater Issues. Explained to the Public. Explaining the Activated Sludge Process*. Spring, 2003. Vol. 14, No. 2, National Small Flows (pp.1-2).
- [4] **WHO EMRO, (2006).** *A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region*, World Health Organization Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities CEHA, Document WHO-EM/CEH/142/E
- [5] **Ortiz, J., García, L., Valdez, R., Lara, L., Rodríguez, H., y Osti, C., (2009).** *“Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales”*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Fac. Agronomía. San Luis Potosí, México. 2 Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10 (2009): pp. 355 - 367
- [6] **González, A., (2009).** *Las alternativas para la valoración y reaprovechamiento del agua en las universidades*. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.
- [7] **Osnaya, M., (2012).** *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez*. Ixtlán de Juárez, Oaxaca.
- [8] **Medina, I., Aramayo, R., Gareca, A., y Quiroga, J., (2005).** *Puesta en marcha, operación y evaluación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas “uasb – catedral”*. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. PROMADE/FONAMA – EIA, 1era Conferencia sobre Reactores Anaerobios para Depuración de Aguas Residuales Domésticas. Tarija- Bolivia. Septiembre, 2005
- [9] **Metcalf y Eddy, (1997).** *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA Editores S.A. de C.V, México, 752 páginas.
- [10] **Torrescano, J., (2009).** *Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados*. AquaForum No. 52, 2009 disponible en: http://seia.guanajuato.gob.mx/document/AquaForum/AF52/AF5204_ParametrosOperacion.pdf

[11] **EPA GUIDELINES, (2009).** *Wastewater irrigation management plan (WIMP) - a drafting guide for wastewater irrigators.* June 2009

[12] **Wills, B., Vélez, S., Arboleda, A., y Garcés, J., (2010).** *Propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen.* Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 13, p. 93-105. Julio 2010. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).

[13] **Aguado, J., (2010).** *Tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales: experiencias en pequeños municipios de España.* Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/12/22/131541>

[14] **Stovall, H., (2007).** *Natural Alternatives to Conventional Wastewater Treatment.* June 2007

[15] **Ramalho, R., (2003).** *Tratamiento de aguas residuales.*, Edición revisada, Barcelona, Editorial Reverté, S. A., 705 págs.

[16] **Cuevas, G., y Tejero, I., (2002).** *Tratamiento de Aguas Residuales en un Rector con Biope.* División de Ciencia e Ingeniería Ambiental Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

[17] **Llagas, W., y Gómez, E., (2006).** *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM* Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 15, Nº 17, 85-96 (2006).

[18] **Pérez, M., y Rojo, C., (2000).** *Función depuradora de los humedales I: una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos.* Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología evolutiva. Año IV, Número 14, Junio 2000, ISSN 1137 – 7747

[19] **Ramírez, C., Pabello, V., y Arredondo, J., (2009).** *Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura.* Revista mexicana de ingeniería química vol. 8, no. 1 (2009) 93-99

[20] **Loaiza, N., Jimmy, L., y Fall, CH., (2010).** *Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca, N.L.* Ciencia UANL, Vol. XIII, Núm. 1, enero-marzo, 2010, pp. 46-54 Universidad Autónoma de Nuevo León México.

[21] **Romero, J., (2009).** *Calidad del Agua,* Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia, 484 páginas.

[22] **Morgan, J., Revah, S., y Noyola, A., (2005).** *Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales: su control a través de procesos biotecnológicos.* Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F.

[23] Dietrich, W. y Newton, W., (2005). *Nitrogen fixation in agriculture forestry, ecology, and the environmental*. Ed. Springer 2005

[24] Siles, E., Monforte, J., Estrany, F., Pujol, R., y Carreras, S., (2008). *Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias*. Técnica Industrial 273. Enero 2008, disponible en:
<http://www.tecnicaindustrial.es/TIAdmin/Numeros/33/40/a40.pdf>

[25] Marsilli, A., (2005). *Tratamiento de aguas residuales*, Diciembre 2005, Disponible en: <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>

[26] Navarro, A. y Palladino L., (2009). *Degradación de Efluentes Líquidos Mediante Lechos Fluidizados*, Wastewater Degradation using Fluidized Beds Inf. Tecnol. v.20 n.5 La Serena 2009

[27] Grupotar, Escuela Internacional de Ingeniería del agua de Andalucía. *Esquema general de los principales procesos biológicos de tratamiento*. Consultado en julio 2012. Disponible en:
<http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam2/tratamientos/esquemas.htm>

[28] Castillo, E., Solís, L., Méndez, N., García, S., Espadas, S., y Canul, P., (2011). *Tratamiento de efluentes de fosas sépticas por el proceso de lodos activados*. 21 de diciembre de 2011

[29] Richard, M., Ph, D., Sear-Brown, Collins, y F. CO., (2003). *Activated sludge microbiology problems and their control*. Presented at the 20th Annual USEPA National Operator Trainers Conference Buffalo, NY, June 8, 2003

[30] Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., y Carrasco, N., (2004). *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio*, *Treatment of residual waters by means of activated muds*, Rev. Inst. Investig. Fac. Minas metal cienc. Geogr v.7 n.14 Lima jul. 2004/dic.

[31] Montoya, C., (2012). *Modelo matemático que permita evaluar el cambio de la DBO₅ soluble debido a agentes inhibitorios en un proceso de lodos activados* universidad nacional de Colombia facultad de minas sede Medellín 2012

[32] Arana, V., (2009). *Guía para la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales no convencionales*, Foro Ciudades para la Vida, Diciembre 2009

[33] **Droppelmann, C., y Oettinger, M., (2009).** *Treatment of Landfill Leachate using Activated Sludge* Información Tecnológica–Vol. 20 N°1–2009, pág.: 11-19, Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642009000100003&script=sci_arttext

[34] **Velázquez, Ma., (2002).** *Organismos filamentosos y su relación con la degradación de materia orgánica y nutrientes bajo condiciones específicas de operación.* División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

[35] **Sandoval, M., (2006).** *Disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) en vinazas mediante tratamiento biológico.* Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/65867680/18/Figura-2-3-Curva-de-crecimiento-de-biomasa>

[36] **Guía Ambiental, (2010).** *Calidad de Agua - Curva de Crecimiento Batch.* <http://www.guiambiental.com.ar/conocimiento-calidad-de-agua-curva-batch.html>

[37] **Fernández, A., (2010).** *Beber aguas residuales recicladas, es una alternativa a la escasez de agua que ya se utiliza en diversas poblaciones de todo el mundo, con garantías sanitarias,* septiembre 2010, disponible en: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2010/09/01/195497.php

[38] **Fernández, A., (2006).** *Reutilización de aguas grises permite el ahorro de agua y la disminución de la contaminación.* Febrero 2006, disponible en: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2006/02/14/149371.php

[39] **SCFI, (1980).** *Norma Mexicana, NMX-AA-003-1980. Aguas residuales. Muestreo.*

[40] **SEMARNAT, (1997).** *Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicio público.*

[41] **SCFI, (2001).** *Norma Mexicana, NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales.*

[42] **SCFI, (2001).** *Norma Mexicana, NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.*

[43] **SCFI, (1987).** *Norma Mexicana, NMX-AA-100-1987. Análisis de agua. Determinación de cloro total, método Iodométrico.*

[44] **SCFI, (2010).** *Norma Mexicana, NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[45] **SCFI, (2006).** *Norma Mexicana, NMX-AA-099-SCFI-2006. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales.*

[46] SCFI, (2001). Norma Mexicana, NMX-AA-079-SCFI-2001. *Análisis de aguas. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.*

[47] SCFI, (2001). Norma Mexicana, NMX-AA-029-SCFI-2001. *Análisis de aguas. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[48] SCFI, (1987). Norma Mexicana, NMX-AA-42-1987. *Calidad del agua. Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli presuntiva.*

[49] IDEXX, (2005). Método de COLILERT® de IDEXX Laboratories, Inc, aprobado por EPA.

[50] SCFI, (2011). Norma Mexicana, NMX-AA-008-SCFI-2011. *Análisis de agua. Determinación del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[51] SCFI, (2000). Norma Mexicana, NMX-AA-007-SCFI-2000. *Análisis de agua. Determinación de Temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[52] SCFI, (2000). Norma Mexicana, NMX- AA-004-SCFI-2000. *Análisis de agua. Determinación de Sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[53] SCFI, (2001). Norma Mexicana, NMX-AA-012-SCFI-2001. *Análisis de agua. Determinación de Oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.*

[54] Lee, N., (2010). Constructora CEDICA, Manual de operación de la constructora de la PTAR Gpe. Victoria, 2010

[55] SCFI, (2001). Norma Mexicana, NMX-AA-108-SCFI-2001. *Calidad del agua. Determinación de cloro libre y cloro total.*

[56] SEMARNAT, (1994). Norma Oficial Mexicana, NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"*

[57] Pacheco, V., Jáuregui, B., Pavón S., y Mejía, G., (2003). *Control del crecimiento de microorganismos filamentosos en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales.* Rev. Int. Contam. Ambient. 19 (1) 47-53 2003. Universidad Nacional Autónoma de México.

[58] Reyes, L., Guido, Z., Bernal, M., Ramírez, L., Padrón, L., Salgado, B., Genescá, J., Durán, C., (2011). *Remoción de fósforo de aguas residuales en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio.* reyes-luz et al. /revista latinoamericana el ambiente y las ciencias, 2 (1):76-93, 2011

[59] Cuevas, G., (2002). *Nitrificación y desnitrificación en un reactor biopelícula de lecho sumergido fijo y membranas de microfiltración.* División de Ciencia e Ingeniería Ambiental Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

[60] González, M., (2008). *Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio.* Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 10, p. 45-53. Diciembre 2008. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia) Artículo recibido 22-IX-2008

[61] Rolim, S., (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización (como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío).* (pp. 146). Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill 2000

[62] Zhang, E., Wang, B., Ning, S., Sun, H., Yang, B., Mei J. y Lin H., (2012). *Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized Chlorella sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment.* African Journal of Biotechnology Vol. 11(24), pp. 6529-6534, 22 March, 2012. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>.

Anexo 1. Descripción detallada de los componentes que conforman la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

En la foto 30 se ilustra un diagrama ilustrativo de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria. Se presenta una descripción de los componentes que conforman la planta.

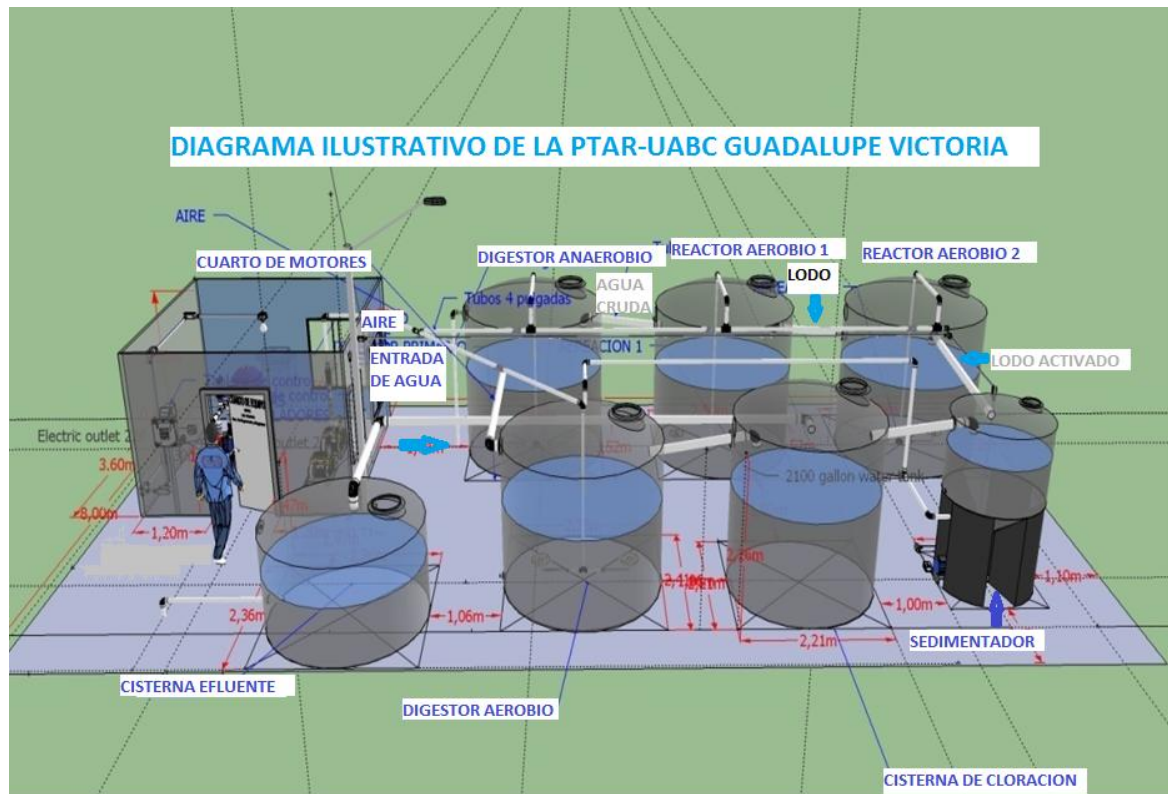


Foto 30. PTAR-UABC Guadalupe Victoria

Cárcamo de almacenamiento

La planta cuenta con un cárcamo de almacenamiento, donde llegan las descargas de agua residual, y éste permite almacenar cierto volumen de agua. Como se observa en la foto 31



Foto 31. Cárcamo de almacenamiento

Bombas sumergibles

Cuenta con dos bombas sumergibles de 2" motor 1HP3 Meyers MW100-23, las cuales bombean el agua desde el cárcamo de almacenamiento hacia el tanque digestor primario (ver foto 32)



Foto 32. Bombas sumergibles

Panel de control y Centros de carga

Las bombas sumergibles cuentan con un panel de control, para poder realizar el paro o el arranque de las bombas estando de modo manual o automático. La distribución de energía es monitoreada por el Centro de carga el cual cuenta con una rotulación de los diferentes puntos donde es distribuida la energía (ver foto 33 y 34).



Foto 33. Panel PLC



Foto 34. Centro de carga

Cuarto de motores

Aquí es donde se encuentran los motores como lo son el compresor, un motor eléctrico Baldor–reliance, 2 motobombas, 1 tanque hidroneumático. El compresor envía alimentación de aire hacia los tanques de la planta (ver fotos 35, 36, 37 y 38).



Foto 35. PLC de motobombas



Foto 36. Centro de carga



Foto 37. Motobombas



Foto 38. Tanque hidroneumático

Anexo 2. Solicitud de información faltante de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria a la constructora

Cárcamo de almacenamiento

La salida del agua residual proveniente del mismo campus es almacenada en el cárcamo de almacenamiento, en cual se observaron diversos inconvenientes.

1. No cuenta con medidor de flujo influente.
2. ¿Que capacidad tiene el cárcamo de almacenamiento?
3. Las bombas sumergibles no son operadas adecuadamente y no presentan las características necesarias para simular un flujo constante ya que es de alta capacidad y bombea muy rápido el agua quedando vacío el cárcamo y sin alimentación continua los reactores. Se requiere saber ¿Cuánto volumen de agua residual bombea la bomba sumergible?

Las 2 bombas no cuentan con guías para poder realizar el mantenimiento adecuado. La tapadera se encuentra descubierta la cual queda a 8 metros aproximadamente del mismo campus generando olores.

4. Se observa un pH de 8.25 de influente el cual se pudiera pensar que es por las descargas de fosas sépticas, siendo este un pH que pudiera afectar al proceso.

Centro de motores

En el centro de motores se observaron varias fugas las cuales eran provenientes de la primera motobomba de riego, ya que la tubería se pudo haber presurizado. Ya se le había dado mantenimiento y no dio buenos resultados por lo que quedo fuera de operación. Se observó que los dos sopladores no contaban con un regulador de aire y estaban sobredimensionados por la capacidad del mismo, ya que las válvulas de apertura con las que contaban los reactores y digestor aeróbico no realizaban su función y se distribuía el aire a donde se comunicara, de tal manera que no regulaba el aire. Se observó que en el diseño se muestran difusores de membrana los cuales no son con los que contaba la planta y se quisiera saber como funciona la modificación que se realizó.

Primer tanque digestor anaeróbico

Aún no quedó claro el funcionamiento del mismo, ya que el cárcamo bombeaba el agua con las bombas sumergibles y de ahí pasaba hacia el digestor anaeróbico pero aquí se encontraron varias interrogantes.

¿Cuánta agua influente entra y cual es el tiempo de retención de diseño?

¿Cuáles son los parámetros específicos de este tanque?

¿Cuál es la función que realiza el primer tanque en el sistema?

Reactores biológicos

La planta cuenta con dos reactores biológicos de aireación extendida, se estuvieron monitoreando y en 3 meses no se observó que tuviera la concentración de sólidos sedimentables adecuados mencionados en la literatura. Por lo que se requiere saber la siguiente información.

¿Qué volumen de sólidos se inoculó y cuales fueron las condiciones en los que se realizó el mismo?

¿Cuáles fueron las concentraciones calculadas para el arranque?

¿Qué concentraciones de sólidos (SSV, SST, SSD) es el rango óptimo según el diseño estipulado?

¿Qué tipo de concentración de OD es la ideal para los reactores?

La aireación por mas ahorcada que estaba la válvula no se lograba regularse por lo que pudiera mostrarse una claro ejemplo de que los sopladores demandaban demasiada aireación y no se podía regular.

Clarificador o Sedimentador

Se observó que no contaba con la limpieza adecuada debido a que el tubo desnatador no realizaba la función adecuadamente como se observa en la foto 39, éste presentaba arrastre de algas hacia el tanque de contacto con cloro.

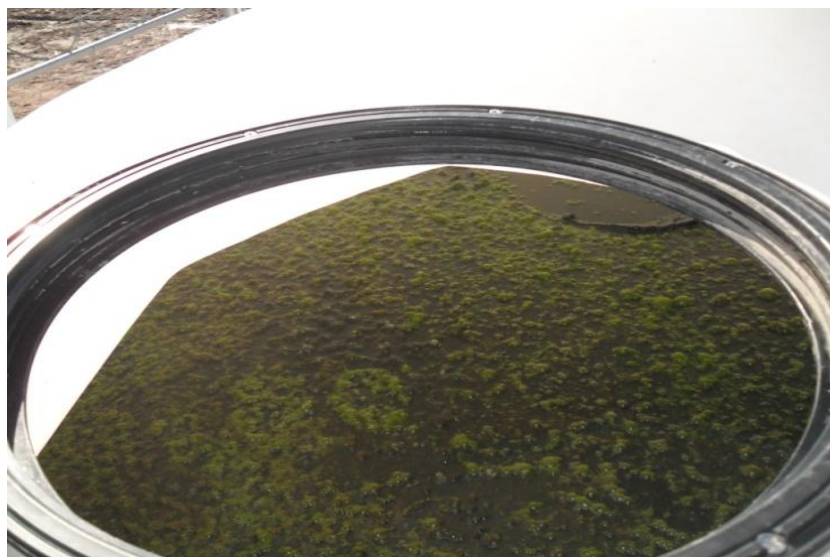


Foto 39. Sedimentador con una gruesa capa de algas

Tanque de contacto

En este tanque no se contaba con la dosificación adecuada debido a que no se entregó ningún manual en el cual se mostraran las dosificaciones que el sistema necesitaba. Se requieren las dosificaciones conforme el diseño. Como ya se mencionó anteriormente aquí se observó gran cantidad de arrastre de alga en el tanque de contacto por lo que éste a su vez lo llevaba a la cisterna efluente.

Digestor aerobio

En este tanque no se observó que cuente con las condiciones de un digestor aerobio debido a la poca concentración de sólidos y se observó que éste a su vez se vuelve a comunicar al reactor el cual se desearía saber con que función se regresa al proceso. Debido a que es un digestor aerobio se requiere saber cual concentración de O. D. es la ideal según el diseño para el mismo.

Cisterna efluente

Aquí es donde se almacena el agua desinfectada en donde se observaron irregularidades debido a que le instalaron un tubo como demasías para que saque el

excedente de agua la cual es demasiada y genera una laguna ocasionando un foco de infección como se observa en la foto 40



Foto 40. Demasías del tanque efluente causando una laguna

Un factor importante con la que no cuenta la planta es un medidor de flujo efluente por lo que no se sabe cual es el volumen que trata por día.

¿Cuál es la capacidad de la PTAR?

Problemas de muestreo

Es indispensable que en cualquier PTAR cuente con la seguridad e higiene adecuada debido a la gran fuente de infección a la que se está expuesto el personal por trabajar con aguas residuales. No se cuenta con las escaleras o sitios adecuados para la toma de muestra, ya que se dificulta y arriesga al personal a padecer accidentes.

En la foto 41 se observan diferentes tipos de fugas las cuales crearon algunas salpicaduras en los diferentes tanques de la planta, siendo conscientes de que es agua residual y éste pudiera tener contacto en los ojos, boca, piel etc., creando una fuente de infección seria, por no contar con la debida seguridad. En la foto 42 se muestra una situación alarmante debido a que en el transcurso de la operación de la planta las autoridades de la Escuela de Ingeniería y Negocios campus UABC Guadalupe Victoria,

no recibieron apoyo de la constructora y la planta se desbordaba ocasionando una gran laguna metros de la comunidad estudiantil por lo que optaron por encaminarla hacia las afueras del campus haciéndoles recomendaciones de que se dejara de operar la planta y se tomaran las medidas correspondientes para evitar este tipo de alternativas.



Foto 41. Fugas de la PTAR



Foto 42. Situación actual de la PTAR

Anexo 3. Resultados de Coliformes fecales del Laboratorio Sinaloa



LAB SIN SERVICIOS PROFESIONALES, S.A. DE C.V.

ANÁLISIS QUÍMICOS, FÍSICOS Y BACTERIOLÓGICOS

Av. Uruguay # 798-11 Fracc. Sonora, Mexicali Baja California
Tel. 01 (686) 565 22 40, 565 21 04, 565 24 92

Mexicali, Baja California, Mayo 10 del 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
AT'N DRA. SOCORRO ROMERO HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA
P R E S E N T E.-

Determinación de Coliformes Fecales, en una muestra de agua residual, recibida en este Laboratorio el día 03 de Mayo del 2012, la cual se identifico como: **Agua del Efluente con Cloración.**

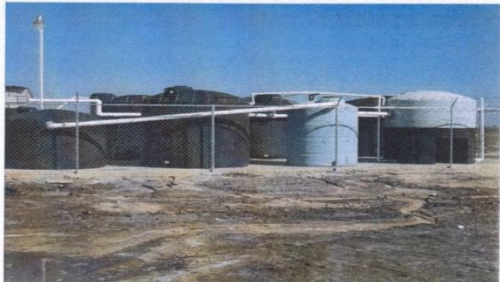
Una vez analizadas estos son sus resultados:

AGUA RESIDUAL DEL EFLUENTE

PARÁMETROS:	TECNICAS:	RESULTADOS:
COLIFORMES FECALES:	NMX-AA-042	43 NMP/100 ml

ATENTAMENTE
Q.F.B. Raúl Torres Arroyo
Quim. Responsable

Anexo 4. Oficio de revisión de Reporte ejecutivo del diagnóstico inicial de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria

	Universidad Autónoma de Baja California Instituto de Ingeniería.
Reporte Técnico	
Evaluación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual "PTAR-UABC Guadalupe Victoria"	
	
Presentan:	
Q.F.B. Yersinia Olvera Vidal. DRA. María Socorro Romero Hernández	
Informe confidencial	
Mexicali, B.C., 27 de enero de 2012	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA
R ECIBID O
JAN 27 2012
ECIBID
VICERRECTORÍA
MEXICALI, B.C.

0

Anexo 5. Oficio de la entrega del reporte ejecutivo

Universidad Autónoma de Baja California INSTITUTO DE INGENIERÍA

Oficio No. 99/2012
Asunto: Entrega de Reporte Técnico.

M.C. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ ROMERO
VICERRECTOR DE LA UABC CAMPUS MEXICALI.

P R E S E N T E .

En respuesta a su solicitud del reporte técnico: Evaluación de la Planta de Tratamiento de Agua Residual "PTAR-UABC Guadalupe Victoria" elaborado por la Dra. María Socorro Romero Hernández Q.F.B. y la QFB. Yersinia Olvera Vidal, le envío anexo a la presente una copia del reporte y el archivo en CD.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Mexicali B. C., 27 de enero de 2012

"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA
RECIBID
JAN 27 2012
RECIBID
VICERRECTORÍA
MEXICALI, B.C.



DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS
Director

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



INSTITUTO DE
INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA
ESPACHAD
JAN 27 2012
ESPACHAD
INSTITUTO DE INGENIERÍA

C.c.p. Expediente/Archivo.