

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIALES EN UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE LÍQUIDOS  
DEL GAS NATURAL**

**Realizado por:**

**Ana Katherina Bolívar Carvajal**

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente  
como requisito parcial para optar al título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Puerto La Cruz, noviembre de 2011**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIALES EN UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE LÍQUIDOS  
DEL GAS NATURAL**

**ASESORES**

---

**Ing. Euripides Cabrices  
Asesor industrial**

---

**Ing. Milena Amundarain M. Sc.  
Asesor académico**

**Puerto La Cruz, noviembre de 2011**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIALES EN UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE LÍQUIDOS  
DEL GAS NATURAL UBICADA EN SAN JOAQUÍN, ESTADO ANZOÁTEGUI**

**JURADO**

---

Ing. Químico Milena Amundarain M. Sc.  
**Asesor Académico**

---

Ing. Químico Alexis Cova M. Sc.  
**Jurado Principal**

---

Ing. Químico Ronald Arias M. Sc.  
**Jurado Principal**

**Puerto La Cruz, noviembre de 2011**

## RESOLUCION

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado:

**“Los Trabajos de Grado son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que forma parte de mi vida:

Primeramente a **dios todo poderoso** por guiarme hacia el camino correcto.

A mi madre **Magalis de Bolívar**, por darme la vida, por creer siempre en mí, por apoyarme y ser mi pilar fundamental a lo largo de toda mi carrera, por ser mi mejor amiga. Gracias mami, a usted le debo lo que hoy soy. Te quiero muchísimo.

A mi padre **Freddy Bolívar**, por confiar en mí en todo momento, por impulsarme a lo que hoy soy una persona feliz, por demostrarme que todo en la vida tiene un sacrificio y vale la pena hacerlo, gracias a usted hoy cumplí mi meta. Gracias papi por ser mi mejor amigo, compañero y sobre todo el mejor papá del mundo lo adoro.

A mi hermano **Frederick Bolívar**, por su cariño y apoyo, espero que tú también logres todas tus metas, éxitos para ti hermano, te quiero.

A mi hermana **Oriannys Bolívar**, por ser la persona más especial y estar siempre pendiente de mi, hermanita llegaste a nuestras vidas y la llenaste de alegrías, gracias por tu cariño, te quiero mucho.

A mi abuelita **Carmen Merchan** por esos consejos maravillosos y por darme esas fuerzas de seguir siempre adelante.

A mi novio **Darluis Meneses**, por su amor, por formar parte de mi vida, por su cariño, comprensión y confianza, por la ayuda que me diste a lo largo de toda mi carrera, por todos los momentos lindos que hemos vividos juntos. Amor a pesar de la distancia siempre estuviste a mi lado gracias. Te amo.

**Sin ustedes no lo hubiese logrado gracias a todos, los amo!!!**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a **dios** por abrirme las puertas en toda mi carrera y darme esa fuerza de seguir adelante.

A agradezco a mis padres **Freddy Bolívar y Magalis de Bolívar**, por creer y confiar en mí en todo momento, por ser mis pilares fundamentales, por darme la estabilidad emocional, económica y sentimental; para poder llegar a la realización de esta meta. Muchísimas gracias a ustedes padres, los quiero muchísimo.

A mis hermanos **Frederick Bolívar y Oriannys Bolívar**, por todo su apoyo y ayuda. Hermanitos espero que este trabajo les sirva de apoyo en un futuro.

Te agradezco a ti mi amor **Darluis Meneses**, por estar siempre conmigo apoyándome y por motivarme a seguir siempre adelante, no solo en este paso final, sino en toda la carrera. Gracias amor mío.

A mis primos y a mis tíos **Carolina Vallenilla, Lisddy Ponce, Jenni Aray, Marilyn González, Ender Merchan, Hember Pérez, Kelvis Merchan, Roque Galea**, por su apoyo incondicional en toda trayectoria de mi carrera.

A mi suegra **Daysi Centeno** y su esposo **Rigoberto Cedeño**, por el apoyo y los consejos que me han dado, por abrirme las puertas de su casa y considerarme como un miembro más de su familia. Muchísimas gracias madrina.

A **Belkis Centeno, Carlos Meneses y mis comadres Carbelis Meneses y Karelbys Meneses**, por ser mi segunda familia, por las palabras, consejos y por estar siempre ahí apoyándome. Los quiero mucho.

A mis cuñadas **Gabriela Gonzales y Rebeca Cedeño** por la amistad que me han brindado hasta ahora.

A la **Sra. Beatriz Navas**, al **Sr. Simón Centeno, Roisis Centeno, Cheyla Centeno y Alexander Bolívar**, por ser mi otra familia, porque a pesar de la distancia siempre me apoyaron.

A mis amigos **Karelis Pino y Darvin Azocar** por su cariño, su amistad y por toda la ayuda y colaboración que me brindaron a lo largo de mi carrera y de este proyecto, muchísima gracias amigos, que dios me los bendiga y que su amor perdure por siempre.

A mis compañeros **Railubys Mongua, Jessica Abreu, Decksays Ugas, Jari Mancilla, Ysabel Roja, Jorge Guanare, Amada Ramos, Odin Paraqueimo y Marcos Riveros**,

por compartir conmigo en la trayectoria de mi carrera universitaria, por el cariño y la amistad que me ofrecieron, todos son personas maravillosas. Éxitos para ustedes también, muchísimas gracias.

Al **Prof. Canache** y al **Sr. Rubén Castillo**, por brindarme la ayuda y el apoyo de poder realizar mis pasantías de grado.

A mi tutor industrial el **Ing. Euripides Cabrices** por la ayuda y colaboración en el trayecto de mis pasantías.

A mi tutora académica **Ing. Milena Amundarain** por la ayuda que me brindo, por abrirme las puertas de su casa y por todos sus asesoramientos académicos. Muchísimas gracias profesora.

A **Rafael Cova**, por los consejos y la amistad que me brindaste a lo largo de mis pasantías, sobre todo por los asesoramientos que me distes relacionado con mi trabajo de grado. Gracias.

A **Neri Pulido** y a los ingenieros **Nelson Nieves, David Molina, Irgwin Cuellar**, por la colaboración, por haberme enseñado y ayudado en todo el trayecto de mis pasantías.

A mis compañeros de pasantías **Yeislis, Crisalida, María, jhoan** y sobre todo a **Susana**, por el compartir y por la amistad que me brindaron.

Agradezco a toda la **Gerencia de la planta de extracción San Joaquín** a cada uno de sus trabajadores que colaboraron conmigo y me hicieron sentir parte de ellos.

A todos aquellos **profesores** a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias por su paciencia y enseñanza.

A la prestigiosa **Universidad de Oriente** un eterno agradecimiento, la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

Y a todas aquellas personas, compañeros y amistades que de una u otra forma, colaboraron o participaron en el trayecto de mi carrera y en la realización de esta tesis que a pesar de que no los mencione, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

**Muchas Gracias a todos!!!**

## RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el proceso biológico del sistema de tratamiento de efluentes industriales en una planta de extracción de líquido del gas natural. Las aguas a tratar provienen de una red de drenaje constituida de una serie de canales abiertos y tuberías que recogen las aguas de lluvia y aguas contaminadas de las distintas unidades que conforman los trenes de proceso A y B de la planta. Para ello se verificó el funcionamiento actual de las unidades del sistema basado en las condiciones del diseño, diagrama de flujos y visitas a campo; además se realizaron análisis fisicoquímicos al afluente y efluente de las diferentes etapas de la planta. Por otra parte se calcularon los parámetros operacionales del proceso biológico, con la finalidad de conocer la eficiencia del mismo así como también se dieron propuestas para la mejora del sistema. La comparación entre las condiciones del diseño de la planta demostró que actualmente se encuentran equipos fuera de servicio. De acuerdo a los análisis fisicoquímicos se determinó que la demanda química de oxígeno (DQO) promedio en el efluente fue de 747,2 mg/l; la cual no cumple con la concentración permisible del decreto 883 (350 mg/l) y que los reactores contienen un alta concentración de sólidos volátiles. En cuanto a los parámetros operacionales el tiempo promedio de retención celular fue de 3,96 días para el reactor 1 y 3,83 días para el reactor 2, el cual está por debajo del rango establecido para un proceso convencional de los activados (5-15) días. Por otra parte se determinó que la remoción de DQO en el proceso biológico fue de 85,86 %, y finalmente se propone la evaluación del separador de placas corrugadas (CPI) y la purga de los sólidos necesarios para mantener la concentración adecuada en los reactores.

## TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCION.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	viii
TABLA DE CONTENIDO .....	ix
INDICE DE TABLAS.....	xii
INDICE DE FIGURAS .....	xiii
CAPITULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción de la empresa.....	1
1.2 Reseña histórica.....	1
1.3 Complejo criogénico de oriente (CCO).....	3
1.4 Planta de extracción San Joaquín .....	4
1.5 Planteamiento del problema .....	5
1.6 Objetivos .....	6
1.6.1 Objetivo general .....	6
1.6.2 Objetivos específicos.....	7
CAPITULO 2 .....	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes .....	9
2.2 Aguas residuales.....	9
2.3 Composición de los caudales del agua residual.....	9
2.4 Muestreo de las aguas residuales industriales.....	9
2.5 Métodos para el medir el caudal.....	10
2.6 Características de las aguas residuales .....	12
2.6.1 Características físicas .....	12
2.6.2 Características químicas .....	15
2.6.3 Características biológicas .....	17
2.7 Tratamiento de las aguas residuales .....	18
2.8 Clasificación de los métodos de tratamientos de las aguas residuales.....	18
2.8.1 Operaciones físicas unitarias .....	18
2.8.2 Procesos químicos unitarios .....	18
2.8.3 Procesos biológicos unitarios .....	19
2.9 Métodos de tratamiento .....	19

2.9.1 Tratamiento preliminar .....	19
2.9.1.1 Desbaste.....	20
2.9.1.2 Homogeneización .....	20
2.9.1.3 Remoción de grasa y aceites.....	20
2.9.2 Tratamiento primario.....	20
2.9.2.1 Precipitación química (coagulación-floculación) .....	21
2.9.3 Tratamiento secundario .....	21
2.9.3.1 Proceso de lodos activados .....	21
2.9.3.2 Relaciones para el diseño y control del sistema de lodos activado.....	25
2.9.4 Tratamiento terciario o avanzado .....	29
2.10 Sistema de tratamiento de efluentes industriales y equipos principales .....	29
2.10.1 Red de drenaje .....	30
2.10.2 Laguna de amortiguación .....	30
2.10.3 Estación de bombeo principal.....	31
2.10.4 Separador de placas corrugadas (CPI).....	31
2.10.5 Sedimentador primario .....	31
2.10.7 Sedimentador secundario.....	32
2.10.8 Laguna de estabilización y cloración.....	32
2.10.9 Lechos de secado de lodos.....	33
2.11 Análisis estadísticos.....	33
2.11.1 Media.....	33
CAPITULO 3 .....	35
DESARROLLO DEL TRABAJO .....	35
3.1 Verificación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta de tratamiento de efluentes industriales .....	35
3.1.1 Concepción original del proceso de tratamiento de efluentes industriales .....	35
3.1.2 Condición real de la planta de tratamientos de efluentes industriales .....	37
3.1.3 Medición del caudal .....	38
3.1.4 Dosificación de químicos .....	40
3.2 Medición de las variables operacionales del sistema de tratamiento.....	40
3.2.1 Análisis fisicoquímico del proceso.....	40
3.2.2 Chequeo de los parámetros operacionales del proceso biológico.....	46
3.3 Estimación de la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la demanda química de oxígeno (DQO).....	51
3.4 Realización de propuestas que permitan el buen funcionamiento del proceso biológico.....	51

CAPITULO 4 .....	52
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	52
4.1 Verificación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta de tratamiento de efluentes industriales .....	52
4.1.1 Descripción del proceso del sistema de tratamiento .....	52
4.1.2 Medición del caudal .....	55
4.1.3 Dosificación de químicos .....	56
4.2 Medición de las variables operacionales del sistema de tratamiento .....	57
4.2.1 Análisis fisicoquímico .....	57
4.2.1.1 Entrada de la planta (afluente industrial) .....	57
4.2.1.2 Salida de la planta (efluente tratado) .....	60
4.2.1.3 Reactores biológicos .....	64
4.2.1.4 Estación de bombeos de lodos recirculados .....	70
4.2.2 Chequeo de los parámetros operacionales del proceso biológico .....	73
4.3 Estimación de la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la demanda química de oxígeno (DQO) .....	75
4.4 Realización de propuestas que permitan el buen funcionamiento del proceso biológico .....	76
4.4.1 Cambios necesarios para mejorar el sistema de tratamiento de efluentes industriales .....	76
4.4.2 Programa de operación y mantenimiento de la planta .....	77
4.5 Conclusiones .....	79
4.6 Recomendaciones .....	80
BIBLIOGRAFIA .....	81

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos empleados para la determinación del caudal en la entrada del sedimentador 1 y en la recirculación de lodos.....	38
Tabla 3.2 Datos para el cálculo de los caudales de entrada a los reactores y salida de la planta .....	39
Tabla 3.3 Datos utilizados para el cálculo de los sólidos totales en el afluente de la planta. ....	42
Tabla 3.4 Datos utilizados para el cálculo de los sólidos suspendidos en el afluente.....	43
Tabla 3.5 Volumen, tiempo de llenado y caudal de lodos de purga .....	46
Tabla 4.1 Valores de los caudales del proceso biológico .....	55
Tabla 4.2 Nutriente y variación de la demanda química de oxígeno (DQO) .....	56
Tabla 4.3 Análisis fisicoquímicos realizados al afluente .....	57
Tabla 4.4 Análisis fisicoquímicos realizados al efluente .....	60
Tabla 4.5 Análisis fisicoquímicos realizados en el reactor 1.....	65
Tabla 4.6 Análisis fisicoquímicos realizados en el reactor 2.....	65
Tabla 4.7 Análisis fisicoquímicos realizados a los lodos recirculados .....	70
Tabla 4.8 Valores de los parámetros operacionales actuales y de diseño.....	73
Tabla 4.9 Nutrientes necesarios y disponibles en el proceso biológico.....	74
Tabla 4.10 Valores de la remoción de DQO en el proceso biológico .....	75
Tabla 4.11 Programa de operación y mantenimiento propuesto para la planta de extracción San Joaquín.....	78

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Infraestructura del gas instalada en Venezuela (Planta de extracción San Joaquín, 1996)..	3
Figura 1.2 Ubicación geográfica del complejo criogénico de oriente (Planta de extracción San Joaquín, 1996) .....	3
Figura 1.3 Ubicación geográfica de Anaco y San Joaquín, estado Anzoátegui (Planta de extracción San Joaquín, 1996).....	5
Figura 1.4 Vista aérea de la planta de extracción San Joaquín (Planta de extracción San Joaquín, 1996).....	5
Figura 2.1 Proceso convencional de lodos activados (Metcalf y Eddy, 1995).....	23
Figura 2.2 Balance global del sistema de tratamiento de lodos activados en la planta de extracción San Joaquín .....	27
Figura 3.1 Esquema del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín (Planta de extracción San Joaquín, 1996).....	37
Figura 3.2 Muestras tomadas en diferentes puntos de la planta (Planta de extracción San Joaquín, 1996) .....	41
Figura 3.3 Gráfica de la tasa de utilización específica con respecto a el inverso del tiempo de retención celular .....	49
Figura 4.1 Esquema actual del sistema de tratamiento de efluentes industriales.....	54
Figura 4.2 Concentraciones de la demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total en el afluente.....	58
Figura 4.3 Concentración de oxígeno disuelto, variación de temperatura y pH en el afluente .....	59
Figura 4.4 Concentración de los sólidos totales, suspendidos y volátiles en el afluente.....	59
Figura 4.5 Concentraciones de la demanda química de oxígeno en el efluente y límite establecido en el decreto 883.....	61
Figura 4.6 Concentraciones del nitrógeno total en el efluente y el límite establecido en el decreto 883 .....	61
Figura 4.7 Concentraciones de fósforo total en el efluente y el límite establecido en el decreto 883...	62
Figura 4.8 Concentración del oxígeno disuelto en el efluente y límite de descarga hacia los cuerpos de aguas.....	62
Figura 4.9 Variación del pH en el efluente y límite establecido en el decreto 883 .....	63
Figura 4.10 Variación de la temperatura en el efluente .....	63
Figura 4.11 Concentración de los sólidos totales y volátiles en el efluente.....	64

Figura 4.12 Concentración de sólidos suspendidos en el efluente y límite establecido en el decreto 883.....	64
Figura 4.13 Concentración del oxígeno disuelto en los reactores y límite de diseño.....	66
Figura 4.14 Variación del pH en los reactores y límite establecido para que ocurra la actividad biológica .....	67
Figura 4.15 Variación de la temperatura en los reactores y límite de diseño establecido para un proceso convencional de lodos activados.....	67
Figura 4.16 Concentración de los sólidos totales en los reactores.....	68
Figura 4.17 Concentración de los sólidos suspendidos en los reactores.....	68
Figura 4.18 Concentración de los sólidos volátiles en los reactores y rango de diseño para un proceso convencional de lodos activados.....	69
Figura 4.19 Variación de los sólidos sedimentables en los reactores .....	69
Figura 4.20 Concentración de oxígeno disuelto de los lodos recirculados y límite de diseño establecido para un proceso convencional de lodos activados .....	71
Figura 4.21 Variación del pH de los lodos recirculados y límite de diseño.....	71
Figura 4.22 Variación de la temperatura de los lodos recirculados y límite de diseño.....	72
Figura 4.23 Concentración de los sólidos totales y suspendidos de los lodos recirculados .....	72
Figura 4.24 Concentración de los sólidos volátiles de los lodos recirculados y límites de diseño .....	73
Figura 4.25 Variación de la eficiencia del proceso biológico .....	76

# CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Descripción de la empresa

PDVSA Gas, es una empresa comercial, cuyo accionista es el estado venezolano, que explora, produce, transporta, procesa, distribuye y comercializa gas natural y sus derivados, de manera rentable, segura y eficiente, con calidad en sus productos y servicios, en armonía con el ambiente y la sociedad, que propicia un clima organizacional favorable para los trabajadores y promueve la incorporación del sector privado en el desarrollo de la industria del gas. PDVSA Gas suplente la demanda de gas metano a más de 460 mil clientes residenciales / comerciales. Adicionalmente produce 193,2 mil barriles diarios de líquidos del gas natural de los cuales la exportación de productos fraccionados alcanza un 34 por ciento.

## 1.2 Reseña histórica

El desarrollo de la industria del gas ha estado muy unido al crecimiento de la industria petrolera venezolana. La primera compañía petrolera fue la “Petrolia del Táchira” fundada en 1978 por Manuel Antonio Pulido. En 1917 comienza la exportación de petróleo y un año después se logra la aprobación de la primera ley de hidrocarburos, siendo modificada en 1920.

En 1922 se crea la Gulf Company. Un hecho importante dentro del ámbito de la industria petrolera en Venezuela sucedió el 14 de diciembre de ese mismo año, con la explosión del pozo barroso-2 en el estado Zulia. Seguidamente, en 1923, se crea Venezuela Oil Company S.A., que luego pasa a tener el nombre de Mene Grande Oil Company, destinada al desarrollo de las actividades petroleras en el país. Con la aprobación de la ley de hidrocarburos el 13 de marzo de 1943, en la cual se reconocía al estado el derecho de explorar y explotar los hidrocarburos mediante órganos descentralizados y particulares que hubiesen obtenido las respectivas concesiones, sentando las bases para la construcción de las grandes refinerías venezolanas; la industria petrolera avanza en su proceso de desarrollo de forma definitiva.

El 19 de abril de 1960 Venezuela estableció su compañía petrolera estatal: la corporación venezolana de petróleo. Durante el gobierno de Rafael Caldera, en julio de 1971, se aprueba la ley de bienes afectos a la reversión en las concesiones petroleras que reserva al estado la industria del gas natural y el mercado interno de hidrocarburos. El 30 de agosto el 1975 el gobierno de Carlos A. Pérez decreta la creación de petróleos de Venezuela S.A., PDVSA, empresa responsable de llevar a cabo las gestiones de la industria petrolera y estaría constituida por 14 empresas operadoras: CORPOVEN, LAGOVEN, MARAVEN, MENEVEN, BITOR, INTERVEN, PALMAVEN, INTEVEP, BARIVEN, LLANOVEN, CARBOZULIA, PEQUIVEN, refinería ISLA y PDV-MARINA.

El 1° de julio del siguiente año se firma en el estado Zulia la ley de nacionalización de la industria petrolera. En 1978 se reduce a 4 el número de empresas filiales

dependientes de petróleos de Venezuela: CORPOVEN, LAGOVEN, MARAVEN, MENEVEN. Durante este año se dió inicio a la exploración petrolera costa afuera donde se localizaron grandes yacimientos de gas, en el Golfo de Paria.

En 1982 se iniciaron las obras de construcción del complejo criogénico de Oriente, compuesto por una planta de extracción en San Joaquín, poliducto de 96 km (16") y una planta de fraccionamiento en Jose, estado Anzoátegui, cuenta, además con un poliducto de 8" y 56 km entre Jose y la refinería de Puerto la Cruz. En 1985 Inicia actividades el complejo criogénico de Oriente.

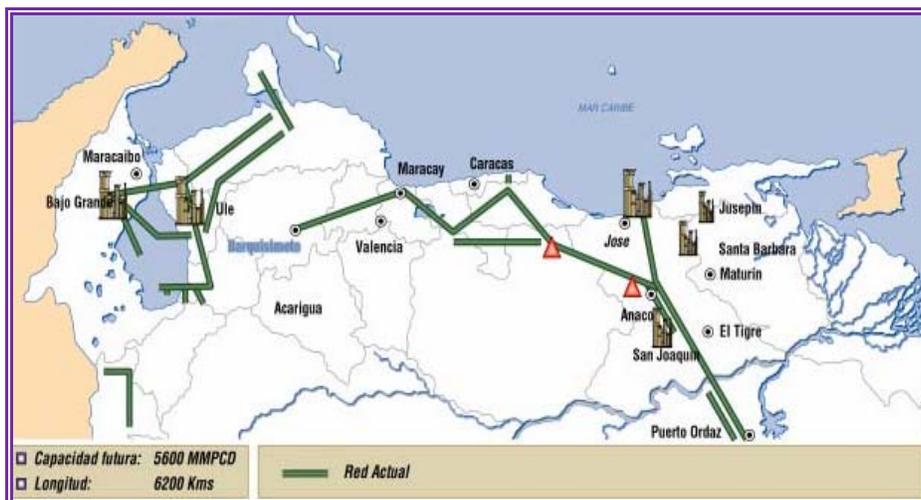
La planta extractora de San Joaquín tiene una capacidad de 23 MMPCD (millones de pies cúbicos por día) de gas y la planta fraccionadora de 70.000 BPD (barriles por días), con él se obtendrían mayores beneficios del gas natural. En los años sucesivos el ejecutivo nacional toma un conjunto de medidas con el fin de racionalizar la industria petrolera nacional.

En 1997, PDVSA decide transformar toda la corporación, fusionando las empresas filiales, en una compañía llamada PDVSA Petróleo y Gas, a la cual reportan las divisiones de exploración y producción de petróleo, servicios, manufactura y mercadeo. En 1998, se dio origen a un nuevo proceso de integración, este proceso de reorganización se hizo definitivo con la creación de PDVSA GAS, cuya principal integrante fue CORPOVEN, convirtiéndose en responsable del procesamiento, transmisión, distribución y comercialización de todo el LGN (líquidos del gas natural), metano y gas natural producido por PDVSA.

Finalmente en 1999 se promulga la ley orgánica de hidrocarburos gaseosos que representa el marco legal para el desarrollo del negocio del gas, esta ley abre el capital privado a múltiples oportunidades en distintas áreas operacionales de la industria. Entre los planes de PDVSA Gas destaca el impulso al desarrollo de los ejes norte - costero y Apure - Orinoco, e incrementar el transporte y distribución de gas a través de la interconexión Centro – Occidente.

Actualmente PDVSA GAS cuenta con una infraestructura instalada en 14 entidades federales (figura 1.1), la cual incluye 5.000 km de tubería para la transmisión y distribución del gas metano y un volumen de transmisión, de 1.950 MMPCSD en el año 2000, distribuidos en 1.330 clientes industriales en el ámbito nacional y 240.000 clientes domésticos y comerciales sólo en el área metropolitana de Caracas. Asimismo, para las operaciones de extracción y procesamiento de los líquidos del gas natural cuenta en el área de oriente, con las plantas de Jusepín, San Joaquín, Santa Bárbara, Guara Oeste, refrigeración San Joaquín y Santa Rosa y la planta de Fraccionamiento de Jose; y en el área de occidente, con las plantas de extracción: EL Tablazo I/II, Tía Juana I/II, Lama Proceso, Lama Líquido y GLP-5 y las plantas de fraccionamiento Bajo Grande y Ulé.

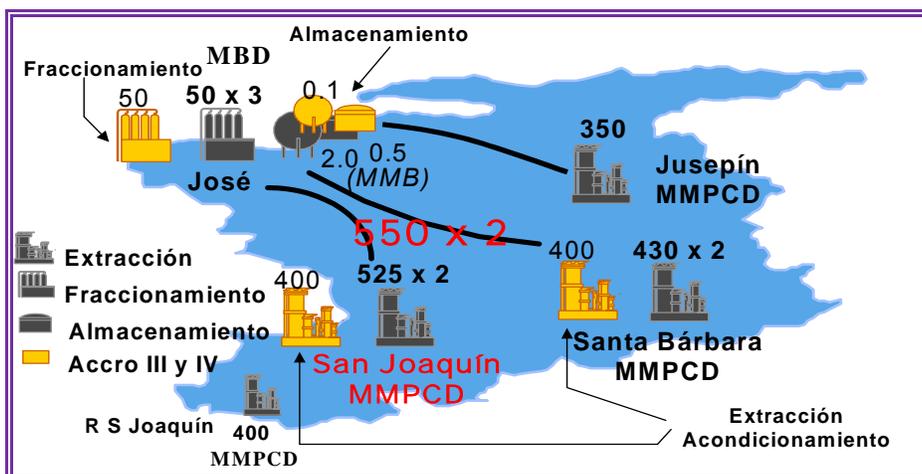
Esto se traduce en 334 km de poliductos y una capacidad de procesamiento de 4275 MMPCSD y fraccionamiento de 230 MBD (millones de barril por día). De la producción actual de LGN solo el 65 % es consumido por clientes internos, el 35 % restante se distribuye principalmente entre los EEUU (45 % del subtotal) y los países de Sudamérica (33 % del subtotal).



**Figura 1.1 Infraestructura del gas instalada en Venezuela (Planta de extracción San Joaquín, 1996)**

### 1.3 Complejo criogénico de oriente (CCO)

El complejo criogénico de oriente constituye una de las obras de mayor trascendencia para la industrialización del gas natural. Su operación se inició a finales de 1985 para extraer líquidos del gas natural y acondicionarlos para su utilización como insumo o como combustible industrial, petroquímico, comercial y doméstico. Luego ha mediado de 1992 se iniciaron las obras de ampliación de infraestructura del CCO, proyecto denominado ACCRO, con el objeto de aumentar la capacidad de procesamiento de gas. Durante el año 2000, a raíz del auge que tuvo el gas, PDVSA Gas ha iniciado el proyecto denominado ACCRO III / IV para una nueva ampliación del CCO con la participación de capital extranjero. En la figura 1.2 se muestra las plantas que conforman el complejo criogénico de oriente.



**Figura 1.2 Ubicación geográfica del complejo criogénico de oriente (Planta de extracción San Joaquín, 1996)**

#### 1.4 Planta de extracción San Joaquín

La planta de extracción San Joaquín se encuentra localizada a 12 kilómetros al oeste de la ciudad de Anaco, estado Anzoátegui; abarca un área de 70 hectáreas. Fue originalmente diseñada para procesar una alimentación nominal de 800 MMPCSD (millones de pies cúbicos estándar de gas por día) a través de dos trenes de proceso idénticos de 400 MMPCSD. Un tren común de utility (área común) fue instalado para servir a ambos trenes de proceso con instalaciones de entrada y servicios comunes.

Después de ser completadas las modificaciones a la planta de San Joaquín, cada tren podrá procesar 500 MMPCSD de gas normal (de diseño); anexando a estos un tercer tren el cual podrá procesar 400 MMPCND (millones de pies cúbicos normales por día) de gas normal (de diseño), tanto en la modalidad de rechazo de etano como en la modalidad de recuperación de etano. El producto LGN (líquidos del gas natural) recuperado es enviado por poliductos a la planta de fraccionamiento Jose para su posterior procesamiento.

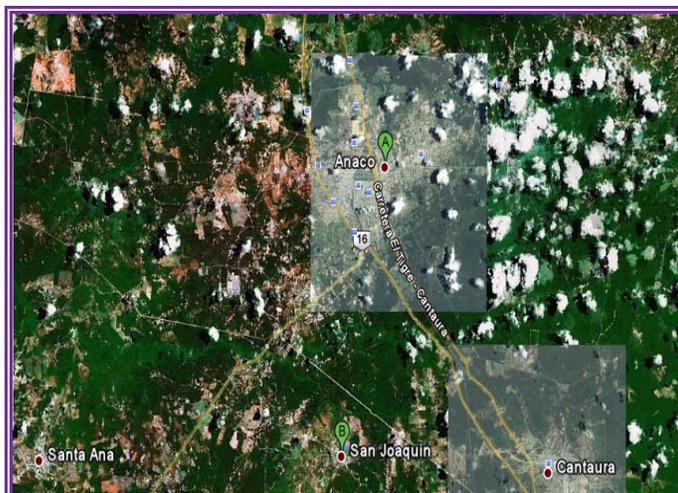
La alimentación a la planta consiste de una combinación de cinco líneas de alimentación o depuradores de entrada de gas natural provenientes de las áreas de Santa Rosa, San Joaquín, Santa Ana y El Toco. En las facilidades de entrada de la planta se instaló un quinto separador. El nuevo separador tiene una capacidad de manejo de gas de 400 MMPCSD y que puede recibir el gas que pase por los otros cuatro depuradores, cuando haga falta, dándole así mayor flexibilidad operacional a la planta.

En la modalidad de rechazo de etano, está diseñada para recuperar aproximadamente el 93% de propano contenido en las corrientes de alimentación. En la modalidad de recuperación de etano, la planta está diseñada para recuperar aproximadamente el 40% del etano contenido en la alimentación de la planta. Para extraer los componentes más importantes es necesario llevarlo a temperaturas criogénicas (menores a -110 °F). De esta manera la planta de extracción San Joaquín extrae del gas natural sus componentes livianos, metano y etano (gas residual), para consumo doméstico e industrial, además de hidrocarburos más pesados (LGN). Para lograr su objetivo a cabalidad la planta de extracción San Joaquín está compuesta por las siguientes unidades básicas:

- Instalaciones de gas de entrada.
- Deshidratación de gas de entrada mediante el uso de glicol.
- Enfriamiento del gas de entrada y Válvula J-T de alta presión.
- Deshidratación con tamices moleculares.
- Enfriamiento del gas de entrada y expansores de baja presión.
- Deetanizador/Demetanizador.
- Compresores de gas residual.
- Estabilizador.
- Sistema de aceite caliente.
- Mechurrio (flare) de emergencia.
- Sistema de gas combustible.
- Tratamiento de agua de desecho.

- Almacenaje de productos químicos.
- Sistema de agua contra incendios y agua potable.
- Sistema de aire para instrumentos.
- Generación de energía eléctrica.
- Sala de control.

A continuación en la figura 1.3 y 1.4 se detallan la ubicación geográfica y vista aérea de la empresa:



**Figura 1.3 Ubicación geográfica de Anaco y San Joaquín, estado Anzoátegui (Planta de extracción San Joaquín, 1996).**



**Figura 1.4 Vista aérea de la planta de extracción San Joaquín (Planta de extracción San Joaquín, 1996).**

### **1.5 Planteamiento del problema**

Durante las últimas décadas la contaminación de los cuerpos de agua a avanzado vertiginosamente, en tal sentido, los gobiernos se han visto en la necesidad de crear

normas que regule el vertido de los efluentes en el medio ambiente. Como es el caso del decreto 883 "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de aguas y vertidos o efluentes líquidos", fue creada el 11 de octubre de 1995 bajo la presidencia del Dr. Rafael Caldera y su objetivo principal es controlar la calidad de los cuerpos de aguas, tomando en consideración sus usos actuales y potenciales, estableciendo límites de efluentes que obligan a la creación de planes de calidad para cada uno de los cuerpos de aguas, dependiendo de los problemas de cada uno.

La planta de extracción San Joaquín, ubicada a 12 kilómetros al oeste de la ciudad de Anaco, estado Anzoátegui, está diseñada para realizar actividades de operaciones de extracción y procesamiento del gas natural rico, proveniente de los campos de Santa Rosa, San Joaquín, Santa Ana y el Toco. Como producto del proceso realizado utilizan agua para las operaciones de enfriamiento, lavados de patios y limpiezas de equipos, en donde el agua adquiere sustancias contaminantes al ambiente.

Para resolver el problema de los efluentes generados en dicho proceso se encuentra en servicio un sistema de tratamiento de efluentes industriales, el cual está integrado por una red de drenaje, un tanque de amortiguación de aguas de proceso y aguas de lluvias, una estación de bombeo y una planta de tratamiento de efluentes; esta última contempla tres tipos de tratamiento: un tratamiento primario basado en la separación de grasas, aceites y sólidos suspendidos por métodos físicos, un tratamiento secundario que consta de la remoción de materia orgánica por tratamiento biológico aeróbico y finalmente una etapa de tratamiento terciario que consiste en una cloración al efluente para la reducción de microorganismos patógenos.

Actualmente la planta de tratamiento de aguas industriales no cumple con su filosofía de diseño, solo ocurre la remoción de materia orgánica mediante el proceso biológico. En este sentido se evaluará el proceso biológico del sistema de tratamiento, para esto se harán análisis fisicoquímicos al afluente y el efluente de la planta; se determinarán los parámetros operacionales, con el fin de verificar su incidencia en la eficiencia del proceso.

Este proyecto será de gran importancia para la empresa puesto que permitirá conocer si el funcionamiento, operación y mantenimiento es el adecuado para dicho sistema, así como también si los efluentes que son vertidos a los cuerpos de aguas naturales aledaños a la planta de extracción de LGN (líquidos del gas natural) están dentro de los parámetros del decreto 883, sujetando el hecho de posibles recomendaciones.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

Evaluar el proceso biológico del sistema de tratamiento de efluentes industriales en una planta de extracción de líquidos del gas natural ubicada en San Joaquín, estado Anzoátegui.

**1.6.2 Objetivos específicos**

1. Verificar el funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta de tratamiento de efluentes industriales.
2. Medir las variables operacionales del proceso biológico.
3. Estimar la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la demanda química de oxígeno (DQO).
4. Hacer propuestas que permitan el buen funcionamiento del proceso biológico.

## **CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes**

Rojas (2005) realizó un estudio de la factibilidad de implementar un polímero el cual mejore las condiciones en el sistema de tratamiento de efluentes industriales en el criogénico San Joaquín, con la finalidad de que el sistema sea más eficiente; observó que el polímero implementado disminuyó en un 80% la materia orgánica presente en el efluente, el cual contribuye a la preservación y el buen desarrollo del medio ecológico (Rojas 2005).

González (2000) realizó una evaluación diagnóstica de planta de tratamiento de aguas residuales los Olivos, Puerto Ordaz, estado Bolívar con el fin de verificar si el diseño y funcionalidad de las unidades operacionales son el adecuado para que el efluente cumpla con la normativa ambiental vigente; además de tomar en cuenta la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua residual a la entrada y salida de la planta de tratamiento y en cada unidad operacional. Dando como resultado que los valores encontrados para estos parámetros no cumplen con el decreto 883 y por ende no satisfacen los requerimientos exigidos por el Ministerio de ambiente y de los recursos naturales (González, 2000).

Nieves (1996) realizó un manual del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín para el personal de operaciones, con el fin de tomar en cuenta los límites operacionales que pueden ser establecidos por las variables de procesos, de esa manera los operadores podrán actuar inmediatamente cuando un parámetro sale de rango y determinar que acción correctiva es la apropiada (Nieves, 1996).

Rodríguez (1993) desarrolló un manual con el objetivo de identificar los parámetros críticos que inciden sobre la operación de los procesos involucrados en la misma, así como también, para el monitoreo diario de la operación de la planta y el control de su desempeño con el objetivo de eliminar daños al ambiente provenientes de la descarga de aguas de desechos contaminadas (Rodríguez, 1993).

A diferencia de los antecedentes antes mencionados, los cuales se abocan a la solución de problemas específicos presentados en tratamiento de aguas. La investigación que se realizó, tuvo un amplio enfoque en la evaluación del proceso biológico en una planta de tratamiento de efluentes industriales a través de los parámetros operacionales y la calidad fisicoquímica de los efluentes generados por dicha empresa, para de esta manera logra una mejora en la eficiencia del mismo, tomando en cuenta la operación, el funcionamiento y mantenimiento del sistema global.

### **2.2 Aguas residuales**

Las aguas residuales es esencialmente el agua de que se desprende la comunidad o proceso una vez ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido

empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, se puede definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimiento industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1995). Las instalaciones diseñadas para purificar las aguas residuales se denominan plantas de tratamientos y empezaron a desarrollarse ante la necesidad de velar por la salud pública y evitar condiciones adversas provocadas por las descargas del agua residual en el ambiente (Rivas, 1978).

### **2.3 Composición de los caudales del agua residual**

La composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad depende del tipo de fuente que la origina, así como el sistema de recogida que se emplee, en líneas generales en un caudal suele haber una mezcla de todas las aguas incluso aguas de infiltración desconocida, y pueden incluir los siguientes componentes (Metcalf y Eddy, 1995):

1. Agua residual doméstica (o sanitaria). Procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
2. Agua residual industrial. Agua residual en la cual predomina vertidos industriales. Varían en su composición de acuerdo con las operaciones de la industria.
3. Infiltración y aportaciones incontroladas. Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas pluviales, drenes de cimentaciones, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.
4. Aguas pluviales. Agua resultante de la escorrentía superficial.

### **2.4 Muestreo de las aguas residuales industriales**

Las técnicas de muestreos utilizadas en un estudio de aguas residuales deben asegurar la obtención de muestras representativas, ya que los datos que se deriven de los análisis de dichas muestras serán, en definitiva, la base para el proyecto de las instalaciones de tratamiento y de ajuste cuando las instalaciones existen. No existen procedimientos universales de muestreo estos deben diseñarse específicamente para cada situación. A los efectos de la planificación del muestreo deben tomarse en cuenta las siguientes previsiones: selección del (los) punto(s) de muestreo; período y frecuencia de muestreo que se establecerá de acuerdo al ritmo de producción, funcionamiento y/u operación de la actividad; número de tipos de muestra (simple o compuestas), volumen, manejo y preservación de las mismas.

Las estaciones de muestreo deben de estar ubicadas de tal forma que puedan proporcionar las características del flujo con condiciones de mezcla máximo para ese cuerpo de agua, también debe considerarse que la velocidad del flujo en el punto de

toma sea lo suficientemente alto para asegurar que no se depositen sólidos. En el momento de tomar las muestras, es conveniente asegurar que no se formen excesivas turbulencias que pudieran liberar gases disueltos, lo cual conduciría a la toma de una muestra no representativa. El sitio de muestreo debe ser de fácil acceso, ya que mientras más fácil sea la toma mejor será la ejecución de la misma.

Los equipos de muestreo pueden ser manuales o automáticos (bomba peristáltica, entre otros), dependiendo de la localización de la muestra, de las condiciones hidráulicas del sistema, de la naturaleza del desecho, del tipo de análisis, del periodo de muestreo, de la preservación de las muestras, entre otros. El equipo manual es muy común y consiste de latas delgadas, botellas de plásticos y vidrio, con algunos arreglos, como soportes, en el caso de muestras profundas.

Luego del muestreo se deben señalar los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que serán analizados, los cuales dependen de cada actividad y sustancias utilizadas en el proceso productivo. Los análisis, así como el muestreo, preservación de las muestras, entre otros, se deben llevar a cabo siguiendo las metodologías establecidas por los procedimientos de los métodos normalizados para cada parámetro a evaluar (Metcalf y Eddy, 1995).

## **2.5 Métodos para el medir el caudal**

La posibilidad de medir los caudales del agua residual es de fundamental importancia a la hora de proyectar los sistemas de saneamiento. Para la obtención de un diseño adecuado a las necesidades, es preciso conocer datos fiables sobre los caudales que se quiere tratar. La selección eficaz del método para la medición del caudal exige un conocimiento del proceso y del fluido que se quiere medir. Los dos métodos principales de medidas de caudales son:

1. Descarga directa: son aquellos donde magnitud de la descarga es función de una o dos variables fácilmente medibles. Algunos métodos de descargas directas son:

- Vertederos: uno de los métodos más exactos para medir caudales es mediante el uso de un vertedero, siempre y cuando las condiciones bajo las que se determinaron los coeficientes de descarga de cierto tipo de vertedero se produzcan aproximadamente en los aforos. Los vertederos pueden ser: triangulares rectangulares y trapezoidales, también se pueden encontrarse vertederos sumergidos.
- Placa orificio: este método consiste en insertar en una conducción cerrada una placa que tiene una abertura cilíndrica en el centro. El caudal se determina a partir de las lecturas de las presiones diferenciales.
- Tubos de Venturi: se utiliza para medir caudales en conducciones cerradas, consta de tres partes: un cono de entrada, en el cual el diámetro de la tubería se reduce gradualmente; una garganta o sección contraída y un cono de salida, donde el diámetro aumenta gradualmente hasta el de la tubería en la que se inserta el medidor. La garganta en los tubos normalizados varía entre un quinto y tres cuartos del diámetro de la tubería y su longitud es aproximadamente igual al diámetro. Se inserta un piezómetro diferencial en la garganta y en la porción recta de la entrada, la determinación del caudal

de agua que fluye se basa en la diferencia de presiones indicadas entre la entrada y en la garganta del medidor.

- Medida volumétrica: se mide el volumen del fluido descargado en un periodo especificado de tiempo. Generalmente se puede hacer solo con caudales bajos, para el cálculo de dicho método se emplea la siguiente expresión:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

Q: caudal ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

V: volumen ( $\text{m}^3$ )

t: tiempo (d)

2. Velocidad-área: este método determina el caudal, multiplicando la velocidad de flujo por la superficie de la sección recta donde circula el caudal, para el cálculo de este método se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = V \times A \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

V: Velocidad del flujo (m/s)

A: Área de la sección mojada ( $\text{m}^2$ )

La velocidad del flujo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

L: Longitud (m)

t: tiempo (d)

El área de la sección mojada se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$A = B \times H \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

B: ancho del canal (m)

H: Altura del agua (m)

Si se sustituyen las ecuaciones 2.3 y 2.4 en la ecuación 2.2 se tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{L \times B \times H}{t} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

La obtención de la velocidad del flujo puede ser medida con flotadores. En alcantarillas son muy raramente usados, excepto en canales rectangulares o para la determinación aproximada entre dos pozos de registro. Se utilizan tres tipos de flotadores: superficial, sumergido y de varilla (Metcalf y Eddy, 1995).

## **2.6 Características de las aguas residuales**

Las características de las aguas residuales varían ampliamente de industria a industria, los procesos de tratamientos también son muy variables. No obstante, las características de dichas aguas influirán sobre la tecnología a emplear en la depuración de las mismas a fin de cumplir los requerimientos de vertidos. Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.6.1 Características físicas**

Los aspectos físicos dan una información muy clara de determinadas características del agua. Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **A. Sólidos totales**

Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación a entre 103 y 105 °C. No se define como sólida aquella materia que se pierde durante la evaporación debido a su alta presión de vapor. Los sólidos sedimentables hacen referencia a aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de mg/l, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Los sólidos totales, o residuos de la evaporación, pueden clasificarse en filtrable o no filtrable haciendo pasar un volumen conocido de líquido por un filtro.

Los sólidos que pasan se denominan disueltos (filtrables) y los que son retenidos por el filtro son sólidos en suspensión (no filtrables). Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación, para eliminarla es necesario la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación. Las ecuaciones para el cálculo de los sólidos son las siguientes (Metcalf y Eddy, 1995):

- **Sólidos totales**

Los sólidos totales de la muestra se calculan mediante la siguiente expresión:

$$S_T = \frac{(B - A)}{C} \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

$S_T$ : sólidos totales (mg/l)

A: masa del crisol vacío (mg)

B: masa del crisol con muestra (mg)

C: volumen de muestra analizada (ml)

- Sólidos volátiles

Los sólidos volátiles se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$S_V = \frac{(B - D)}{C} \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

$S_V$ : contenido de sólidos volátiles (mg/l)

D: masa del crisol después de incinerar la muestra (mg)

- Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos se calculan mediante la siguiente expresión:

$$S_S = \frac{(P_b - P_a)}{V} \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

$S_S$ : sólidos suspendidos (mg/l)

$P_a$ : masa del disco de filtrado vacío (mg)

$P_b$ : masa del disco de filtrado con residuo (mg)

V: volumen de muestra analizada (ml)

## A. Olores

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento.

Esto es de particular interés cuando se trata de precisar la necesidad de aplicar al agua residual ciertos tratamientos adicionales o el prever el comportamiento de otros en función a tal circunstancia. El olor, además, puede indicar o hacer sospechar la presencia de ciertos residuos industriales de interés para el ingeniero, cuando se trata de

establecer antecedentes que ayuden a fijar los métodos de acondicionamiento y estabilización de este despojo (Metcalf y Eddy 1995, Rivas 1978).

### **B. Temperatura**

Las aguas residuales industriales tienden a presentar una temperatura superior a la de los cursos de agua. La temperatura del agua es un parámetro importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles, no es un factor crítico cuando se encuentra por debajo de los 37°C siempre que se valla a proceder a un tratamiento biológico de las mismas. La viscosidad de las aguas residuales se incrementa al disminuir la temperatura, provocando una separación de los sólidos más difícil. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y 35 °C (Metcalf y Eddy 1995, Perry 1992).

### **C. Densidad**

Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fango de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento. La densidad de un agua residual se define como su masa por unidad de volumen, expresada en  $\text{kg/m}^3$ . Tanto la densidad como el peso específico, dependen de la temperatura y varían en función de la concentración total de sólidos en el agua residual (Metcalf y Eddy, 1995).

### **D. Color**

Este término se refiere a la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y olor. El agua residual reciente suele tener un color grisáceo, cuando su color es muy oscuro indica que el agua se encuentra contaminada. Es de particular interés en los efluentes de plantas de tratamiento cuando son vertidos en masas hídricas receptoras (Rivas, 1978).

### **E. Turbiedad**

Nos permite tener una idea de la cantidad de materia extraña en suspensión que pueden estar presentes en las aguas residuales, en especial: arcillas, limo, materia orgánica finamente dividida u organismos microscópicos. Se utiliza, mayormente, para apreciar la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación de la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones (Rivas 1978, Metcalf y Eddy 1995).

## 2.6.2 Características químicas

### A. Compuestos orgánicos

La composición orgánica de las aguas residuales industriales varía ampliamente, sobre todo debido a la diferencia de materias primas empleadas en cada industria. Están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos de nitrógeno. Estas sustancias orgánicas incluyen proteínas, hidratos de carbono, grasa y aceites, productos petroquímicos, moléculas de alta y baja masa molecular, sólidos y líquidos. Además, dentro de una industria se producen corrientes de aguas residuales de características variables. Los ensayos de laboratorios más significativos que representan el poder polucional lo constituye: la prueba del quinto día para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico (COT) (Perry, 1992).

#### A.1 Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO)

Esta determinación es, hasta el momento, la de mayor significación dentro de los análisis aplicados a las aguas residuales y a las masas hídras receptoras. La DBO, en conjunto con la demanda química del oxígeno (DQO), es capaz de evaluar la materia responsable de la polución de las aguas naturales en forma más exacta aún que la que se obtiene a través de la determinación de los sólidos totales contenidos en aguas polutas.

La DBO es la cantidad de oxígeno requerido para la respiración de los microorganismos responsables de la estabilización (oxidación) de la materia orgánica a través de su actividad metabólica en medio aerobio, la demanda bioquímica de oxígeno representa indirectamente una medida de la concentración de la materia orgánica biodegradable contenida en el agua. Como consecuencia de una actividad biológica, la DBO está influenciada, principalmente, por los factores tiempo y temperatura (Rivas, 1978).

#### A.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

Representa una medida de la cantidad de materia carbonosa contenida en los diferentes tipos de materias orgánicas presentes en las aguas residuales, es utilizada, al igual que la DBO, como una expresión del poder polucional de un agua. En especial, de aguas residuales, mayormente industriales, que contienen compuestos tóxicos a los microorganismos responsables de la descomposición de esa materia orgánica (Rivas, 1978).

### B. pH y alcalinidad

La concentración del ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. Las aguas residuales deben tener valores de pH entre 6 y 9 para que provoquen un mínimo impacto ambiental. Las aguas residuales con valores de pH inferiores a 6 tenderán a ser corrosiva debido al exceso de iones de hidrógenos. Por otra parte, las aguas que presentan pH superiores a 9 tenderán

a ser incrustante, causando problemas de depósitos debido a la precipitación de los iones metálicos como carbonatos o como hidróxidos. La alcalinidad es importante para mantener los valores de pH en niveles adecuados, la alcalinidad bicarbonatada ayuda a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácido (Perry, 1992).

### **C. Compuestos inorgánicos**

Los compuestos inorgánicos presentes en la mayoría de las aguas residuales industriales derivan de la capacidad de transporte del agua. Las aguas blandas presentan concentraciones inferiores de compuestos inorgánicos que las aguas duras o las aguas saladas. Además hay aguas residuales industriales que contiene altas concentraciones de compuestos inorgánicos como resultado de la incorporación al agua de sustancias químicas durante los procesos de fabricación (Perry, 1992).

### **D. Nitrógeno**

El nitrógeno es esencial para el crecimiento de protista y plantas, razón por la cual reciben el nombre de nutriente o bioestimulador. Es el principal elemento nutritivo, puesto que es absolutamente básico para la síntesis de proteínas, será preciso conocer datos sobre la presencia del mismo en las aguas, y en que cantidades para valorar la posibilidad de tratamiento de las aguas residuales domésticas o industriales mediante procesos biológicos (Metcalf y Eddy, 1995).

### **E. Fósforo**

El fósforo también es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales y a través de las escorrentías naturales (Metcalf y Eddy, 1995).

### **F. Oxígeno disuelto (OD)**

Es la cantidad de oxígeno disuelto en agua para cierto tiempo, expresado en ppm, el oxígeno disuelto es un factor ambiental crítico para los cursos de aguas y son necesarios para la respiración de los microorganismos aeróbicos. Sin embargo el oxígeno es solo ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno y otros gases pueden estar presente en la solución, viene condicionada con los siguientes aspectos: (1) solubilidad, (2) presión, (3) temperatura y (4) pureza del agua (salinidad, sólidos en suspensión, etc.) (Metcalf y Eddy, 1995).

### **G. Aceites y grasas**

La presencia de aceites y grasas en el agua residual puede provocar problemas tanto en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento. Si no se elimina el contenido de grasa antes del vertido del agua residual, puede interferir con la vida biológica en aguas superficiales crear películas y acumulaciones de materias flotantes

desagradables. El contenido de grasa se determina por extracción de la muestra con triclorotrifluoroetano, debido a que la grasa es soluble en el, también es posible la extracción de otras sustancias como el keroseno entre otras (Metcalf y Eddy 1995, Perry 1992).

### **2.6.3 Características biológicas**

Los componentes orgánicos de las aguas residuales es un medio del cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos, todos los organismos que se encuentran en el agua son elementales en el momento de establecer el control de la calidad de la misma. En los sistemas de tratamiento de agua, es importante conocer los grupos de microorganismos biológicos presentes tanto en aguas residuales como aquellos que intervienen en el proceso biológico. Algunas características biológicas del agua residual se definen a continuación (Metcalf y Eddy 1995):

#### **a. Hongos**

Los hongos son protistas eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioterótrofos; basan su alimentación en materia orgánica muerta. Junto con las bacterias, los hongos son los responsables de la descomposición del carbono en la biosfera. Desde el punto de vista ecológico, presentan ciertas ventajas sobre las bacterias: pueden crecer y desarrollarse en zonas de baja humedad y en ámbitos con pH bajos (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **b. Protozoos**

Son microorganismos eucariotas cuya estructura está formada por una sola célula abierta. La mayoría de los protozoos son aerobios o facultivamente quimioheterótrofos anaeróbicos, aunque se conocen algunos anaerobios. Los protozoos se alimentan de bacterias y otros microorganismos microscópicos. Tienen una importancia tanto en el funcionamiento de los tratamientos biológicos como en la purificación de cursos de aguas ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **c. Bacterias**

Las bacterias se pueden clasificar como eubacterias procarióticas unicelulares. El papel que desempeñan en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento, es amplio y de gran importancia. La mayoría son inofensivas ya que consumen la materia orgánica y como productos extracelulares generan inhibidores de organismos patógenos (Metcalf y Eddy, 1995)

#### **d. Algas**

Las algas pueden presentar serios inconvenientes en las aguas superficiales, puesto que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables. Este fenómeno se conoce con el nombre de crecimiento explosivo, puede conducir a que ríos,

lagos y embalses se cubran con grandes colonias flotantes de algas (Metcalf y Eddy, 1995)

#### **e. Virus**

Los virus son partículas parasíticas por un cordón de material genético ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (RNA) con una capa de recubrimiento proteínico. Los virus excretados por los seres humanos pueden representar un importante peligro en la salud pública. Se sabe con certeza que algunos virus pueden sobrevivir hasta 41 días, tanto en aguas limpias como residuales a la temperatura de 20°C, y hasta 6 días en un río normal (Metcalf y Eddy, 1995)

### **2.7 Tratamiento de las aguas residuales**

Las aguas residuales antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, al límite de evitar que su disposición provoque los problemas enunciados de polución y de contaminación de las aguas de recibimiento. El grado de tratamiento requerido en cada caso, para las aguas residuales, deberá responder a las condiciones que acuse los receptores en los cuales se haya previsto su vertimiento (Rivas, 1978).

### **2.8 Clasificación de los métodos de tratamientos de las aguas residuales**

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios. A pesar de que estas operaciones y procesos se utilizan conjuntamente en los sistemas de tratamientos, se considera ventajoso estudiar las bases científicas de cada uno de ellos por separado, ya que los principios básicos son comunes (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **2.8.1 Operaciones físicas unitarias**

Los métodos de tratamientos en los que predomina la acción de fuerzas físicas se conocen como operaciones físicas unitarias, fueron los primeros en ser aplicados al tratamiento de las aguas residuales. El desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración son operaciones unitarias típicas (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **2.8.2 Procesos químicos unitarios**

Los métodos de tratamiento en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se consigue con la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas, se conoce como procesos químicos unitarios. Fenómenos como la precipitación, adsorción y la desinfección son ejemplos de los procesos de aplicación más común en el tratamiento de las aguas residuales. En la

precipitación química, el tratamiento se lleva a cabo produciendo un precipitado que se recoge por sedimentación, no solo contiene los constituyentes que pueden haber reaccionado con los productos químicos añadidos, sino que también estará compuesto por algunas sustancias arrastradas al fondo durante la sedimentación del precipitado. La adsorción es un proceso mediante el cual se eliminan compuestos específicos de las aguas residuales sobre superficies sólidas basándose en las fuerzas de atracción entre cuerpos (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.8.3 Procesos biológicos unitarios**

Los procesos de tratamientos en los que la eliminación de los contaminantes se lleva a cabo gracias a la actividad biológica se conocen como procesos biológicos unitarios. La principal aplicación de los procesos biológicos es la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradable presentes en el agua residual en forma, tanto coloidal, como en disolución. Básicamente, estas sustancias se convierten en gases, que se liberan a la atmósfera, y en tejido celular biológico, eliminable por sedimentación. Los tratamientos biológicos también se emplean para eliminar el nitrógeno. Mediante un adecuado control el agua residual se puede tratar biológicamente en la mayoría de los casos (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.9 Métodos de tratamiento**

Los procesos y operaciones unitarias se combinan y complementan para dar lugar a diversos niveles de tratamiento de las aguas. Históricamente, los términos pretratamiento y/o tratamiento primario se refería a las operaciones físicas unitarias; el termino secundario se refería a los procesos químicos o biológicos unitarios, y se conocía con el nombre de tratamiento terciario o avanzado, a las combinaciones de los tres. Estos términos son arbitrarios, el principal objetivo es establecer el nivel de eliminación de contaminantes (tratamiento) necesarios antes de reutilizar o verter las aguas residuales al medio ambiente. Basándose en consideraciones fundamentales, se puede agrupar diferentes operaciones y procesos unitarios para alcanzar el nivel de tratamiento adecuado (Metcalf y Eddy, 1995).

#### **2.9.1 Tratamiento preliminar**

Se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Como ejemplo de pretratamiento se pueden citar el desbaste y dilaceración para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa que puedan causar obstrucciones en los equipos y un desgaste excesivos en los mismos (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.9.1.1 Desbaste**

La primera operación que tiene lugar en las plantas de tratamiento es la operación de desbaste. Una rejilla es un elemento con aberturas, generalmente de tamaño uniforme, que se utiliza para retener los sólidos gruesos existentes en el agua residual. Los elementos separadores pueden estar constituidos por barras, alambres o varillas paralelas, rejillas, telas metálicas o placas perforadoras, y las aberturas pueden ser de cualquier forma, aunque normalmente suelen ser ranuras rectangulares u orificios circulares (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.9.1.2 Homogeneización**

Esta medida se emplea para solventar los problemas que las variaciones de éstos provocan en las instalaciones y para mejorar la efectividad de los procesos de tratamiento situados aguas abajo. Este sistema permite reducir las concentraciones de los diferentes constituyentes y amortiguar los caudales de forma considerable. La homogeneización reduce las cargas de choque que podrían ser un problema para el sistema biológico, esto mediante la dilución de las sustancias inhibitoras y la estabilización del pH, mejora la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria al trabajar con cargas de sólidos constantes y además mejora el control de la dosificación de los químicos en el tratamiento fisicoquímico (Metcalf y Eddy, 1995).

### **2.9.1.3 Remoción de grasa y aceites**

Las grasas y los aceites tienden a formar capas insolubles con el agua a causa de su carácter hidrófobo, estas sustancias pueden separarse fácilmente de la fase acuosa por gravedad y arrastre superficial, siempre que no se encuentren íntimamente mezclada con el agua. Los aceites cuando están en el agua, pueden emulsionarse debido a la presencia de surfactantes y emulsificantes. Existen dos tipos de emulsiones: aceite en agua, en el cual todo el aceite ha sido emulsionado y dispersado en la fase agua, y agua en aceite en el cual el agua es emulsificada en el aceite. En ambos casos se llama fase continua o externa a la que sirve como medio y la fase interna o inerte se encuentra dispersada o emulsificada en diminutas gotas.

Un efluente aceitoso puede ser una combinación de aceite libre o no emulsificado, aceite emulsificado y sólidos insolubles, por lo tanto, la eliminación del aceite libre se realiza por diferencia de densidades y el emulsificado por tratamiento químico y separación por unidades de flotación. Los equipos usados para la separación son los separadores API y CPI (eliminación de aceite libre), y las unidades de flotación de aire DAF (eliminación de aceite emulsionado) (Metcalf y Eddy 1995, Nalco 1998).

## **2.9.2 Tratamiento primario**

Consiste provocar una separación física de tales sustancias al límite que no interfieran con los subsiguientes pasos del acondicionamiento o que reduzcan, apreciablemente, las cargas procesales (orgánicas) de las otras unidades de tratamiento. El objetivo del

tratamiento de las aguas residuales es la eliminación de contaminantes con el mismo coste, elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante técnicas de separación físicas como el tamizado y la sedimentación o química, gestionándose posteriormente como lodos (Metcalf y Eddy, 1995, Perry 1992).

#### **2.9.2.1 Precipitación química (coagulación-floculación)**

Los sólidos en suspensión de baja densidad y los sólidos coloidales pueden eliminarse mediante precipitación química y sedimentación por gravedad. En efecto la precipitación química se emplea para aglomerar los sólidos en suspensión no sedimentables generando partículas más grandes que sedimenten rápidamente en los decantadores. La coagulación describe el efecto producido por la adición de un producto químico, a una dispersión coloidal, que se traduce en la estabilización de las partículas por una reducción de aquellas fuerzas que tienden a mantenerlas separadas.

El proceso de coagulación comprende tres etapas: mezcla rápida para coagulación, neutralización de cargas y agitación (para aumentar el número efectivo de colisiones). Se usan tradicionalmente una serie de sustancias químicas coagulante tales como: el cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, alumbre, cal, cloruro lumínico y carbonato de sodio. La elección del coagulante depende de las características químicas particular a eliminar, el pH de las aguas residuales, del costo mínimo y de la disponibilidad del agente precipitante.

La floculación consiste en la agrupación de las partículas descargadas cuando se ponen en contacto una con otra. Ésta es la segunda fase de formación de partículas sedimentables, a partir de partículas desestabilizadas de tamaño coloidal. La floculación se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos. Los flóculos pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánicos), su origen (anódico, catiónico o no iónico) (Perry 1992, Rivas 1978).

#### **2.9.3 Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario persigue la estabilización de distintos compuestos presentes en las aguas residuales mediante la acción de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos presente se denominan en su conjunto como biomasa. El tratamiento consiste en un proceso biológico de oxidación donde la materia orgánica putrescible es descompuesta con la ayuda de la biomasa en medio controlado aerobio, en compuestos estables de composición más sencilla, al límite de transformar muchos de los complejos orgánicos normalmente presentes en esta agua residuales, en dióxido de carbono, agua y compuestos simples nitrogenados (Perry 1992, Rivas1978).

##### **2.9.3.1 Proceso de lodos activados**

En el proceso de lodos activados el residuo orgánico se introduce en un reactor, en el que se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de "líquido mezcla". En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a





$$\frac{dX}{dt} \cdot V_r = Q_0 \cdot X_0 [Q_w \cdot X_r + Q_e \cdot X_e] + V_r (r'_g) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

$\frac{dX}{dt}$ : variación de la concentración de microorganismos acumulados en el reactor con respecto al tiempo ( $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )

$V_r$ : volumen del reactor ( $\text{m}^3$ )

$Q_0$ : caudal del afluente ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$X_0$ : concentración de microorganismos en el afluente ( $\text{mg}/\text{l}$ )

$Q_w$ : caudal de purga del sistema ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$X_r$ : concentración de microorganismos en la purga del sistema ( $\text{mg}/\text{l}$ )

$Q_e$ : caudal del efluente del sedimentador ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$X_e$ : concentración de microorganismos en el efluente del sedimentador ( $\text{mg}/\text{l}$ )

$r'_g$ : tasa neta de crecimiento bacteriano ( $\text{mg}/\text{l}$ )

La tasa neta de crecimiento bacteriano se define como:

$$r'_g = -Y \cdot r_{su} - k_d \cdot X_a \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

$Y$ : coeficiente de producción máxima medido durante cualquier periodo de la fase de crecimiento exponencial, definido como la relación entre la masa de las células formadas y la masa de substrato consumido ( $\text{kg}/\text{kg}$ )

$r_{su}$ : tasa de utilización de substrato ( $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ )

$k_d$ : coeficiente de composición endógena ( $\text{d}^{-1}$ )

$X_a$ : concentración de microorganismos en el reactor ( $\text{mg}/\text{l}$ )

Sustituyendo la ecuación 2.11 en la 2.10 y suponiendo que la concentración de las células en el afluente es nula t que prevalecen condiciones estacionarias ( $d_x/dt=0$ ), se obtiene:

$$\frac{Q_w \cdot X_r + Q_e \cdot X_e}{V_r \cdot X_a} = -Y \cdot \frac{r_{su}}{X_a} - k_d \quad (\text{Ec. 2.12})$$

El término de la izquierda de la ecuación 2.12 es el inverso del tiempo medio de retención celular, por lo tanto la ecuación queda:

$$\frac{1}{\theta_c} = -Y \cdot \frac{r_{su}}{X_a} - k_d \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

$\theta_c$ : tiempo medio de retención celular (h)

El término  $r_{su}$  se determina por medio de la siguiente expresión:

$$r_{su} = -\frac{Q}{V_r} \cdot (S_0 - S_e) = \frac{S_0 - S_e}{\theta} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

donde:

$(S_0 - S_e)$ : concentración de sustrato utilizado (mg/L)

$S_0$ : concentración de sustrato en el afluente (mg/L)

$S_e$ : concentración de sustrato en el efluente (mg/L)

$\theta$ : tiempo de retención hidráulica (d)

La concentración de microorganismos en el reactor,  $X_a$ , se puede determinar sustituyendo la ecuación 2.14 en la 2.13 y despejando el valor de  $X_a$ :

$$X_a = \frac{\theta_c}{\theta} \cdot \frac{Y \cdot (S_0 - S)}{(1 + k_d \cdot \theta_c)} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Haciendo un balance del sustrato, se obtiene que la concentración de sustrato en el efluente es:

$$S_e = \frac{k(1 + k_d \cdot \theta_c)}{\theta_c(Y \cdot k - k_d) - 1} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde:

$k_s$ : constante de velocidad mitad, concentración de sustrato a la mitad de la máxima tasa de crecimiento (mg/L)

$k$ : tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos ( $d^{-1}$ )

### 2.9.3.2 Relaciones para el diseño y control del sistema de lodos activado

Es importante considerar ciertas relaciones para el diseño y control del proceso entre las cuales es importante destacar (Ramalho, 1991):

#### a. Tiempo de retención hidráulico del sistema

El tiempo de retención hidráulico se define como:

$$\theta_s = \frac{V_T}{Q_0} = \frac{V_r + V_s}{Q_0} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

$\theta_s$ : Tiempo de retención hidráulica del sistema (h)

$V_T$ : volumen del reactor mas el volumen del tanque sedimentador ( $m^3$ )

$V_r$ : Volumen del reactor ( $m^3$ )

$V_s$ : Volumen del tanque de sedimentación ( $m^3$ )

El tiempo de retención hidráulico del reactor se define como:

$$\theta = \frac{V_r}{Q_0} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

### b. Tiempo de retención celular

El tiempo medio de retención celular se define como la masa de microorganismo del reactor dividido por la masa diaria de microorganismo purgada en el sistema, viene dado por la siguiente expresión:

$$\theta_c = \frac{V_r \cdot X_a}{Q_w \cdot X_r + Q_e \cdot X_e} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

### c. Tasa de utilización específica

La tasa de utilización específica se puede calcular de la siguiente manera:

$$U = -\frac{r_{su}}{X_a} = \frac{S_0 - S_e}{\theta \cdot X_a} = \frac{Q_0 (S_0 - S_e)}{V_r \cdot X_a} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Si se sustituye el término U por  $(-r_{su}/X_a)$  en la ecuación 2.13, la ecuación que resulta es:

$$\frac{1}{\theta_c} = U \cdot Y - k_d \quad (\text{Ec. 2.21})$$

### d. Relación alimento microorganismo

Uno de los términos de gran importancia para el control del proceso es el factor de carga, definido como la relación entre la materia orgánica biodegradable (alimento) y los microorganismos presentes en el reactor (F/M), la relación alimento microorganismos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta \cdot X_a} = \frac{Q_0 \cdot S_0}{V_r \cdot X_a} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

En los procesos de lodos activados, la relación F/M varía entre 0,3 y 0,6; situándose el valor óptimo alrededor de 0,45, (Ramalho).

Los términos U y (F/M) están relacionados por el rendimiento del proceso en la forma:

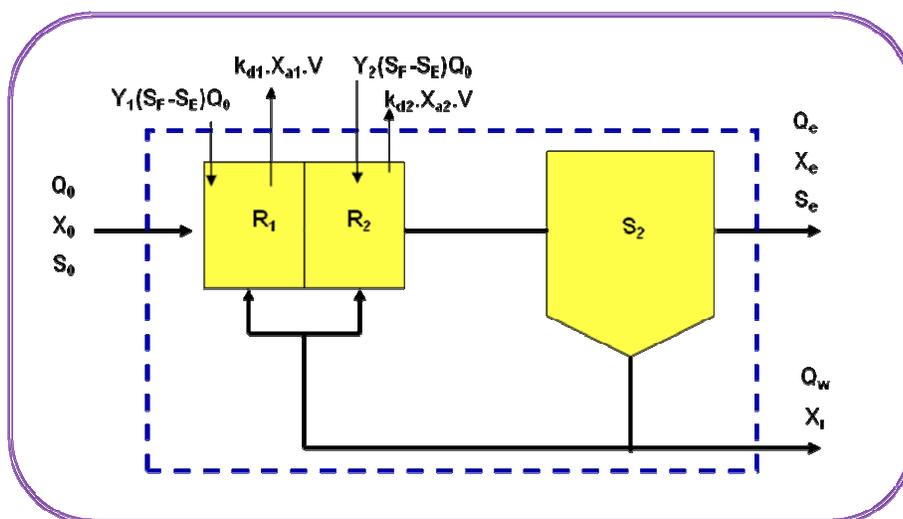
$$U = \frac{(F/M) \cdot E}{100} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

donde E es el rendimiento del proceso, cuya definición es la siguiente:

$$E = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

### e. Producción total de lodos del sistema

La corriente de purga contiene sólidos en suspensión volátil y no volátil. La expresión de los lodos totales en la corriente de purga se puede obtener mediante un balance global de sólidos volátiles en suspensión (figura 2.2) en toda la planta como se muestra a continuación:



**Figura 2.2 Balance global del sistema de tratamiento de lodos activados en la planta de extracción San Joaquín**

En condiciones de equilibrio se tiene:

$$\text{Entra} = \text{Sale}$$

$$(Y_1 + Y_2)(S_0 - S_e)Q_0 + Q_0 X_0 = Q_w X_r + (k_{d1} \cdot X_{a1} + k_{d2} \cdot X_{a2}) V + Q_e \cdot X_e \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Los sólidos volátiles en la corriente de purga se pueden calcular mediante la siguiente ecuación:

$$(Vss)_w = Q_w X_r \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Sustituyendo la ecuación 2.22 en la 2.23 y despejando la corriente de purga, se tiene:

$$(V_{ss})_W = Q_W \cdot X_r = \underbrace{(Y_1 + Y_2)(S_0 - S_e)Q_0 - (k_{d1} \cdot X_{a1} + k_{d2} \cdot X_{a2})V}_{\Delta X_v} + Q_0 \cdot X_0 - Q_e \cdot X_e \quad (\text{Ec. 2.27})$$

donde:

$\Delta x$ : producción neta en el reactor

Los sólidos volátiles en la corriente de purga son iguales a la producción neta en el reactor, más los sólidos volátiles que entran en la alimentación inicial, menos los sólidos volátiles perdidos en el clarificador secundario, por lo tanto, el lodo que hay que purgar en el sistema, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$(V_{ss})_W = Q_W \cdot X_r = \frac{\Delta X_v + Q_0 \cdot X_0 - Q_e \cdot X_e}{F_1 \times F_2} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

donde:

$F_1$ : factor de conversión (mg/kg)=  $1 \times 10^6$

$F_2$ : factor de conversión ( $m^3/l$ )= 0,001

#### f. Consumo de nutrientes

Para la degradación aerobia biológica de las aguas residuales se necesita una cantidad adecuada de ciertos nutrientes. Los nutrientes necesarios son el nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y vitaminas. La estimación de las necesidades de nitrógeno y fósforo se basa en el hecho de que los sólidos suspendidos volátiles en el licor madre (MLVSS) purgados ( $\Delta X_v$  kg/d) contienen aproximadamente el 2% de su peso seco como fósforo y el 12% como nitrógeno. La estimación de los pesos añadido comprende:

1. Cantidad de nutrientes que se pierden por purga de MLVSS, esto es:

$$N_T = 0,12 \times \Delta X_v \text{ kg/d} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

$$P_T = 0,02 \times \Delta X_v \text{ kg/d} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

2. Cantidad de nutrientes que se pierden en el efluente total. Las concentraciones de nitrógeno y fósforo solubles presentes en el efluente se estiman iguales a 0,1 y 0,5 mg/l respectivamente. Por lo tanto las ecuaciones utilizadas para conocer el nitrógeno y fósforo perdidos en el efluente son:

$$N_T = 86,4 \times Q_e \times 1,0 \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$P_T = 86,4 \times Q_e \times 0,5 \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Donde  $Q_e$  viene dado en  $m^3/s$  por lo tanto las necesidades totales de nitrógeno vienen dada por la suma de las ecuaciones 2.31 y 2.33, como se muestra a continuación:

$$N_T \text{ que se pierde} = 0,12 \times \Delta X_V + 86,4 \times Q_e \times 1,0 \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

$$P_T \text{ que se pierde} = 0,02 \times \Delta X_V + 86,4 \times Q_e \times 0,5 \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

La cantidad de nitrógeno y fósforo disponible en la alimentación inicial se calcula de la siguiente manera:

$$N_T \text{ disponible} = 86,4 \times Q_0 \times N_T \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$$P_T \text{ disponible} = 86,4 \times Q_0 \times P_T \text{ (kg/d)} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

donde:

$N_T$ : nitrógeno total en la alimentación inicial, (mg/l)

$P_T$ : fósforo total en la alimentación inicial (mg/l)

Si las cantidades de nitrógeno y fósforo disponible son mayores que las requeridas no se necesita adición de nutrientes.

#### 2.9.4 Tratamiento terciario o avanzado

Se aplica para reducir la presencia de microorganismos entéricos y otras formas de vida, evidentemente, transmisores de enfermedades de origen hídrico, o indeseable desde todo punto de vista sanitario (Rivas, 1978). El tratamiento terciario se define como el nivel de tratamiento necesario, más allá del tratamiento secundario convencional, para la eliminación de los constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, los compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión.

Entre los sistemas de tratamiento terciario se tiene: remoción de sólidos suspendidos, adsorción, intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis y desinfección. También se emplea el tratamiento avanzado para diversas posibilidades de reutilización de las aguas residuales para las cuales es preciso conseguir efluentes de alta calidad, como es el caso para el agua empleada para la refrigeración industrial o para la recarga de aguas subterráneas.

#### 2.10 Sistema de tratamiento de efluentes industriales y equipos principales

El método utilizado para el tratamiento de aguas residuales en la planta de extracción San Joaquín es conocido como tratamiento convencional de lodos activado (TLA) el cual remueve materia orgánica soluble de las aguas utilizadas en el proceso o aguas de lluvia contaminadas. El sistema de tratamiento está conformado de la siguiente manera:

- ◆ Red de drenaje
- ◆ Laguna de amortiguación
- ◆ Estación de bombeo principal
- ◆ Separador CPI
- ◆ Sedimentador secundario
- ◆ Reactores biológicos
- ◆ Sedimentados secundario

- ◆ Laguna de estabilización y cloración
- ◆ Lechos de secado

### **2.10.1 Red de drenaje**

La red de drenaje está constituida de una serie de canales abiertos y tuberías, que recogen las aguas contaminadas y las aguas de lluvias, del área de procesos. Esta red recoge las aguas contaminadas y aceites de distintas unidades que conforman los trenes A y B de la planta de extracción tales como (Rodríguez, 1993):

- ◆ Torre estabilizadora
- ◆ Turbo expansores
- ◆ Sistema de glicol
- ◆ Horno de aceite caliente
- ◆ Enfriadores de aceites
- ◆ Depósitos de químicos y área de descarga de productos químicos

### **2.10.2 Laguna de amortiguación**

Esta laguna está diseñada para acumular las aguas que vienen de la red de drenaje del área de proceso. Está compuesta por dos lagunas contiguas: una para la acumulación de afluentes, conocida como laguna de acumulación, y la otra para la amortiguación de volúmenes de agua en época de lluvia, conocida como laguna de tormenta; ambas lagunas están separadas por dos paredes y entre éstas existe una válvula de 8 pulgadas que permite comunicarlas. En condiciones normales de operación, todo el afluente se retiene en la laguna de acumulación, en época de lluvia, el afluente de exceso se trasvasa hacia la laguna de tormentas, dependiendo de la intensidad y duración de la lluvia.

Las lagunas están en capacidad de acumular un total de 600,0 m<sup>3</sup> de afluente, la finalidad de estas laguna es la de lograr la igualación química y la estabilidad hidráulica de las aguas recibidas en ellas. En el fondo de la laguna de acumulación se aplica aire a baja presión, éste es suministrado por sopladores secundarios, para mantener en suspensión los sólidos retenidos en la misma, los cuales deberán ser arrastrados hacia la planta de tratamiento para su remoción.

En la laguna de acumulación se separa parte del aceite e hidrocarburos libres presentes en el agua, estos son recolectados por medio de una canaleta incorporada a la pared oeste de la estructura de división de la laguna y enviados a la fosa de aceites recuperados. Mientras que las aguas pasan por vaso comunicantes a la tanquilla de la estación de bombeo principal por medio de una tubería de 8" y el control de una válvula de compuerta de 8". En época de sequía el caudal generado en las áreas de proceso es muy reducido, se debe mantener abierta la recirculación proveniente de la laguna de estabilización a fin de garantizar por lo menos un suministro diario de afluente hacia el resto del sistema de tratamiento (Nieves, 1996).

### **2.10.3 Estación de bombeo principal**

Está compuesta por una tanquilla y un sistema de bombas, tiene como finalidad suministrar afluente al proceso desde la tanquilla, hasta el separador de aceites (CPI), la tanquilla está conectada por una tubería de 8" a la laguna de acumulación; las aguas llegan a esta tanquilla por vasos comunicantes, y por medio de las bombas son elevadas hasta la entrada del separador de placas corrugadas (CPI) mediante dos bombas centrífugas verticales con el motor no sumergible, llamada bombas principales, una en operación y otra en reversa.

Cada bomba tiene una capacidad máxima de bombeo de 32 l/s, para garantizar una mejor eficiencia del separador de aceites, el caudal de descarga de cada una de las bombas fue regulado a 64,8 m<sup>3</sup>/h mediante una placa orificio ubicada en cada una de las líneas de transferencia que van hacia el CPI (Nieves, 1996).

### **2.10.4 Separador de placas corrugadas (CPI)**

El agua procedente de la estación de bombeo, llega a este separador CPI para la remoción de grasa, aceites e hidrocarburos libres. El CPI es conocido como interceptor de placas corrugadas y está diseñado para separar los aceites arrastrados por el efluente industrial de la planta de extracción. Este equipo consiste en un recipiente de concreto armado, el cual posee tres secciones: la primera es la cámara de entrada, la cual tiene como función prevenir la turbulencia y reducir drásticamente la velocidad horizontal del flujo; la segunda, está integrada por una colmena de 87 placas corrugadas, en forma de paralelepípedos, de dimensiones 2,5 m x 2,15 m x 0,95 m y están inclinada en 45°, es en esta cámara donde se realiza la separación de las grasas, aceites e hidrocarburos del agua, la nata aceitosa recuperada de este separador es enviada, por gravedad, a la tanquilla de aceites ubicada inmediatamente a la laguna de acumulación de afluente.

La tercera viene a ser una cámara de sedimentación. Ya que allí se depositan parte de los sólidos arrastrados por la corriente líquida desnatada, los sólidos que sedimentan son extraídos eventualmente con una bomba sumergible portátil, y por medio de una manguera son enviados a los lechos de secados para su deshidratación y disposición final. El agua libre de aceites sale a través de un canal, por gravedad, hacia el separador primario (Intevep, 2003).

### **2.10.5 Sedimentador primario**

Esta unidad tiene como finalidad remover los sólidos que son arrastrados por el efluente desde el separador CPI. En el canal que conduce el efluente hacia el sedimentador primario, se dosifica las soluciones para el control de pH y los agentes coagulantes. A esta unidad llegan igualmente las aguas de escurrimiento provenientes de la deshidratación de los lodos en los lechos de secados.

El sedimentador primario es de forma circular, tiene un volumen de aproximadamente 60,0 m<sup>3</sup> y está equipado con un puente barrelados. Los sólidos que sedimentan son recolectados en el fondo del sedimentador y luego drenados a la fosa de

lodos primarios, de donde son bombeados hacia los lechos de secados para su deshidratación y disposición final. El efluente libre de sólidos sedimentables sale por rebose del sedimentador y es recolectado por una canaleta concéntrica de donde pasa al canal de salida, el cual lo conduce hacia los reactores biológicos. De acuerdo al caudal de diseño, este separador provee en un tiempo de retención hidráulico de 1,5 horas y es capaz de remover un 30% de la carga inicial de DBO del afluente, a condiciones de diseño (Nieves, 1996).

### **2.10.6 Reactores biológicos**

Las aguas provenientes del sedimentador primario son sometidas a biotratamiento aeróbico con lodos activados, el tratamiento de lodo activado es de tipo convencional. En éste tipo de proceso las fases de absorción, floculación y síntesis se realizan, todas, en un solo paso. Los reactores biológicos están conformados por dos tanques de concreto de aproximadamente 230,0 m<sup>3</sup> cada uno, tiene como finalidad remover la carga orgánica mediante reacciones biológicas efectuadas por microorganismos existentes en el seno del mismo. Cada reactor tiene un suministro continuo de aire comprimido mediante difusores ubicados en la parte inferior.

El suministro de aire se hace con el propósito de dotar a la masa biológica del oxígeno necesario para sus reacciones metabólicas de eliminación de materia orgánica contaminantes y para garantizar mantener la biomasa en suspensión homogénea dentro de los reactores. La oxidación de la materia orgánica solo se efectúa si se mantiene adecuadas condiciones ambientales: pH 6-9, temperatura < 40 °C, ausencia de tóxicos, oxígeno disuelto más de 2 mg/L, presencia de nutrientes minerales (nitrógeno y fósforo) y microorganismos en suspensión.

La mezcla de efluente tratado y lodos biológicos en suspensión, es luego descargada, por gravedad a través de un canal rectangular al sedimentador secundario (clarificador) para su separación. Parte de los lodos biológicos son reciclados desde la fosa de lodos biológicos a los reactores biológicos. De acuerdo al caudal de diseño, el tiempo de retención hidráulico del efluente en este sistema es de 4 horas. (Nieves, 1996 y Rodríguez, 1993).

### **2.10.7 Sedimentador secundario**

La mezcla sólido-líquido, efluente de los reactores biológicos entra al sedimentador secundario para su separación. Este sedimentador tiene las mismas características que el sedimentador primario. Los lodos son drenados por el fondo hacia la fosa de lodos biológicos. El efluente, libre de sólido suspendidos sale por rebose al canal para ser transportados por gravedad hacia la laguna de estabilización (Intevp, 2003).

### **2.10.8 Laguna de estabilización y cloración**

La laguna de estabilización cuya capacidad es de uno 1750,0 m<sup>3</sup> es fundamentalmente un reservorio de agua tratada que requiere de un tratamiento terciario, mediante la eliminación total de los microorganismos remanentes del efluente del sedimentador

secundario. La laguna está dividida internamente por tabiques de concreto en dos secciones fundamentales: una sección donde se llevan a cabo reacciones fotosintéticas y una sección para la desinfección por oxidación química (cloración).

La primera sección homogeniza las aguas recibidas y por la acción natural elimina gran parte de los microorganismos presentes; la segunda sección, llamada cámara de cloración esta subdividida por una serie de tabiques, dispuesto de tal modo que obligan a un movimiento zigzagueante que permite una buena disolución del cloro para optimizar la reacción de oxidación y de esta forma garantizar la eliminación de los microorganismos restantes. De la laguna de estabilización a través de un canal abierto sale el agua tratada hacia el lecho de un río cercano (Intevep, 2003).

### **2.10.9 Lechos de secado de lodos**

Consiste en tanques de concreto armado de poca profundidad subdivididos en ocho cámaras iguales, cuatro para el secado de los lodos primarios y cuatro para los lodos biológicos. Todas las cámara tienen una capa de grava en el fondo, luego una capa de arena y sobre estas se depositan la capa de lodo. Aquí el agua contenida en el lodo percola por las capas de arena y grava para luego drenar hacia las fosas de drenajes.

En los lechos se realiza el secado de los lodos biológicos en exceso que se han formado en el proceso biológico y los acumulados en el separador primario. Una vez secos estos son extraídos manualmente para su adecuada disposición final. La disposición final de los lodos biológicos y de los contaminados con aceites deben ser previamente evaluados a objetos de garantizar su adecuada disposición final tanto en rellenos sanitarios como de seguridad respectivamente (Rodríguez, 1993).

### **2.11 Análisis estadísticos**

Los análisis estadísticos son utilizado para cuantificar una serie de mediciones, muchas veces los datos obtenidos en la realización de una experiencia son a menudo tan numerosos que resultan prácticamente inútiles si no se les condensa, o reduce, en forma más conveniente. En estos casos se emplean medidas descriptivas como la media aritmética la cual refleja un valor representativo de los datos estudiados (Rivas, 1978)

#### **2.11.1 Media**

Dado un conjunto de  $n$  medidas u observaciones,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , se puede describir su centro (medio o lugar central) de muchas maneras. La más común es la media aritmética, la cual no es más que la sumatoria de todos los datos obtenidos entre el número total de mediciones. Cabe destacar que existen ocasiones en donde se emplean otros tipos de promedios para propósitos especiales. La media se expresa mediante la siguiente formula (manual de cermeño):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

(Ec.2.20)

donde:

$\bar{x}$ : media

$x_i$ : medida u observación.

$n$ : numero de medidas u observaciones

## **CAPITULO 3 DESARROLLO DEL TRABAJO**

La elaboración del trabajo planteado, tuvo como alcance la evaluación del proceso biológico que conforma la planta de tratamiento de efluentes industriales del complejo criogénico San Joaquín, con la finalidad de proponer alternativas que permitan una mejor operación y manejo de las mismas. Para el desarrollo de los objetivos planteados se llevaron a cabo las siguientes etapas:

### **3.1 Verificación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta de tratamiento de efluentes industriales**

Inicialmente se procedió a recaudar la información necesaria para el desarrollo de esta etapa, a través del manual de descripción de la planta, el diagrama de flujo del proceso, visitas a campo, revisión de textos, tesis y páginas web, relacionados los mismos con el tema de estudio, con el fin de conocer los parámetros de diseño establecidos por la empresa y el funcionamiento del sistema.

#### **3.1.1 Concepción original del proceso de tratamiento de efluentes industriales**

En el desarrollo de esta etapa se procedió a la revisión del esquema de diseño original del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín, con el propósito de tener una visión más detallada del funcionamiento y las diferentes secciones que la conforma. Cabe mencionar que este sistema opera bajo un proceso convencional de lodos activados y está conformada por once elementos, los cuales se describen a continuación:

- 1) Fosa de acumulación y de tormenta, está compuesta por dos lagunas; la fosa de acumulación recibe el colector de sistema de drenaje y la sección de fosa de tormenta almacena el agua que rebosa la fosa de acumulación con la finalidad de separar parte del aceite e hidrocarburos libres presentes en el agua.
- 2) Estación de bombeo de crudo-agua, bombea el líquido desde la fosa de acumulación hasta el separador de placas corrugadas (CPI).
- 3) Estación de bombeo de aceite, es una tanquilla que se encuentra ubicada en un punto intermedio de la laguna de acumulación y tormenta, conectada por una tubería de 8 pulgadas. Recibe los aceites de la separación hecha en el CPI y del rebose en la sección de acumulación y los envía al tanque de acumulación de aceites.
- 4) Separador de placas corrugadas (CPI), separa el crudo contenido en el agua proveniente de la fosa de acumulación, el agua clarificada va hacia el sedimentador primario y el aceite va hacia la tanquilla ubicada cerca de la fosa de tormenta.
- 5) Sistema de dosificación de químicos es un sistema que añade químicos al agua que sale del separador de placas corrugadas en el trayecto hacia el sedimentador primario.
- 6) Sedimentador primario, posee un volumen de aproximadamente 60 m<sup>3</sup>, en el se recibe el agua libre de aceites pero con gran contenido de sólidos sedimentables

generados a partir de la incorporación de químicos; el agua libre de sedimentos sale por una canaleta (vertedero) hacia los tanques de aireación, mientras que los sedimentos se depositan en el fondo y van por medio de una tubería a la tanquilla de recolección de lodos. Adicionalmente el sedimentador primario posee un equipo barrelos para retirar el lodo adherido al fondo de la estructura, transportándolo desde el fondo de la tolva del sedimentador a la tanquilla de lodos.

7) Tanque de aireación, en el se lleva a cabo la biodegradación de la materia orgánica contenida en el agua proveniente del sedimentador primario, por medio de aire comprimido y recirculación del efluente almacenado. Una vez culminado el proceso, el agua pasa al sedimentador secundario. La oxidación de la materia orgánica solo se efectúa si se mantiene las condiciones ambientales tales como: pH, temperatura, ausencia de tóxicos, oxígeno disuelto, presencia de nutrientes minerales (nitrógeno y fósforo) y microorganismos en suspensión

8) Sedimentador secundario, es muy similar al sedimentador primario en donde el agua proveniente de los tanques de aireación, con flóculos y ligeras partículas con menor densidad que el agua, entra en reposo. El agua libre de sedimentos va a la laguna de oxidación mientras que los sedimentos depositados en el fondo van por medio de tuberías a la tanquilla recolectora de lodos; al igual que el sedimentador primario posee un equipo barrelos.

9) Estación de bombeo de lodos recirculados, posee dos secciones independientes, una denominada cámara para lodos primarios y la otra cámara para lodos secundarios. Los lodos de la sección primaria van directamente a los lechos de secado de lodos, mientras que los lodos de la sección secundaria pueden tanto recircularse dentro de la misma cámara como enviarse al lecho de secado de lodos.

10) Lechos de secados de lodos, recibe los lodos provenientes de la estación de bombeo de lodos mediante un cabezal con ocho ramales dotados con válvulas de bloqueo. El operador responsable apertura la válvula que corresponda a la subdivisión seleccionada y descarga el lodo; el agua percola a través de una capa de arena y grava, al llegar al fondo del tanque drena hacia una tanquilla que a su vez desemboca (por gravedad) en el sedimentador primario. Los lodos se retiran del lecho de manera manual.

11) Laguna de oxidación, recibe el agua proveniente del sedimentador secundario, posee tres sectores claramente definidos en donde ocurre los procesos de sedimentación, oxidación, digestión, intercambio de gases, fotosíntesis, sintetización, evaporación etc. Está dividida internamente por tabiques de concreto en dos secciones fundamentales: una sección donde se llevan a cabo reacciones fotosintéticas y una sección para la desinfección por oxidación química (cloración)

El objetivo de este sistema es tratar las aguas provenientes de las actividades de operación de la planta, con el fin de ajustar la calidad de los mismos a la normativa ambiental vigente. Es importante mencionar que el efluente generado por la planta es enviado a través de un canal hacia el río Guario. En la figura 3.1 se muestra el esquema de diseño del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín, con los equipos que la conforma.

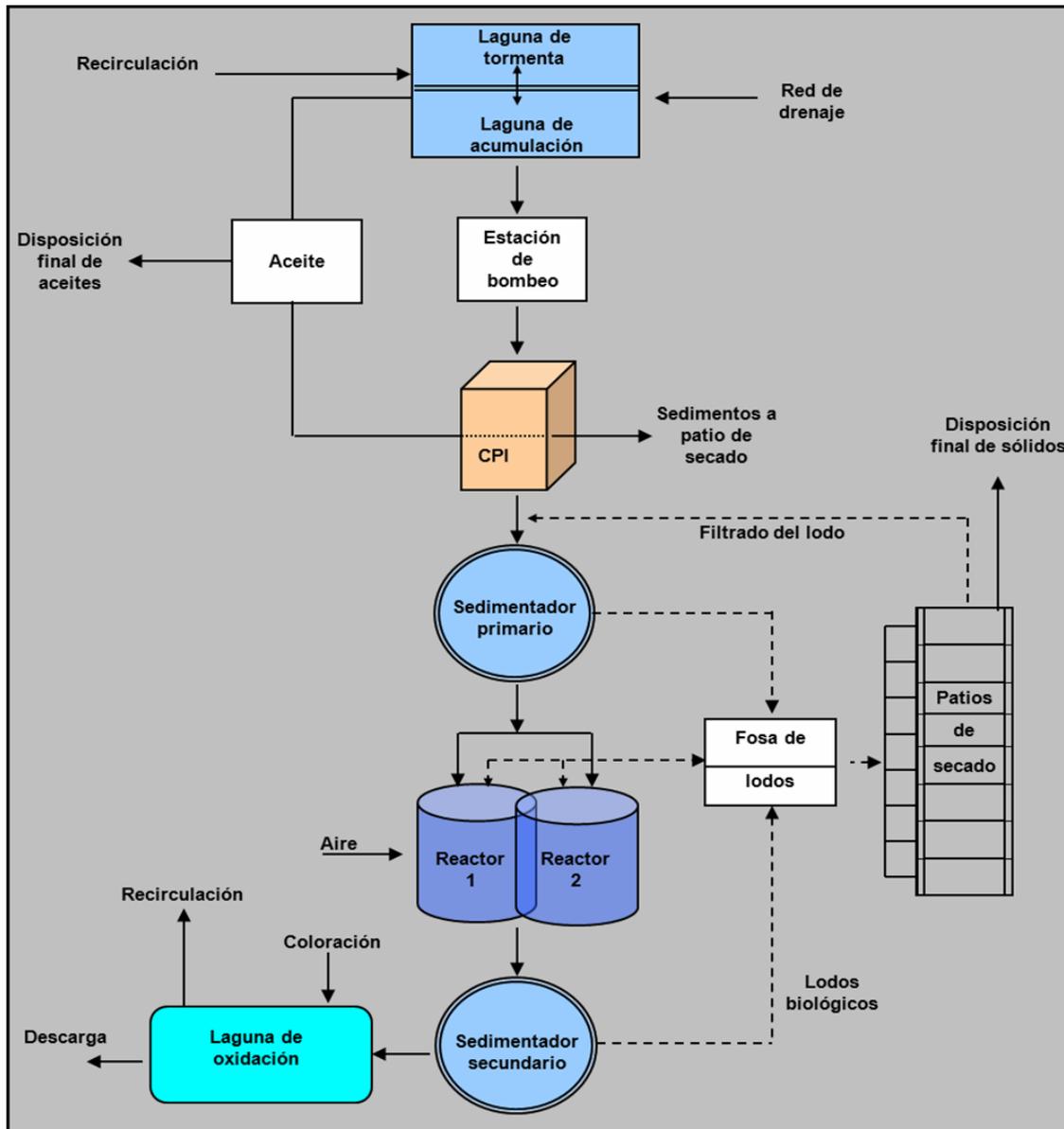


Figura 3.1 Esquema del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín (Planta de extracción San Joaquín, 1996).

### 3.1.2 Condición real de la planta de tratamientos de efluentes industriales

Como ayuda para la visualización del funcionamiento actual del sistema de tratamiento, se llevó a cabo un recorrido en las instalaciones junto con los operadores, para posteriormente comparar dichos resultados con las condiciones de diseño. En el sistema de tratamiento no se lleva a cabo el proceso original, por lo tanto, se mencionan los equipos que se encuentran en funcionamiento:

- Fosa de acumulación y tormenta
- Estación de bombeo de aceite

- Sedimentador primario
- Tanques de aireación
- Sedimentador secundario
- Estación de bombeo de lodos
- Lechos de secado
- Laguna de oxidación

### 3.1.3 Medición del caudal

La planta de tratamiento de efluentes industriales no posee medidores de flujo para la determinación del caudal sin embargo, para la conocer dicho parámetro se utilizaron dos métodos manuales:

- **Método volumétrico**

Este método se empleó para medir el caudal de entrada en el sedimentador primario y en la recirculación de lodos de ambos reactores ya que poseen caudales bajos, para ello se recolectaron volúmenes de muestra de 1.000 ml y 3.000 ml utilizando jarras y se anotó el tiempo que transcurre en colectar dicho volumen. Esta operación se repitió tres veces y se promedió, con el fin de asegurar una mayor exactitud. Los datos utilizados para la determinación de los caudales durante el tiempo de estudio se encuentran reportados en la tabla 3.1

**Tabla 3.1 Datos empleados para la determinación del caudal en la entrada del sedimentador 1 y en la recirculación de lodos**

Fecha	Entrada del sedimentado 1		Recirculación de lodos			
	Volumen (l)	Tiempo (s)	Reactor 1		Reactor 2	
			Volumen (l)	Tiempo (s)	Volumen (l)	Tiempo (s)
23/05/11	1	4,04	1	1,02	1	0,70
24/05/11	1	4,17	3	2,81	3	2,51
25/05/11	3	8,86	1	1,22	1	0,99
26/05/11	1	4,09	1	1,09	1	0,87
27/05/11	1	4,08	1	1,02	1	0,80
30/05/11	1	3,97	1	1,04	1	0,93
31/05/11	3	4,65	3	2,60	3	2,27
01/06/11	3	4,69	3	2,57	3	2,17
02/06/11	3	7,01	3	2,63	3	2,36
03/06/11	3	5,26	3	2,65	3	2,26
06/06/11	3	5,36	3	2,48	3	2,13
07/06/11	3	5,15	3	2,79	3	2,37
08/06/11	3	4,07	3	2,55	3	2,27
09/06/11	3	4,01	3	2,76	3	2,23
10/06/11	3	4,16	3	2,45	3	2,33

Sustituyendo los datos de la tabla 3.1 en la ecuación 2.1 se tiene:

$$Q = \frac{1L \times \frac{1m^3}{1000L}}{4,04s \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1día}{24h}} = 24,39 \text{ m}^3/\text{d}$$

De manera similar se realiza dichos cálculos para el resto de los datos y los resultados se reportan en la tabla 4.1

Para obtener el promedio, se sustituye en la ecuación 2.39 los datos reportados en la tabla 4.1, como se muestra a continuación:

$$\bar{x} = \frac{(21,39 + 20,72 + \dots + 64,64 + 62,31) \text{ m}^3/\text{d}}{15} = 41,47 \text{ m}^3/\text{d}$$

Los resultados se encuentran reportados en la misma tabla.

- **Método velocidad-área**

Este método se utilizó en la entrada de los reactores y en la salida de la planta, ya que el efluente es descargado por medio de un canal rectangular. Para la obtención de la velocidad del flujo fue utilizada una pelota de plástico menos pesada que el agua como flotador superficial, se ubico un tramo de sección uniforme, posteriormente se dejo soltar la pelota en el canal y se procedió a medir el tiempo que transcurre en la longitud escogida. Los datos necesarios para los cálculos se presentan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Datos para el cálculo de los caudales de entrada a los reactores y salida de la planta**

Fecha	Entrada de los Reactores			Salida del efluente		
	Longitud (cm)	Tiempo (s)	Altura del agua (cm)	Longitud (cm)	Tiempo (s)	Altura del agua (cm)
23/05/11	80,6	10,71	3,9	142,0	4,80	1,5
24/05/11	100,0	17,89	4,5	154,0	4,88	1,0
25/05/11	130,0	23,41	4,0	130,0	4,70	2,0
26/05/11	115,0	19,71	4,2	148,0	4,84	1,3
27/05/11	90,5	13,58	4,0	151,0	4,87	1,1
30/05/11	100,0	21,56	4,4	150,0	4,78	1,2
31/05/11	77,3	7,67	6,4	81,0	1,53	5,3
01/06/11	78,3	8,37	5,5	85,0	1,53	4,3
02/06/11	76,3	6,92	7,3	77,5	1,52	3,8
03/06/11	76,0	8,58	5,5	80,0	2,00	2,5
06/06/11	75,5	8,71	4,0	85,0	1,94	2,5

07/06/11	76,5	8,46	7,0	75,0	2,05	2,5
08/06/11	78,5	6,7	7,3	82,5	1,05	5,5
09/06/11	81,0	8,03	7,0	85,0	1,11	6,0
10/06/11	76,0	5,46	7,5	80,0	1,00	5,0

Como el ancho del canal de entrada a los reactores (0,24 m) y el de salida de la planta (0,79 m) no varían, la altura y la longitud desplazada por el agua en el canal en un intervalo de tiempo determinado nos proporciona el caudal. Sustituyendo en la ecuación 2.5 los datos reportados en la tabla 3.2 se tiene lo siguiente:

$$Q = \frac{0,806\text{m} \times 0,24\text{m} \times 0,039\text{m}}{10,71\text{s} \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \times \frac{1\text{día}}{24\text{h}}} = 60,86 \text{ m}^3/\text{d}$$

Se procede de la misma manera con el resto de los datos, los resultados se encuentran en la tabla 4.1 con su respectivo promedio.

### 3.1.4 Dosificación de químicos

En el sistema de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín, anteriormente la dosificación de químicos se realizaba en dos tanques, uno almacenaba una sustancia pro-coagulante para el control de exceso de sólidos coloidales de difícil remoción y el otro para el control de pH del afluente. Esto ocurría en un canal abierto, mediante el cual se inyectan las siguientes sustancias:

1. Un coagulante: sulfato de aluminio hidratado (alumbre).
2. Un pro-coagulante: polielectrolito.
3. Un alcalinizante: hidróxido de calcio (Flor de cal).

La acidez en el agua era reducida con cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). La solución se prepara en un tanque dispuesto para tal fin, anexo al CPI y mezclado con el agua que sale de este (Rodríguez, 1993). Cabe mencionar que en el tiempo de estudio a la planta, no se añadió ningún coagulante al sistema, solo se agregó hidróxido de sodio (NaOH) para aumentar el pH

### 3.2 Medición de las variables operacionales del sistema de tratamiento

Durante esta etapa se evaluaron los parámetros operacionales del proceso biológico, para ello se tomaron como puntos de muestreo la entrada y salida de la planta, el pase a los reactores y la estación de bombeo de lodos recirculados.

#### 3.2.1 Análisis fisicoquímico del proceso

Para el análisis fisicoquímico, se realizó durante una semana un muestreo compuesto con el fin de conocer el tipo de técnica a utilizar, se pudo observar que las características de las corrientes fueron relativamente constantes, por lo tanto se decidió utilizar un muestreo de tipo instantáneo. Los datos de este muestreo se muestran en el anexo A, Tabla A.1.

La metodología a seguir para la toma de las muestras consistió en tomar 1 litro de agua en envases plásticos con tapas enroscable (figura 3.1), a estos se les determino la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH en el sitio, siguiendo las normas COVENIN 2709:2002 mostradas en el anexo B, posteriormente fueron transportadas desde el punto de muestreo hasta el laboratorio de control de calidad de la planta, las muestras fueron tomadas a las 7:00 AM durante quince días. Los resultados de los análisis realizados durante la evaluación se encuentran reportados en el anexo C.



**Figura 3.2 Muestras tomadas en diferentes puntos de la planta (Planta de extracción San Joaquín, 1996)**

A continuación se describen los procedimientos utilizados:

#### **A. Determinación de los sólidos totales**

La determinación de sólidos, son generalmente empleados para establecer la calidad del agua ya sea para consumo humano o para uso industrial entre otros. No obstante, este método determina los sólidos totales de una muestra de agua en el afluente y efluente de la planta. El estudio se realizó mediante el siguiente procedimiento según (Franson, 1992):

- 1) Se lavó el crisol de vidrio, se seco y se colocó en una mufla a una temperatura de 550 °C durante una hora. Luego se dejó enfriar en un desecador (figura E.1) por 30 minutos, se pesó y se repitió el procedimiento hasta obtener un valor constante.
- 2) Se añadió 50 ml de la muestra en el crisol y se evaporó en un baño de vapor.

3) Se secó la muestra en un horno a 105 °C durante una hora, finalmente se dejó enfriar el crisol en un desecador y se pesó. Se repitió este paso hasta obtener un valor constante de masa.

En la tabla 3.3 se muestran los datos utilizados para calcular los sólidos totales en el afluente de la planta. Es importante mencionar que para la determinación de los sólidos totales en los reactores y en la tanquilla de recirculación se usaron 20 ml de la muestra, llegándose a repetir el mismo procedimiento. Los datos utilizados para dichos cálculos se encuentran en la tabla D.1.

**Tabla 3.3 Datos utilizados para el cálculo de los sólidos totales en el afluente de la planta.**

Fecha	A (mg)	B (mg)
23/05/11	41586,3	41668,3
24/05/11	42059,3	42141,0
25/05/11	41950,5	42031,3
26/05/11	41769,2	41851,3
27/05/11	41587,9	41671,2
30/05/11	42050,3	42124,3
31/05/11	42000,7	42110,6
01/06/11	41951,1	42026,9
02/06/11	41586,9	41667,7
03/06/11	42054,4	42119,3
06/06/11	41951,1	42018,3
07/06/11	41586,3	41652,0
08/06/11	42050,7	42121,1
09/06/11	41951,2	42032,0
10/06/11	41658,6	41710,5

donde:

A: masa del crisol vacío (mg)

B: masa del crisol con muestra (mg)

Sustituyendo en la ecuación 2.6 los datos de la tabla 3.3 se obtiene lo siguiente:

$$S_T = \frac{(41668,3 - 41586,3) \text{ mg}}{50 \text{ ml}} \times 1000 = 1640 \text{ mg/L}$$

Se realiza el mismo procedimiento para el resto de los valores de las tablas 3.3 y D.1, los resultados se reportan desde la tabla 4.3 hasta la 4.7.

### **B. Determinación de los sólidos volátiles**

Para calcular la fracción volátil de los sólidos totales se introdujo la muestra anteriormente desecada en un horno mufla a 550 °C durante 20 minutos, una vez calcinada la muestra, se procedió a enfriar en un desecador y se pesó. Se repitió este

paso hasta obtener un valor constante de masa (Franson, 1992). Los datos utilizados para dichos cálculos se encuentran reportados en la tabla D.2.

Sustituyendo en la ecuación 2.7 los valores de las tablas 3.3 y D.2, se tiene:

$$S_v = \frac{(41668,3 - 41610,9) \text{ mg}}{50 \text{ ml}} \times 1000 = 1148 \text{ mg/L}$$

De manera similar se realiza para el resto de los datos, los resultados son reportados desde la tabla 4.3 hasta la 4.7. Además, se procedió a calcular el valor promedio de los sólidos volátiles en ambos reactores, estos valores se muestran en las mismas tablas.

### C. Determinación de los sólidos suspendidos

La determinación de los sólidos suspendidos en la entrada y la salida de la planta se determinó mediante el siguiente procedimiento:

- 1) Se agito la muestra fuertemente para lograr su homogenización.
- 2) Se seco el disco de filtrado en una estufa a una temperatura de 105 °C durante una hora, luego se dejo enfriar en un desecador, posteriormente se peso y se repitió el procedimiento hasta obtener un valor constante.
- 3) Se preparó el equipo de filtración, se coloco el papel de filtro, se lavo el filtro tres veces con agua destilada.
- 4) Se añadió 50 ml de muestra y se aplico filtración al vacío durante 20 minutos.
- 5) Se colocó el residuo que quedo en el disco de filtrado en la estufa a 105 °C durante una hora.
- 6) Se transfirió el disco de filtrado al desecador y se peso hasta obtener un valor constante (Franson, 1992).

Los datos empleados para el cálculo de los sólidos suspendidos en el afluente fueron los siguientes:

**Tabla 3.4 Datos utilizados para el cálculo de los sólidos suspendidos en el afluente.**

Fecha	P <sub>a</sub> (mg)	P <sub>b</sub> (mg)
23/05/11	91,5	95,3
24/05/11	91,5	98,4
25/05/11	93,7	97,1
26/05/11	92,7	96,4
27/05/11	91,6	95,7
30/05/11	92,8	96,3
31/05/11	92,0	95,9
01/06/11	91,2	95,2
02/06/11	92,6	99,6
03/06/11	92,5	96,6
06/06/11	92,2	95,8
07/06/11	92,5	96,8

08/06/11	92,5	96,1
09/06/11	93,0	97,2
10/06/11	90,9	94,8

donde:

Pa: masa del disco de filtrado vacío (mg)

Pb: masa del disco de filtrado con residuo (mg)

Sin embargo, para el caso de los reactores y la tanquilla de recirculación de lodos, se tomaron 20 ml de muestra aplicándose el mismo procedimiento. Los datos empleados para dicho cálculos se encuentran reportados en la tabla D.3.

Sustituyendo en la ecuación 2.8 los valores reportados en la tabla 3.4 se obtiene:

$$S_S = \frac{(95,3 - 91,5) \text{ mg}}{50 \text{ ml}} \times 1000 = 76 \text{ mg/L}$$

Este mismo procedimiento se realiza para los datos restantes y para la tabla D.3, cuyos resultados son reportados desde la tabla 4.3 hasta la 4.7, con sus respectivos promedios.

#### D. Determinación de los sólidos sedimentables

Los sólidos sedimentables en una muestra de agua nos indica la cantidad de sólidos que pueden sedimentarse a partir de un volumen dado de muestra en un tiempo determinado. Para la determinación de los sólidos sedimentables, la metodología a seguir, consistió en añadir 1 litro de muestra en un cono Imhoff, se dejó sedimentar durante un período de 30 minutos, la cantidad se determina mediante la altura de la separación entre la fase sólida y líquida. Este procedimiento se realizó tanto para el reactor 1 como para el reactor 2, los resultados se encuentran en las tablas 4.5 y 4.6 (Franson, 1992).

#### E. Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO)

La determinación de la DQO en la entrada de la planta se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento: Se colocaron 3 ml de muestra en un tubo vial para digestión con reactivo analítico del equipo spectroquán (test), Se digesta a 148°C por 2 horas en un termoreactor (figura E.2), dejándose enfriar la cubeta a temperatura ambiente. Paso seguido se agitó durante 10 minutos, finalmente se introdujo el tubo (que consta de un código de barras que identifica el método y el rango de medida) en el espectrofotómetro (figura E.3) anotándose el valor directamente (ISO157005-02, 2002). Los resultados se muestran directamente en una pantalla digital, para el efluente se añadieron 2 ml de la muestra y se realizó el mismo procedimiento. Los valores puntuales se describen en las tablas 4.3 y 4.4 y los valores promedio se muestran en la misma tabla.

#### F. Determinación del oxígeno disuelto

En la determinación de oxígeno disuelto, se verificó si el equipo se encontraba calibrado, utilizando el método de calibración del aire mediante una solución de oxígeno para ajuste cero, luego se sumergió el electrodo en la muestra tomada, posteriormente se agitó la muestra para homogenizar y finalmente se anotó el valor proporcionado por el instrumento. Los resultados vienen dados directamente por el instrumento en una pantalla digital en mg/l o ppm. Se siguió el mismo procedimiento en la salida de la planta, los reactores y la tanquilla de recirculación de lodos (COVENIN 2871-92,1992). Dicha información se encuentra reportada desde las tablas 4.3 hasta la 4.7.

### **G. Determinación del nitrógeno total**

La determinación del nitrógeno total en el afluente de la planta, se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento (Norma ISO 11905-1, 1997):

- 1) Se agregaron 10 ml de la muestra en una cubeta redonda vacía y se le añadió el reactivo analítico del equipo spectroquant (test), se dejó digerir a 120 °C durante una hora en el termoreactor, posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- 2) Se tomaron 1,5 ml de la muestra preparada inicialmente, se añadió en un tubo vial y se adicionó otra parte del test analítico preparado de reactivo del spectroquant.
- 3) Se agitó la muestra y se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- 4) Se introdujo el tubo vial (que consta de un código de barras que identifica el método y el rango de medida) en el spectroquant y se anotó el valor directamente.

De igual manera se procedió a calcular el nitrógeno total del efluente. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4.3 y 4.4.

### **H. Determinación del fósforo total**

La determinación del fósforo total en el afluente de la planta se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento (ISO 6878-05, 2005):

- 1) Se agregó 1 ml de la muestra en un tubo vial para digestión con reactivo analítico del equipo spectroquant (test), luego se dejó digerir a 120 °C durante 30 minutos, se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- 2) Se adicionó otra parte del test analítico y se agitó vigorosamente durante 5 minutos. Finalmente se introdujo el tubo vial (que consta de un código de barras que identifica el método y el rango de medida) en el spectroquant y se anotó el valor dado por el equipo.

Siguiendo el mismo procedimiento se determinó el fósforo total en el efluente. Los resultados se encuentran reportados en las tablas 4.3 y 4.4.

### **I. Determinación del pH y la temperatura**

La determinación del pH y la temperatura en el efluente de la planta se determinó mediante el siguiente procedimiento (COVENIN 2462-02 1992, ISO2770-02 2002):

- 1) Se verificó si el equipo (figura E.4) se encontraba calibrado, sumergiendo el electrodo en una solución patrón de pH conocido (en medio ácido, pH <7, y básico, pH >7).
- 2) Se sumergieron los electrodos del equipo en la muestra tomada, luego se agitó la muestra para homogenizar y mantener los sólidos en suspensión.

3) Se anotó el valor de pH y temperatura proporcionado por el instrumento en una pantalla digital.

Se realizó en mismo procedimiento para el efluente, los reactores y la tanquilla de recirculación de lodos. Los resultados se muestran desde las tablas 4.3 hasta la 4.7.

### 3.2.2 Chequeo de los parámetros operacionales del proceso biológico

Mediante los datos suministrados por la planta y las variables obtenidas durante el periodo de muestreo, se procedió a la revisión de los parámetros de diseño y de operación actual del sistema biológico, a través del cálculo del tiempo de retención hidráulico y celular, la relación alimento microorganismos entre otros. Con la finalidad de conocer las posibles fallas que viene presentando el sistema de tratamiento. Sin embargo, antes de determinar dichos parámetros se requiere conocer la purga del sistema.

#### A. Medición del caudal de purga

La purga de lodos se realiza de forma puntual, por lo tanto estos datos no son representativos. Para ello se procedió a determinar el caudal que circula por la tubería de purga ( $Q'_w$ ) y el volumen de lodos descargado del sistema, para establecer un caudal representativo de purga de lodos. El caudal que circula por la tubería se calculó mediante el método volumétrico (ecuación 2.1), para este método se utilizó una jarra de 3 litro y los datos reportados en la tabla 3.5, los resultados puntuales y promedio se muestran en la misma tabla.

**Tabla 3.5 Volumen, tiempo de llenado y caudal de lodos de purga**

Volumen (L)	Tiempo (s)	$Q'_w$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q'_w$ (m <sup>3</sup> /d)
3	3,07	3,52	84,43
3	2,44	4,43	106,23
3	2,9	3,72	89,38
3	2,81	3,84	92,24
3	1,23	8,78	210,73
3	1,07	10,09	242,24
3	1,36	7,94	190,59
3	1,5	7,2	172,8
<b>Promedio</b>		<b>6,19</b>	<b>148,58</b>

Es importante mencionar que en la planta la purga de lodos no se realiza de forma continua, este se lleva a cabo cuando en el reactor existe una gran cantidad de microorganismos. Sin embargo, durante el tiempo de estudio solo se realizaron dos purgas al sistema.

El volumen de lodos descargados se calculo despejando el volumen de la ecuación 2.1, sustituyendo el valor promedio de  $Q'_w$  mostrado en la tabla 3.5 y los datos de la tabla F.1, como se muestra a continuación:

$$V_L = \frac{148,58 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 30 \text{ min}}{1440 \frac{\text{min}}{\text{d}}} = 3,1 \text{ m}^3$$

De igual manera se realiza para el siguiente valor de la tabla F.1 y los valores de volúmenes de lodos descargados se muestra en la misma tabla.

Para el cálculo del caudal de purga representativo se suman los volúmenes de lodos purgados y se divide entre el periodo de recolección de datos (2 días), como se muestra a continuación:

$$Q_w = \frac{(3,1 + 6,19) \text{ m}^3}{2 \text{ d}} = 4,65 \text{ m}^3/\text{d}$$

El resultado se muestra en la tabla F.1.

### **B. Tiempo de retención hidráulico del reactor**

Utilizando los datos reportados en las tablas 4.1 Y D.4 en la ecuación 2.18, se tiene:

$$\theta = \frac{230 \text{ m}^3}{60,86 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}} = 90,7 \text{ h}$$

Se realiza el mismo procedimiento para el resto de los datos, el valor promedio se encuentra reportado en la tabla 4.8 y los valores puntuales se reportan en la tabla F.2.

### **C. Tiempo de retención celular en el reactor**

Sustituyendo los datos de las tablas D.4, 4.1, 4.5, 4.7 y 4.8 en la ecuación 2.19 se obtiene lo siguiente:

$$\theta_c = \frac{230 \text{ m}^3 \times 4480 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{4,65 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 3320 \frac{\text{mg}}{\text{l}} + 302,89 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 514 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} = 6,02 \text{ d}$$

De igual forma se procedió con el resto de los datos de las tablas y para el reactor 2. Los resultados puntuales se reportan en las tablas F.3 y el valor promedio se encuentra en la tabla 4.8.

### **D. Tasa de utilización específica**

Para el cálculo de la tasa de utilización específica se empleo la ecuación 2.20 en función de la DQO de entrada y salida, sustituyendo los datos reportados 4.1, 4.3, 4.4 y D.4, se tiene:

$$U = \frac{60,86 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times (3860 - 540) \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{230 \text{ m}^3 \times 4480 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} = 19,61 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Este cálculo se realiza para los datos restantes y para el reactor 2, los resultados puntuales se reportan en la tabla F.4 y el valor promedio se muestra en la tabla 4.8.

### E. Relación alimento-microorganismos

Sustituyendo los datos de las tablas 4.1, 4.3, 4.5 y D.4 en la ecuación 2.22, se obtiene el siguiente cálculo:

$$F/M = \frac{60,86 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 3860 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{230 \text{ m}^3 \times 4480 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} = 0,23 \text{ d}^{-1}$$

Se procede de la misma manera con el resto de los datos, los valores puntuales se encuentran reportados en la tabla F.4 y el valor promedio se encuentra en la tabla 4.8.

### F. Determinación del coeficiente de descomposición endógena ( $K_d$ ) y el coeficiente de producción máxima ( $Y$ )

Para la realización de este cálculo se comparó la ecuación 2.21, con la ecuación de una línea recta, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\theta_c} &= Y \cdot U - K_d \\ y &= m \cdot x + l \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

y = inverso del tiempo de retención celular ( $1/\theta_c$ )

m = coeficiente de producción máxima (Y)

x = tasa de utilización específica (U)

l = coeficiente de descomposición endógena ( $-K_d$ )

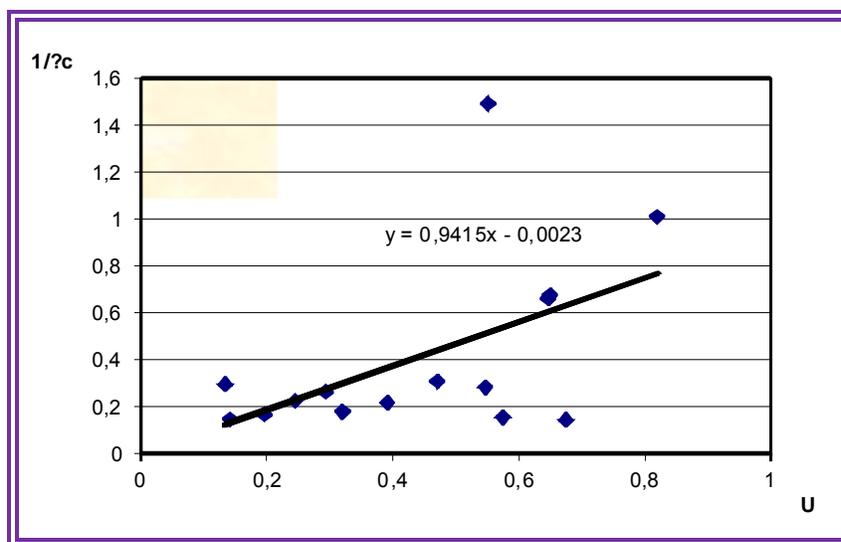
Para emplear la ecuación 2.21, es necesario obtener el inverso de los datos mostrados en la tabla F.3, como se muestra a continuación:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{1}{6,02 \text{ d}} = 0,1661 \text{ d} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Se realiza el mismo procedimiento para el reactor 2 y los resultados se encuentran reportados en la tabla F.5.

Se procede a graficar los valores de U (tabla F.5) con respecto a los valores de  $1/\theta_c$  (tabla F.5), luego se traza la mejor recta que represente la tendencia de los datos

graficados, esta grafica se muestra en la figura 3.2, después de haber graficado se determina el intercepto y la pendiente de la recta graficada.



**Figura 3.3 Gráfica de la tasa de utilización específica con respecto a el inverso del tiempo de retención celular**

$$m = Y = 0,9415 \text{ kg/kg}$$

$$\text{Int.} = -k_d = -0,0023 \text{ d}^{-1}$$

$$k_d = 0,0023 \text{ d}^{-1}$$

Se procede de la misma manera para el reactor 2 y los resultados de Y y  $k_d$  se muestran en la tabla 4.8.

### G. Producción total de lodos

Para el cálculo de la producción total de lodos, primero se procedió a calcular la la producción neta de lodo en el reactor y posteriormente la producción total de lodos. Para el cálculo del  $\Delta X$  se sustituyo en la ecuación 2.27 los datos mostrados desde la tabla 4.1 hasta la tabla 4.6 y las tablas 4.8 y F.8, como se muestra a continuación:

$$\Delta X = \frac{[(0,94 + 0,70) \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \times (5180,47 - 747,2) \times 103,8 - (0,0023 \text{ d}^{-1} \times 4383,33 - 0,1009 \text{ d}^{-1} \times 4218,33) \times 230] \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{1 \times 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{L}}}$$

$$\Delta X = 852,88 \text{ kg/d}$$

La producción total de lodos se calculó mediante la ecuación 2.28, en el cual se le sustituyo el valor de  $\Delta X$  calculado y los datos de la tabla 4.1, 4.3 y 4.4, obteniendo la siguiente expresión:

$$(V_{SS})_w = 852,88 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + \frac{[103,8 \times 1195,73 - 1156,06 \times 465,87] \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{1 \times 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}$$

$$(V_{SS})_w = 438,42 \text{ kg } S_v/\text{d}$$

La cantidad de lodo que hay que purgar en el proceso es 438,42 kg de sólidos volátiles por día.

Por lo tanto el caudal de purga del sistema se calcula, mediante la ecuación 2.26, sustituyendo el valor promedio de los sólidos volátiles en la recirculación y la cantidad de sólidos volátiles que hay que purgar el sistema, se tiene:

$$Q_w = \frac{438,42 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{4751 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{kg}}{1 \times 10^6 \text{mg}} \times \frac{1000 \text{L}}{1 \text{m}^3}} = 92,28 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

El caudal que se debe purgar del sistema es de 92,28 m<sup>3</sup> de sólidos volátiles por días.

#### H. Consumo de nutrientes

La cantidad de nitrógeno total que se pierde en la purga se calculan, sustituyendo en la ecuación 2.29 el valor de  $\Delta X$  calculado en la producción total de lodos, como se muestra a continuación:

$$N_T = 0,12 \times 852,88 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 102,35 \text{ kg/d}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.31, el valor promedio del caudal del efluente reportado en la tabla 4.1, se calcula la cantidad de nitrógeno total que se pierde en el efluente, obteniéndose la siguiente expresión:

$$N_T = 86,4 \times 0,80 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1,0 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 69,12 \text{ kg/d}$$

La necesidad total de nitrógeno se calcula, sustituyendo la cantidad de nitrógeno total que se pierde en la purga y en el efluente, en la ecuación 2.33, como se muestra a continuación:

$$N_{T \text{ que se pierde}} = 102,35 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + 69,12 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 171,47 \text{ kg/d}$$

El resultado se encuentra reportado en la tabla 4.8. Para calcular la necesidad de fósforo se emplea la ecuación 3.34 y los resultados se encuentran en la misma tabla.

La cantidad total de nitrógeno disponible en la alimentación se calcula, sustituyendo los valores de las tablas 4.1 y 4.2 en la ecuación 2.35, por lo tanto se tiene:

$$N_{T \text{ disponible}} = 86,4 \times 1,20 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 4,41 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,46 \text{ kg/d}$$

El resultado se encuentra reportado en la tabla 4.9. Para conocer la cantidad de fósforo disponible se empleó la ecuación 2.36, mostrándose el resultado en la tabla 4.9.

### **3.3 Estimación de la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la demanda química de oxígeno (DQO)**

Con ayuda de la información recolectada, se calculó la eficiencia del proceso biológico utilizando como parámetro la demanda química de oxígeno (DQO), con la finalidad de determinar el porcentaje de remoción del sistema. Sustituyendo en la ecuación 2.24 los datos reportados en las tablas 4.3 y 4.4, se obtiene:

$$\%E = \frac{(3860 - 540) \text{ mg/l}}{3860 \text{ mg/l}} \times 100 = 86,01\%$$

Se procede de la misma manera con el resto de los datos, los valores puntuales y promedio se encuentran reportados en la tabla 4.10.

### **3.4 Realización de propuestas que permitan el buen funcionamiento del proceso biológico**

En base a los resultados de los análisis fisicoquímicos y los parámetros operacionales. Se evaluó la operatividad del sistema biológico, permitiendo así determinar las posibles razones que afectan al proceso, también se propusieron soluciones con la finalidad de mejorar el funcionamiento y cumplimiento de las condiciones de diseño y las normas ambientales. Por otra parte, se estableció un programa de operación y mantenimiento de la planta (Tabla 4.11).

## **CAPITULO 4**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 Verificación del funcionamiento actual de las unidades que conforman la planta de tratamiento de efluentes industriales**

La metodología empleada en cada una de las etapas para la evaluación del proceso biológico del sistema de tratamiento de efluentes industriales en la planta de extracción San Joaquín, permitió desarrollar un análisis basado en los resultados obtenidos, lo cual se cita a continuación:

##### **4.1.1 Descripción del proceso del sistema de tratamiento**

De acuerdo a las diferentes inspecciones realizadas a la planta de tratamiento se pudo verificar que el sistema de tratamiento ya no cuenta con las mismas unidades que permite separar los contaminantes de acuerdo a la filosofía original del proceso, para una mejor interpretación, la discusión de los resultados se realizará para cada equipo por separado.

- **Fosa de acumulación y tormenta**

La fosa de acumulación y tormenta, tiene como finalidad lograr la igualación química y la estabilidad hidráulica de las aguas recibidas en ella, para ello se dispone de una corriente de aire que agita el agua residual. Durante el tiempo de estudio se observó que en este tanque, ocurre un fenómeno de adherencia del aceite sobre la superficie de la burbuja de aire, el aceite se mantiene suspendido, acumulándose en la superficie. En los días de lluvia llegaba a su límite máximo, ocasionando que la tanquilla de aceites situada cerca del separador de placas corrugadas (CPI) se desbordara.

- **Estación de bombeo crudo-agua**

La estación de bombeo crudo-agua suministra el efluente desde la fosa de acumulación y tormenta hasta el separador de placas corrugadas, mediante dos bombas centrifugas verticales con el motor no sumergible. Actualmente este equipo se encuentra fuera de servicio, debido a problemas de filtración en el CPI, sin embargo, se notó la presencia de grasa en la misma.

- **Estación de bombeo de aceite**

La estación de bombeo de aceite se encuentra ubicada en una canaleta incorporada en la pared que divide la fosa de acumulación y tormenta, esta estación envía parte del aceite presente en la laguna de acumulación a la tanquilla de recolección de aceite. En ella se percibió la falta mantenimiento en el área, ya que en varias oportunidades la tanquilla se filtraba, ocasionando daños al suelo.

- **Separador de placas corrugadas (CPI)**

Este equipo separa el agua de los aceites, permitiendo la recuperación de ambos en altos porcentajes, posee una cámara de coalescencia conformada por placas corrugadas que permiten que las gotas de aceites se aglomeren creando una nata aceitosa, para posteriormente enviarla por gravedad a la fosa de aceites. Con respecto a su funcionamiento, se encuentra fuera de servicios por motivo de filtración, esto conllevó a la realización de un bypass que desvía el caudal de salida de la fosa de acumulación y tormenta hacia la laguna de estabilización.

- **Laguna de oxidación**

La laguna de oxidación o estabilización está diseñada para ocurra una actividad fotosintética con el fin de reducir la carga orgánica y microbiana, en la realidad esto no se cumple con cabalidad por causa del bypass existente. Esta laguna actualmente funciona como un tanque de compensación, permitiendo la presencia de grasa en la misma.

- **Sedimentador primario**

Esta unidad remueve los sólidos inorgánicos que son arrastrados por el efluente. Debido al bypass existente, se pudo observar que el sedimentador es alimentado cada 8 horas a través de una tubería de 8 pulgadas proveniente de la laguna de estabilización, a esta alimentación no se le aplica ninguna dosificación de químicos.

- **Tanques de aireación**

Los reactores biológicos están conformados por dos tanques de concreto, donde ocurren las reacciones biológicas efectuadas por los microorganismos, con el fin de remover la materia orgánica. En ellos se evidenció un crecimiento de espuma, esto puede indicar la presencia de un material no biodegradable, también se observó una fuerte turbulencia en ciertas áreas, debido a que los difusores se encuentran rotos, esto conlleva a la existencia de áreas insuficientemente mezcladas.

- **Sedimentador secundario**

Tiene como objetivo garantizar un efluente libre de sólidos suspendidos, sin embargo, se pudo constatar en reiteradas oportunidades que en el sedimentador presenta problemas de resuspensión y/o abultamiento de lodos de lodos, estos lodos consistía en un material de color verde y su tamaño variaban entre 5 cm y 25 cm, entre las causas de este fenómeno se encuentra: el tiempo de retención hidráulico del sedimentador que permite que las burbujas de gas queden atrapadas en los lodos causando la flotación de los mismo, la mala operación del proceso, entre otros, razón que requiere de una investigación más seria.

Además, se notó presencia de aceite en la superficie del agua contenida en el, por otra parte las rejillas en la salida de los reactores se encontraban obstruidas por lodos, lo



Cabe mencionar que la planta posee un personal dedicado a las inspecciones de las instalaciones, sin embargo dichas inspecciones no se realizan constantemente, además no cuenta con el entrenamiento necesario para operar el sistema.

#### 4.1.2 Medición del caudal

La planta de tratamiento de efluentes industriales recibe las aguas de lluvia y de proceso de las distintas unidades que conforman los trenes A y B, por medio de un sistema de drenaje cerrado, debido a su estructura el caudal del afluente no fue determinado, sin embargo, en la tabla 4.1 se muestran los caudales del proceso biológico obtenidos durante el periodo de muestreo con sus respectivos promedios.

**Tabla 4.1 Valores de los caudales del proceso biológico**

Fecha	Entrada del sedimentador primario	Paso a los Reactores	Recirculación de lodos		Salida de la Planta
	Q (m <sup>3</sup> /d)		Reactor 1	Reactor 2	
		Q <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>r1</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>r2</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>e</sub> (m <sup>3</sup> /d)
23/05/11	21,39	60,86	84,71	123,43	302,89
24/05/11	20,72	52,16	92,24	103,27	215,40
25/05/11	29,26	46,06	70,82	87,27	377,59
26/05/11	21,12	50,81	79,27	99,31	260,90
27/05/11	21,18	55,28	84,71	108,00	239,15
30/05/11	21,76	42,32	83,08	92,90	254,89
31/05/11	55,74	133,26	99,69	114,19	1902,97
01/06/11	55,27	106,84	100,86	119,45	1611,60
02/06/11	36,98	165,65	98,56	109,83	1305,06
03/06/11	49,28	101,23	97,81	114,69	682,56
06/06/11	48,36	72,30	104,52	121,69	747,65
07/06/11	50,33	131,25	92,90	109,37	624,29
08/06/11	63,69	176,14	101,65	114,19	2949,63
09/06/11	64,64	146,42	93,91	116,23	3136,09
10/06/11	62,31	216,47	105,8	111,24	2730,24
<b>Promedio (m<sup>3</sup>/d)</b>	41,47	103,8	92,7	109,67	1156,06

En la tabla 4.1 se muestra que el caudal del paso hacia los reactores es mayor que el de la entrada del sedimentador primario, esto se debe a que el método utilizado (velocidad-área) en la entrada de los reactores no era el adecuado, ya que se realizó con un flotador superficial donde se presentaron perturbaciones en las medidas, a causa del viento, el nivel del agua, la hidráulica del proceso, entre otros.

En cuanto a la recirculación de los lodos es notoria la diferencia entre sus valores, estas variaciones se deben a la falta de mantenimiento en las tuberías, ya que se encontraba con presencia de lodos, lo cual impedían el paso del flujo. Por otra parte en la salida de la planta al igual que en la entrada de los reactores los resultados se consideran como aproximaciones, debido a que el método utilizado es muy inexacto.

#### 4.1.3 Dosificación de químicos

La dosificación de químicos es importante en los sistemas de tratamiento por que facilita la remoción de los sólidos disueltos y en suspensión, ayudan al proceso de sedimentación y a la neutralización del agua residual. Con la finalidad de aumentar el pH para garantizar una actividad biológica óptima, se agrega hidróxido sodio en el canal que conduce hacia los reactores, mediante una bomba dosificadora. Cabe mencionar que al sistema de tratamiento no se le agrega ningún coagulante.

En cuanto a la dosificación de nutrientes en los reactores, de acuerdo a un balance de materia, se pudo verificar que no se agrega continuamente al sistema, esto se realiza solo cuando el personal de laboratorio lo indique, sin embargo en la tabla 4.2, se muestran los nutrientes agregados al proceso y la variación de DQO en fechas anteriores, la demanda química de oxígeno del efluente tratado se mantenía por debajo del límite establecido por el decreto 883 (350mg/l), dicho decreto se muestra en el anexo G (tabla G.1), es importante mencionar que las cantidades dependían de los estudios realizados en el laboratorio, además se llevaba un control continuo de todo el sistema.

**Tabla 4.2 Nutriente y variación de la demanda química de oxígeno (DQO)**

fecha	Nutrientes		DQO del efluente
	Sulfato diamónico (kg)	Urea (kg)	
22/12/09	3	4	84
23/12/09	-	-	82
24/12/09	3	10	160
25/12/09	5	10	102
26/12/09	3	10	104
04/01/11	-	5	132
05/01/11	-	6	72
06/01/11	4	10	114
07/01/11	-	8	180
08/01/11	3	10	102

## 4.2 Medición de las variables operacionales del sistema de tratamiento

De acuerdo a la determinación los parámetros operacionales del sistema biológico y la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo, a través de los análisis fisicoquímicos realizados en el laboratorio de control de calidad de la planta de extracción San Joaquín, se observó que en el sistema de tratamiento no se lleva un control adecuado de los equipos. A continuación se presentan los resultados de las variables medidas en el sistema.

### 4.2.1 Análisis fisicoquímico

Los análisis fisicoquímicos determinan las características físicas, químicas o ambas de las aguas a tratar. En esta etapa la discusión de los resultados se realizará en cada punto de muestreo.

#### 4.2.1.1 Entrada de la planta (afluente industrial)

Las aguas a tratar en la planta de tratamiento de efluentes industriales provienen de los distintos procesos realizados en la planta de extracción de líquidos del gas natural, estas agua se encuentran contaminadas de aceites, diesel y principalmente de hidrocarburos condensados tales como: metano, etano, propano, entre otro. En la tabla 4.3 se muestran los análisis fisicoquímicos realizados en el afluente. A continuación se realiza la discusión por grupos de parámetros, a través de figuras representativas.

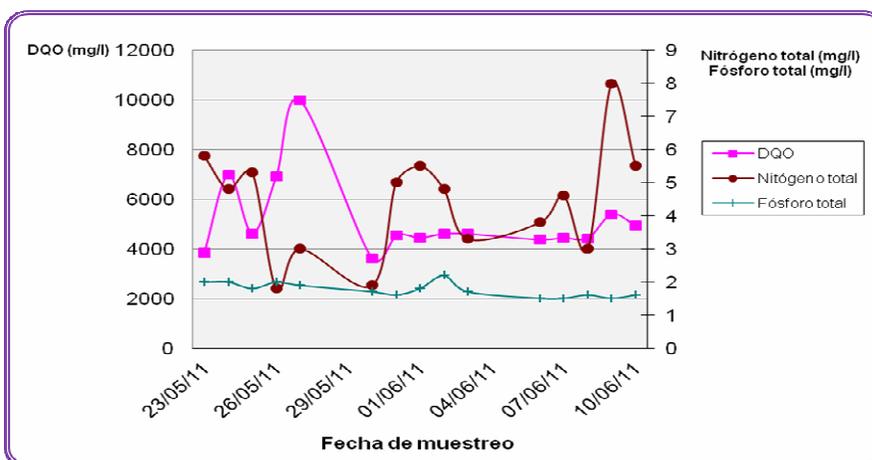
**Tabla 4.3 Análisis fisicoquímicos realizados al afluente**

fecha	Parámetros								
	DQO (mg/l)	OD (mg/l)	N <sub>T</sub> (mg/l)	P <sub>T</sub> (mg/l)	pH	T (°C)	S <sub>V</sub> (mg/l)	S <sub>S</sub> (mg/l)	S <sub>T</sub> (mg/l)
23/05/11	3.860	2,0	5,8	2,0	3,8	31,6	1.148	76	1.640
24/05/11	6.976	2,1	4,8	2,0	4,0	30,7	1.396	138	1.634
25/05/11	4.620	1,9	5,3	1,8	3,8	30,4	1.170	68	1.616
26/05/11	6.917	2,5	1,8	2,0	3,7	30,4	1.294	74	1.642
27/05/11	9.974	2,0	3,0	1,9	3,5	30,4	1.418	82	1.666
30/05/11	3.600	2,1	1,9	1,7	3,9	31,9	954	70	1.480
31/05/11	4.548	2,8	5,0	1,6	4,0	32,0	1.750	78	2.198
01/06/11	4.438	2,0	5,5	1,8	4,1	32,1	1.146	80	1.516
02/06/11	4.612	1,9	4,8	2,2	4,1	31,8	1.184	140	1.616
03/06/11	4.600	3,0	3,3	1,7	4,0	31,3	924	82	1.298
06/06/11	4.368	2,8	3,8	1,5	3,9	31,9	1.066	72	1.344
07/06/11	4.446	2,5	4,6	1,5	3,9	30,9	1.004	86	1.314
08/06/11	4.418	2,1	3,0	1,6	3,9	31,5	962	72	1.408
09/06/11	5.390	2,3	8,0	1,5	4,0	32,0	1.500	84	1.616
10/06/11	4.940	2,8	5,5	1,6	4,0	30,9	1.020	78	1.038
<b>Promedio</b>	<b>5.180,47</b>	<b>2,32</b>	<b>4,41</b>	<b>1,76</b>	<b>3,91</b>	<b>31,32</b>	<b>1.195,73</b>	<b>85,33</b>	<b>1.535,07</b>

#### • Análisis fisicoquímico de DQO, nitrógeno y fósforo del afluente

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada por medio de un agente químico fuerte. El nitrógeno y el fósforo se consideran como los principales elementos nutritivos, ambos pueden provocar un aumento de la productividad biológica.

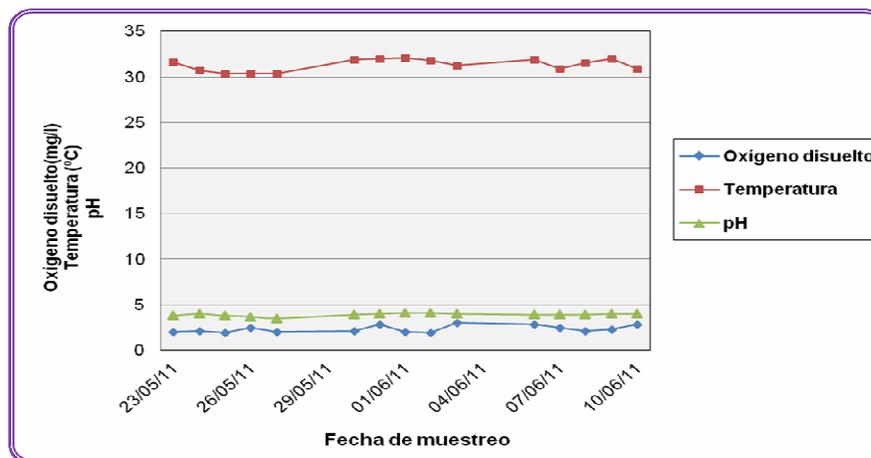
En la figura 4.2 se muestran las concentraciones de la demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total, obtenidos durante el tiempo de estudio, los valores para la realización de la figura fueron tomados de la tabla 4.3. En ella puede apreciar la variación de la demanda química de oxígeno, las cuales oscila entre un rango de (3600-9974) mg/l, esto se debe a la concentración de materia orgánica contenida en ella. En cuanto a las cantidades nitrógeno total y fósforo total, los valores promedio obtenidos fueron 4,41mg/l y 1,76 mg/l respectivamente, siendo estos valores bajos para la biodegradación de los compuestos orgánicos, lo que nos indica la deficiencia en compuestos inorgánicos específicos.



**Figura 4.2 Concentraciones de la demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total en el afluente.**

#### • Análisis de oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura del afluente

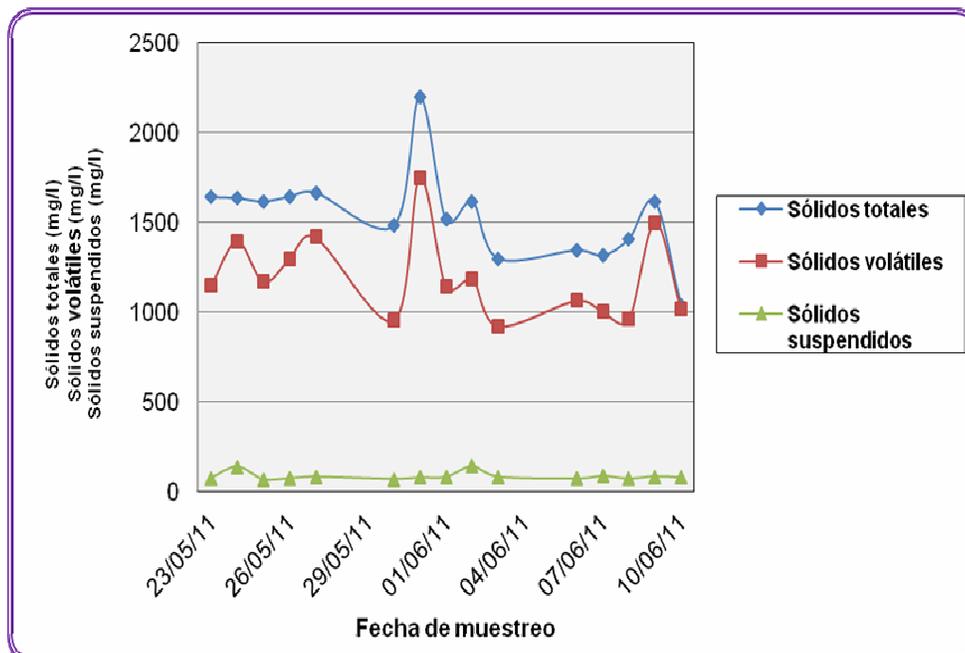
En la figura 4.3 se muestran las concentraciones de oxígeno disuelto, la variación de pH y temperatura del afluente, en ella se observa que el oxígeno disuelto tiene valores muy bajos los cuales están comprendidos entre 1,9 mg/l y 3,0 mg/l siendo su valor promedio de 2,32 mg/l, por otra parte el pH se encuentra con un promedio de 3,91, lo cual nos indica que el agua tiene carácter ácido, esto se debe a los compuestos generados de los distintos procesos. En cuanto a la temperatura se encuentra dentro del rango establecido para el desarrollo de la actividad bacteriana (25-35) °C. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.3.



**Figura 4.3 Concentración de oxígeno disuelto, variación de temperatura y pH en el afluente**

• **Análisis fisicoquímicos de sólidos totales, suspendidos y volátiles en el afluente**

En la figura 4.4 se muestran las concentraciones de los sólidos totales, disueltos y volátiles en el afluente, en ella se observa que los sólidos totales varían entre un rango de 1038mg/l y 2198 mg/l, obteniendo un valor promedio de 1.535,07 mg/l, por otra parte los sólidos suspendidos varían entre 70 mg/l y 140 mg/l siendo su valor promedio de 85,33 mg/l, con respecto a los sólidos volátiles, ellos varían entre 924 mg/l y 1.750 mg/l, el valor promedio obtenido fue de 1195,93 mg/l, siendo estos resultados característicos de estas aguas. Los valores para la realización de la figura fueron tomados de la tabla 4.3.



**Figura 4.4 Concentración de los sólidos totales, suspendidos y volátiles en el afluente.**

#### 4.2.1.2 Salida de la planta (efluente tratado)

El efluente generado es descargado a través de un canal hacia el río Guarío, el cual es uno de los afluentes del río Orocopiche que desemboca en el embalse La Estancia situado al este de la población de Aragua de Barcelona. Razón por la cual se hizo necesaria la evaluación de los parámetros siguientes: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, pH, oxígeno disuelto (OD) y temperatura.

Los resultados se muestran en la tabla 4.4. A continuación la discusión de los resultados se realizara por grupos de parámetros, a través de figuras representativas y se compararán, con el artículo 10 del decreto 883 “Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de aguas y vertidos o efluentes líquidos”. Es necesario que la empresa cumpla con estas normas, para preservar y mejora el ambiente.

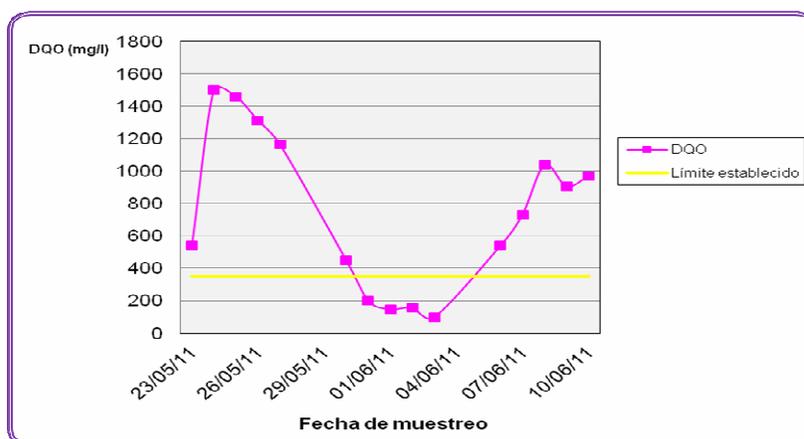
**Tabla 4.4 Análisis fisicoquímicos realizados al efluente**

Fecha	Parámetros								
	DQO (mg/l)	OD (mg/l)	N <sub>T</sub> (mg/l)	P <sub>T</sub> (mg/l)	pH	T (°C)	S <sub>V</sub> (mg/l)	S <sub>S</sub> (mg/l)	S <sub>T</sub> (mg/l)
23/05/11	540	2,0	0,3	0,8	6,5	29,9	514	48	844
24/05/11	1.500	1,8	0,8	1,2	6,2	30,2	640	60	1.064
25/05/11	1.458	2,0	0,6	1,0	6,3	30,0	786	48	1.100
26/05/11	1.310	2,0	0,2	1,3	6,3	30,1	920	50	1.196
27/05/11	1.162	2,1	2,0	1,3	6,2	30,2	1056	54	1.292
30/05/11	450	2,3	1,2	1,1	7,0	30,3	472	62	830
31/05/11	200	2,3	0,3	0,5	7,4	30,9	306	44	636
01/06/11	148	2,0	3,3	0,8	7,7	30,9	138	24	440
02/06/11	158	2,2	1,1	0,5	7,3	30,3	100	14	440
03/06/11	100	1,9	1,9	0,8	7,3	29,8	156	12	450
06/06/11	540	2,0	0,8	0,8	6,8	30,2	302	86	590
07/06/11	732	2,2	0,2	1,0	6,7	29,9	472	72	754
08/06/11	1.036	1,8	0,2	0,9	6,5	30,4	540	84	832
09/06/11	904	2,0	0,9	1,3	6,6	30,7	206	52	700
10/06/11	970	2,2	0,6	1,1	6,5	30,2	380	74	766
<b>Promedio</b>	<b>747,2</b>	<b>2,05</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>6,75</b>	<b>30,27</b>	<b>465,87</b>	<b>52,27</b>	<b>795,6</b>

#### • Análisis fisicoquímico de DQO, nitrógeno y fósforo del efluente

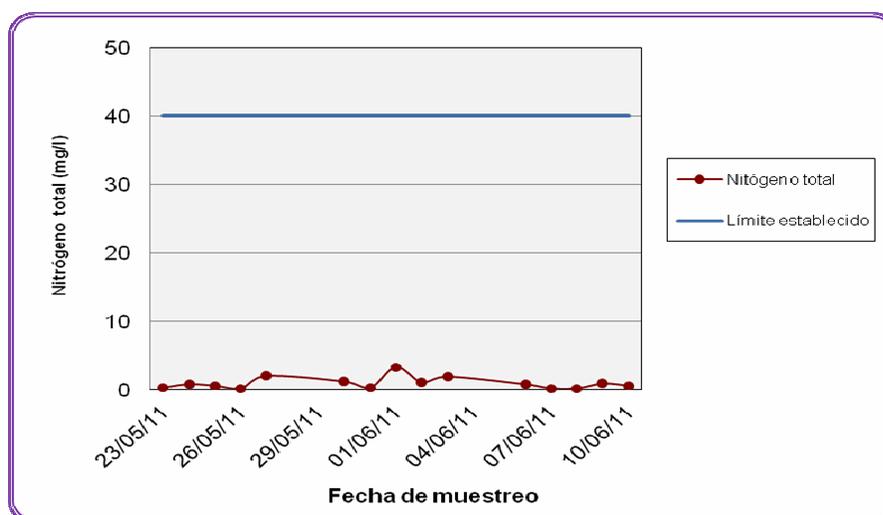
En la figura 4.5 se observa, que a pesar de que existe una reducción de la demanda química de oxígeno con respecto al valor de entrada, este se encuentra muy elevado en relación a la concentración límite establecida por el decreto 883 (350 mg/l), siendo el valor promedio de 747,2mg/l, esto puede deberse a la poca concentración de nutrientes

en los reactores y a la cantidad de materia orgánica contenida en el. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.4.

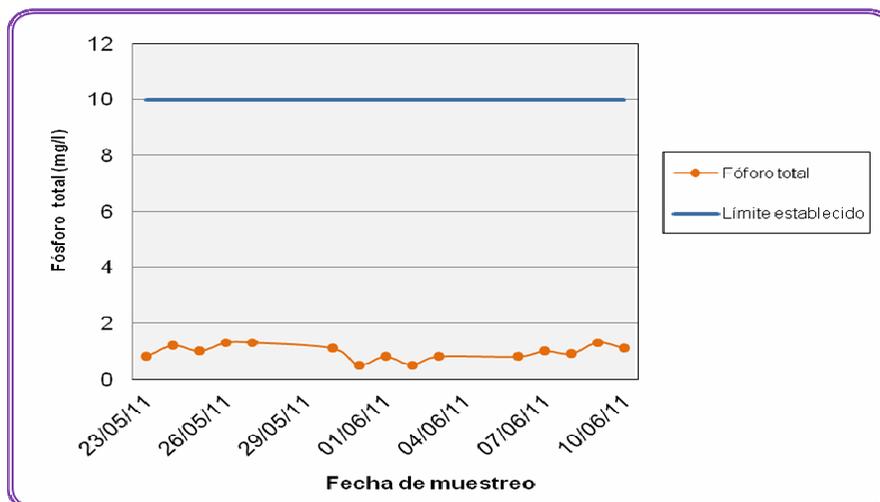


**Figura 4.5 Concentraciones de la demanda química de oxígeno en el efluente y límite establecido en el decreto 883**

No obstante en las figuras 4.6 y 4.7 se muestran las variaciones del nitrógeno total y fósforo total, en ella se puede percibir que los resultados se encuentran comprendidos entre (0,2-3,3) mg/l para el nitrógeno total y (0,5-1,3) mg/l para el fósforo total respectivamente, dichos resultados se sitúan dentro del valor establecido por el artículo 10 del decreto 883, lo cual establece que para el nitrógeno total el límite máximo es 40 mg/l y para el fósforo 10 mg/l. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.4.



**Figura 4.6 Concentraciones del nitrógeno total en el efluente y el límite establecido en el decreto 883**

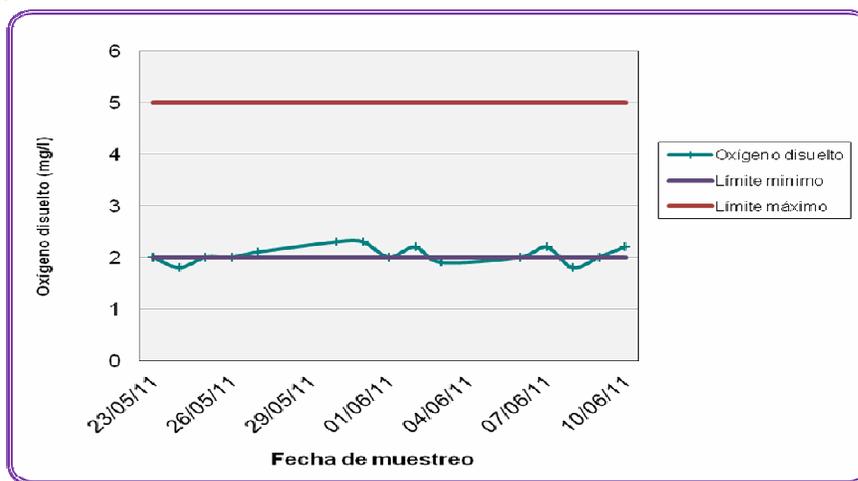


**Figura 4.7 Concentraciones de fósforo total en el efluente y el límite establecido en el decreto 883**

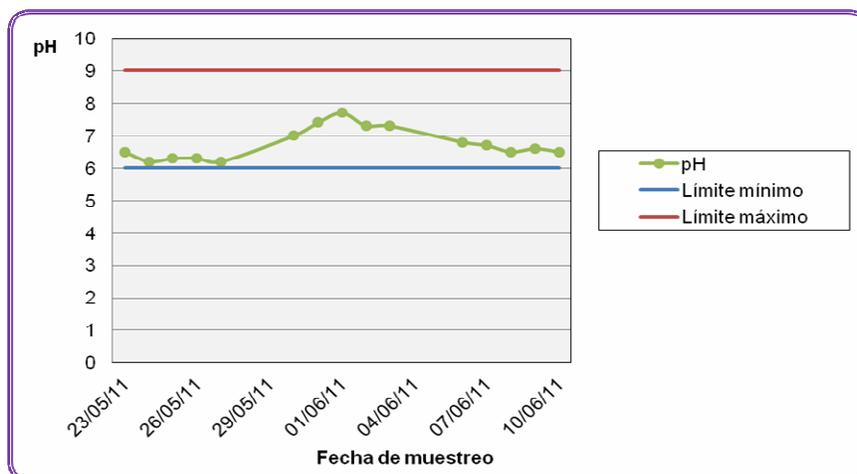
• **Análisis de oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura del efluente**

En la figura 4.8 se muestra la variación del oxígeno disuelto en el efluente, en ella se muestra que varían entre 1.8 mg/l y de 2,2 mg/l respectivamente, estos valores se encuentran por debajo del rango permitido (2-5) mg/l, esto puede ser causa de la cantidad de materia orgánica contenía en el efluente, lo cual puede producir efectos nocivos en determinadas especies, sobre todo si se descarga a los cuerpos de aguas, como es un río.

Por otra parte la acidez del agua medida por su pH, afecta el equilibrio químico y ecológico de las aguas ambientales, por lo tanto es de suma importancia el conocimiento de este parámetro. En la figura 4.9 se muestra que el rango de pH establecido por el artículo 10 del decreto 883 se encuentra entre 6-9, siendo el valor promedio obtenido en el efluente 6,75.

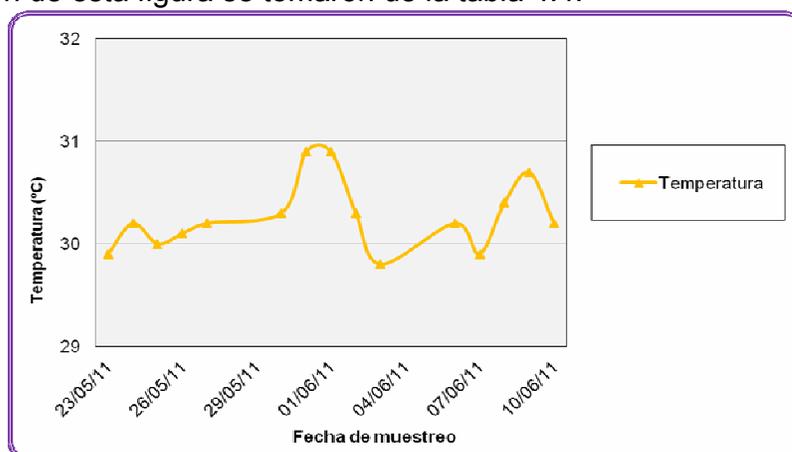


**Figura 4.8 Concentración del oxígeno disuelto en el efluente y límite de descarga hacia los cuerpos de aguas**



**Figura 4.9 Variación del pH en el efluente y límite establecido en el decreto 883**

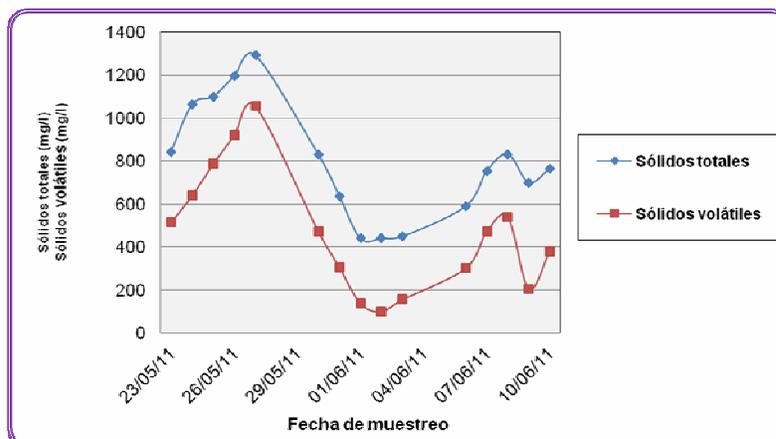
De acuerdo a la temperatura, este factor que incide en la vida acuática y es importante controlarla, en la figura 4.10 se observa que los valores obtenidos en el efluente están comprendidos entre (29,8-30,9) °C, siendo el valor promedio de 30,27 °C. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.4.



**Figura 4.10 Variación de la temperatura en el efluente**

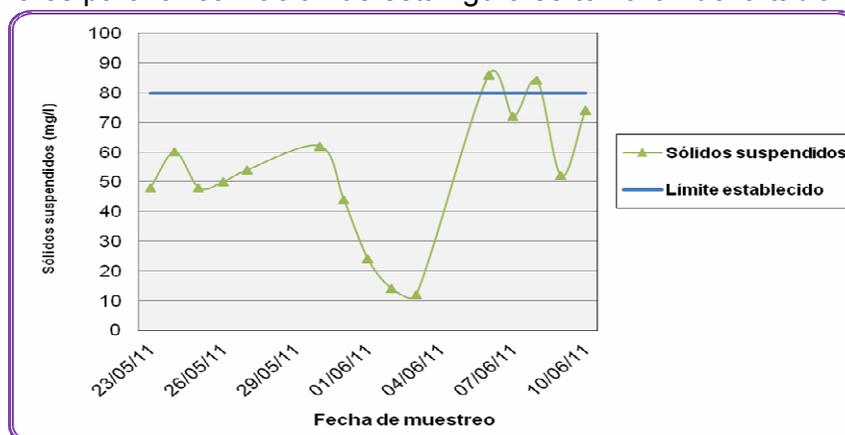
• **Análisis fisicoquímicos de sólidos totales, suspendidos y volátiles en el efluente**

En la figura 4.11 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos de los sólidos totales y volátiles en el efluente. De acuerdo a los sólidos totales y volátiles, es importante mencionar que el artículo 10 del decreto 883, no establecen ningún valor límite para estos parámetros, sin embargo, el valor promedio de los sólidos totales fue de 795,6 mg/l mientras que el de los sólidos volátiles es de 465,87 mg/l, se puede decir que existe una disminución considerable de dichos sólidos en relación a los valores obtenidos en la entrada de la planta.



**Figura 4.11 Concentración de los sólidos totales y volátiles en el efluente**

Con respecto a los sólidos suspendidos, en la figura 4.12 se observa que los sólidos volátiles oscilan entre (12-84) mg/l, por otra parte se pudo el estimar el valor promedio es de 52,27 mg/l, cabe destacar que aunque cumpla con los límites exigidos (80 mg/l de sólidos suspendidos) el proceso solo disminuye un 38,74%, lo que indica que el sistema tiene una baja remoción en cuanto a sólidos suspendidos se refiere, esto puede deberse al tiempo de retención de los sedimentadores, ocasionando problemas de suspensión de lodos. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.4.



**Figura 4.12 Concentración de sólidos suspendidos en el efluente y límite establecido en el decreto 883**

#### 4.2.1.3 Reactores biológicos

El sistema de tratamiento de efluente industriales esta conformados por dos reactores en paralelos, los cuales son los causantes de disminuir la materia orgánica, mediante microorganismos, principalmente bacterias. Una fracción de los compuestos se oxida por la acción microbiana liberando energía y el resto se utiliza para generar masa celular. Las tabla 4.5 y 4.6 muestran los parámetros analizados en ambos reactores.

Tabla 4.5 Análisis fisicoquímicos realizados en el reactor 1

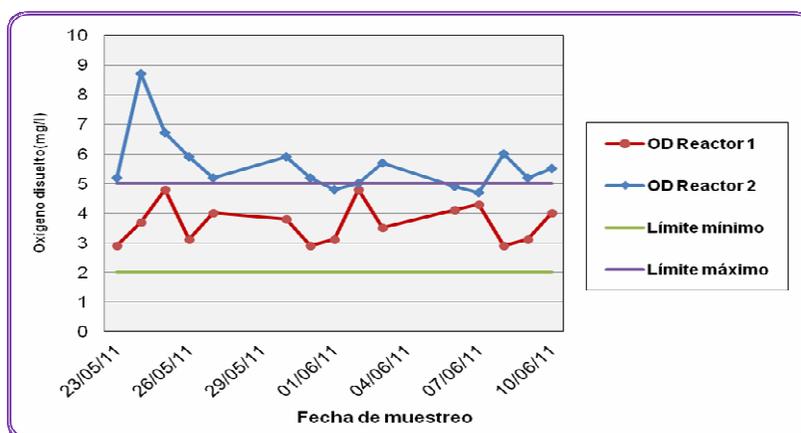
Fecha	Parámetros						
	pH	T (°C)	OD (mg/l)	S <sub>V</sub> (mg/l)	S <sub>S</sub> (mg/l)	S <sub>T</sub> (mg/l)	S <sub>SED.</sub> (%)
23/05/11	5,5	30,5	2,9	4.480	4.665	6.200	80
24/05/11	6,1	30,3	3,7	3.890	4.595	5.210	90
25/05/11	6,0	30,3	4,8	4.755	5.315	6.770	90
26/05/11	5,9	30,5	3,1	5.070	5.305	6.960	90
27/05/11	5,7	30,6	4,0	5.415	5.420	7.175	89
30/05/11	6,4	30,5	3,8	4.115	4.955	5.765	88
31/05/11	6,5	30,7	2,9	3.880	4.970	5.615	85
01/06/11	6,5	30,7	3,1	3.645	4.990	5.465	85
02/06/11	6,5	30,5	4,8	4.755	4.415	5.680	85
03/06/11	6,5	30,4	3,5	3.450	4.660	5.080	85
06/06/11	6,0	30,7	4,1	4.110	5.265	5.585	85
07/06/11	5,9	30,0	4,3	4.505	5.210	6.165	85
08/06/11	6,1	30,1	2,9	4.705	5.135	6.430	80
09/06/11	5,8	30,8	3,1	4.415	5.070	6.080	88
10/06/11	5,4	30,7	4,0	4.560	4.830	6.255	80
Promedio	6,05	30,49	3,67	4.383,33	4.986,67	6.029	85,67

Tabla 4.6 Análisis fisicoquímicos realizados en el reactor 2.

Fecha	Parámetros						
	pH	T (°C)	OD (mg/l)	S <sub>V</sub> (mg/l)	S <sub>S</sub> (mg/l)	S <sub>T</sub> (mg/l)	S <sub>SED.</sub> (%)
23/05/11	6,4	30,8	5,2	4.445	5.930	6.695	88
24/05/11	6,4	30,7	8,7	4.935	5.085	6.795	90
25/05/11	6,2	30,8	6,7	3.755	5.450	5.475	90
26/05/11	6,2	30,5	5,9	4.565	5.085	6.310	90
27/05/11	6,1	30,9	5,2	5.375	4.620	7.150	90
30/05/11	6,7	30,7	5,9	4.105	5.570	5.875	84
31/05/11	6,8	30,5	5,2	3.795	5.460	5.550	88
01/06/11	6,8	30,3	4,8	3.480	5.345	5.225	85
02/06/11	7,2	30,0	5,0	3.540	5.180	5.475	90
03/06/11	7,2	29,9	5,7	3.905	4.935	5.800	85
06/06/11	6,6	30,2	4,9	2.785	3.840	3.975	90
07/06/11	6,6	30,8	4,7	4.665	4.380	6.715	90
08/06/11	6,4	30,1	6,0	4.995	4.900	6.830	90
09/06/11	6,6	31,2	5,2	4.620	5.450	6.275	95
10/06/11	6,6	31,3	5,5	4.310	4.330	6.055	88
Promedio	6,59	30,58	5,64	4.218,33	5.037,33	6.013,33	88,87

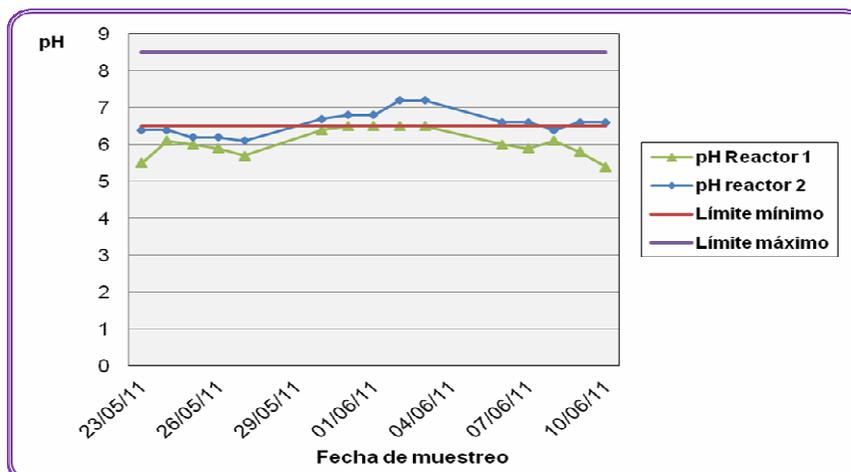
• **Análisis de oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura en los reactores**

En la figura 4.13 se muestra la variación de las concentraciones de oxígeno disuelto, en ella se puede observar, que el oxígeno disuelto en el reactor 1 se encuentra en un rango comprendido entre 2,9 mg/l y 4,8 mg/l respectivamente, siendo su valor promedio 3,67 mg/l, dichos valores se encuentran dentro del rango de diseño (2-5) mg/l, mientras que para el reactor 2 varían entre 4,7mg/l y 8,7 mg/l, con un valor promedio de 5,64 mg/l, sin embargo es importante mencionar que en el mismo se encuentra por encima de lo establecido, esto se debe a la mala distribución del aire, ya que no poseen válvulas para controlar o regular el suministro de aire. Esto ocasionaba una fuerte turbulencia en el reactor 2.



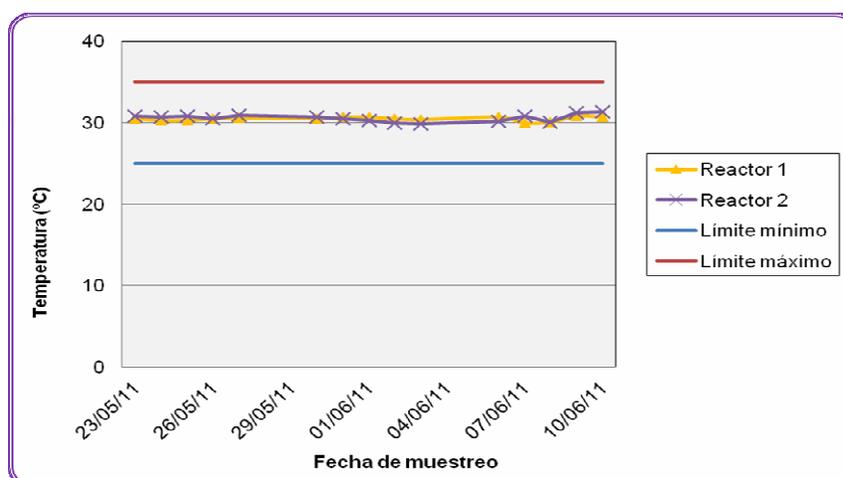
**Figura 4.13 Concentración del oxígeno disuelto en los reactores y límite de diseño**

De acuerdo al pH, en la figura 4.14 se muestra que los valores obtenidos en el reactor 1 varía entre un rango de 5,4 a 6,4, siendo el valor promedio 6,05, mientras que para el reactor 2 oscila entre 6,1-7,2 con un valor promedio de 6,59, esta variación se debe a la cantidad de soda cáustica que se le agrega al efluente del sedimentador primario. El reactor 1 se encuentra debajo del rango mínimo establecido, para que ocurra una actividad biológica óptima (6,5-8,5), por tanto se hace necesario el suministro de químicos para aumentar el pH.



**Figura 4.14 Variación del pH en los reactores y límite establecido para que ocurra la actividad biológica**

Por otra parte en la figura 4.15 se observó que la temperatura de los reactores se mantuvo casi constante en todo el sistema siendo su promedio de 30,49 °C para el reactor 1 y 30,58 °C para el reactor 2 respectivamente, cumpliendo con lo establecido para el desarrollo de la actividad bacteriana (25-35) °C. Los valores para la realización de esta figura se tomaron de la tabla 4.5 y 4.6.

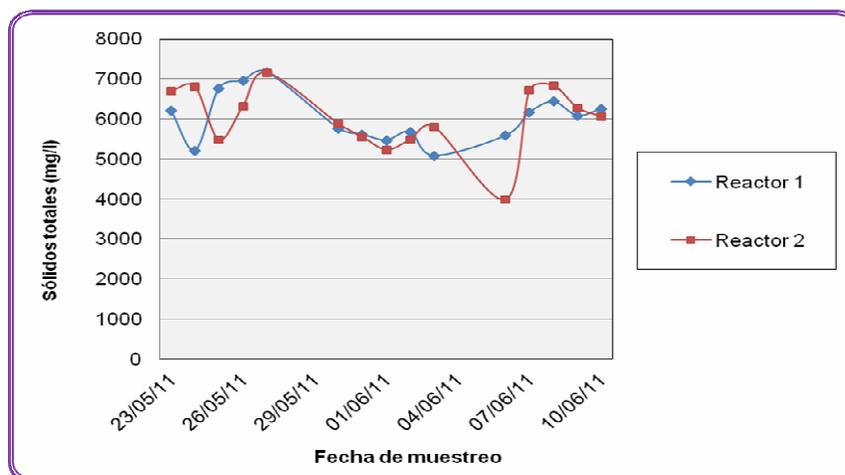


**Figura 4.15 Variación de la temperatura en los reactores y límite de diseño establecido para un proceso convencional de lodos activados**

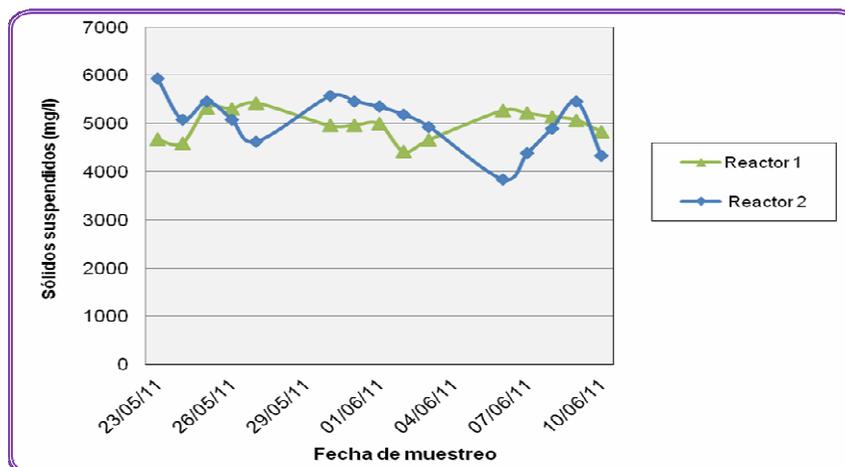
• **Análisis fisicoquímicos de sólidos totales, suspendidos, volátiles y sedimentables en los reactores**

En la figura 4.16 se muestran la variación de los sólidos totales en los reactores, en ella se puede observar que se obtuvieron valores comprendidos entre (7.175-5.080)mg/l de sólidos totales para el reactor 1 y (7.150-3.975) mg/l para reactor 2, en lo que respecta a los sólidos suspendidos en la figura 4.17 se percibe las variaciones de los sólidos

suspendidos, siendo el valor promedio obteniendo de 4.986,67 mg/l para el reactor 1 y 5.037,33 mg/l para el reactor 2, estos valores son característicos de un proceso convencional de lodos activados, ya que existe una generación de microorganismos.



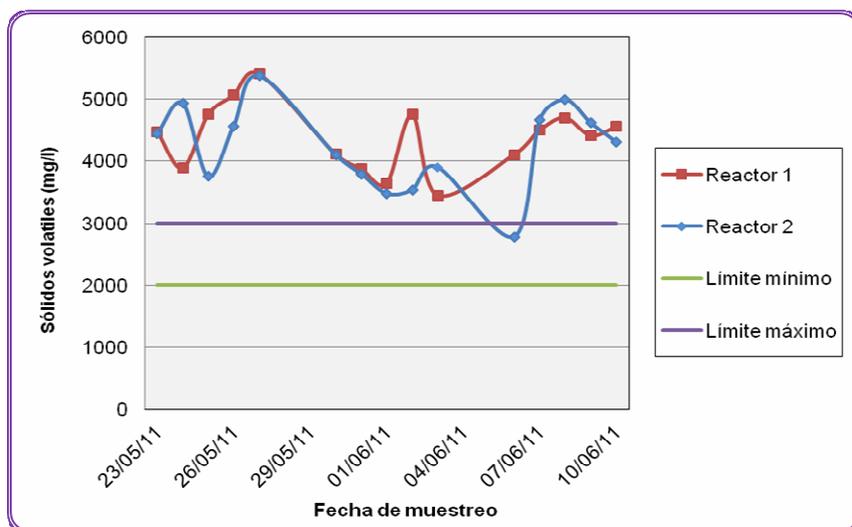
**Figura 4.16 Concentración de los sólidos totales en los reactores**



**Figura 4.17 Concentración de los sólidos suspendidos en los reactores**

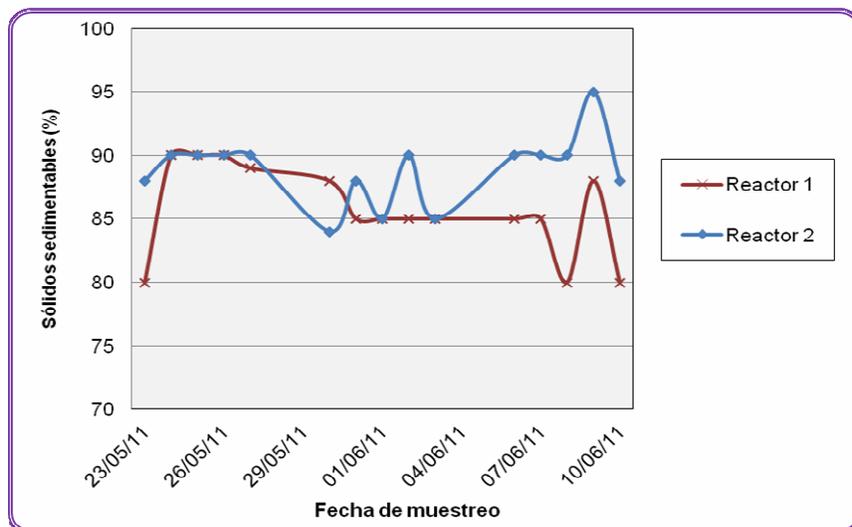
Por otra parte en la figura 4.18 se muestra la variación de la concentración de los sólidos volátiles en los reactores, en ella se observa que la concentración en el reactor 1 oscila entre (3.450-5.415) mg/l, mientras que en el reactor 2 se encuentran en (3.480-5.415) mg/l, lo cual se obtuvo un promedio de 4.383,33 mg/l para el reactor 1 y 4.218,33 mg/l para el reactor 2, estos valores están por encima del rango de diseño para un proceso convencional de lodos activados (2.000-3.000) mg/l, esto nos indica que en el sistema no se lleva un control de la cantidad de lodos que se generan del proceso, lo cual ocasiona que los microorganismos se reproduzcan cada vez más y causen problemas en las

tuberías, es importante destacar que los operadores realizan la purgan en un tiempo indefinido, dejándolo con poca cantidad de sólido volátiles.



**Figura 4.18 Concentración de los sólidos volátiles en los reactores y rango de diseño para un proceso convencional de lodos activados**

En la figura 4.19 se muestra la variaciones de los sólidos sedimentables en los reactores, en ella se puede observar que varían entre (80-95) % en ambos reactores, obteniendo un valor promedio de 85,67% para el reactor 1 y 88,87% para el reactor 2, lo que nos indica que en los reactores biológicos existen una gran cantidad de lodos presentes en ellos, estos provoca problemas en rendimiento y eficacia del proceso.



**Figura 4.19 Variación de los sólidos sedimentables en los reactores**

#### 4.2.1.4 Estación de bombes de lodos recirculados

Estación de bombes de lodos recirculados funciona como un biodigestor como parte del proceso de un lodo activado convencional, en ella se recircula los lodos provenientes de los sedimentadores hacia los reactores biológicos, con la finalidad de mantener la concentración en los mismos. En la tabla 4.7 se muestra los análisis fisicoquímicos realizados a los lodos recirculados.

**Tabla 4.7 Análisis fisicoquímicos realizados a los lodos recirculados**

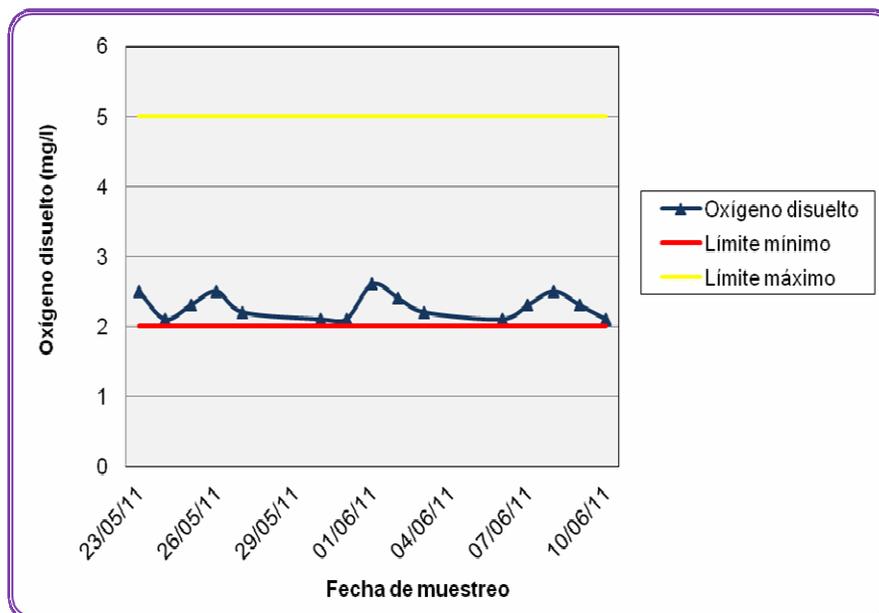
Fecha	Parámetros					
	pH	T (°C)	OD (mg/l)	S <sub>v</sub> (mg/l)	S <sub>s</sub> (mg/l)	S <sub>T</sub> (mg/l)
23/05/11	6,5	30,1	2,5	3.320	4.680	4.935
24/05/11	6,3	30,1	2,1	5.000	4.905	6.845
25/05/11	6,3	30,2	2,3	5.515	6.440	7.645
26/05/11	6,3	30,4	2,5	4.860	5.920	6.545
27/05/11	6,2	30,5	2,2	4.205	5.405	5.445
30/05/11	6,8	30,4	2,1	3.950	5.455	5.495
31/05/11	6,9	30,3	2,1	4.640	5.645	6.270
01/06/11	6,9	30,2	2,6	3.245	4.425	4.965
02/06/11	7,3	30,0	2,4	5.515	4.610	7.365
03/06/11	7,2	30,2	2,2	3.805	4.930	5.525
06/06/11	6,8	30,3	2,1	4.910	5.695	6.895
07/06/11	6,7	30,2	2,3	5.400	2.070	7.405
08/06/11	6,4	30,5	2,5	5.550	5.745	7.505
09/06/11	6,6	31,0	2,3	5.850	7.215	7.425
10/06/11	6,4	30,7	2,1	5.500	6.480	6.865
<b>Promedio</b>	6,64	30,34	2,29	4.751	5.308	6.475,33

#### • Análisis de oxígeno disuelto (OD), pH y temperatura en la estación de bombeo de lodos recirculados

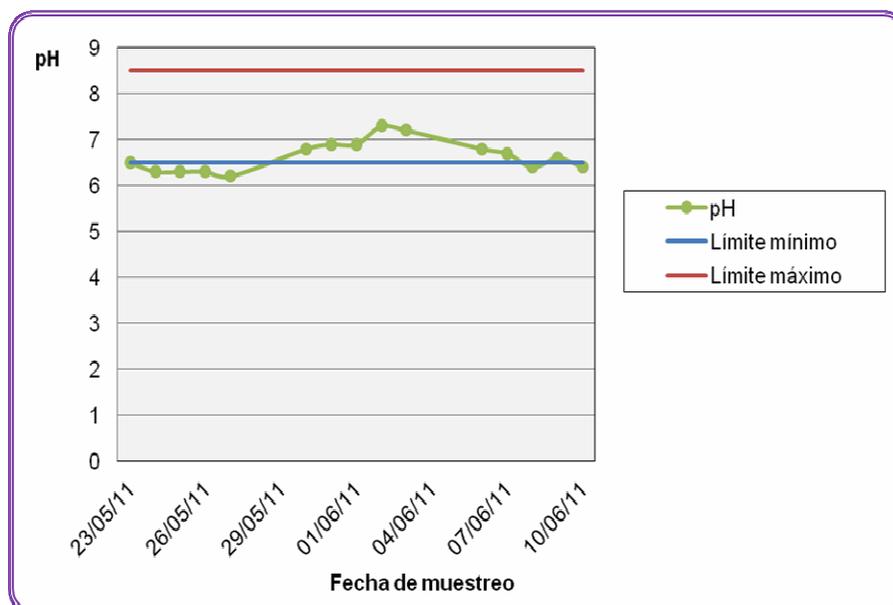
En la figura 4.20 se muestran las variaciones del oxígeno disuelto de lodos recirculados realizadas durante el periodo de muestreo, en ella se puede apreciar que los resultados obtenidos se encuentran comprendido entre (2,1-2,6) mg/l, siendo su valor promedio de 2,29 (mg/l), dichos valores se encuentra cerca del rango recomendado para estos procesos, esta situación podría ser causa de la mala distribución del aire, ya que los difusores no tiene una válvula para controlar la cantidad de oxígeno, además se pudo notar en algunas oportunidades que la estación de bombes de lodos recirculados no tenía suministro de oxígeno.

En la figura 4.21 y 4.22 se muestran las variaciones de pH y temperatura en la estación de bombes de lodos recirculados, en ella se puede observar que los resultados obtenidos del pH oscila entre (6,2-7,3) siendo su valor promedio 6,64,

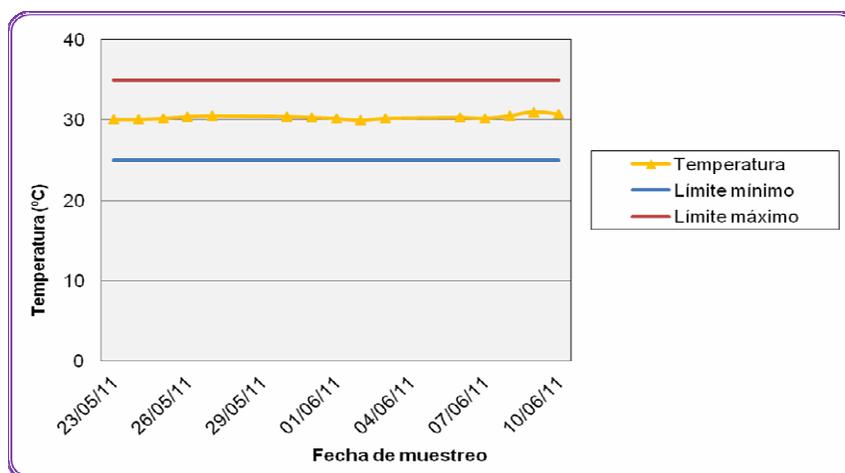
mientras que la temperatura se encuentra comprendida entre (30,1-31,0) °C y su valor promedio fue de 30,34 °C, por lo tanto estos resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos de pH y temperatura para un proceso de lodos activados.



**Figura 4.20 Concentración de oxígeno disuelto de los lodos recirculados y límite de diseño establecido para un proceso convencional de lodos activados**



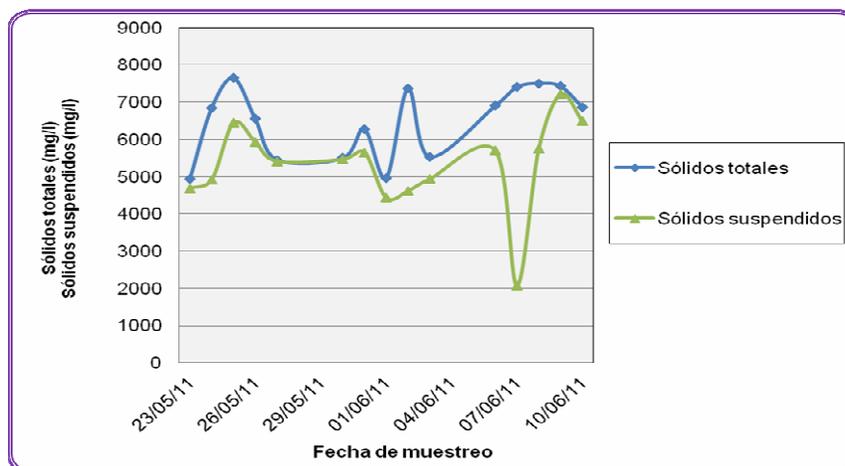
**Figura 4.21 Variación del pH de los lodos recirculados y límite de diseño**



**Figura 4.22 Variación de la temperatura de los lodos recirculados y límite de diseño**

• **Análisis fisicoquímicos de sólidos totales, suspendidos y volátiles en la estación de bombeo de lodos recirculados**

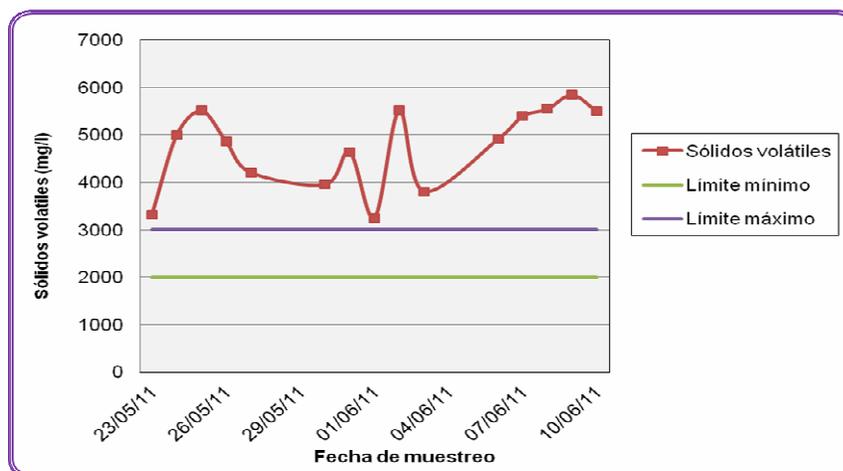
En la figura 4.23 se muestran las concentraciones de los sólidos totales y suspendidos en la tanquilla de recirculación de lodos, en ella se observa que los sólidos totales están comprendidos entre (3.320-5.515) mg/l y los sólidos suspendidos entre (2.070-7.225) mg/l respectivamente, estos valores son altos, debido a la cantidad de lodos generados en este proceso.



**Figura 4.23 Concentración de los sólidos totales y suspendidos de los lodos recirculados**

En cuanto a los sólidos totales en la figura 4.24 se muestra las concentraciones obtenidas durante el tiempo de estudio, en ella se puede apreciar que varían entre 3.320

mg/l y 5.550 mg/l, por lo tanto estos valores se encuentran por encima del rango establecido para un proceso de lodos activados (2.000-3.000) mg/l, esta situación podría causar daños en el proceso biológico y inhibir el proceso.



**Figura 4.24 Concentración de los sólidos volátiles de los lodos recirculados y límites de diseño**

#### 4.2.2 Chequeo de los parámetros operacionales del proceso biológico

El sistema de tratamiento de efluentes industriales cuenta con dos reactores, ubicados en paralelo con la finalidad de reducir la materia orgánica. A continuación se presentan los resultados obtenidos de los parámetros operacionales de ambos reactores y su comparación con los valores de diseño de un sistema convencional de lodos activados.

**Tabla 4.8 Valores de los parámetros operacionales actuales y de diseño**

Parámetros	Operación		Diseño
	Reactor 1	Reactor 2	
Tiempo de retención hidráulica (h)	69,95	69,95	4-8
Tiempo de retención celular (d)	3,96	3,83	5-15
Tasa de utilización específica ( $d^{-1}$ )	44,33	46,43	NP
Relación alimento microorganismos ( $d^{-1}$ )	0,51	0,56	0,3-0,6
Coefficiente de descomposición endógena $k_d$ ( $d^{-1}$ )	0,0023	-0,1009	0,05-0,17
Coefficiente de producción máxima $Y$ (kg/kg)	0,9415	0,7042	0,31-0,72

NP: no reportado

En la tabla 4.8 se observa que el tiempo de retención hidráulico es muy alto en comparación con los valores indicados para un proceso convencional de lodos activados, esto se debe al poco caudal que entra por día al proceso biológico, ya que a medida que disminuye el flujo que ingresa al reactor, mayor es el tiempo en el cual el agua se mantiene retenida en este.

En cuanto al tiempo de retención celular, se encuentra bajo con respecto al rango establecido (5-15) días para un proceso convencional de lodos activados, esta situación podría ser causa de la mala medición del caudal, ya que el método utilizado era muy inexacto. Por otra parte de acuerdo a un balance de materia al proceso biológico se determinó la relación alimento microorganismos, en la tabla 4.8 se observa que dicha relación se encuentra dentro del rango de diseño establecido, esto nos indica que la cantidad de alimento presente en el sistema es suficiente para mantener el crecimiento de los microorganismos.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la tasa de utilización específica, este parámetro no tiene rangos establecidos, sin embargo, nos muestra que la velocidad de sustrato consumida por lo microorganismos es mayor en el reactor 2, esto se debe a la cantidad de microorganismos presentes y al tiempo de retención celular, además es importante mencionar que mientras mayor sea la tasa de consumo, mayor será la velocidad de crecimiento.

El coeficiente de descomposición endógena muestra la fracción de microorganismos por unidad de tiempo oxidada durante el proceso de respiración endógena, de acuerdo a los valores obtenidos, estos se encuentran por debajo del rango establecido en ambos reactores, debido a la falta de nutrientes y oxígeno disuelto en el sistema. Por otra parte el coeficiente de producción máxima para el reactor 2 obtuvo un valor de 0,7042 kg/kg, a diferencia del reactor 1 (0,9415 kg /kg), el cual resultó estar por encima del valor establecido para este proceso. Tomando en cuenta cada uno de los aspectos se puede concluir que existe una producción excesiva de lodos biológicos por kilogramo de sustrato consumido, debido a que en el sistema no se lleva un control de la purga de los lodos.

En cuanto al caudal de purga, se necesitan desalojar del sistema 92,28 m<sup>3</sup>/d, esto es aproximadamente 438,42 kg sólidos volátiles por día. Estos valores están referidos a los datos calculados durante los días de muestreo.

En la tabla 4.9 se muestra los nutrientes necesarios y disponibles del sistema biológico, en ella se puede observar que la cantidad necesaria de nitrógeno y fósforo es mayor que la disponible, esto quiere indicar que existe una gran demanda de dichos nutrientes, es decir; la cantidad que entra al reactor no es suficiente, para que ocurra completamente la remoción de la materia orgánica. Esto se debe a que en la planta actualmente no se realiza ninguna dosificación de químicos, además tampoco llevan un control de dichos parámetros.

**Tabla 4.9 Nutrientes necesarios y disponibles en el proceso biológico.**

Nutrientes	Necesario	Disponible
Nitrógeno (kg/d)	171,47	0,46
Fósforo (kg/d)	51,62	0,18

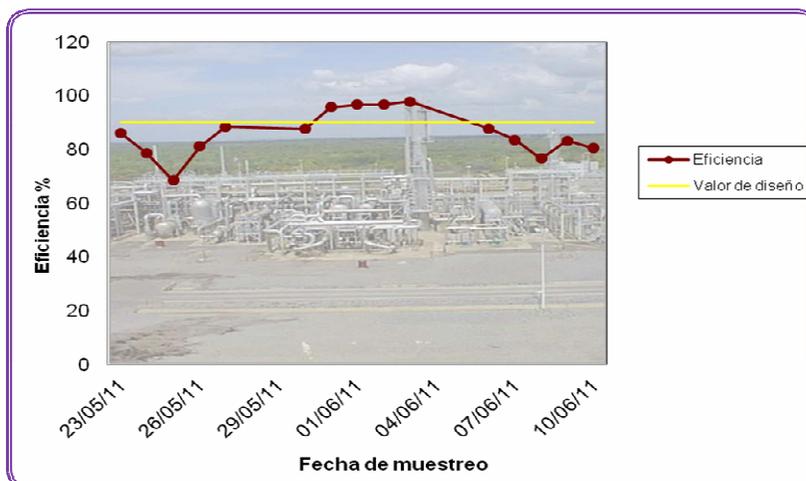
Es importante mencionar que los resultados obtenidos en esta etapa son contradictorios, esto se debe a los caudales, ya que en vista de la mala operación que tiene la planta, fué difícil la medición de los mismos.

#### 4.3 Estimación de la eficiencia del sistema de tratamiento en función de la demanda química de oxígeno (DQO)

En la tabla 4.10 se muestra la remoción de la demanda química de oxígeno en el proceso biológico, en ella se observa que los valores obtenidos oscilan entre (76,55-97,83) siendo el valor promedio de 85,86 %, esto indica que a pesar de que la planta no opera de acuerdo a su diseño, existe una gran remoción de materia orgánica biodegradable.

**Tabla 4.10 Valores de la remoción de DQO en el proceso biológico**

<b>Fecha</b>	<b>%E</b>
23/05/11	86,01
24/05/11	78,5
25/05/11	68,44
26/05/11	81,06
27/05/11	88,35
30/05/11	87,5
31/05/11	95,6
01/06/11	96,67
02/06/11	96,57
03/06/11	97,83
06/06/11	87,64
07/06/11	83,54
08/06/11	76,55
09/06/11	83,23
10/06/11	80,36
<b>Promedio</b>	<b>85,86</b>



**Figura 4.25 Variación de la eficiencia del proceso biológico**

En la figura 4.25 se muestra la variación de la eficiencia del proceso biológico, en ella se que observa durante algunos días se encontró por encima del valor de diseño (90%). No obstante la DQO en el efluente sigue siendo alto con respecto límite máximo permitido por las normas ambientales, esto puede ser causa de la falta de nutrientes el sistema.

#### **4.4 Realización de propuestas que permitan el buen funcionamiento del proceso biológico**

Una vez evaluada la operatividad del sistema biológico, se proponen soluciones con la finalidad de mejorar el funcionamiento del proceso.

##### **4.4.1 Cambios necesarios para mejorar el sistema de tratamiento de efluentes industriales**

En el sistema de tratamiento se observó la falta de mantenimiento en su estructura, debido a que algunos equipos se encuentran deteriorados. No obstante de acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación de los análisis fisicoquímicos y los parámetros operacionales de la planta, se procedió a proponer cambios que permitan el buen funcionamiento del sistema biológico:

- **Adiestrar al personal de operación**

La planta de tratamiento de efluentes industriales posee un operador encargado de velar el funcionamiento del sistema y el mantenimiento de todas las unidades que conforma el sistema, sin embargo este personal carece de entrenamiento, es por esto que se propone adiestrarlos con el fin de obtener una operación correcta de las misma y el mantenimiento adecuado.

- **Caudales**

Con respecto al caudal de entrada se recomienda llevar un control fijo ya que en algunas ocasiones, la bomba se encontraba apagada, por otra parte es necesario la incorporación

de vertederos en las canaletas para así poder obtener mejores resultados en la medición de dichos caudales, ya que este es un factor importante a la hora de evaluar el proceso. No obstante se propone la verificación de dichos caudales, ya que se requieren para el balance de masa y la purga de lodos.

- **Equipos**

A fin de lograr una mejor separación de los aceite se propone la evaluación del separador de placas corrugadas, con la finalidad de ponerlo en funcionamiento, ya que este equipo es necesario en esta planta, además se recomienda hacer mantenimiento en las tuberías y incrementar el nivel de la tanquilla que recoge los aceites del CPI, por la menos a 3 pies de altura, para evitar derrames a causas de las lluvias.

- **Distribución de aire**

El oxígeno disuelto es un parámetro importante en el proceso biológico, por consiguiente se hace necesario la revisión del sistema de tuberías y difusores, ya que los reactores y la estación de bombes de lodos recirculados no cuentan con una apropiada distribución de aire.

- **Caudal de purga**

En la planta de tratamiento no se puede obtener un tiempo específico de purga, ya que esto depende de la cantidad de microorganismo que se producen diariamente en el sistema, sin embargo de acuerdo a los datos obtenidos se recomienda purgar en un solo lecho de secado durante 4 horas, por el exceso de lodos que se encuentra en los reactores. Posteriormente se hace necesario evaluar el sistema para verificar la cantidad de lodos que debe ser desalojado.

#### **4.4.2 Programa de operación y mantenimiento de la planta**

Para una mejor operación y mantenimiento adecuado de los equipos se propuso un programa, donde se les indiquen a los operadores las labores de operación, mantenimiento y análisis, a realizar en las instalaciones. A causa de los problemas encontrados durante la evaluación, en la tabla 4.11 se muestra el programa de operación y mantenimiento propuesto para la planta de extracción san Joaquín.

**Tabla 4.11 Programa de operación y mantenimiento propuesto para la planta de extracción San Joaquín**

Operación y mantenimiento	Control			
	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Realizar análisis fisicoquímico		X		
Purgar los lodos generados en el proceso biológico		X		
Limpiar la rejilla	X			
Limpiar la planta de tratamiento			X	
Limpiar los lechos de secado			X	
Revisar el funcionamiento de todas las bombas			X	
Revisar las tuberías			X	
Chequear el caudal	X			
Lubricación engrase y cambio de aceite			X	
Regular el aire del soplador según la cantidad de oxígeno disuelto obtenido	X	X		
Pintar las partes metálicas				X
Adiestra al personal				X
Realizar dosificación de químico	X			
Llevar un registro del muestreo	X			

Para el análisis fisicoquímico se evaluarán los parámetros de: pH, oxígeno disuelto, caudal diariamente; nitrógeno, fósforos, sólidos suspendido, sólidos totales, sólidos volátiles, la demanda química de oxígeno (DQO) se realizara semanalmente.

Con respecto a la purga de lodos se efectuaran de acuerdo a la cantidad que se generen en el proceso biológico, para así mantener un nivel de sólidos suspendidos volátiles. Por otra parte se recomienda limpiar las rejillas cada 3 horas, para evitar que el nivel del sedimentador secundario disminuya. Con estas propuestas se pretende mantener una mejor operación y cumplimiento de las normas ambientales

#### 4.5 Conclusiones

1. Actualmente se encuentran equipos fuera de servicio, por lo tanto planta de tratamiento de efluentes industriales no opera de acuerdo a su filosofía de diseño.
2. Los caudales del paso de los reactores y el de salida de la planta se consideraron como aproximaciones, ya que el método utilizado para el cálculo de los mismos, no fue el más adecuado.
3. El efluente de la planta de tratamiento presenta una DQO promedio de 747,2 mg/l, encontrándose fuera del límite permitido por el artículo 10 del decreto 883 (350 mg/l).
4. Los reactores biológicos contiene una alta concentración de sólidos volátiles y baja concentración de oxígeno disuelto, así mismo el tiempo de retención hidráulica siendo su valor promedio de 69,95 horas, valor muy alto para este tipo de proceso.
5. El tiempo promedio de retención celular fue de 3,96 días para el reactor 1 y 3,83 días para el reactor 2, el cual está por debajo del límite establecido para un proceso convencional de los activados (5-15) días.
6. La cantidad de alimento presente en el reactor 1 fue de  $0,51 \text{ d}^{-1}$  y en el reactor 2 fue de  $0,56 \text{ d}^{-1}$ , siendo dichas cantidades suficientes para mantener el crecimiento de los microorganismos, debido a que se encuentran dentro del rango establecido para un proceso convencional de lodos activados.
7. A partir del balance de materia al proceso biológico, se determinó que la necesidad de nutriente en los reactores fue de 171,47 kg de nitrógeno por día y 51,62 kg de fósforo por día.
8. La eficiencia del proceso biológico en la remoción de DQO es de 85,86 %.
9. Para lograr una mejor operación de la planta de tratamiento se propuso la evaluación del separador de placas corrugadas (CPI).
10. En vista de la cantidad de microorganismos en el proceso biológico se hace necesario la purga de los sólidos volátiles en la tanquilla de recirculación para disminuir las cantidades excesivas de lodos y mantener una concentración adecuada en los reactores.

#### **4.6 Recomendaciones**

1. En vista de los problemas generados en la planta se requiere de un supervisor capacitado para la operación de la misma.
2. Con la finalidad de disminuir la materia orgánica en el proceso, se recomienda realizar la caracterización del afluente, para conocer los compuestos contaminantes específicos que posee el agua.
3. Se hace necesario la instalación de un mecanismo que permita obtener una medición de caudal real.
4. Se exhorta al Ministerio del Poder Popular del Ambiente como ente regulador de la normativa ambiental del estado Venezolano, a realizar el seguimiento de esta planta de tratamiento, para así verificar la adecuación de las instalaciones, con el propósito de evitar daños al ambiente y enfermedades tanto infecciosas como cancerígenas, ya que estas aguas llegan a un cauce de un río que es utilizado como fuente de agua potable.

## BIBLIOGRAFIA

- Corpoven (1989). **“Curso básico de tratamiento de efluentes líquidos industriales”**. Anzoátegui, Venezuela.
- COVENIN 2462-02 (2002). **“Aguas naturales industriales y residuales. Determinación del pH”**. Caracas, Venezuela.
- COVENIN 2871-92 (1992). **“Aguas naturales industriales y residuales. Determinación del oxígeno disuelto”**. Caracas, Venezuela.
- Franson, M. (1992). **“Métodos normalizados para el análisis del agua potable y residuales”**. Madrid, España.
- González, C. (2000). **“Evaluación diagnóstica de la Planta de tratamiento de aguas residuales los Olivos, Puerto Ordaz, Estado Bolívar”**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Anzoátegui, Venezuela.
- Guerra, P. (2010). **“Evaluación del funcionamiento actual en plantas de tratamiento de aguas residuales industriales ubicadas en Barcelona, estado Anzoátegui”**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Anzoátegui, Venezuela.
- Intevap (2003). **“Informe técnico, adecuación para la planta de tratamiento de efluentes industriales”**. Anzoátegui, Venezuela.
- ISO15705:2002 (2002). **“Calidad del agua. Determinación del índice de la demanda química de oxígeno. Método de sellar tubos en pequeñas escalas”**.
- ISO6878:2005 (2005). **“Calidad del agua. Determinación del fósforo. Método espectrométrico de molibdato de amonio”**.
- ISO2770-02 (2002). **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de la temperatura”**.
- ISO11905-1 (1997). **“Calidad del agua. Determinación del nitrógeno. Parte I: método de mineralización oxidante con peróxido de sulfato”**.
- Mectcalf y eddy Inc. (1995). **“Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización”**. Tercera Edición. Volumen I y II. Editorial MacGraw-Hill, Mexico.

- Nalco (1998). **“Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicación”**. Editorial MacGraw-Hill, México.
- Nieves, N. (1996). **“Manual del sistema de tratamiento de efluentes industriales de la planta de extracción San Joaquín”**, Gerencia de procesamiento de gas, Planta de extracción San Joaquín. Anzoátegui, Venezuela.
- Perry, R. (1992) **“Perry manual del ingeniero químico”**. Tomo IV y VI. Sexta Edición. Editorial MacGraw-Hill. Ciudad de México, México.
- Planta de extracción San Joaquín (1996). **“Manual de operaciones”**. Anzoategui, Venezuela.
- Ramalho, R. (1991). **“Tratamiento de aguas residuales”**. Segunda edición. Editorial Reverté S.A., Barcelona, España.
- Rojas, W. (2005). **“Estudio de la factibilidad de implementar un polímero el cual mejore las condiciones en el sistema de tratamiento de efluentes industriales en la planta de extracción San Joaquín edo. Anzoátegui PDVSA GAS”**. Anzoátegui, Venezuela.
- Rivas Mijares, G. (1978). **“Tratamiento de aguas residuales”**, Ediciones Vega, 2<sup>da</sup> Edición, Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, A. (1993). **“Guía para la operación y control de la planta de efluentes”**, Gerencia de procesamiento de gas, Planta de extracción San Joaquín. Anzoátegui, Venezuela.
- Tawil, J. (2008). **“Evaluación del incremento de la capacidad de procesamiento de la planta de tratamiento de efluentes líquidos (PTEL) del terminal de embarque jose-PDVSA”**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Anzoátegui, Venezuela.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>EVALUACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES EN UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN DE LÍQUIDOS DEL GAS NATURAL</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Ana Katherina Bolívar Carvajal</b>	<b>CVLAC: 18.205.602 E MAIL: ktherinab@gmail.com</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

Proceso Biologico

---

Tratamiento

---

Efluente

---

Tiempo de secado

---

Extraccion de liquidos

---

Gas Natural

---

Red de Drenaje

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicada	
	Ingeniería Química

#### RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo se evaluó el proceso biológico del sistema de tratamiento de efluentes industriales en una planta de extracción de líquido del gas natural. Las aguas a tratar provienen de una red de drenaje constituida de una serie de canales abiertos y tuberías que recogen las aguas de lluvia y aguas contaminadas de las distintas unidades que conforman los trenes de proceso A y B de la planta. Para ello se verificó el funcionamiento actual de las unidades del sistema basado en las condiciones del diseño, diagrama de flujos y visitas a campo; además se realizaron análisis fisicoquímicos al afluente y efluente de las diferentes etapas de la planta. Por otra parte se calcularon los parámetros operacionales del proceso biológico, con la finalidad de conocer la eficiencia del mismo así como también se dieron propuestas para la mejora del sistema. La comparación entre las condiciones del diseño de la planta demostró que actualmente se encuentran equipos fuera de servicio. De acuerdo a los análisis fisicoquímicos se determinó que la demanda química de oxígeno (DQO) promedio en el efluente fue de 747,2 mg/l; la cual no cumple con la concentración permisible del decreto 883 (350 mg/l) y que los reactores contienen un alta concentración de sólidos volátiles. En cuanto a los parámetros operacionales el tiempo promedio de retención celular fue de 3,96 días para el reactor 1 y 3,83 días para el reactor 2, el cual está por debajo del rango establecido para un proceso convencional de los activados (5-15) días. Por otra parte se determinó que la remoción de DQO en el proceso biológico fue de 85,86 %, y finalmente se propone la evaluación del separador de placas corrugadas (CPI) y la purga de los sólidos necesarios para mantener la concentración adecuada en los reactores.

#### **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Milena Amundarain	CVLAC:	3945689			
	E_MAIL	Milena.amundarain@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Ronald Arias	CVLAC:	13498859			
	E_MAIL	ronaldariasc@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Alexis Cova	CVLAC:	11905328			
	E_MAIL	alexicovab@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Euripides Cabrices	CVLAC:	11532630			
	E_MAIL	cabricee@pdvsa.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2011	11	17
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. Evaluación del proceso biológico del sistema de tratamiento de efluentes industriales.doc	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L M  
N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1  
2 3 4 5 6 7 8 9 .

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Químico

---

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

---

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Química

---

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado

“Los Trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

**Bolivar, Ana**

**AUTOR**

**Mundarain, milena**

**TUTOR**

**Cova, Alexis**

**JURADO**

**Arias, Ronald**

**JURADO**

**Salas, Yraima**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**