

OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS EN EL  
FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO  
ASCENDENTE (MUNICIPIO DE “EL TAMBO”)

DARÍO JORGE CAMACHO MUÑOZ  
ÁLVARO DAVID GUERRERO JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIIA  
POPAYÁN  
2005

OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS EN EL  
FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO  
ASCENDENTE (MUNICIPIO DEL EL TAMBO)

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Ambiental

DARÍO JORGE CAMACHO MUÑOZ  
ÁLVARO DAVID GUERRERO JIMÉNEZ

Director

CARLOS CÉSAR CABEZAS CÓRDOBA

Ingeniero Químico, M. Sc.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIA  
POPAYÁN  
2005

## RESUMEN

Este trabajo presenta la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales del Municipio de El Tambo ubicado en el Departamento del Cauca, se centra en el estudio del reactor anaeróbico de flujo ascendente y el análisis de los procesos microbiológicos que ocurren en su interior.

El reactor anaeróbico está conformado por tres zonas de tratamiento: zona de lecho de grava, zona en suspensión y zona de lecho plástico. Se evaluaron diferentes tiempos de retención celular (TRS) modificando la duración de las carreras del reactor, de esta forma se estudiaron dos carreras de 13 días y una de 28 días. Se encontró que en este sistema de tratamiento el tanque séptico reportó las mayores eficiencias en remoción de DQO con valores de 60,66%, 57,49% y 54,03% para las tres carreras respectivamente, mientras que el reactor anaeróbico reportó eficiencias de remoción de 31,48% 41,47% y 53,59% respectivamente. En general las remociones totales presentadas por el sistema en general estuvieron entre un 70% y 80%.

En el interior del reactor anaeróbico se identificaron dos zonas de tratamiento efectivo: La zona del lecho de grava y La zona de tratamiento en suspensión , se determinó que la zona que emplea el material plástico como lecho no presenta remociones apreciables.

Se encontró que al interior del rector anaeróbico los procesos biológicos no se generan adecuadamente, esta situación dificulta la realización de un modelo predictivo bajo la teoría de cinética microbiana. Dicha circunstancia es atribuible a los grandes problemas hidráulicos que presenta este dispositivo que restringen los TRS y causan una gran variación del caudal tratado por el sistema alo largo de cada carrera.

*Palabras clave:* carrera del reactor, TRS, DQO, cinética microbiana, estado estacionario.

## **AGRADECIMIENTOS**

En estas líneas queremos agradecer a cada una de las personas y entidades que prestaron su colaboración para hacer posible la realización de esta investigación.

A la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) por apostarle a la investigación como la mejor alternativa para fortalecer el desarrollo tecnológico de la región y por su colaboración económica para la financiación de este trabajo.

A las Empresas Publicas del Municipio de El Tambo por prestarnos su colaboración en el diligenciamiento del permiso para acceder a la zona de trabajo. Especialmente al operador de la PTARD Tambo y su familia por estar siempre prestos a colaborar cuando fue necesario.

A la Universidad del Cauca por financiar parte de este proyecto investigativo. En especial a todos los ingenieros del Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria por estar siempre prestos a resolver las inquietudes que les presentamos.

Queremos manifestar el mas cordial de los agradecimientos a nuestro director de tesis el Ingeniero Químico M. Sc. Carlos Cesar Cabezas Córdoba quien tubo la gentileza de orientar este trabajo de grado.

A los auxiliares de laboratorio de Ingeniería Ambiental. Ricardo y Reinaldo quienes tuvieron que soportar largas jornadas extras de trabajo, sin las cuales hubiese sido imposible dar término a este trabajo.

A la Facultad de Química en especial al ingeniero Ph.D. Jaime Martín quien siempre estuvo oportuno en el diligenciamiento de los permisos para utilizar los laboratorios.

En general a todos los profesores del programa de Ingeniería Ambiental que contribuyeron a nuestra formación y muy especialmente a todos y cada uno de nuestros compañeros con los cuales compartimos la experiencia de realizar el trabajo de grado sin cuyo consejo y colaboración hubiese sido imposible realizar esta investigación.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Popayán, 12 de diciembre de 2005

# CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>NOTA DE ACEPTACIÓN.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN .....	12
1.2 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MUNICIPIO DE “EL TAMBO” .....	14
1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO .....	15
1.4 BOSQUEJO DE LA TESIS.....	15
<b>2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS .....</b>	<b>17</b>
2.1 SISTEMA TÍPICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	17
2.1.1 <i>Sistema de Pretratamiento</i> .....	17
2.1.2 <i>Tratamiento Primario</i> .....	21
2.1.3 <i>Tratamiento Secundario</i> .....	22
2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE “EL TAMBO”.....	27
2.2.1 <i>Sistema de Pretratamiento</i> .....	29
2.2.2 <i>Tratamiento Primario</i> .....	29
2.2.3 <i>Tratamiento Secundario</i> .....	29
<b>3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>33</b>
3.1 DISEÑO METODOLÓGICO .....	33
3.2 COMPORTAMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA.....	37
3.3 ANÁLISIS DE LA NATURALEZA DE LAS DESCARGAS .....	39
3.4 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL CAUDAL.....	42
3.5 EFICIENCIAS DEL SISTEMA .....	46
3.6 CONCLUSIONES .....	49
<b>4 EVALUACIÓN DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE .....</b>	<b>51</b>
4.1 FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE .....	51
4.1.1 <i>Zona de Lecho de Grava</i> .....	51

4.1.2	<i>Zona en Suspensión</i> .....	53
4.1.3	<i>Zona de Lecho Plástico</i> .....	53
4.2	ANÁLISIS AL INTERIOR DEL REACTOR ANAERÓBICO .....	55
4.2.1	<i>Análisis de la Carga Contaminante</i> .....	55
4.2.2	<i>Análisis de la Variación de Sólidos</i> .....	57
4.2.3	<i>Análisis del Estado Estacionario</i> .....	62
4.3	VIABILIDAD DEL REACTOR ANAEROBICO .....	64
4.4	CONCLUSIONES .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	66
5.2	RECOMENDACIONES .....	67
5.2.1	<i>Recomendaciones en cuanto al sistema de tratamiento en general</i> .....	67
5.2.2	<i>Recomendaciones en cuanto al reactor anaeróbico de flujo ascendente</i> .....	68
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÉNDICES .....</b>	<b>74</b>
	APÉNDICE 1. MÉTODOS ANALÍTICOS DESCRITOS EN EL STANDARD MÉTODO .....	75
	<i>DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO</i> .....	75
	<i>DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO</i> .....	80
	<i>OXIGENO DISUELTO</i> .....	89
	<i>SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES</i> .....	92
	<i>SÓLIDOS TOTALES</i> .....	94
	<i>SÓLIDOS VOLATILES</i> .....	96
	APÉNDICE 2. PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS OBTENIDOS EN LA EVALUACIÓN DE LA PTARD DEL MUNICIPIO DE EL TAMBO .....	99
	APÉNDICE 3. PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS BÁSICOS EN LA ENTRADA AL SISTEMA DE TRATAMIENTO DURANTE EL PERIODO DE EVALUACIÓN. ....	109
	APÉNDICE 4. VALORES DE CAUDALES T° Y PH MEDIDOS EN CAMPO.....	112
	APÉNDICE 5. GRAFICAS DE REMOCIONES ALCANZADAS EN DBO <sub>5</sub> , DQO Y ST A TRAVÉS DEL SISTEMA EN LAS CARRERAS 1 Y 3. ....	113
	APÉNDICE 6. VARIACIÓN DE SF Y SST A TRAVÉS DEL REACTOR ANAERÓBICO EN LA CARRERA 2.....	114

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 1. ....	37
Tabla 2. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 2. ....	38
Tabla 3. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 3. ....	38
Tabla 4. Perdida de carga hidráulica a través del sistema.....	46
Tabla 5. Aporte de cada dispositivo a la remoción total de DBO <sub>5</sub> , DQO y SST. ....	64
Tabla 6. Cantidad de reactivos y muestra para diferentes tubos de digestión.....	78
Tabla 7. Preparación de patrones de ftalato ácido de Potasio en el rango 50-700 mg/L COD.....	80
Tabla 8. Diluciones recomendadas para tipos de aguas mas comunes. ....	86
Tabla 9. Volumen de muestra analizar para sólidos suspendidos de acuerdo a la turbiedad.....	93
Tabla 10. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 1. ....	100
Tabla 11. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 2. ....	101
Tabla 12. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 3. ....	102
Tabla 13. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 4. ....	103
Tabla 14. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 5. ....	104
Tabla 15. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 6. ....	105
Tabla 16. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 7. ....	106
Tabla 17. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 8. ....	107
Tabla 18. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 9. ....	108
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos básicos de las aguas residuales del municipio de El Tambo.	109

Tabla 20. Factor de biotratibilidad, relación DQOI/DQOm y pH en las aguas residuales del municipio de El Tambo.....	110
Tabla 21. Clasificación de factores de biodegradabilidad. ....	111
Tabla 22. Valores de caudales temperatura y pH medidos en campo.....	112

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas. ....	19
Figura 2. Configuraciones de los reactores de lecho empacado y flujo ascendente. ....	26
Figura 3. Esquema convencional de distribución y recolección de flujo tratada en reactores anaeróbicos de flujo ascendente.....	28
Figura 4. Configuración del reactor anaeróbico de flujo ascendente del Municipio de El Tambo...30	
Figura 5. Esquema de distribución y recolección de flujo en el reactor anaeróbico de flujo ascendente del Municipio de El Tambo. ....	32
Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo a través del sistema. ....	36
Figura 7. Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales durante el periodo de evaluación. ....	40
Figura 8. Comportamiento del caudal a través del tiempo en las tres carreras evaluadas. ....	43
Figura 9. Eficiencias medias de remoción de DQO alcanzadas por los dispositivos durante las carreras evaluadas. ....	47
Figura 10. Remociones alcanzadas en DBO <sub>5</sub> , DQO y ST a través del sistema en la carrera 2. ....	48
Figura 11. Variación de ST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2. ....	52
Figura 12. Variación de la DBO <sub>5</sub> y la DQO a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2. ....	54
Figura 13. DQO en la segunda carrera a través del lecho del Reactor.....	56
Figura 14. DBO <sub>5</sub> en la segunda carrera a través del lecho del Reactor.....	56
Figura 15. SV en la segunda carrera a través del lecho del reactor.....	58
Figura 16. Variación de SF, SV y SST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.....	59
Figura 17. SST en la segunda carrera a través del lecho del reactor.....	61
Figura 18. Remociones alcanzadas en DBO <sub>5</sub> , DQO y ST a través del sistema carrera 1. ....	113
Figura 19. Remociones alcanzadas en DBO <sub>5</sub> , DQO y ST a través del sistema carrera 3.....	113
Figura 20. Variación de SF a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2. ....	114
Figura 21. Variación de SST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2. ....	114

# 1 INTRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales siempre ha sido un aspecto estrechamente ligado al desarrollo de los pueblos. Un aspecto relegado y descartado en un principio dada su naturaleza improductiva y su aparente inconsecuencia, solamente se le adjudicó la importancia que merece cuando se comprobó, a raíz de no pocas epidemias de cólera que no es un factor descartable, que está estrechamente relacionado con el saneamiento básico y con la salud de los pueblos.

## 1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

Los primeros antecedentes acerca de la captación de las aguas residuales no aparecen sino hasta el siglo XIX, mientras que el tratamiento sistemático de las mismas data de finales del siglo XX y principios del XXI. Pero según Metcalf y Eddy, 1999 [18] el hecho culmen que marcó el inicio de una nueva era en el campo del tratamiento de las aguas residuales, fue el planteamiento de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX. En aquel entonces el desarrollo de esta teoría no se aplicó directamente, pero sin duda alguna dejó al descubierto a los microorganismos como una herramienta potencial de trabajo hasta el momento desconocida y desaprovechada que mas tarde extendería su uso a diferentes campos.

Rittmann B. y McCarty P. [24] consideran que, no fue sino hasta la década de 1940, en manos del famoso microbiólogo francés Jacks Monod que la aplicación de los microorganismos (bacterias) comenzó a desarrollarse en el campo del tratamiento de las

aguas residuales con sus estudios preliminares<sup>1</sup> que actualmente constituyen las bases de lo que hoy se conoce como cinética microbiana.

A pesar de que ya pasan mas de sesenta años desde aquellos días, el desarrollo de la teoría cinética se restringe principalmente a el campo académico, donde se han elaborado numerosos estudios, que para el caso de países en desarrollo muy pocas veces han trascendido satisfactoriamente al campo práctico, o por lo menos eso se puede decir para el caso particular de Colombia, mas específicamente el Departamento del Cauca, en donde son numerosos los sistemas de tratamiento que se han implementado pero muy pocos o ninguno incluyen en su formulación un estudio preliminar o posterior de la cinética microbiana implicada, que permita un mejor conocimiento y aprovechamiento de los dispositivos. En la mayoría de los casos los diseñadores se limitan a seguir conocidas “recetas” formuladas en los libros especializados, generalmente escritos por autores extranjeros para condiciones muy diferentes a las de esta región, terminando por reproducir sistemas que medianamente se pueden aplicar en nuestro medio.

Es bien sabido que la cinética microbiana y mas generalmente cualquier proceso biotecnológico, opera en conformidad con principios bien establecidos de ingeniería y microbiología, pero su aplicación requiere siempre cierto grado de empirismo que aunque no sea sustitutivo se debe adoptar, puesto que las materias tratadas mediante biotecnología son intrínsecamente complejas y varían en el tiempo y el espacio. Es por esto que se hace indispensable una adaptación de la tecnología o mejor aun el desarrollo de una tecnología propia que respondan a las necesidades de saneamiento especificas de cada región.

Es en este marco contextual donde se destaca la importancia de este trabajo, ya que de este modo se comienza con los procesos de apropiación de las tecnologías, que permitirá en un futuro una mayor propiedad en el diseño y construcción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales logrando un uso mas eficiente de los recursos invertidos, pues ya no será

---

<sup>1</sup> Su trabajo original relacionaba la tasa especifica de crecimiento de bacterias de rápido crecimiento con la concentración de sustrato limitador del crecimiento.

necesario recurrir al sobre dimensionamiento de los dispositivos para alcanzar desempeños aceptables.

Este documento presenta una evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Tambo. El análisis se centra principalmente en la operación del reactor anaeróbico implementado en esta localidad, puesto que las condiciones particulares de este dispositivo, el cual emplea un lecho mixto conformado por gravas y un material sintético, proponen una nueva alternativa en la configuración de estas estructuras que no tiene precedentes en el departamento.

## 1.2 LOCALIZACIÓN Y CARACTERISTICAS DEL MUNICIPIO DE “EL TAMBO”

El municipio del Tambo se localiza al centro occidente del Departamento del Cauca; la cabecera municipal dista 33 kilómetros de Popayán y esta ubicada a los 2°27'15" de latitud Norte y a 76°40'04" de longitud oeste.

En la formulación del PBOT de El Tambo [8] se encuentra que el municipio tiene una altura promedio de 1745 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) con una temperatura media de 18° C con valores máximos de 32°C y mínimos de 5°C y una humedad relativa alta de 80 %. La precipitación media anual en la estación El Tambo (cabecera municipal) que se encuentra a 1700 m.s.n.m alcanza un valor de 2042 mm/año. Según las proyecciones del DANE para el año 2004 el municipio cuenta con 53.337 habitantes, distribuidos de la siguiente manera: 47.370 habitantes que representan el 88.81%, localizados en el área rural y 5.967 habitantes que conforman el 11.19% localizados en la cabecera del municipio En cuanto al empleo el 71% de la población se ocupan en labores agrícolas, la población económicamente activa es de 18.802 habitantes.

La economía del municipio se basa en la Ganadería, recursos forestales y muchos cultivos, como café, caña de azúcar, chontaduro, yuca, plátano, legumbres y frutales. Se encuentran minas de oro, carbón, cal y hierro. Son importantes las manufacturas artesanales de caucho.

Excelente actividad comercial por su variada producción agrícola que surte los mercados de Popayán y Cali

### 1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO

El estudio esta enfocado principalmente a establecer el tiempo de retención de sólidos necesario para el óptimo funcionamiento de un reactor anaeróbico de flujo ascendente en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de El Tambo. Para alcanzar este propósito es necesario, evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, determinar el funcionamiento del reactor anaeróbico de flujo ascendente y establecer la influencia de el tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulica frente a la calidad del efluente.

### 1.4 BOSQUEJO DE LA TESIS

Este documento esta conformado por 7 capítulos incluyendo la introducción, en ellos se recopilan resultados, análisis y conclusiones acerca del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas implementado en el municipio de El Tambo, a continuación se realiza una descripción de dichos capítulos:

**CAPITULO 2, TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS:** En este capitulo se realiza una comparación entre las estructuras que componen un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales domésticas, con las estructuras implementadas en la planta de tratamiento del municipio de El Tambo.

**CAPITULO 3, DISEÑO METODOLOGICO DE LA TOMA DE MUESTRAS:** En este capitulo se establece la metodología implementada para llevar a cabo la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Tambo. Incluye una descripción de la forma como se realizó el muestreo, un listado de los análisis

fisicoquímicos y las mediciones realizadas, por último se presenta una síntesis de los resultados obtenidos.

**CAPITULO 4, RESULTADOS Y DISCUSIÓN:** En este capítulo se realiza un análisis de la naturaleza de las descargas realizadas en el municipio de El Tambo, también se incluye un estudio de las condiciones hidráulicas del sistema y se evalúan las remociones presentadas en los dispositivos que conforman el sistema de tratamiento.

**CAPITULO 5, ANALISIS AL INTERIOR DEL REACTOR ANAEROBICO:** Este capítulo muestra una descripción específica de las zonas de tratamiento que se presentan dentro del reactor anaeróbico, en el también se realiza un análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos al interior de este dispositivo y se evalúa el desarrollo de los procesos biológicos generados.

**CAPITULO 6, CONCLUSIONES:** Se presentan las conclusiones obtenidas durante la evaluación del sistema de tratamiento con base a los objetivos planteados inicialmente.

**CAPITULO 7, RECOMENDACIONES:** Se establece una lista de recomendaciones a tener en cuenta para mejorar el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Tambo.

## 2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La depuración de aguas residuales domesticas requiere soluciones que respondan a las necesidades de saneamiento específicas de cada región. Teniendo en cuenta esto y dadas las características socioeconómicas del Departamento del Cauca, se han implementado sistemas de tratamiento a nivel municipal que funcionan por gravedad y fundamentan su trabajo en procesos biológicos de descomposición anaeróbica de materia orgánica. Dichos sistemas se componen básicamente de tres etapas. La primera es el tratamiento preliminar el cual comprende una estructura aliviadero de caudales, una cámara de retención de sólidos gruesos y sedimentables y una cámara de distribución de caudales; en la segunda etapa se realiza el tratamiento primario por medio de tanques sépticos y la tercera etapa comprende el tratamiento secundario que se realiza a través de filtros anaeróbicos.

En la primera parte del presente capítulo se describen cada una de las estructuras que componen el sistema de tratamiento de aguas residuales, con el fin de generar una visión más amplia de esta tecnología. En la segunda parte se realiza una descripción de los aspectos particulares de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de El Tambo, de esta forma se pretende establecer las características particulares que condicionan la operación de esta planta.

### 2.1 SISTEMA TIPICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta el esquema general típico de un sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas. A continuación se describen cada una de las partes que conforman el tratamiento.

#### 2.1.1 Sistema de Pretratamiento

El tratamiento preliminar de los sistemas de tratamiento centralizados debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa,

dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas residuales que pueda interferir los procesos de tratamiento.

La presencia de residuos de gran tamaño en el agua residual ocasiona problemas mecánicos en bombas y demás equipos de la planta de tratamiento, igualmente la presencia de gravas y arenas representa un problema, debido a que se acumulan en las estructuras disminuyendo volumen útil y causando taponamientos. Otra complicación muy común es la generada por la formación de capas grasosas en bombas y tuberías la cual es causada por la presencia de grasas y aceites, constituyentes que reducen la eficiencia de los procesos biológicos de tratamiento.

#### *2.1.1.1 Estructura de Separación de Aguas Lluvias (aliviadero)*

En el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) [23] se define como una estructura diseñada en colectores combinados, con el propósito de separar los caudales que exceden la capacidad del sistema y conducirlos a un sistema de drenaje de agua lluvia. Según un informe técnico de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) realizado por Ramírez [22], en el Departamento del Cauca normalmente los sistemas de alcantarillado son combinados ya que fueron construidos cuando las tendencias de diseño no involucraban dentro de sus variables la calidad del agua transportada con el fin de tratarla, pensando que la fuente receptora podía diluir lo que recibía.

El aliviadero pretende que el exceso de caudal que llegue al sistema de tratamiento a través del sistema de alcantarillado por efecto de las aguas lluvias o incrementos en la dotación neta por habitante sea evacuado hidráulicamente en dicha estructura al alcanzar el tirante de flujo normal en el periodo de diseño.

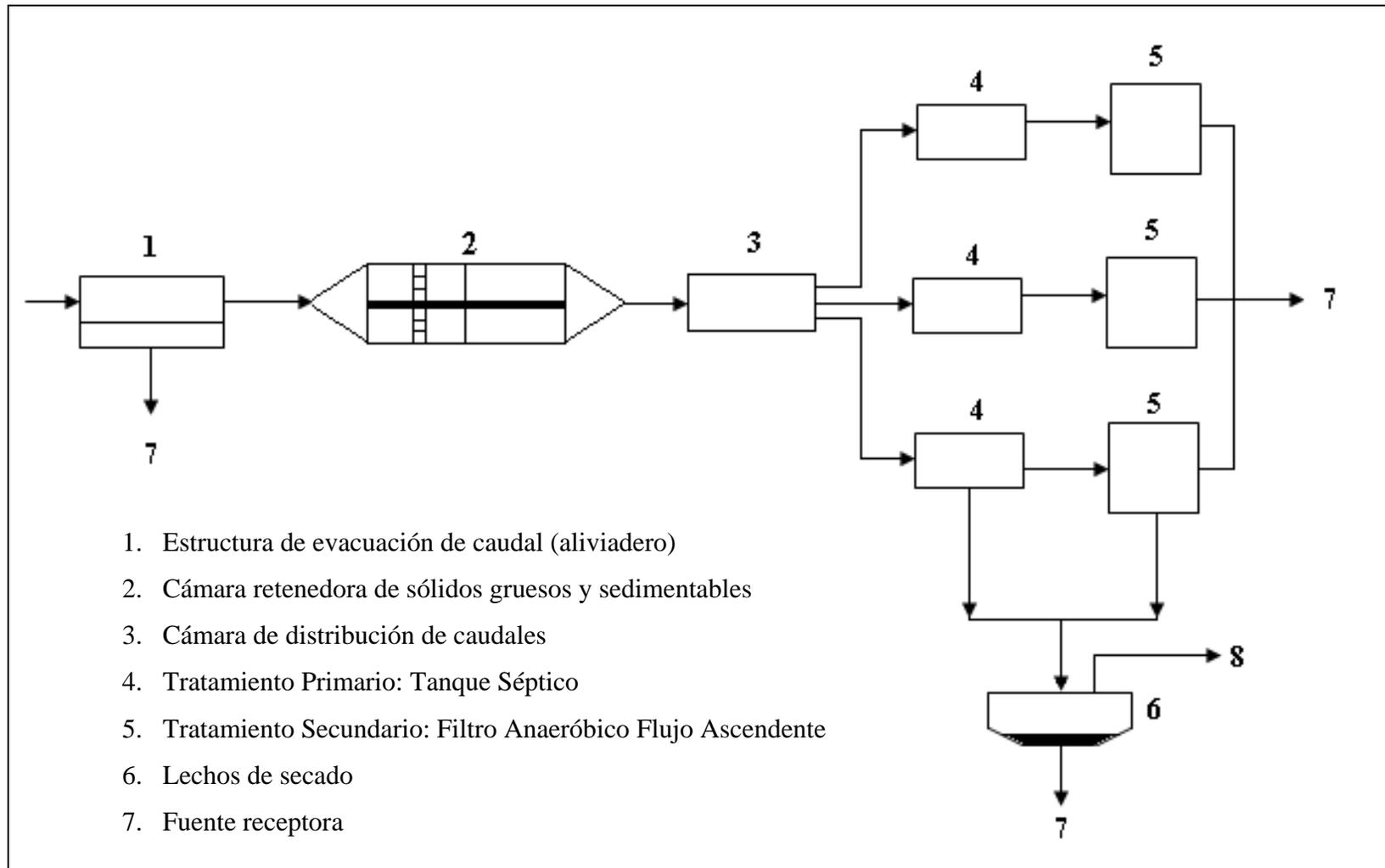


Figura 1. Esquema general de una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas.

### *2.1.1.2 Cámara Retenedora de Sólidos Gruesos y Sedimentables*

En esta cámara se ubican las estructuras de rejas para separación de sólidos gruesos y el desarenador que permite la sedimentación de las arenas y otros sólidos de gran densidad.

**Rejas:** En los procesos de tratamiento del agua residual, las rejas se utilizan para proteger bombas, válvulas y otros elementos contra los posibles daños y obstrucciones provocados por la presencia de trapos, palos y otros objetos de gran tamaño. Por esta razón las rejillas deben colocarse aguas arriba de las estaciones de bombeo o de cualquier dispositivo de tratamiento subsecuente que sea susceptible de obstruirse por el material grueso que trae el agua residual sin tratar. De acuerdo con el método de limpieza las rejas se clasifican como de limpieza manual o limpieza mecánica. Las rejillas de limpieza manual se usan con bastante frecuencia en plantas de tratamiento pequeñas y los sólidos removidos por las rejillas se colocan sobre una bandeja perforada para su deshidratación.

**Desarenador:** Independiente de las características geométricas de los desarenadores, estos deben localizarse después de rejillas y antes de los tanques de sedimentación primaria y estaciones de bombeo. Es importante construir un mínimo de dos unidades, cada unidad debe tener la capacidad para operar con los caudales de diseño cuando la otra unidad está en periodo de limpieza. Bajo condiciones ideales, la velocidad de diseño debe permitir la sedimentación de las partículas mas pesadas, mientras que las partículas orgánicas pasan a través del sedimentador. Los desarenadores deben diseñarse de manera tal que la velocidad pueda controlarse, esto se logra con el uso de vertederos con secciones especiales.

### *2.1.1.3 Cámara de Distribución de Caudales*

Como su nombre lo indica el objetivo de esta estructura es distribuir el flujo que ha pasado por la cámara de retención de sólidos hacia las unidades posteriores de tratamiento cuando se trabaja con sistemas de tratamiento configurados en paralelo. Además de esto en esta estructura se implementan dispositivos de aforo que ayudan a llevar un control sobre el

caudal que entra a la cámara (caudal que está tratando el sistema) y el caudal que sale a cada una de las unidades de tratamiento.

### 2.1.2 Tratamiento Primario

El tratamiento primario se define como el tratamiento en el que se remueve una porción de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica del agua residual, esta remoción normalmente es realizada por operaciones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario usualmente contiene alto contenido de materia orgánica y una relativamente alta  $DBO_5$ . El diseño de las estructuras de tratamiento primario se debe realizar con el caudal medio proyectado para el periodo de diseño.

En los municipios de Departamento del Cauca el tratamiento primario se realiza usualmente por medio de *Tanques Sépticos*. Si bien los tanques sépticos son usados principalmente para residencias y demás instalaciones de comunidades aisladas, han servido también como sistemas de tratamiento de residuos líquidos provenientes de grupos de hogares, establecimientos comerciales y pequeñas comunidades.

En general los tanques sépticos de gran tamaño se diseñan como reactores de flujo pistón y aunque en ellos ocurren procesos de digestión anaeróbica, el propósito fundamental de su diseño es la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación. Según Mara [17] en esta estructura la eficiencia media de remoción de sólidos suspendidos es del orden del 60%, y se han encontrado remociones de  $DBO_5$  de hasta el 40%.

La mayoría de los tanques sépticos construidos en concreto son rectangulares, cuentan con un deflector interno que divide el tanque y con puntos de acceso que permiten la inspección y la limpieza. La primera cámara ocupa aproximadamente las dos terceras partes del volumen total del tanque.

En el tanque séptico los sólidos sedimentables que se encuentran en el agua residual cruda precipitan y forman una capa de lodo en el fondo. Las grasas, aceites y demás material ligero tienden a acumularse en la superficie donde forman una capa flotante de espuma en la parte superior y la materia orgánica retenida en el fondo del tanque se somete a un proceso de descomposición anaerobia, transformándose en compuestos y gases más estables como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S).

De acuerdo con Tchobanoglous [29] la inspección rutinaria de tanques sépticos generalmente es realizada una o dos veces al año y contempla la revisión de:

- La impermeabilidad del tanque.
- El ingreso de aguas extrañas al tanque.
- Los empaques en las conducciones que conectan al tanque séptico con los procesos posteriores de tratamiento.
- La acumulación de lodos y espumas.

Los sólidos sedimentados acumulados (lodos) se deben remover periódicamente, estos se descargan normalmente en una instalación de tratamiento (generalmente, lechos de secado de lodos). Calderón y Zambrano [5] recomiendan que la extracción de los lodos se debe realizar cuando su altura supere el 40% con respecto a la profundidad del líquido en el tanque, igualmente la capa de espumas se debe retirar cuando presente una altura mayor a 7.5 cm.

### 2.1.3 Tratamiento Secundario

El objetivo de un tratamiento secundario es remover la DBO<sub>5</sub> soluble que escapa de un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos suspendidos. Estas remociones se efectúan fundamentalmente por medio de procesos biológicos.

Los procesos biológicos son eficientes en remoción de sustancias orgánicas que presentan tamaño coloidal e inferior. El RAS 2000 [23] señala que un tratamiento secundario típico remueve aproximadamente 85% de la DBO<sub>5</sub> y los SS, aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados ni organismos patógenos.

Se puede realizar una clasificación de los procesos biológicos en dos grandes grupos: aerobios y anaerobios. Dentro de cada uno de estos grupos se presenta crecimiento de película bacterial adherida y crecimiento de bacterias en suspensión. En seguida se analizaran la configuración y los procesos que ocurren dentro de un filtro anaeróbico de flujo ascendente como tratamiento secundario de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas.

La estructura *Filtro Anaeróbico* es un reactor de flujo ascendente o descendente empacado con materiales inertes generalmente soportes plásticos o piedras. La biomasa se desarrolla en forma de biopelícula adherida al soporte, además de retenerse en los intersticios del empaque. Con este arreglo, se aumenta en forma importante el tiempo de retención celular sobre el tiempo de retención hidráulica lo que hace posible operar el sistema con reducidos tiempos de retención hidráulica y volúmenes de reactor limitados, conservando buenas eficiencias en la remoción de materia orgánica, además de una mayor estabilidad en su operación.

Según Campos [6], el termino "*filtro anaeróbico*" no representa en realidad esta estructura, debido a que no se realiza específicamente el proceso físico de filtración, por consiguiente siendo una estructura con un medio de soporte de microorganismos sumergido, una denominación precisa seria *Reactor Anaeróbico de Lecho Fijo Sumergido con Flujo Ascendente o Descendente*.

Cuando el reactor anaeróbico es de flujo ascendente, en las capas más profundas del lecho se encuentran las mayores concentraciones de microorganismos que se disponen en forma de flocs y gránulos suspendidos. El agua residual que pasa a través del filtro entra en

contacto con estas capas favoreciendo su interacción y ocasionando que las mayores remociones de materia orgánica ocurran en esta zona del reactor. Por otra parte y como lo menciona Campos [6] se ha comprobado que en el reactor anaeróbico a pesar de existir la presencia de material biológico adherido al medio de soporte, la porción más significativa de organismos está en los intersticios. Debido a esto un gran porcentaje de la estabilización del agua residual ocurre en los intersticios.

Los medios de soporte de los reactores anaeróbicos pueden ser de diferentes tipos y su escogencia condiciona la estructura y dimensiones del reactor, así la altura útil de los reactores anaerobios puede variar entre 3 a 13 metros cuando se utilizan medios sintéticos y entre 0.8 y 2 m. cuando se emplean piedras. Las piedras son los soportes mas comúnmente usados en países en desarrollo y el RAS 2000 [23] recomienda que su tamaño este entre 4 y 5 cm, tamaños menores pueden causar graves problemas de colmatación y taponamiento del lecho, igualmente la disposición inadecuada de los tamaños de grava ocasionará obstrucciones indeseables.

La escogencia del material de soporte depende de su fácil consecución, de su costo, del ahorro en volumen útil, etc. Es muy importante el efecto del tamaño de los intersticios ya como se mencionó anteriormente, es en estas zonas en las cuales se presenta un mayor crecimiento microbiológico. Para un medio de soporte en piedra la porosidad varia entre 40% y 50%, los medios sintéticos poseen porosidades entre 80% y 90%.

Existen dos configuraciones especiales para reactores anaeróbicos de flujo ascendente, la primera consiste en un reactor en el cual la totalidad de su volumen esta ocupado por el material de soporte. En la segunda existe una zona inferior vacía (falso fondo) que según Campos [6] generalmente presenta una altura cercana a los 50 cm. y sobre ella descansa el material de adherencia. La Figura 2 se pueden apreciar las configuraciones descritas.

En el diseño de un reactor anaeróbico de lecho sumergido la hidráulica juega un papel muy importante, se debe tener como criterio principal disminuir al máximo las zonas muertas y

cortos circuitos, esto justifica el tener un especial cuidado con los sistemas de ingreso y recolección del flujo en el filtro, estos sistemas se deben concebir de tal forma que el flujo ingrese, recorra y salga del filtro de la forma más equilibrada posible.

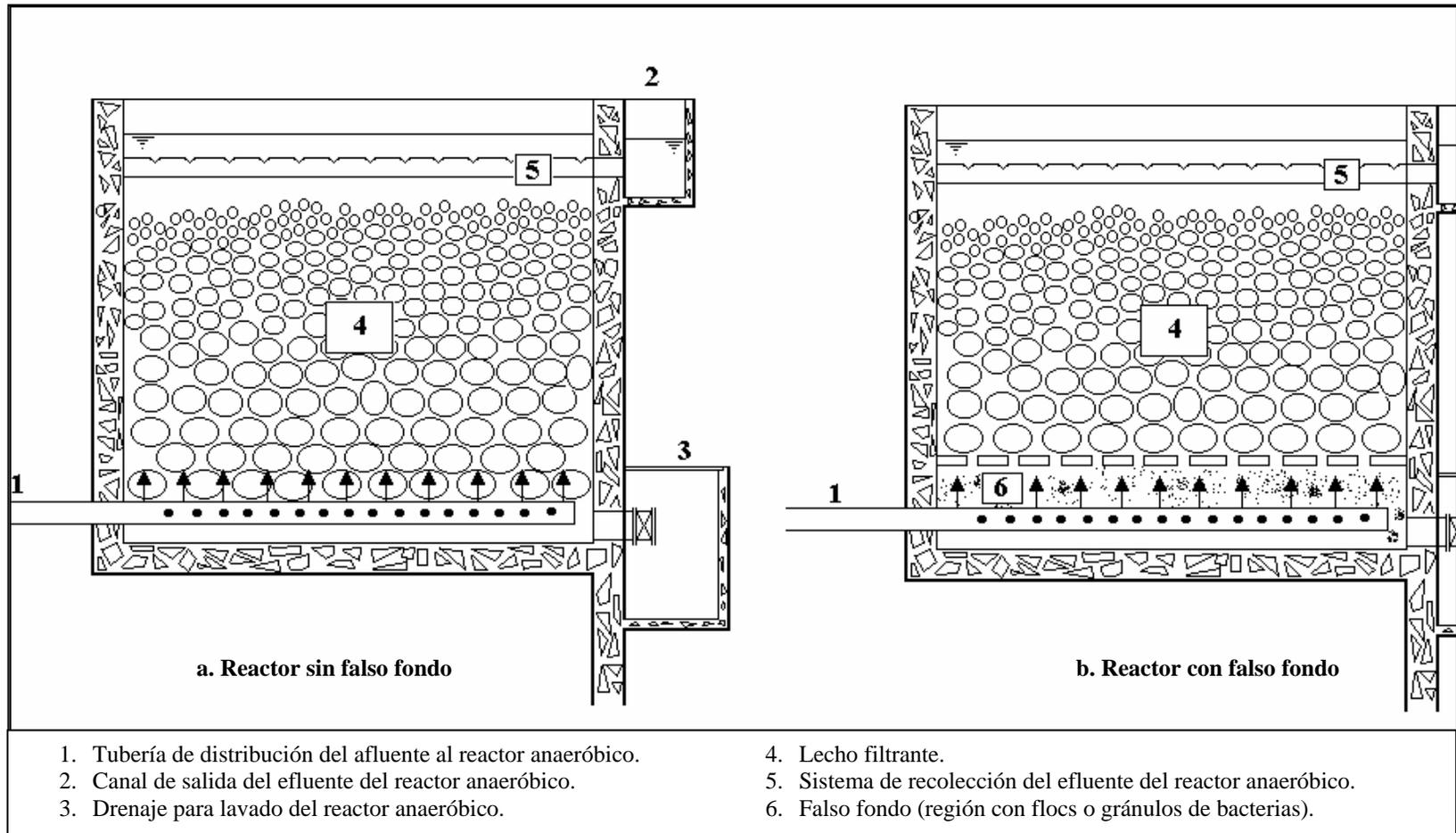


Figura 2. Configuraciones de los reactores de lecho empacado y flujo ascendente.

Generalmente el sistema de distribución de caudales se hace por medio de tuberías de PVC perforadas lateralmente y distribuidas uniformemente en el fondo del reactor (en reactores de flujo ascendente). Campos [6] destaca una recomendación empírica para determinar la cantidad de agujeros que debe llevar cada tubo, que expresa que; la suma de las áreas de las aberturas en el conducto sea menor a la mitad del área total del tubo. Como otras recomendaciones de diseño Campos sugiere que la velocidad de salida del sistema de distribución sea menor a 1 m/s y el diámetro de los orificios de salida no supere los 2 cm, también se recomienda que cuando se tenga un reactor sin falso fondo la separación entre agujeros sea menor a 1 m.

El sistema de recolección del flujo se puede realizar de dos maneras distintas, la primera se hace por medio de tubos de PVC perforados en su parte superior y sumergidos cerca de 10 cm. bajo el nivel del agua, la segunda que es la más comúnmente usada es a través de canaletas dispuestas uniformemente en la parte superior del filtro que recogen y dirigen el flujo a un canal principal para que finalmente salga del reactor. La disposición de estos sistemas se puede observar en la Figura 3, la cual presenta un esquema convencional de distribución y recolección de flujo en reactores anaeróbicos de flujo ascendente.

## 2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE “EL TAMBO”.

La planta de tratamiento del municipio de El Tambo esta configurada según el esquema típico de los sistemas de tratamiento implementados en el Departamento del Cauca. Dichos sistemas realizan la depuración de las aguas a través de un tratamiento preliminar, primario y secundario, tal como se detalló en la primera parte de este capítulo.

Es importante tener en cuenta que aunque se siga un modelo específico en la construcción de las estructuras de tratamiento existen particularidades que comprometen la operación de cada dispositivo y que obedecen a diferencias en los criterios de diseño. El sistema de tratamiento evaluado presenta algunas características que condicionan su operación, en esta sección se expondrán los aspectos más relevantes identificados en la planta en cuestión.



### 2.2.1 Sistema de Pretratamiento

El conjunto de estructuras que conforman el tratamiento preliminar, es decir: el aliviadero, rejillas, desarenador y estructura de reparto operan de conformidad a las condiciones establecidas en el diseño. Aunque es importante notar que actualmente llega al sistema de tratamiento un caudal que supera el caudal de diseño lo que hace que el aliviadero opere constantemente evacuando los excesos. Además esta situación a hecho obsoletas las estructuras de control de caudal (vertederos), impidiendo la medición de los caudales afluentes.

### 2.2.2 Tratamiento Primario

Durante el pretratamiento el total del caudal pasa a través de las estructuras en una sola línea de flujo, pero al comenzar el tratamiento primario el caudal se reparte en tres unidades de tratamiento, cada una de ellas dirigida a un tanque séptico y reactor anaeróbico independientes (sistema en paralelo). Este arreglo es igual al presentado en la Figura 1.

En cuanto a los dispositivos que efectúan el tratamiento primario (tanques sépticos), cada uno tiene una altura de 1.8 m, un largo de 13.8 m y un ancho de 4.6 m, siendo su volumen útil de 114.26 m<sup>3</sup>.

### 2.2.3 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario es efectuado por un sistema en paralelo de tres reactores anaeróbicos de Lecho Fijo Sumergido con Flujo Ascendente, cada uno con un volumen útil de 140.94 m<sup>3</sup>, con un largo de 14.5 m, un ancho de 5.4 m y una profundidad útil de 1.8 m. La configuración del reactor anaeróbico del municipio de El Tambo no tiene el arreglo convencional de los reactores anaeróbicos comunes, ya que consta de un lecho mixto en donde se emplean tres medios filtrantes, a continuación se describe este arreglo el cual puede observarse en la Figura 4.

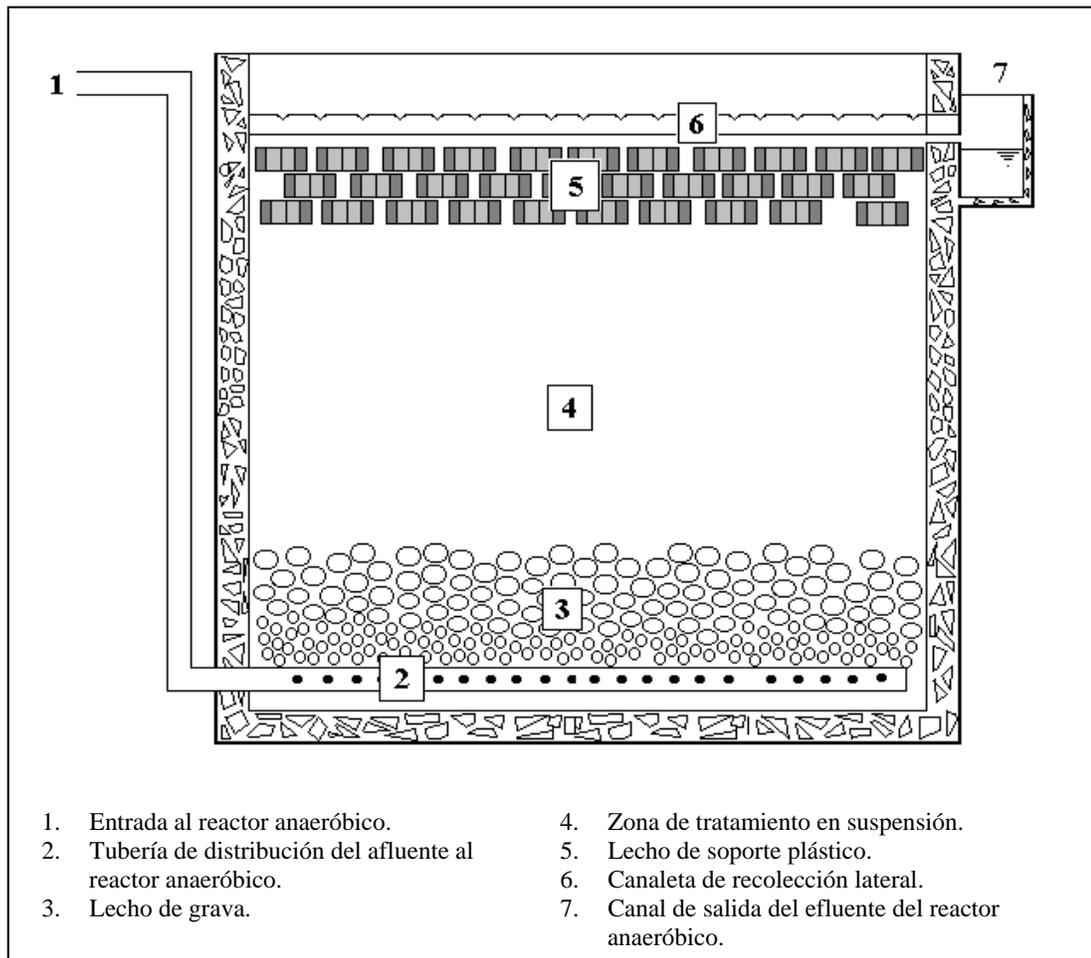


Figura 4. Configuración del reactor anaeróbico de flujo ascendente del Municipio de El Tambo.

La primera parte del lecho del reactor esta conformada por grava estratificada que se extiende 50 cm. desde el fondo y posee diámetros menores a 5 cm., dispuesta desde los menores tamaños en el fondo hasta los mas gruesos en el límite de los 50 cm. En esta zona parte del material biológico crece adherido a la superficie de la grava realizando una remoción tipo película fija, existe también una gran porción de este material que se forma en los intersticios entre la grava, realizando un tratamiento en suspensión.

Una segunda parte del lecho del reactor la conforma una zona en donde a pesar de que no existe un medio soporte el material biológico crece en suspensión, esta zona se extiende por

mas de un metro de alto. Finalmente se encuentra un lecho plástico (galletas sintéticas) flotando en la superficie del agua, se estima que su profundidad alcanzaría un nivel máximo de 15 cm., al igual que en el caso de la grava en esta zona existe material biológico que crece adherido a la superficie de la galleta (tratamiento de película fija) y que se forma en los intersticios entre la misma (tratamiento en suspensión).

La alimentación a cada reactor anaeróbico se realiza a través de tres líneas de flujo, por medio de tubos de PVC de cuatro pulgadas, dispuestos longitudinalmente en el fondo del reactor, tal como lo muestra la Figura 5. Los tubos de entrada están perforados lateralmente con doble orificio de 0.625 Pulgadas de diámetro y separados 50 cm. en la primera mitad y 25 cm. en la segunda mitad de la tubería difusora.

En la superficie del agua, es decir a 1.8 m. desde el fondo del reactor se encuentran ubicadas dos canaletas plásticas para la recolección del flujo, están instaladas en las paredes laterales de la estructura y pretenden dirigir el liquido hacia un canal final de recolección hecho en concreto y ubicado en la pared posterior del reactor tal como puede apreciarse en la Figura 5. Es importante anotar que a pesar de que existen canaletas para llevar acabo una recolección lateral estas no están operando adecuadamente impidiendo una recolección uniforme del flujo a lo largo del reactor, y obligando a que este se escape directamente al canal posterior de recolección.

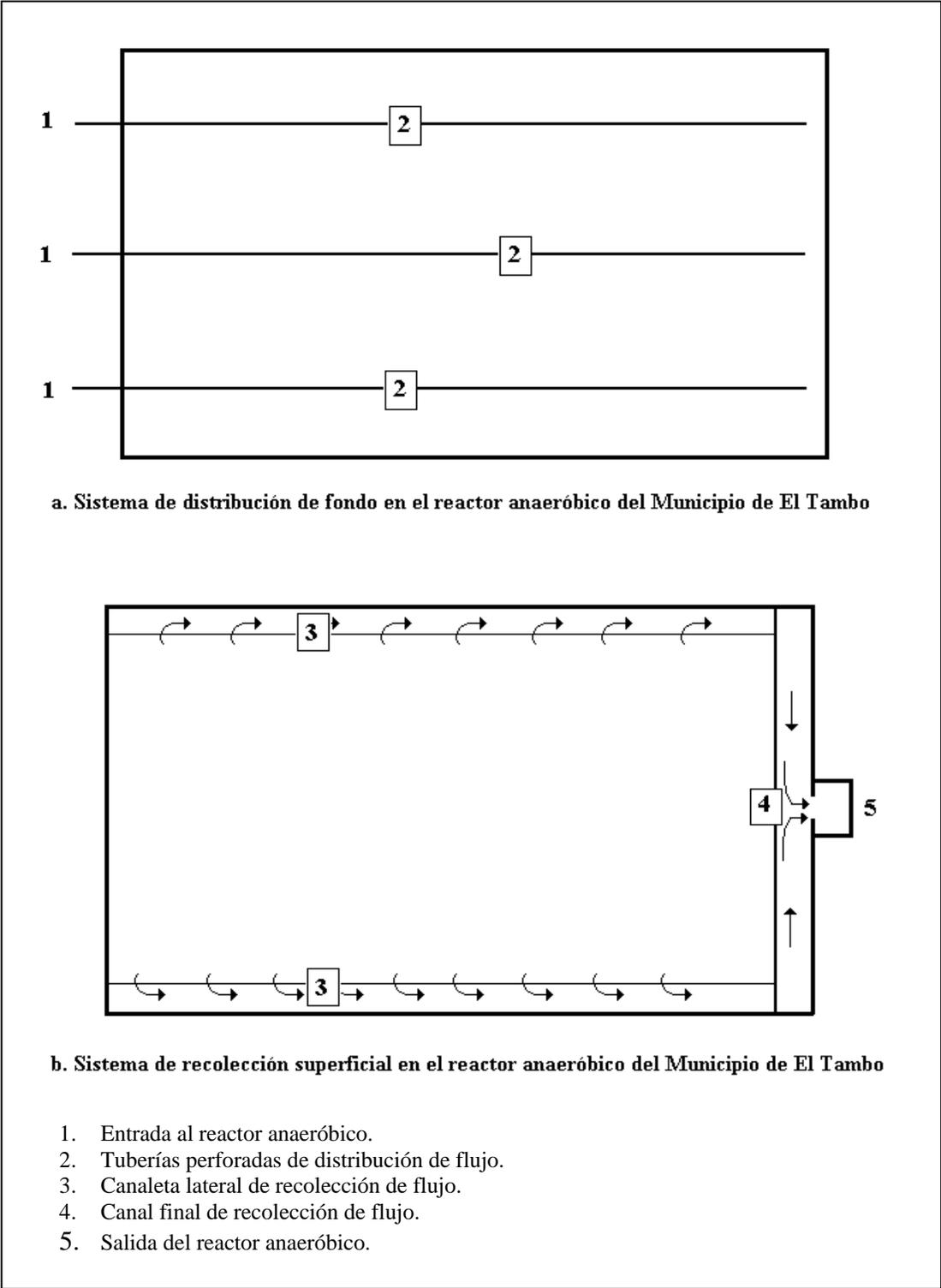


Figura 5. Esquema de distribución y recolección de flujo en el reactor anaeróbico de flujo ascendente del Municipio de El Tambo.

### **3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Esta sección presenta un estudio amplio de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas municipales, empezando por el diseño metodológico y continuando con una descripción de las descargas que se generan en el municipio de El Tambo, también se efectúa un análisis de tipo hidráulico en el que se estudia la variación del caudal tratado junto con las pérdidas de carga que se presentan a través del sistema y finalmente se evalúan las remociones presentadas por los dispositivos de tratamiento.

#### **3.1 DISEÑO METODOLÓGICO**

El trabajo investigativo se realizó a través de un estudio de campo en La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del Municipio de El Tambo, el cual se encuentra ubicado en el Departamento del Cauca.

Para efectuar el estudio fue necesario formular una estrategia de muestreo que permitiera registrar el comportamiento del sistema de tratamiento y los procesos que lo sustentan. En este sentido se eligieron nueve puntos necesarios para la toma de muestras, siete de ellos están ubicados a través del reactor anaeróbico de lecho mixto con flujo ascendente y los dos restantes comprenden la entrada y la salida del sistema de tratamiento. La Figura 6 ilustra la ubicación exacta de los puntos de muestreo a través del sistema de tratamiento.

La recolección de las muestras se realizó a través de 8 piezómetros de los cuales siete corresponden a los puntos ubicados dentro del reactor y uno a la entrada del sistema, la toma de muestras en la salida del sistema de tratamiento se efectuó directamente sumergiendo el recipiente de recolección dentro del agua. Para ubicar los piezómetros a

través del reactor fue necesario vaciar la totalidad del líquido contenido en el dispositivo e introducirlos sujetos a un ángulo de aluminio, una vez terminada esta operación se puso en funcionamiento el reactor y se esperó por un periodo de 20 días a que este se estabilizara para poder iniciar la etapa de muestreo.

El muestreo se efectuó durante dos meses en los cuales se evaluaron tres corridas del reactor anaeróbico, entendiéndose una corrida como el intervalo de tiempo entre las descargas de lodos que se realizan como mantenimiento. Las dos primeras corridas tuvieron una duración aproximada de 15 días y la última se prolongó por un periodo cercano a 30 días con el fin de tener una visión mas amplia de la evolución del reactor.

Los procesos biológicos a través de los cuales se lleva acabo la depuración de las aguas están determinados en gran parte por el efecto que la temperatura ejerce sobre la dinámica de los mismos, por lo cual fue necesario trabajar mediante un muestreo compuesto entre 10 a.m. y 2 p.m., de tal manera que permitiera registrar el comportamiento promedio del reactor anaeróbico. Se eligió este intervalo de tiempo porque es donde se suelen presentar las máximas temperaturas en esta región y por ende la máxima actividad biológica.

Durante la evaluación de cada carrera del reactor anaeróbico se midió el caudal promedio diario en la salida de la planta, y se llevó acabo un control de la variación de las pérdidas de carga hidráulica a lo largo del sistema. A las muestras recolectadas se les determinó: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Totales, Sólidos Fijos y Sólidos Volátiles, estas pruebas se efectuaron mediante los métodos analíticos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [2] que se presentan en el Apéndice 1. La totalidad de los datos obtenidos son presentados en el Apéndice 2.

En las aguas residuales domésticas existe contaminación por materia orgánica debida a sustancias solubles en el agua y material no soluble, para poder determinar los aportes contaminantes de cada una de estas formas fue necesario realizar dos pruebas de DQO por

cada muestra recolectada. La primera corresponde a la DQO total de la muestra (DQO) la cual indica tanto la cantidad de material oxidable disuelto en el líquido (sustancias orgánicas e inorgánicas) como el aportado por los sólidos no disueltos, la segunda es la DQO soluble o del líquido (DQOI) la cual determina el material oxidable que se encuentra soluble en la muestra. Para realizar esta última prueba fue necesario someter las muestras previamente a centrifugación durante 20 minutos a fin de separar el material sólido, la diferencia entre la DQO y la DQOI representa la materia orgánica oxidable ligada al material sólido insoluble en el agua (DQOs).

Componentes del sistema:

1. Entrada al tanque séptico.
2. Tanque séptico.
3. Tubería de conducción Tanque séptico – Reactor anaeróbico.
4. Lecho de grava.
5. Zona de tratamiento en suspensión.
6. Lecho de soporte plástico.
7. Salida del reactor anaeróbico.

Puntos de muestreo:

- P8. Entrada al tanque séptico.
- P1. Entrada al reactor anaeróbico, ubicado a 5 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P2. En medio del lecho de grava, a 25 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P3. Al final del lecho de grava, a 50 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P4. En medio de la zona en suspensión, a 100 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P5. Al final de la zona en suspensión, a 150 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P6. En medio del medio plástico, a 165 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P7. Al final del medio plástico, a 180 cm. de la base del reactor anaeróbico.
- P9. Salida del sistema.

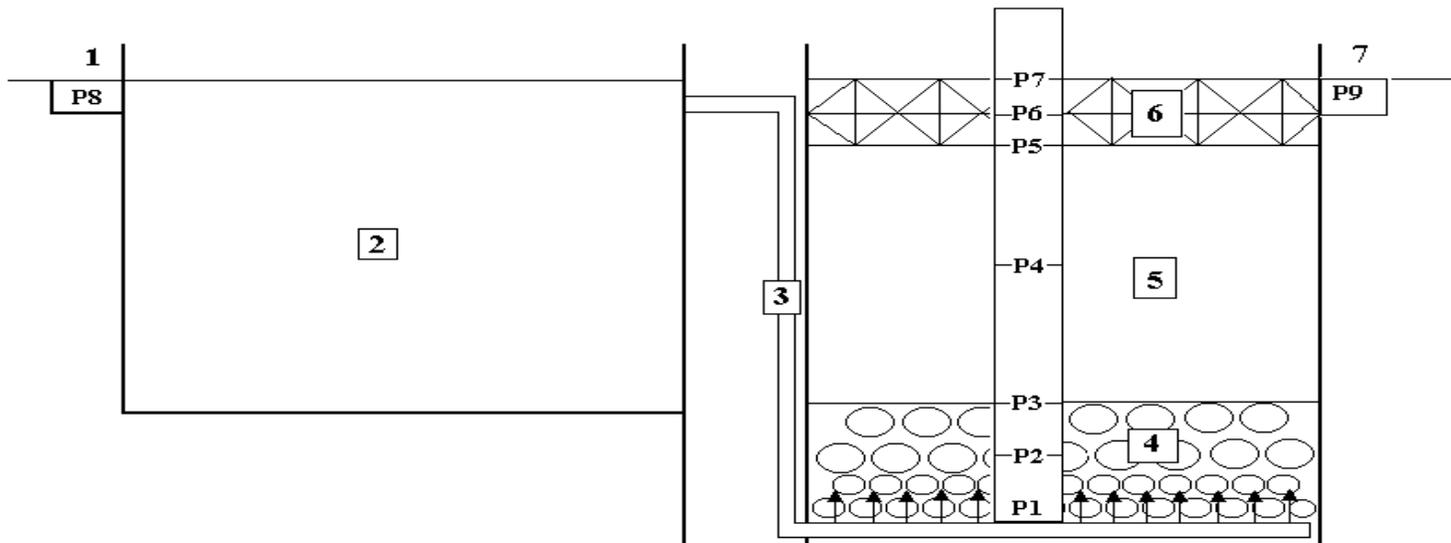


Figura 6. Ubicación de los puntos de muestreo a través del sistema.

### 3.2 COMPORTAMIENTO GLOBAL DEL SISTEMA

A continuación se presentan los valores promedio para los diferentes parámetros evaluados en la entrada y salida, del tanque séptico y del reactor anaeróbico. Dichos valores se presentan de este modo con el fin de evaluar de una manera general la eficiencia en remoción de las cargas contaminantes alcanzadas tanto para el sistema global como para los dispositivos implicados en el tratamiento. En la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3, es importante notar que algunos parámetros tienen un valor mayor a la salida del sistema que al final del medio plástico, esta situación se debe principalmente a problemas en el funcionamiento del sistema de recolección perimetral del reactor anaeróbico y se discute detenidamente en la sección 4.1.3.

Tabla 1. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 1.

Parámetro	Carrera 1			
	Entrada Tanque Séptico	Entrada Reactor Anaeróbico	Final del Medio Plástico	Salida del Sistema
DBO <sub>5</sub>	123.60	30.06	24.92	36.71
DQO	298.66	117.48	80.50	88.07
DQOI	158.01	57.19	60.97	69.79
DQOs	122.88	75.37	13.23	19.32
ST	503.30	326.91	228.67	272.00
SST	151.70	147.21	23.00	22.25
SV	239.13	183.88	62.25	89.00
SF	264.17	318.87	166.42	183.00
Turbiedad	231.60	176.20	30.60	44.80
pH	6.77	6.74	6.75	6.74

Tabla 2. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 2.

Parámetro	Carrera 2			
	Entrada Tanque Séptico	Entrada Reactor Anaeróbico	Final del Medio Plástico	Salida del Sistema
DBO <sub>5</sub>	171.29	53.58	35.09	43.09
DQO	412.17	175.23	102.56	87.44
DQOI	163.05	39.55	60.21	60.97
DQOs	249.11	135.69	43.35	26.47
ST	425.84	328.45	187.33	247.87
SST	147.87	72.61	22.07	30.45
SV	218.48	109.73	64.24	94.75
SF	207.36	218.72	123.08	153.12
Turbiedad	251.00	78.40	36.40	50.20
pH	6.89	6.52	6.90	6.86

Tabla 3. Comportamiento medio de los parámetros medidos en la Carrera 3.

Parámetro	CARRERA 3			
	Entrada Tanque Séptico	Entrada Reactor anaeróbico	Final del Medio Plástico	Salida del Sistema
DBO <sub>5</sub>	103.43	37.25	37.01	41.55
DQO	344.81	158.51	73.57	82.39
DQOI	163.33	58.45	54.31	51.31
DQOs	181.48	100.07	19.08	25.63
ST	347.03	305.89	237.97	230.51
SST	93.83	22.85	6.89	18.10
SV	149.59	98.35	62.37	69.94
SF	197.43	207.54	175.60	160.57
Turbiedad	230.89	100.00	61.44	74.89
pH	6.73	6.54	6.66	6.63

### 3.3 ANÁLISIS DE LA NATURALEZA DE LAS DESCARGAS

En el municipio de El Tambo las descargas líquidas de mayor importancia son producidas por actividades domésticas, seguidas de las generadas por algunas actividades comerciales que afectan significativamente la naturaleza de las aguas residuales, ya que no se dispone de un tratamiento adecuado antes de arrojar estos desechos a la red de alcantarillado.

La Figura 7 presenta el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos básicos evaluados en el afluente del sistema de tratamiento. En ella se pueden observar gran cantidad de variaciones, las cuales indican que las características del agua residual están sujetas a cambios significativos en su composición.

Dichas variaciones son atribuibles a las condiciones particulares de la localidad y su población, el hecho de que el número de habitantes en la cabecera municipal no supere los 6000 y que su principal actividad económica (mercado popular) se lleve a cabo únicamente dos veces por semana, ocasionan que se presenten altos y bajos en la concentración de las cargas contaminantes supeditados a los hábitos y costumbres de la población. Según Chauv [7] si se tratara de una localidad con una mayor población e industria dichos cambios no serían apreciables de una forma tan evidente como en este caso, debido a que los diferentes factores que determinan las características de las cargas contaminantes son mayores y actúan con una mayor sinergia la cual finalmente se ve representada en unas características más homogéneas del agua residual.

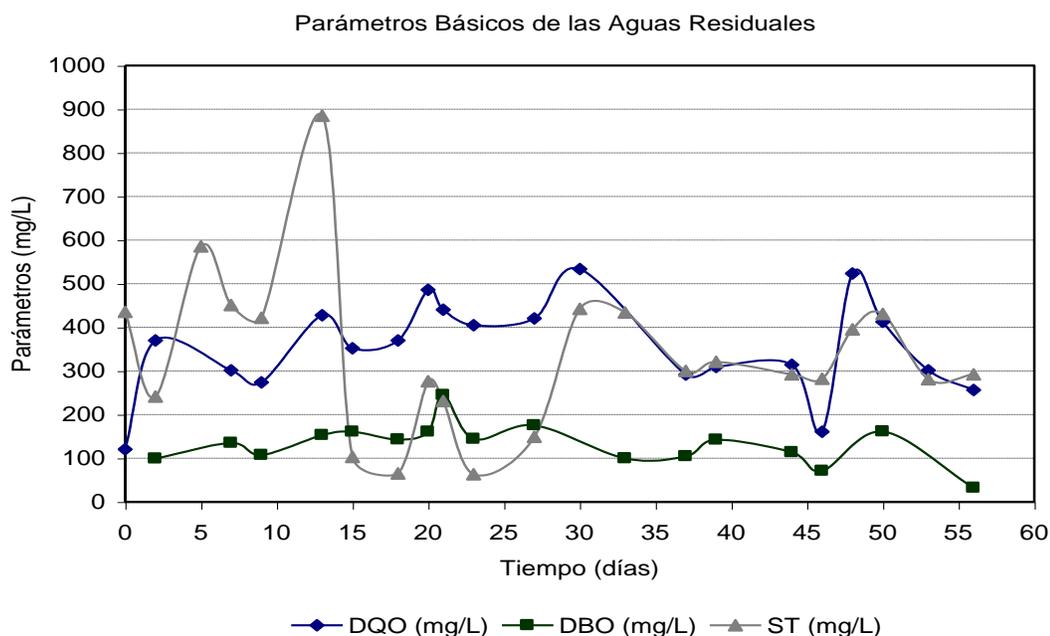


Figura 7. Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales durante el periodo de evaluación.

Dentro de las características particulares del agua residual de este municipio está el efecto que tiene el adicionar una descarga inusual, como lo es el efluente del matadero municipal el cual es arrojado directamente al sistema de alcantarillado con restos de sangre y desperdicios biológicos (rumen) alterando significativamente las características del agua. Esta actividad se realiza dos veces por semana a horas específicas, lo cual permite al operador de la planta desviar el afluente por un periodo limitado de tiempo, evitando parcialmente el efecto que el efluente del matadero pudiera causar sobre el sistema.

En la Tabla 19 del Apéndice 3 se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos básicos de las aguas residuales obtenidos durante los dos meses evaluados, estos análisis muestran que los ST tienen un valor medio de  $335.33 \text{ mg/L} \pm 70.60^2$ , la DQO obtuvo

<sup>2</sup> En el apéndice 3 se utilizó la distribución t de student para obtener los intervalos de confianza, correspondientes a un nivel de confianza del 95%.

353.48 mg/L  $\pm$  41.92, la DQOI presento una media de 162.12  $\pm$  20.04 y la DBO<sub>5</sub> de 149.99 mg/L  $\pm$  36.28.

En un proceso de tratamiento anaeróbico el pH es factor crítico, ya que el mejor rango de operación de los microorganismos metanógenos es de 6.8 a 7.2 [10], siendo tolerable el intervalo 6.4 a 7.4, Metcalf y Eddy [18] apuntan que el valor característico del pH en las aguas residuales domesticas municipales esta en el intervalo 6.8 a 7.2. Para el caso de este estudio el valor promedio de pH fue de 6.76  $\pm$  0.08 y se presenta junto con todos los datos obtenidos para este parámetro en la Tabla 20 del Apéndice 3. Estos valores indican que el crecimiento microbiano se encuentra favorecido por este parámetro.

Al igual que el pH la temperatura es un factor que afecta directamente la operación de los sistemas de tratamiento biológico, en la literatura se reportan valores de temperatura entre 29 y 37°C como óptimos para el buen desempeño de microorganismos metanógenos [10], sin embargo se ha comprobado que a temperaturas superiores a 20°C estos microorganismos presentan una desempeño aceptable [1]. Los valores de temperatura medidos durante esta evaluación se exponen en la Tabla 22 del Apéndice 4 y presentan un valor medio de 22.57°C  $\pm$  0.19, el cual indica que bajo este parámetro se puede generar un buen desarrollo de procesos biológicos.

En la Tabla 20 del Apéndice 3 se presenta la relación entre los valores de DQOI y DQO, para las aguas residuales del municipio. Este cálculo representa el porcentaje de sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables que se encuentran solubles en el agua, con respecto a la totalidad del material contaminante, el valor medio obtenido para esta relación es 48.57%  $\pm$  0.06, e indica que gran parte de la contaminación de las aguas residuales que llegan al sistema de tratamiento (51.43%) es debida a material no soluble.

La relación entre los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO en el agua es muy importante para el análisis de la naturaleza de las descargas, Barba Ho [4] explica que la razón DBO<sub>5</sub>/DQO representa la fracción de material orgánico oxidable químicamente que puede ser degradado

biológicamente, en este sentido se ha calculado un factor de biodegradabilidad ( $F_b$ )<sup>3</sup> como indicador de las características de biotratabilidad del efluente. Los resultados obtenidos en el cálculo de dicho factor se presentan en la Tabla 20 del Apéndice 3, y presentan un valor medio de  $0.59 \pm 0.06$  el cual indica que las aguas residuales del municipio de El Tambo presentan una condición de biotratabilidad MEDIA según la clasificación de los factores de biodegradabilidad presentada en la Tabla 21 del Apéndice 3.

El estudio de los parámetros presentados anteriormente muestra que un alto porcentaje de la contaminación de las aguas residuales es generado por material no soluble, esta característica hace que este material sea potencialmente sedimentable y brinda la posibilidad de retenerlo empleando un tratamiento primario. Unido a esta situación se presenta el hecho de que las aguas residuales poseen valores de pH cercanos a los óptimos para el tratamiento biológico y además mantienen temperaturas superiores a 20°C las cuales garantizan el buen desarrollo de procesos biológicos, indicando que se favorece el tratamiento biológico de las aguas residuales a pesar de que estas se clasifiquen en una condición de tratabilidad media.

#### 3.4 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL CAUDAL

Para llevar a cabo un análisis del funcionamiento del sistema es pertinente en primer lugar estudiar la variación del caudal en cada una de las carreras, y así establecer, de manera preliminar, las condiciones de operación del sistema.

Los caudales fueron medidos en cada carrera obteniéndose como valores máximos 5.49 L/s, 3.42 L/s y 3.43 L/s, respectivamente, estos caudales se midieron en una de las tres unidades de tratamiento del sistema, lo cual indica que a la planta está llegando un caudal superior a los 9 L/s para los que está diseñada. Los valores mínimos se registraron al final de las carreras siendo de 1.10 L/s (día 15) y de 0.89 L/s (día 14) para la primera y segunda

---

<sup>3</sup>  $F_b = DBO_5 / (0.65 * DQO)$

corridas respectivamente, la última carrera que fue evaluada durante 28 días presentó un caudal mínimo de 0.35 L/s. En el Apéndice 4 se presentan todos los datos obtenidos en las mediciones de caudal.

El afluente de la planta se reparte a tres unidades de tratamiento que trabajan en paralelo, La Figura 8 presenta el comportamiento del caudal tratado a través del tiempo en una unidad del sistema, en cada una de las carreras evaluadas. En esta se puede ver como el caudal disminuye drásticamente en los cinco primeros días después del lavado y luego sufre fluctuaciones relativamente pequeñas durante los días posteriores, en la tercera carrera se alcanza a observar que el caudal tiene una disminución fuerte nuevamente a partir del veinteavo día. Variaciones tan marcadas son inusuales en sistemas de tratamientos que operen normalmente y evidencian deficiencias en el funcionamiento hidráulico de los dispositivos.

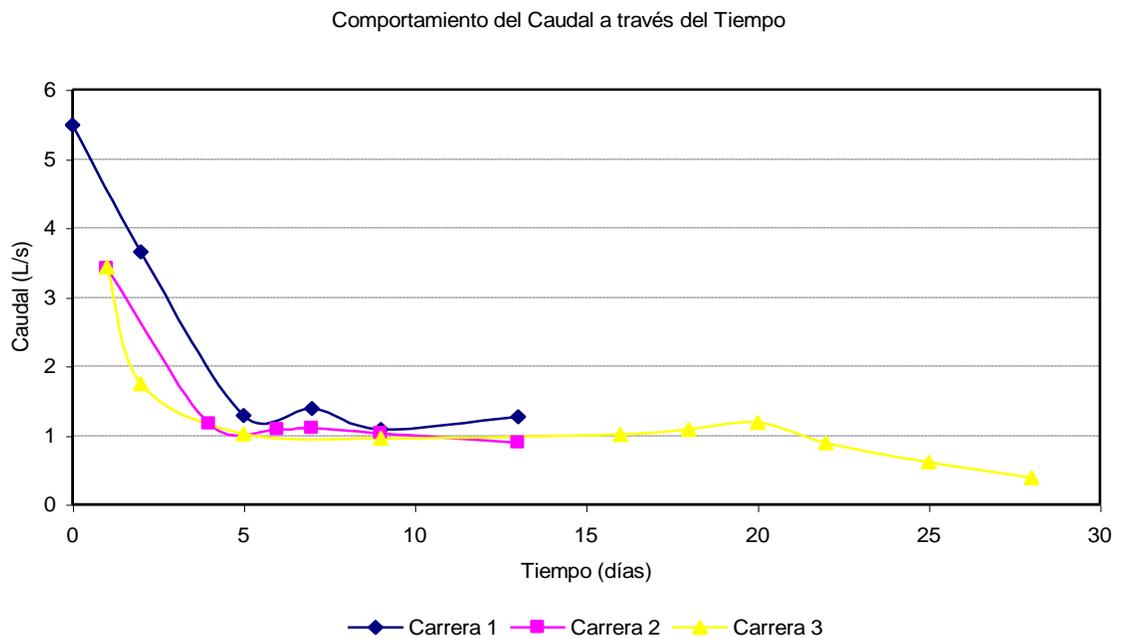


Figura 8. Comportamiento del caudal a través del tiempo en las tres carreras evaluadas.

La pérdida de carga evaluada a través del sistema, muestra a grandes rasgos el comportamiento hidráulico de este, en la Tabla 4 se presentan los resultados de pérdida de carga obtenidos durante la evaluación del sistema, esta revela que la mayoría de las pérdidas se presentan entre el punto 8, situado a la entrada del tanque séptico y el punto 1, ubicado en el fondo del reactor anaeróbico después del sistema de distribución. Los elementos que pueden generar la pérdida de carga entre estos dos puntos son los accesorios (codos, entradas, tabiques, salidas, válvulas) y el sistema de distribución. La pérdida de carga por accesorios puede estimarse como:

$$h_L = \sum K \times \frac{V^2}{2g} \quad \text{donde} \quad V = \frac{Q}{A}$$

Considerando que los accesorios o dispositivos que pueden ocasionar pérdida de carga entre los mencionados puntos son dos entradas de borda, cinco codos, una salida de borda y una válvula de bola, todos con un diámetro de 4 pulgadas (10.16 cm.), cuyos coeficientes de pérdidas locales ( $K$ ) en su orden son 0.8, 0.3, 1 y 0 para la válvula y si se evalúa la ecuación con el dato de caudal en el primer día de la segunda carrera, que según la Tabla 4, es 3.42 L/s tenemos:

$$h_L = (0.8 + 0.8 + 0.3 + 1.0 + 0.0) \times \frac{\left( \frac{3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{8.11 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \right)^2}{2 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \quad \text{entonces } h_L = 0.0263 \text{ m}$$

Esto significa que la pérdida de carga debida a los accesorios es solo de 2.63 cm. Por otro lado la pérdida de carga medida entre el punto 8 y el punto 1 el primer día de la segunda corrida fue de 62,44 cm, lo cual implica que la pérdida de carga atribuible al sistema de distribución es de 59,81 cm, es decir más del 95.0% de la pérdida de carga en el tramo.

Un hecho que explica la situación anterior es el procedimiento de lavado del reactor anaeróbico el cual dificulta el buen funcionamiento hidráulico, debido a que este se realiza

por bombeo a través del mismo sistema de distribución impidiendo que se genere una extracción uniforme a lo largo del lecho. Esto ocasiona que en esta operación solamente se desprenda el lodo de determinadas zonas las cuales dada su pequeña proporción frente al volumen total del reactor, se colmatan rápidamente favoreciendo la obstrucción de este dispositivo. Dicho comportamiento es fácilmente comprobable al analizar las tendencias decrecientes de caudal que se muestran en la Figura 8.

Se pudo observar que la disminución en el caudal esta asociada con un rebosamiento en el aliviadero ubicado en la entrada de la planta, lo cual sumado a las altas pérdidas de carga atribuibles al sistema de distribución permiten establecer que el reactor anaeróbico presenta problemas de obstrucción.

Tabla 4. Perdida de carga hidráulica a través del sistema.

Carrera	Día de carrera	Caudal	h (P8 - P1)	h (P1 – P7)	Perdida Total
1	2	3.65	45.30	2.40	47.70
	5	1.29	49.50	0.70	50.20
	7	1.39	50.28	1.23	51.50
	9	1.08	51.40	0.70	52.10
	13	1.27	50.80	0.87	51.67
2	1	3.42	62.44	0.94	63.20
	4	1.17	60.28	0.86	61.00
	6	1.08	64.57	0.87	65.20
	7	1.11	64.32	0.92	65.00
	9	1.03	66.08	0.88	66.68
	13	0.89	69.03	0.90	69.75
3	2	1.57	63.10	0.95	64.05
	5	0.91	65.00	0.88	65.88
	9	0.96	64.60	0.82	65.43
	11	0.55	54.40	0.90	55.30
	16	1.01	62.93	0.90	63.83
	18	1.08	58.80	0.75	59.55
	20	1.18	64.55	0.80	65.35
	22	0.89	62.90	0.85	63.75
	25	0.61	65.23	1.03	66.27
	28	0.36	67.80	0.80	68.60

### 3.5 EFICIENCIAS DEL SISTEMA

El análisis de demanda química de oxígeno (DQO) mide el oxígeno necesario para la oxidación química de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en una muestra, por lo

cual se convierte en un parámetro de gran utilidad para calcular eficiencias. Es por esta razón que se utiliza este parámetro para analizar las eficiencias alcanzadas por el sistema (P8-P9), el tanque séptico (P8-P1) y el reactor anaeróbico (P1-P7) con el fin de evaluar este aspecto de una manera general.

La Figura 9 presenta las eficiencias medias de remoción de DQO alcanzadas por el sistema y los dispositivos en cada una de las carreras. En ella se observa que las cargas contaminantes retenidas por el sistema durante el periodo evaluado en promedio estuvieron entre el 70 y 80% aproximadamente, alcanzando las mayores remociones en la tercera carrera (78.66%). También se evidencia que el dispositivo que presenta las mayores remociones de DQO es el tanque séptico, el cual mantuvo remociones superiores al 50% durante las 3 carreras evaluadas.

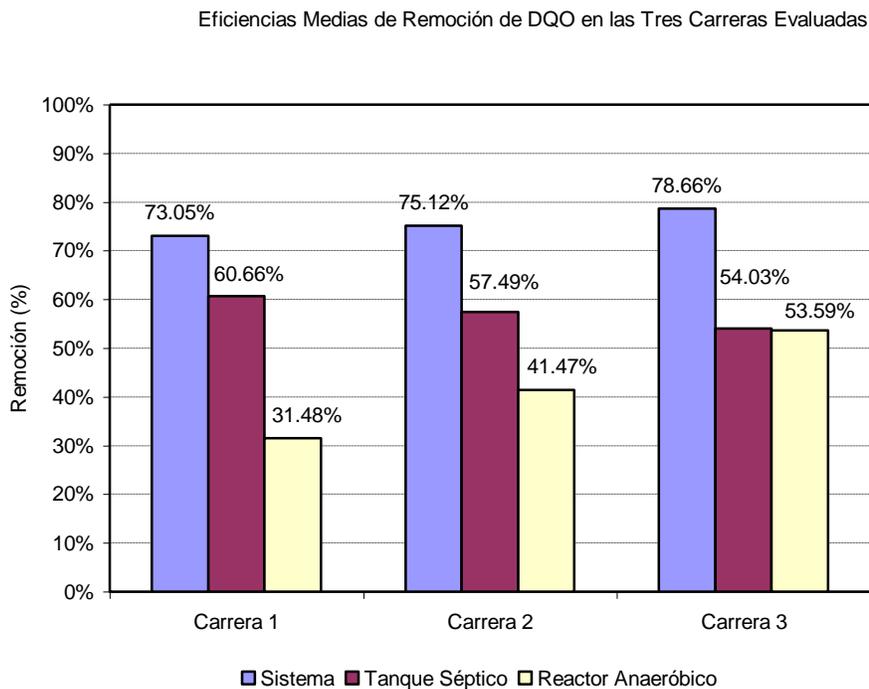


Figura 9. Eficiencias medias de remoción de DQO alcanzadas por los dispositivos durante las carreras evaluadas.

Remociones de DBO, DQO y ST Presentadas en la Carrera 2

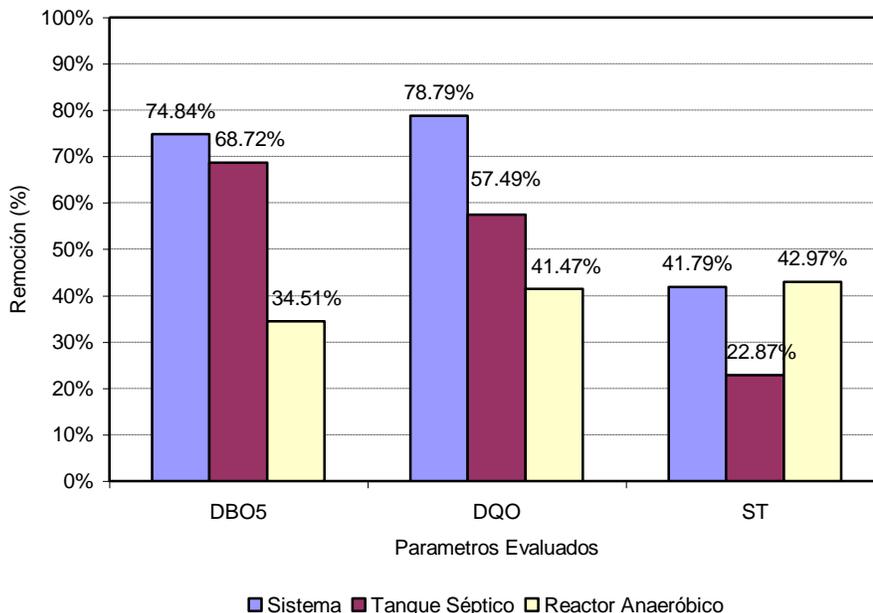


Figura 10. Remociones alcanzadas en DBO<sub>5</sub>, DQO y ST a través del sistema en la carrera 2.

La Figura 10 muestra las remociones alcanzadas para la segunda carrera en DBO<sub>5</sub>, DQO y Sólidos Totales (ST) a través del sistema y cada uno de los dispositivos.<sup>4</sup> Aquí se observa que el parámetro que se remueve en mayor proporción es la DBO<sub>5</sub> seguida por la DQO y los ST, además se muestra como el dispositivo que mas aporta a la remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> es el tanque séptico y la mayor remoción de ST se presenta en el reactor anaeróbico. Las altas remociones de DBO<sub>5</sub> y DQO en el tanque séptico se deben a que las aguas residuales que llegan al sistema de tratamiento contienen una alta proporción material no soluble (el valor medio de la relación DQOs/DQO fue 51.43% ± 0.06) el cual es removido en gran parte por la operación de sedimentación que se genera en el tanque séptico.

<sup>4</sup> las carreras 1 y 3 presentan un comportamiento similar y las figuras correspondientes se presentan en el apéndice 5.

El aumento de la eficiencia de remoción de DQO que presenta el reactor anaeróbico en la tercera carrera se explica por el aumento del tiempo de retención celular (TRS), esta carrera se evaluó durante un periodo de 28 días y se piensa que el aumento en el TRS permitió que los procesos biológicos generados al interior de reactor anaeróbico alcanzaran una mayor estabilización que se refleja en la magnitud de las remociones.

El hecho de que el reactor anaeróbico presente mayores eficiencias de remoción de ST que el tanque séptico se explica por la ubicación del punto 1, referenciado como la salida del tanque séptico y la entrada al reactor anaeróbico. Este punto de muestreo se encuentra en el fondo del reactor anaeróbico donde se tienen concentraciones relativamente altas de sólidos que generan distorsiones en los cálculos de estas eficiencias. Hecha esta aclaración se evidencia que en general el tanque séptico es la estructura que mas aporta a la remoción de la carga contaminante.

Según lo discutido por Fatma Y., Cakir y Stenstrom K. [11], los reactores anaeróbicos convencionales presentan mejores eficiencias cuando tratan aguas con altas cargas contaminantes, basándose en esta hipótesis las regulares eficiencias presentadas en el reactor anaeróbico se pueden atribuir en parte a las bajas concentraciones de la carga contaminante que llegan a este dispositivo.

### 3.6 CONCLUSIONES

Se estableció que las características fisicoquímicas de las aguas residuales del municipio de El Tambo favorecen su depuración por medio de tratamientos biológicos, ya que el valor promedio de pH (6.76) obtenido es muy cercano al óptimo de operación de los microorganismos y la temperatura (22.57°C) favorece el desarrollo de los mismos.

Se determinó que el reactor anaeróbico presenta problemas de obstrucción en su sistema de distribución, ya que el mayor porcentaje de pérdida de carga se genera en este punto.

El sistema presenta eficiencias de remoción de DQO que varían entre un 70 y 80% aproximadamente, un análisis general de las eficiencias en cada estructura de tratamiento evidencia que el dispositivo que mas aporta al tratamiento global es el tanque séptico.

## 4 EVALUACIÓN DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE

En la primera parte de este capítulo se pretende elaborar un análisis del reactor anaeróbico que permita establecer su modo de operación frente a las condiciones específicas con las cuales se evaluó el sistema de tratamiento, teniendo en cuenta lo particular de la conformación del lecho filtrante.

En la segunda parte se analizan la variación de los parámetros fisicoquímicos con el propósito de determinar cual es el comportamiento de los procesos que ocurren al interior del reactor.

### 4.1 FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE

Es importante destacar que el comportamiento del reactor está ligado directamente a su configuración, en este caso el lecho del reactor presenta tres zonas:

- Zona de lecho de grava
- Zona en suspensión
- Zona de lecho plástico

#### 4.1.1 Zona de Lecho de Grava

Esta zona esta ubicada en el fondo del reactor y comprende una altura de 50 cm, está conformada por diámetros de grava entre 2 y 5 cm dispuestos desde los diámetros mas pequeños en el fondo del reactor hasta los mayores en la parte superior. En ella se ubicaron tres puntos de muestreo; *Punto1* en el fondo del reactor, *Punto 2* en la franja intermedia del

lecho de grava, *Punto 3* en el límite entre esta zona y la zona en suspensión. En esta zona del reactor se encuentran altas concentraciones de lodos como lo indican las tendencias de ST presentadas en la Figura 11, en ella se observa que existe una marcada diferencia entre la concentración de ST en el punto 3 y los otros dos puntos de esta zona, esta diferencia indica que el punto 3 se encuentra mas influenciado por los procesos que se generan en la zona de tratamiento en suspensión y los dos primeros puntos son los que realmente representan el comportamiento del lecho de grava.

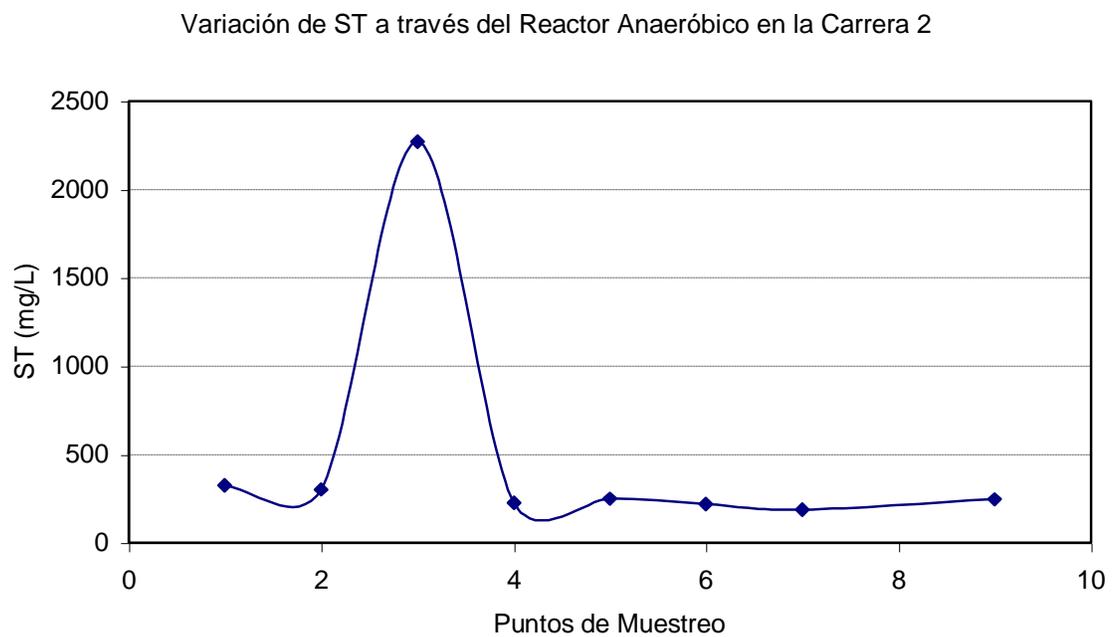


Figura 11. Variación de ST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.

El hecho de que esta zona sea la primera en hacer contacto con el flujo del agua hace que aquí se presenten altas cargas contaminantes, esta circunstancia favorece la generación de microorganismos que por el tipo de lecho presente depuran el agua a través de procesos de película fija y tratamiento en suspensión (intersticios de la grava).

Una situación a destacar en esta zona es la alta pérdida de carga que se presenta en el sistema de distribución (discutida en la sección 3.4). Este problema es atribuible en gran parte a los pequeños diámetros de grava utilizados y su inadecuada disposición.

#### 4.1.2 Zona en Suspensión

Esta zona comprende la parte intermedia del reactor, comienza en la parte superior del lecho de grava y se prolonga por aproximadamente 1m. En ella se llevan a cabo procesos de eliminación de la materia orgánica mediante decantación y procesos biológicos en suspensión. Según Fatma Y., Cakir y Stenstrom K. [11], para que estos procesos biológicos presenten buenas eficiencias se necesitan altas cargas de materia orgánica, es por esta razón que este tipo de tratamientos son empleados mas efectivamente en las zonas bajas de los reactores de flujo ascendente. En este caso específico, al poseer bajas cargas contaminantes en esta zona se presenta la acción biológica de manera limitada aunque suficiente para formar agrupaciones de microorganismos que tienden a decantarse acumulándose en la superficie de la grava. Esta hipótesis se comprueba al analizar los altos valores de sólidos presentados en el punto 3 de la Figura 11.

Los sólidos acumulados a la altura del punto 3 conforman una cama de lodos donde se generan procesos de digestión que estabilizan la materia orgánica. Por esta razón es en este punto donde se lleva acabo la mayor parte del tratamiento biológico de esta zona.

#### 4.1.3 Zona de Lecho Plástico

Esta es la última zona de tratamiento dentro del reactor, esta conformada por un medio sintético, que según el diseño debería estar distribuido en unos 30 cm por debajo de la superficie del agua después de la zona en suspensión, pero dadas las características del material plástico este flota en la superficie del agua presentando una mínima área sumergida. En esta zona fueron colocados 3 puntos de muestreo, uno 30 cm bajo la superficie (punto 5), otro 15 cm bajo el nivel del agua (punto 6) y el último justo en la

superficie del agua (punto 7). En la Figura 12 se puede ver que en esta zona las cargas orgánicas son bajas puesto que el agua residual se encuentra en una etapa final de tratamiento y esto causa dificultades en la generación de una actividad biológica adecuada, es por esto que el aporte de esta zona al tratamiento global es mínimo.

Variación de DBO y DQO a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2

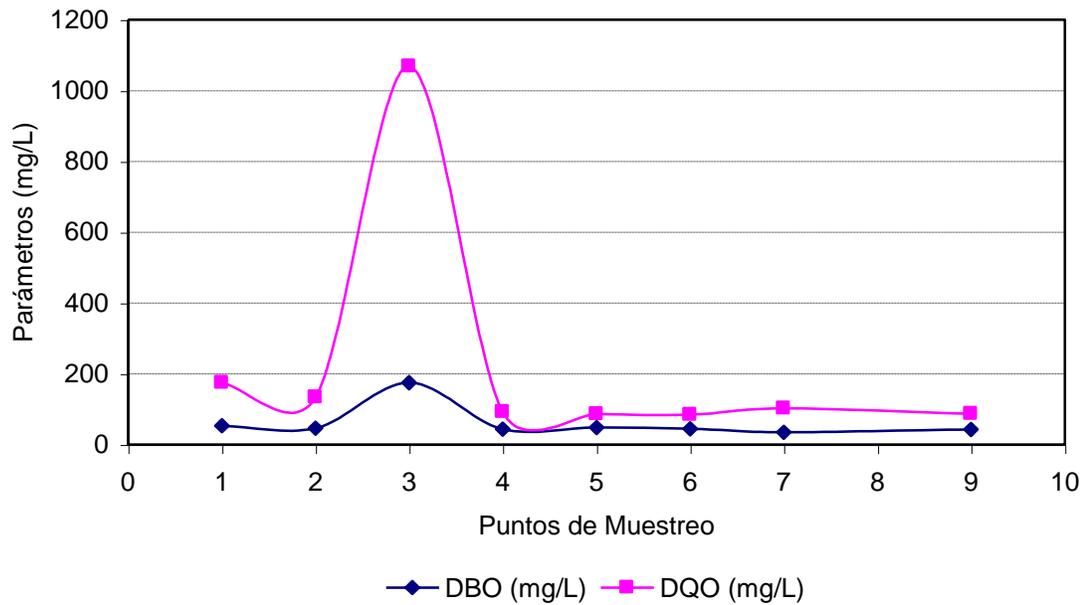


Figura 12. Variación de la DBO5 y la DQO a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.

Debido a que el sistema de recolección perimetral de flujo en el reactor no opera correctamente, el agua que asciende hasta la parte superior es obligada a fluir superficialmente a través del lecho plástico hasta la salida del reactor. Dicha situación ocasiona el arrastre del material biológico adherido a el medio plástico disminuyendo la calidad del efluente final, tal como se observa al comparar los resultados de los parámetros evaluados para el punto 7, que representa la parte superficial del reactor anaeróbico y el punto 9, que representa la salida total del sistema de tratamiento. Estos resultados se muestran en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 presentadas en el Capítulo 3.

## 4.2 ANÁLISIS AL INTERIOR DEL REACTOR ANAERÓBICO

Para evaluar el desarrollo de los procesos microbiológicos bajo las condiciones específicas en las que opera el reactor anaeróbico, se analizarán los valores obtenidos para la segunda carrera, debido a que las tendencias registradas en las otras dos carreras presentan un comportamiento similar.

### 4.2.1 Análisis de la Carga Contaminante

Si se analiza la variación de la carga contaminante a través del lecho del reactor, es de esperarse que las concentraciones disminuyan a medida que el flujo asciende, debido a que los microorganismos presentes utilizan la materia orgánica como sustrato, depurando cada vez más el agua. Igualmente se pensaría en una reducción de la carga en cada punto del reactor desde el primer día de cada corrida hasta un tiempo específico en el cual se alcanzaría un equilibrio o estado estacionario, de aquí en adelante las propiedades en un punto específico dentro del reactor presentarían un valor constante, que se reflejaría en una superposición de las curvas en una gráfica de la carga contaminante contra la posición en el eje Z a través del reactor, teniendo como parámetro el tiempo de retención de celular.

En la Figura 13 y Figura 14 se grafican los datos de DQO y DBO<sub>5</sub> tomados en la segunda carrera contra la posición de los puntos de muestreo dentro del reactor, de la forma como se explico anteriormente. En estas figuras se distinguen solamente dos zonas en las que se realiza un tratamiento efectivo. La primera, conformada por el lecho de grava muestra inicialmente (hasta los 25 cm. desde al fondo) una disminución de la carga contaminante, después se observa un drástico incremento en la concentración de los parámetros debido principalmente a la cantidad de lodos concentrados en el punto 3 (50 cm. desde el fondo). En la segunda zona, donde se realiza un tratamiento en suspensión decrece drásticamente la concentración de la carga contaminante entre los punto 3 y 4, en adelante se observa una leve variación de la carga contaminante que se mantiene hasta la parte superior del filtro,

esta ultima tendencia demuestra que el efecto que tiene el lecho conformado por el material plástico es imperceptible frente al tratamiento global que sufre el agua en el reactor.

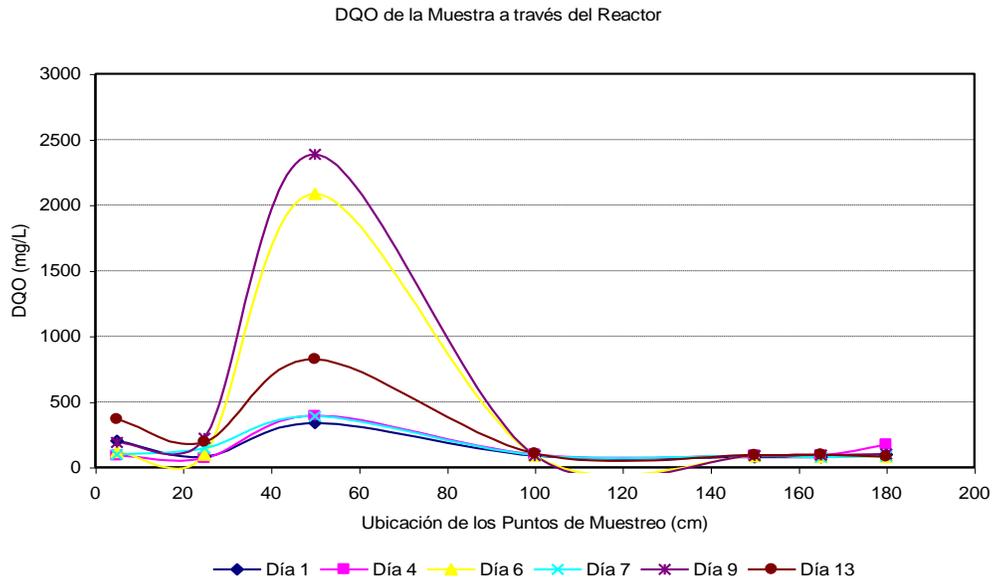


Figura 13. DQO en la segunda carrera a través del lecho del Reactor.

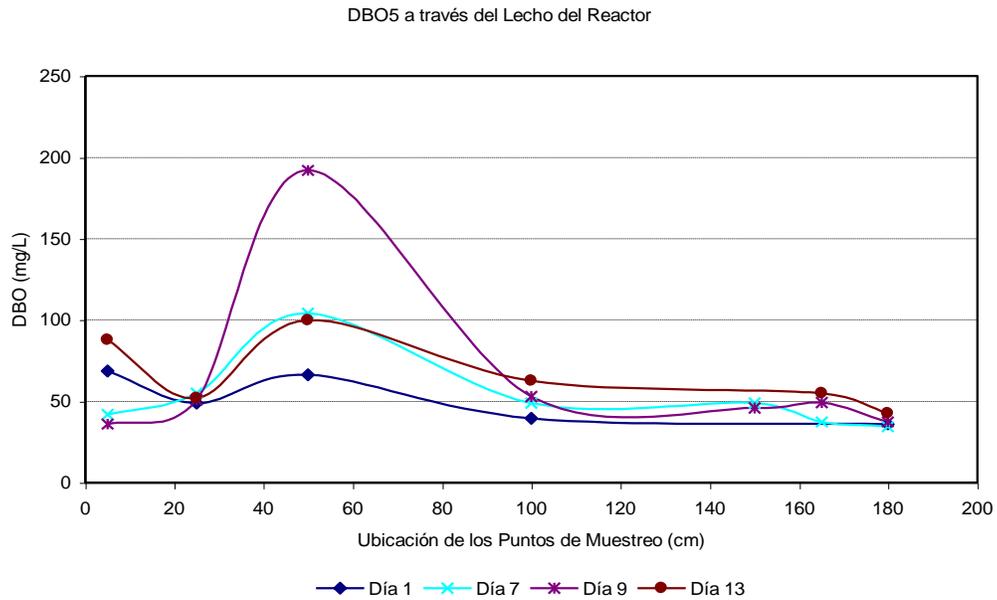


Figura 14. DBO5 en la segunda carrera a través del lecho del Reactor.

Según las tendencias presentadas anteriormente en la zona de lecho de grava se genera la depuración del agua a través de un tratamiento biológico representado en la disminución de la carga contaminante desde la entrada del reactor anaeróbico hasta el punto 2. El incremento de los parámetros al final del lecho de grava se explica por la acumulación excesiva de lodos entre los puntos de muestreo 2 y 3, que se favorece por que, el tamaño de la grava ubicada entre estos dos puntos ofrece el mayor volumen libre, permitiendo que los lodos producidos en la zona en suspensión se decanten y retengan.

La acumulación de material sólido en el intermedio de la zona de grava y la zona de tratamiento en suspensión genera una franja con condiciones especiales dentro del reactor, esta micro zona posee todas las condiciones para generar procesos de digestión anaeróbica ya que favorece un contacto íntimo del flujo cargado con materia orgánica y la espesa cama de bacterias en un medio anaeróbico. Finalmente la leve variación de los parámetros que se mantiene después del punto 4 evidencia una escasa actividad microbiana en las secciones superiores del filtro, lo que indica que en este sector no se realiza un tratamiento en suspensión como tal, puesto que según Lettinga [15] las concentraciones necesarias para generar un tratamiento de este tipo están alrededor de 20000 mg/L.

#### 4.2.2 Análisis de la Variación de Sólidos

Para realizar un análisis de la variación de sólidos en el reactor anaeróbico se definirán inicialmente cada uno de los parámetros evaluados, después se analizará su comportamiento en el tiempo y por último las variaciones que presentan a través del reactor anaeróbico.

Los Sólidos Volátiles (SV) simbolizan el material biodegradable que comprende tanto la materia orgánica soluble y la no soluble como la biomasa activa, por otro lado los Sólidos Fijos (SF) muestran el material no biodegradable presente en una muestra y la suma de estos dos parámetros representa la cantidad total de sólidos presentes en una muestra (ST). Otro parámetro evaluado fueron los Sólidos Suspendidos Totales (SST) los cuales

representan el material sólido tanto orgánico como inorgánico que se encuentra en suspensión en el agua.

A través del tiempo se esperaría que los SV disminuyeran hasta alcanzar un valor constante esta tendencia representaría el desarrollo de los procesos biológicos y la estabilización de la materia orgánica, igualmente la evolución de estos procesos generaría un aumento en los SF debido principalmente a la producción de biomasa inerte asociada a este fenómeno.

En la Figura 15 se presentan los valores de SV contra la posición en el eje Z a través del reactor, para cada uno de los días evaluados. En ella se puede ver como la variación de los SV en el tiempo no representa el comportamiento esperado, ya que a través de los días se observa que las concentraciones aumentan y disminuyen aleatoriamente. Esta situación es similar para el caso de los SF y SST lo que indica que al interior del reactor anaeróbico no se alcanza un desarrollo total de los procesos biológicos que permita la estabilización de los parámetros, la Figura 20 y Figura 21 que se presentan en el Apéndice 6 muestran este comportamiento para los SF y SST.

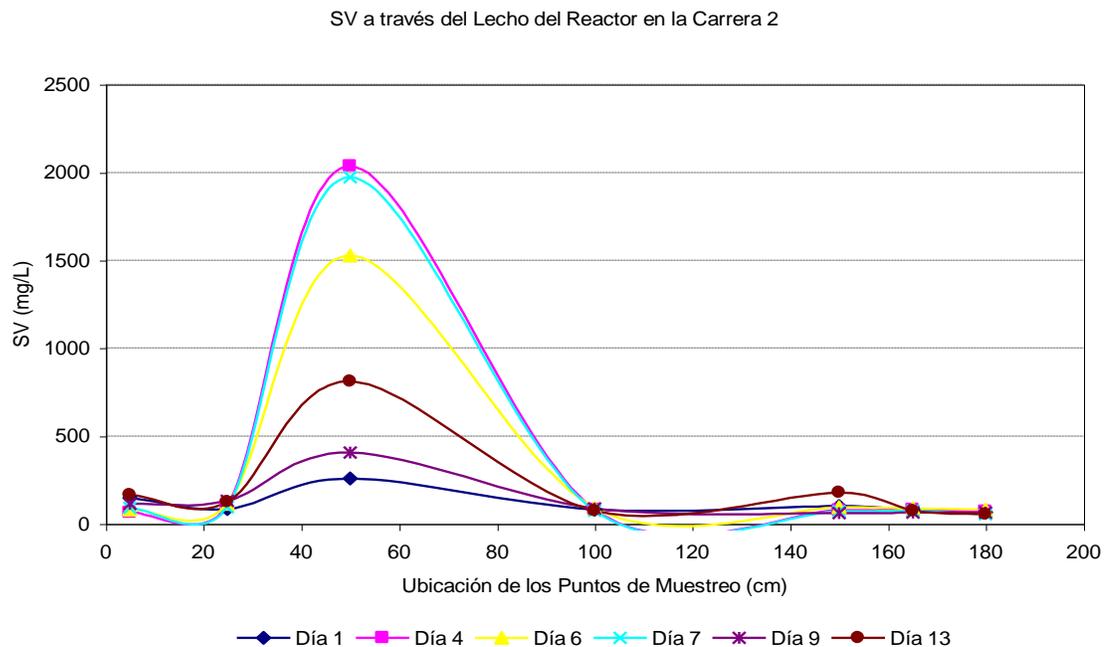


Figura 15. SV en la segunda carrera a través del lecho del reactor.

A través del reactor anaeróbico se espera que los SV decrezcan conforme el flujo asciende debido a que son usados como alimento por las bacterias para sustentar los procesos microbianos, en este sentido también se debe presentar una disminución de los valores de SF correspondiente a un decremento en la actividad microbiana en las capas superiores del reactor.

En la Figura 16 se muestra el comportamiento de los valores medios de SV, SF y SST a través del reactor obtenidos durante la segunda carrera. En ella se observa una disminución leve de los valores de SV entre los puntos 1 y 2; hacia el punto 3 se observa un alto incremento de las concentraciones de este parámetro al acercarse a la cama de lodos, entre el punto 3 y 4 las concentraciones disminuyen drásticamente y en adelante se presenta una leve variación a medida que el flujo asciende.

Variación de SF, SV y SST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.

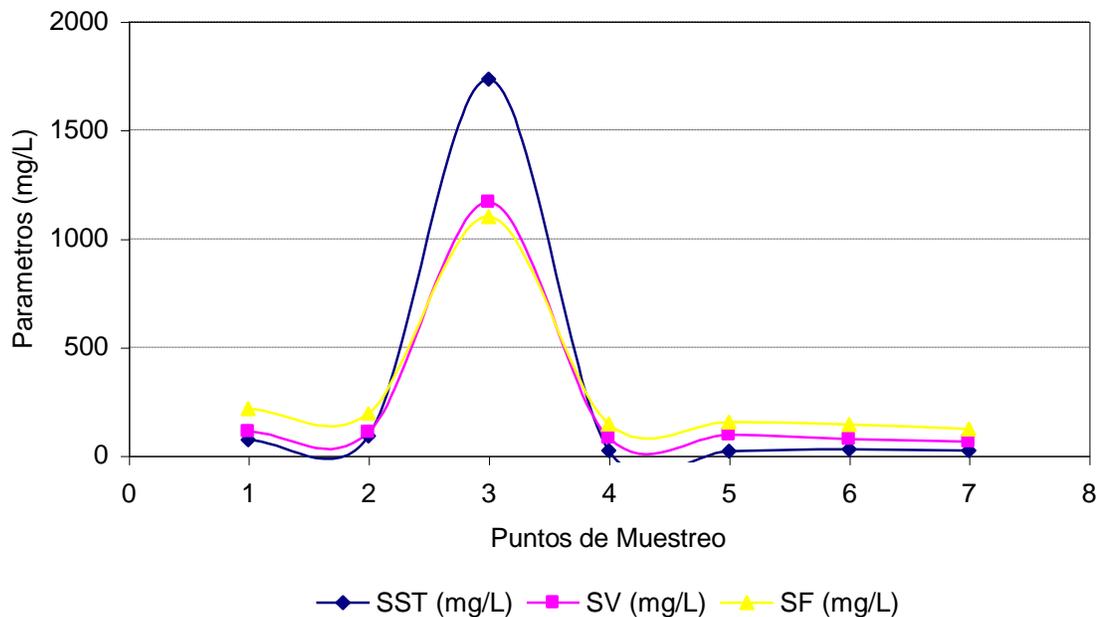


Figura 16. Variación de SF, SV y SST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.

Este comportamiento indica la generación de procesos biológicos propios del lecho de grava entre el punto 1 y 2, debido a que los microorganismos consumen materia orgánica representada en los valores de SV, así mismo evidencia una alta actividad microbiológica en el punto 3 donde se generan procesos de digestión que finalmente se ven representados en la disminución que muestran los SV en el punto 4. De este punto en adelante la poca variación que se observa evidencia una baja actividad biológica que se refleja en la escasa disminución que se ve en los SV en esta zona.

En la Figura 16 se observa que los SF presentan un comportamiento similar al de los SV a través del reactor, sin embargo las concentraciones de este parámetro son superiores en todos los puntos excepto el punto 3. En este punto la acumulación de las bacterias que se decantan desde la zona en suspensión causa un incremento en los valores de los SV respecto de los SF, igualmente la alta actividad microbiana que se genera en este punto causa un aumento en los valores de SF debido a la alta producción de biomasa inerte. Las concentraciones superiores de SF respecto a SV en los otros puntos se puede explicar por diferentes razones:

- La primera se basa en el hecho de que el agua residual llega a la planta con altas concentraciones de SF, muchos de los cuales pueden estar en forma de sales disueltas que son muy difíciles de remover en estos sistemas.
- La segunda se debe principalmente a la posible adición de SF al agua en el interior del reactor anaeróbico, mas específicamente en la zona del lecho de grava, este incremento se puede ocasionar por la formación de sales en esta zona, producto de la reacción de sustancias corrosivas que transporta el agua como sulfatos o cloruros con el material de soporte.
- El tercer hecho que explica el comportamiento de los SF, es su acumulación al interior del lecho de grava debido a que la inadecuada operación de lavado no genera una

extracción uniforme de los lodos causando la formación de altos porcentajes de zonas muertas.

Los SST representan el material orgánico e inorgánico que se encuentra en suspensión en el agua. Como tal, se esperaría que este parámetro disminuyera a medida que el flujo asciende en el reactor anaeróbico, también se espera que los SST alcanzaran valores representativos en la primera zona del reactor donde el material sólido debe estar suspendido entre los intersticios del lecho de grava. Aunque las mayores concentraciones de SST se deben encontrar especialmente en la zona de tratamiento en suspensión donde se esperaría la presencia de material biológico en forma de gránulos suspendidos en el agua.

A pesar de que fue imposible diferenciar un patrón de comportamiento de los SST entre las carreras, se evidenció la disminución de este parámetro a medida que el flujo asciende a través de reactor, como se puede ver en la Figura 17, este hecho pone de manifiesto la existencia de procesos depurativos a interior del reactor.

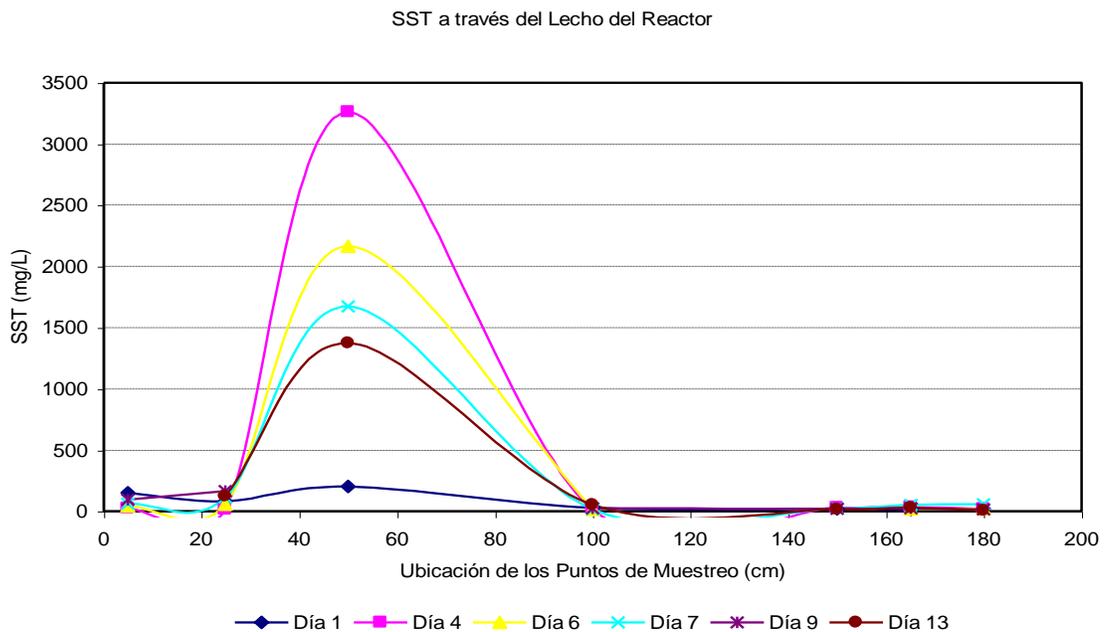


Figura 17. SST en la segunda carrera a través del lecho del reactor.

En la Figura 16 se observa como los SST en los punto 1 y 2 son muy cercanos a los SV. Dicho comportamiento evidencia la existencia de procesos biológicos de tratamiento al interior del lecho de grava, debido a que en esta zona no solo se lleva a cabo un tratamiento por película fija sino que buena parte del tratamiento es realizado por el material en suspensión que se acumula entre los intersticios de la grava.

En el punto 3 se observa que los valores de SST superan a los SV y los SF lo que indica que es en esta región del reactor donde se encuentra la mayor proporción de sólidos en suspensión. Debido a esto se puede asegurar que en este punto los procesos de tratamiento de las aguas se ven favorecidos por las altas cantidades de SST que se encuentran y además que el tratamiento en suspensión es el proceso depurativo predominante en este sitio.

A partir del punto 4 y hasta la superficie del reactor anaeróbico las concentraciones de este parámetro no varían significativamente. Dicho comportamiento evidencia el pequeño aporte de esta zona al tratamiento del agua, debido esencialmente a que en esta parte del reactor los sólidos presentes en su mayoría están diluidos en el agua, y solo una pequeña proporción se encuentra suspendida, de este modo se desfavorecen las condiciones del tratamiento en suspensión, que requieren de la presencia de alta cantidad de material biológico suspendido para que los procesos depurativos sean eficientes.

#### 4.2.3 Análisis del Estado Estacionario

La teoría de cinética microbológica que se maneja en el diseño de reactores anaeróbicos de tratamiento de agua, se fundamenta principalmente en alcanzar la condición de estado estacionario, en la cual teóricamente las propiedades del sistema son invariables a través del tiempo. En cualquier reactor que genere procesos biológicos es importante que las condiciones de funcionamiento permanezcan estables favoreciendo el desarrollo adecuado de los procesos y generando condiciones cercanas a las de un estado estacionario, para el caso de un reactor anaeróbico de flujo continuo las condiciones para alcanzar dicho estado

incluyen la estabilidad del sustrato que ingresa al sistema y la disponibilidad de un tiempo necesario para que se desarrollen los procesos biológicos.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor muestran claramente que en ninguna de las tres carreras se alcanzó la condición de estado estacionario, este hecho se puede explicar analizando dos factores importantes como lo son la variabilidad del caudal y los tiempos de retención de celular.

La Figura 8, presentada en el capítulo 5 muestra los valores del caudal a lo largo de cada carrera, en ella se observa claramente una gran variación de este parámetro en los primeros 5 días, esta variación fue crucial en el hecho de no alcanzar el estado estacionario, porque primero; causó una variación en los tiempos de retención hidráulica haciendo que no se presente el mismo tiempo de contacto entre los microorganismos y el agua, y segundo; refleja un cambio en la cantidad del sustrato que ingresó al reactor, dicho cambio causa inestabilidad en el desarrollo de los procesos microbianos.

Otro hecho importante por el cual no fue posible alcanzar la condición deseada, es el corto tiempo de retención celular (TRS) que se maneja. Los intervalos de tiempo entre los lavados del reactor (que representan el TRS) no permiten la evolución de los procesos biológicos de remoción, ya que esta operación se realiza cada 15 días, tiempo que es muy inferior al sugerido en la literatura. Según Tchobanoglous [29] se debe intentar mantener el tiempo de retención celular superior a 100 días.

Todo lo anterior además de impedir que se alcance la condición de estado estacionario, imposibilita la modelación del reactor, debido a que la alta variabilidad de los factores implicados, genera gran inestabilidad en los procesos, la cual se refleja en parámetros altamente variables y poco predecibles.

### 4.3 VIABILIDAD DEL REACTOR ANAEROBICO

En esta sección se pretende discutir sobre la viabilidad de seguir empleando el reactor anaeróbico como tratamiento secundario con las condiciones específicas que se presentan en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de El Tambo. Para esto se analizarán los resultados y observaciones obtenidos a lo largo de este estudio.

En la sección 3.5 se determinó que el aporte del tanque séptico a la remoción de DQO es superior al que presenta el reactor anaeróbico. En la Tabla 5 se presenta el aporte de cada dispositivo en la remoción total de DBO<sub>5</sub>, DQO y ST alcanzada por el sistema para las tres carreras evaluadas. En ella se observa que el mayor aporte a las remociones de DBO<sub>5</sub> y DQO lo realiza el tanque séptico y que el reactor anaeróbico remueve un mayor porcentaje de SST.

Tabla 5. Aporte de cada dispositivo a la remoción total de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST.

Parámetro	Carrera 1		Carrera 2		Carrera 3	
	Tanque Séptico	Reactor Anaeróbico	Tanque Séptico	Reactor Anaeróbico	Tanque Séptico	Reactor Anaeróbico
DBO <sub>5</sub>	75.68%	17.10%	68.49%	34.51%	63.99%	0.64%
DQO	60.66%	31.48%	57.49%	41.47%	50.03%	53.59%
ST	35.05%	30.05%	22.87%	42.97%	11.85%	22.10%

La situación presentada es inusual en sistemas de tratamiento convencionales ya que el objetivo de un tratamiento primario (tanque séptico) es remover material sólido sedimentable y la remoción de materia orgánica es propia del tratamiento secundario (reactor anaeróbico). Lo que indica que el reactor anaeróbico no está cumpliendo el objetivo de diseño.

Otro motivo para poner en juicio la viabilidad del reactor anaeróbico es que los mayores problemas hidráulicos del sistema se encuentran en este dispositivo y están asociados a las

inadecuadas operaciones de lavado y las particularidades de diseño. Esta situación hace que se presenten problemas de taponamiento que terminan afectando todo el sistema de tratamiento reduciendo su efectividad.

Todo lo anterior indica que en las condiciones específicas con las que está operando el reactor anaeróbico no es viable emplear este dispositivo para llevar a cabo un tratamiento secundario.

#### 4.4 CONCLUSIONES

Se pudo comprobar que el efecto que tiene el lecho conformado por el material plástico es imperceptible frente al tratamiento global que sufre el agua al atravesar el reactor anaeróbico, puesto que no se presentan remociones apreciables de la carga contaminante en esta zona.

La acumulación de material sólido en el intermedio de la zona de grava y la zona de tratamiento en suspensión genera una franja con condiciones especiales dentro del reactor, en esta micro zona se generan principalmente procesos de digestión anaeróbica debido a las altas concentraciones de materia orgánica presentes en este punto.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor muestran claramente que en ninguna de las tres carreras se alcanzó la condición de estado estacionario, ya que a través del tiempo no se pudo identificar un comportamiento de estos parámetros relacionado con la cinética microbiana.

No fue posible realizar la modelación del reactor anaeróbico, debido a que la alta variabilidad de los factores implicados en la estabilidad de este dispositivo, genera un gran desequilibrio en los procesos, el cual se refleja en parámetros altamente variables y poco predecibles.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Se pudo comprobar que a pesar de que el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Tambo presenta problemas hidráulicos y está operando con caudales mayores a los de diseño, presenta eficiencias de remoción de materia orgánica superiores al 60%. Aunque estas remociones no cumplen las normas de vertimiento estipuladas en el decreto 1594/84 donde se exige una remoción mínima del 80% en carga para desechos líquidos domésticos, se considera que el desempeño del sistema fue aceptable teniendo en cuenta las condiciones con las que se evaluó.

A pesar de que el reactor anaeróbico dispone de tres zonas diferentes de tratamiento únicamente en dos de ellas se llevan a cabo los procesos depurativos: la zona de lecho de grava y la de tratamiento en suspensión. Se pudo establecer que la configuración del reactor favorece la acumulación de lodos en el límite de estas dos zonas, este hecho causa que en este sitio se generen condiciones que favorecen procesos de digestión anaeróbica.

Las condiciones con las que opera el reactor anaeróbico tales como la alta variación del caudal afluente y los cortos tiempos de retención celular, impiden el desarrollo total de los procesos microbiológicos y generan un alto grado de inestabilidad de los mismos. Esta situación dificulta la realización de un modelo predictivo que se ajuste razonablemente a la dinámica de crecimiento microbiano e imposibilita la determinación de un TRS óptimo.

Las condiciones específicas que se presentan en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Tambo causan que la operación del sistema no busque mejorar las eficiencias de los dispositivos, sino evitar en lo posible que el sistema colapse o

se deteriore. En este estudio se determinó que en los primeros 5 días después del lavado el caudal disminuye drásticamente, este hecho determina que el principal aspecto a tener en cuenta para mantener el sistema operando adecuadamente sea que los tiempos entre lavados sean de cinco días aproximadamente, así se aprovecharía mas eficazmente el sistema de tratamiento al tratar la mayor cantidad de caudal afluente.

## 5.2 RECOMENDACIONES

A continuación se realizan las principales recomendaciones a tener en cuenta para mejorar el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio del Tambo. En la primera parte de este capítulo se realizan algunas recomendaciones en cuanto al sistema en general de tratamiento. En la segunda parte se efectúan las recomendaciones necesarias para lograr un correcto funcionamiento tanto hidráulico como microbiológicas al interior del reactor anaeróbico.

### 5.2.1 Recomendaciones en cuanto al sistema de tratamiento en general

Rehabilitar las estructuras de control de caudal (vertederos) que actualmente se encuentran obsoletas para poder llevar a cabo un seguimiento del comportamiento hidráulico del sistema.

Llevar a cabo una revisión periódica de los tanques de tratamiento, puesto que durante el periodo de evaluación se evidenció la presencia de algunas fracturas en las estructuras, que pueden estar causando fugas de agua residual. Además es conveniente ubicar al final del sistema de tratamiento una estructura de medición de caudal para poder referenciar con ayuda de los vertederos dispuestos al inicio del sistema si existen fugas de aguas y si la cantidad de ellas es representativa.

Realizar un monitoreo periódico de la calidad del agua tratada que permita llevar acabo un registro de las eficiencia globales del sistema así como de los dispositivos implicados en la depuración de las aguas.

Llevar acabo un seguimiento adecuado del caudal de aguas residuales producido en el municipio de El Tambo para así poder prever con anticipación la implementación de nuevas unidades de tratamiento y de este modo evitar la sobrecarga de el sistema de tratamiento.

#### 5.2.2 Recomendaciones en cuanto al reactor anaeróbico de flujo ascendente

Rediseñar y proteger el sistema de distribución del flujo al interior del reactor anaeróbico para garantizar el buen funcionamiento hidráulico del dispositivo y de esta manera poder aprovechar eficientemente el sistema de tratamiento. Puesto que actualmente en este sector se esta generando la mayor cantidad de pérdida hidráulica.

Utilizar diámetros de grava entre 5 y 7 cm. en la conformación del lecho de grava así como también reconfigurar la disposición del mismo, ubicando los tamaños mas grandes en el fondo del reactor anaeróbico y los menores en la parte superficial del lecho, para así favorecer la retención adecuada del material sólido y evitar la colmatación de los lodos que se presenta en esta zona.

Retirar el material plástico del lecho del reactor anaeróbico, ya que de la manera que actualmente está dispuesto, el aporte efectivo de esta zona al tratamiento del agua es desfavorable.

Habilitar el sistema de recolección perimetral del flujo al interior del reactor anaeróbico para de este modo favorecer la uniformidad de las características del flujo al interior de este dispositivo y evitar el arrastre de material sólido por la canalización del flujo a la salida del dispositivo.

Para futuros diseños se recomienda la implementación de reactores anaeróbicos con falso fondo ya que esta estructura favorece una distribución uniforme del flujo a través del reactor y genera una zona de tratamiento que presenta altas eficiencias.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ACOLCUR. *“Memorias XI Encuentro Nacional de Técnicos y Químicos de la Industria del Cuero: Curso de Tratamiento de Efluentes de Curtiembre y Tecnología Limpia”*. Antioquia, Colombia. 2004.
2. APHA, AWWA, WEF *“Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”*. 18th Edition. Washington. 1992.
3. Asociación Colombiana de Químicos y Técnicos de la Industria del Cuero *“Revista ACOLCUR”*. Bogota, Colombia. Septiembre de 2005.
4. Barba L. *“Química Asociada con la Contaminación del Agua”*. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Departamento de Procesos Químicos y Biológicos, Sección de Saneamiento Ambiental. Cali, Colombia. 1989.
5. Calderón y Zambrano, *“Conferencias de Saneamiento Ambiental”*. Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil. Colombia. 1993.
6. Campos J. R. *“Proyecto y Operación de Filtraos Anaeróbicos para Tratamiento de Efluentes Líquidos Industriales”*. Taller Regional y Conferencia sobre Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales en América Latina. 1990.
7. Chaux G. *“Contaminación 3; Tratamiento de Aguas Residuales”*. Curso de pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad del Cauca. 2005.
8. Corporación Autónoma Regional del Cauca (C.R.C). *“Formulación Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) Volumen 2”*. Geosig Ltda.. El Tambo. 2000.

9. CYTED. Programa Iberoamericano de Cooperación Científico-tecnológica multilateral. *“Agua Potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas”*. Cap. 22 “Modelación Matemática de Plantas de Tratamiento de Lodos Activados”. Cheikh Fall. 2001.
10. Environmental Protection Agency. *“Anaerobic Sludge Digestion: Operation Manual”*. Office of Water. EPA 4301979001. United States. 1979
11. Fatma Y., Cakir and Michael K. Stenstrom. *“A Dynamic Model for Anaerobic Filter”*. UCLA, Los Angeles, California, USA. *Journal of Environmental Science and Health* . Vol. A38, No. 10, pp. 2069–2076, 2003.
12. Gavrilescu M. *“Engineering concerns and new developments in anaerobic waste-water treatment”* *Clean Techn Environ Policy* 3 (2002). Enero 2002.
13. González L. y Mendoza F. *“Arranque y Estabilización de un Reactor Uasb sin Inóculo para el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas”*. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA-UNAN. 1996.
14. Hernández, A. *“Depuración de Aguas Residuales”*. Ingeniero. Ph.D. 4ta edición. Madrid 1998.
15. Lettinga G., Vinken J. N. *“Feasibility of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Process for the Treatment of Low-Strength Wastes”*. Proceedings of the 35<sup>th</sup> Annual Industrial Waste Conference, Purdue University. Ann ASrbor Science Publisher. 1980.
16. Manios T., Stentiford E. and Millner P. *“The Removal of Chemical Oxygen Demand from Primary-Treated Domestic Wastewater in Subsurface-Flow Reed Beds Using*

- Different Substrates*". Water Environment Research. volume 75, number 4; Jul/Ago 2003.
17. Mara D, "*Tratamiento de Agua Residual Doméstica en Países en Vías de Desarrollo*". Earthscan. Londres, Reino Unido.
  18. Metcalf y Eddy. "*Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales*". España, 1981. Editorial Labor S.A.
  19. Ministerio de Agricultura "*Decreto No. 1594 del 26 de Junio de 1984: Usos del Agua y Residuos Líquidos*" Republica De Colombia. 1984.
  20. Puñal A., Mendez R. and Lema J. M.. "*Multi-fed Upflow Anaerobic Filter: Development and Features*". Journal of environmental engineering. Volumen 124. N° 12. Diciembre 1998.
  21. Ramírez, M. "*Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas*". Ingeniero Civil. Corporación Autónoma Regional del Cauca (C.R.C.). Popayán 1999.
  22. Ramírez, M. "*Informe Técnico funcionamiento PTARD para la contraloría general de la nación*". Ingeniero Civil. Corporación Autónoma Regional del Cauca (C.R.C.). Popayán, Colombia. 2003.
  23. RAS 2000. "*Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico*". Título D y E. Ministerio de desarrollo Económico. Bogota. Noviembre 2000.
  24. Rittmann B. And McCarty P. "*Biotecnología del Medio Ambiente*". Editorial Mc Graw Hill. 2001.

25. Sawyer C. "*Química Para Ingeniería Ambiental*". Cuarta Edición. Mc Graw-Hill. Santa Fe De Bogota. 2001.
26. Snoeyink y Jenkins. "*Química del Agua*". Editorial Limusa S. A. México 1987.
27. Spiegel M. "*Probabilidad y Estadística*". Mc. Gaw Hill, México D. F. 1996.
28. Stasinakis A., Mamais D., Paraskevas P. and Lekkas T. "*Evaluation of Different Methods for the Determination of Maximum Heterotrophic Growth Rates*". Water Environment Research. volume 75, number 6; Nov/Dec 2003.
29. Tchobanoglous, G. "*Tratamiento de aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*". Editorial Mc Graw Hill. 2000.

## **APÉNDICES**

## APÉNDICE 1. MÉTODOS ANALÍTICOS DESCRITOS EN EL STANDARD MÉTODO DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Método: Reflujo Cerrado, Método Colorimétrico

Rango : 0 -1500 mg O<sub>2</sub>/L Rango alto

### INTRODUCCION

La demanda química de oxígeno DQO, es la cantidad de oxígeno que sustancias reductoras como la materia orgánica, presente en agua residuales necesitan para su descomposición sin intervención de los microorganismos.

Esta prueba al igual que la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es ampliamente usada para medir el grado de contaminación del agua residual de una fuente superficial.

Una de las limitaciones que tiene la DQO es su incapacidad para diferenciar entre materia orgánica biológicamente oxidable y biológicamente inerte. La ventaja del análisis es que requiere únicamente dos horas para su realización.

### PRINCIPIO

Las muestras son introducidas en tubos de 16 x 100 mm refluidas en solución ácida fuerte con un exceso de dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>). Después de la digestión, el oxígeno consumido es medido contra curva de estándares a 600 nm construidas en un espectrofotómetro. El valor mínimo detectable en agua residual es de 5 mg O<sub>2</sub>/l.

### INTERFERENCIAS

El dicromato oxida cuantitativamente los cloruros, por lo tanto cuando ellos están presentes en gran cantidad se los interpreta como materia orgánica químicamente oxidable, dando altos valores de DQO. Esta interferencia se evita agregando al balón de digestión HgSO<sub>4</sub>.

Materia orgánica proveniente de la atmósfera o del recipiente de vidrio donde se ha muestreado puede introducir error y aumentar el valor de la DQO.

La presencia de nitritos a concentraciones mayores a 2 mg/L ejerce una DQO de 1:1 mg O<sub>2</sub> /mg NO<sub>2</sub>. Para eliminar esta interferencia se debe adicionar 10 mg de ácido sulfámico/MgNO<sub>2</sub>.

La adición del reactivo de plata debe hacerse lentamente y enfriando la muestra, para evitar la pérdida de material volátil por aumento de la temperatura de la muestra.

Los compuestos orgánicos volátiles son completamente oxidados en el sistema cerrado debido al mayor contacto con el oxidante.

Antes de cada medición inspeccionar el enrase de los tubos por rompimiento en la línea de TFE (tetrafluoroetileno).

Utilizar el tamaño de celda adecuado para un mayor grado de sensibilidad. Utilizar tubos de 25x150-mm. para muestras con bajo DQO; ya que en estos puede ser tratado un mayor volumen de muestra.

## MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Las muestras deben recogerse preferentemente en recipientes de vidrio, si esto no es posible pueden usarse recipientes plásticos estrictamente libres de materiales orgánicos contaminantes.

Las aguas con materiales sedimentables deben ser homogenizadas, para estar seguros de tomar una muestra representativa.

Las muestras pueden ser preservadas, agregándoles 2 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado por litro de muestra. Si se conoce que la muestra tiene materia orgánica biológicamente activa, el

análisis debe hacerse inmediatamente; aunque preservada puede analizarse posteriormente, máximo hasta 7 días.

#### EQUIPOS Y MATERIALES

Recipiente de digestión: Preferiblemente utilizar celdas (tubos) de borosilicatos, 16X100-mm, 20X150 mm, ó 25X150 mm, con la tuerca arriba de la línea de TFE. Alternativamente utilizar ampollitas de borosilicato, 10ml capacidad, 19 a 20mm de diámetro.

Espectrofotómetro para utilizar a 600nm. Con adaptador para ampollitas o tubos de 16, 20 o 25-mm.

#### REACTIVOS

Agua destilada: Debe estar libre de materiales que puedan ser oxidados por el dicromato en las condiciones que se efectúa la prueba.

Solución de digestión: Disolver 10.216 g de  $K_2Cr_2O_7$  calidad estándar primario, previamente secados a  $103^\circ C$  durante 2 horas en 500ml de agua destilada, 167ml. de  $H_2SO_4$ , y 33.3g. de  $HgSO_4$ . Disolver en agua fría ó temperatura ambiente y diluir a 1 litro en un balón aforado.

Reactivo de ácido sulfúrico - sulfato de plata: Disolver 5.26 gr. de sulfato de plata en 500 ml de ácido Sulfúrico concentrado( $H_2SO_4$ ). Agitar continuamente para disolver o prepararlo mínimo 2 días antes de usarlo. Manipular con mucho cuidado esta solución, pues el  $H_2SO_4$  es altamente corrosivo.

Ácido Sulfámico: Se necesita solamente cuando están presentes los nitritos en significancia, adicionar 10 mg de ácido sulfámico por cada mg de  $NO_2^-$ -N presente en el volumen de muestra usado; adicionar la misma cantidad de ácido sulfámico al vaso de reflujo que contiene el blanco.

*Control de los Reactivos:* La técnica y la calidad de los reactivos deben ser evaluados con una solución estándar de calidad analítica: ftalato ácido de potasio, estándar primario.

Preparar una solución de 1000 mg/L de ftalato ácido de potasio, disolviendo en agua destilada 850.2 mg. de ftalato ácido de potasio y completar a un litro en un balón aforado. Determinar la DQO igual que para una muestra. La DQO teórica del ftalato ácido de potasio es de 1.176 mg O<sub>2</sub>/mg y esta solución tiene un COD teórico de 1000 µg. O<sub>2</sub> /mL. Esta es estable hasta 3 meses en refrigeración en ausencia de crecimiento de material biológico.

#### PROCEDIMIENTO

Tratamiento de muestras: Medir el volumen propio de la muestra y reactivos dentro del tubo como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Cantidad de reactivos y muestra para diferentes tubos de digestión.

Recipiente de Digestión Medida del tubo	Muestra (ml)	Solución de digestión (ml)	Reactivo de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ml)	Volumen total final (ml)
16 x 100mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150mm.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150mm	10.0	6.0	14.0	30.0
ampules estandar 10-ml	2.5	1.5	3.5	7.5

Introducir con pipeta volumétrica la muestra en el tubo previamente lavado con ácido Sulfúrico 20% y adicionar la solución de digestión suavemente, adicionar cuidadosamente sobre las paredes del tubo el reactivo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> –Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; así una capa de ácido es formada bajo la muestra-capa solución digestora antes de la digestión de la muestra. Apretar cada tubo e inviertalo varias veces para mezcla completa. *Precaución:* Hay que prevenir posibles

reacciones explosivas para esto mezclar totalmente el contenido de los tubos antes de aplicar calor. Tenga el rostro protegido al mezclar el contenido del recipiente.

Colocar los tubos en el bloque de digestión calentado a 150°C y refluir por 2 horas. Enfríar a temperatura ambiente y colocarlos en un recipiente para tubos (Beaker de 500 ml).

Medición de la Reducción del Dicromato: invierta las muestras, el blanco, y los estándares varias veces y permitir por algún tiempo para que todos los sólidos sedimenten antes de la medición de la absorbancia. Desaloje los sólidos por las paredes ; Lea la absorbancia y comparar contra la curva de calibración estándar

luz que posee el espectrofotómetro a 600nm. ; compare con la curva de calibración. Utilizar los tubos que son ópticamente de gran sensibilidad, descartar tubos rayados o manchados.

Preparación de la Curva de Calibración: Preparar al menos nueve estándares de solución ftalato ácido de potasio con COD en el rango de 50 a 900 mg O<sub>2</sub>/L. A partir de la solución patrón de 1000 mg/L se preparan los patrones, para un volumen final de 100 ml de acuerdo a la Tabla 7.

Usar los mismos volúmenes reactivos, medidas, y el mismo procedimiento de digestión como se procedió para las muestras. Prepare una curva de calibración para cada nuevo lote de tubos cuando los estándares preparados difieran por valor mayor o igual a 5% de la curva de calibración.

Tabla 7. Preparación de patrones de ftalato ácido de Potasio en el rango 50-700 mg/L COD

Volumen de Solución patrón 1000 mg/L COD (ml)	Concentración de patrones mg/L ftalato ácido de potasio
0.0	0.0
5.0	50
10.0	100
20.0	200
30.0	300
40.0	400
50.0	500
60.0	600
70.0	700
90.0	900

#### CALCULOS

Aplicar la ecuación lineal de la curva de calibración standard para determinar la concentración de la muestra a partir de su absorbancia medida a 600nm en el espectrofotómetro

#### DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO

Método: Volumétrico

Rango: 0 a 10.000 mg./l

#### INTRODUCCION

La demanda bioquímica de oxígeno DBO, es una prueba empírica en la cual el procedimiento de laboratorio es usado para estimar los requerimientos de oxígeno de los efluentes de aguas residuales o poluídas. Los microorganismos utilizan el oxígeno

atmosférico disuelto en el agua para realizar la oxidación bioquímica del agua poluída la cual es la fuente de carbón.

La DBO es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica degradable presente en una muestra. La prueba mide el oxígeno utilizado durante un periodo específico de incubación para la degradación bioquímica de la materia orgánica y el oxígeno usado para oxidar material inorgánico como sulfuros y el ión ferroso. También puede medir el oxígeno usado para oxidar formas reducidas de nitrógeno lo cual se evita con un inhibidor.

Aunque el método que aquí se presenta es a cinco días. existen muchas variaciones para medir la demanda de oxígeno, de acuerdo a los requerimientos específicos. Una limitante de este análisis es que no mide la materia orgánica biodegradable presente en la muestra. La oxidación completa de la materia orgánica no biodegradable puede seguir largos periodos de incubación, por lo cual un periodo de cinco días ha sido aceptado como estándar.

#### PRINCIPIO

El método consiste en llenar completamente un frasco de vidrio de volumen definido (generalmente 300ml) con una muestra de agua previamente tratada con pH entre 6.5 y 7.5 incubada a 20°C durante cinco días. El oxígeno disuelto es medido antes y después de la incubación. La DBO5 es obtenida por diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y final. El valor mínimo a detectar en agua potable es de 2mg/L.

#### INTERFERENCIAS

Muestras con pH ácido ó básico. Para el análisis debe estar entre 6.5 y 7.5

La oxidación de formas reducidas de nitrógeno.

La presencia de sustancias tóxicas como metales pesados y plaguicidas.

#### MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Las muestras para análisis de DBO5 pueden degradarse significativamente durante el periodo entre la recolección y el análisis lo cual baja el contenido del parámetro. Para

minimizar este efecto, debe refrigerarse la muestra a 4 °C. Si el análisis es realizado dentro de las dos horas siguientes al muestreo, no es necesario el enfriamiento. El tiempo máximo de almacenamiento de la muestra es de 6 horas, sin embargo puede admitirse hasta 24 horas.

## EQUIPOS Y MATERIALES

Incubadora a 20 °C.

Horno de 0 a 150 °C.

Balones aforados de 1 litro.

Pipetas volumetricas de 1,2,5,10,25 y 50 ml.

Botellas Winkler

Pipetas graduadas de 1,2,3,4,5,10,20 ml.

## REACTIVOS

Agua destilada o desionizada.

Solución buffer de fosfatos: disolver en 500ml de agua 8.5 g de fosfato diácido de potasio,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 21.75 g de fosfato ácido de potasio,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 33.4g de fosfato de sodio heptahidratado,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  y 1.7g de cloruro de amonio,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Completar a un litro con agua destilada en balon aforado.

Solución de sulfato de magnesio: Disolver en agua destilada 22.5 g de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y completar a un litro en un balón aforado.

Solución de cloruro de calcio: Disolver en agua destilada 27.5g de  $\text{CaCl}_2$  anhidro y llevar a un litro en balón aforado con agua destilada.

Solución de cloruro férrico: Disolver 0.25 g de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada y llevar a un litro en balón aforado. Cualquiera de las soluciones anteriores, deben ser desechadas cuando se observe un crecimiento biológico.

Solución de ácido sulfúrico aproximadamente 1N. :Medir 28ml de ácido sulfúrico concentrado y diluir con agua destilada en balón aforado de un litro.

Solución de hidroxido de sodio aproximadamente 1 N. : Disolver en agua destilada 40 g de NaOH, enfriar y diluir hasta un litro.

Solución de sulfito de sodio 0.025N.: Disolver 1.575g de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  en un litro de agua destilada. Esta solución debe prepararse diariamente.

Solución de sulfato manganoso : Disolver 480g de  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , ó 400g  $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ó 364g de  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  en agua destilada y llevar en balón aforado a un litro. Esta solución debe ser incolora al agregar una solución ácida de KI.

Solución alcalí yoduro - nitruro : Puede prepararse de la siguiente manera:

Disolver 500g de NaOH (ó 700g de KOH) y 135g de NaI (ó 150 g de KI) en agua destilada y llevar a un litro. Disolver 10g de azida de sodio ( $\text{NaN}_3$ ) en 50ml de agua destilada y añadir a la solución anterior.

Disolver 400 g de NaOH en 500ml de agua destilada hervida y fría. Dejar disolver 900g de NaI. Disolver 10g de azida de sodio en 50ml de agua destilada y mezclar las 2 soluciones.

Acido sulfúrico concentrado:

Solución de almidón: Disolver en 80ml de agua destilada hervida 0.5g de almidón y agitar con una varilla. Completar a 100ml. Dejar sedimentar y utilizar el sobrenadante, preservar con 0.2 g de ácido salicílico.

Solución de tiosulfato de sodio 0.025 N: Disolver 6.205 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada recién hervida y fría. Llevar a un litro. Preservar esta solución con 5 ml de cloroformo ó 0.4 g de NaOH.

Solución estándar de dicromato de potasio 0.025 N: Disolver 1.226 g de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  previamente secados durante dos horas a  $103^\circ\text{C}$ . Disolver en 100 mL de agua y enrazar a un litro.

Estandarización de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ : Disolver 2 g de yoduro de potasio libre de yodato, en un erlenmeyer de 500 mL. Agregar 100 mL de agua destilada y adicionar 10 mL de ácido sulfúrico 1:9. Medir volumétricamente 20 mL de dicromato de potasio y añadirlos a la mezcla anterior. Colocar la solución por 5 minutos en la oscuridad. Agregar 200 ml de agua y titular con la solución de tiosulfato de sodio hasta que la solución se torne amarilla clara. Añadir 1 mL de solución de almidón y continuar titulado hasta la desaparición del color azul. La normalidad de la solución se calcula de la siguiente forma:

$$N_2 = (V_1 \times N_1) / V_2$$

$V_1$ : mL de solución de dicromato

$N_1$ : Normalidad del dicromato

$V_2$ : Volumen del tiosulfato gastado en la titulación

$N_2$ : Normalidad a determinar del tiosulfato

Semillas: El objetivo de la semilla es introducir en la muestra una población de bacterias que sea capaz de oxidar la materia orgánica presente en la muestra.

Cuando la muestra posee estos microorganismos como es el caso de las aguas domésticas y superficiales, así como efluentes no clorados, no es necesario añadir una semilla o inóculo. Siendo necesario en aguas residuales sometidas a procesos de cloración o que tienen pH o temperatura altas.

Hay dos clases de semillas: naturales y aclimatadas.

Semillas naturales: Contienen microorganismos activos que se encuentran presentes en cualquier corriente natural o agua residual doméstica. La semilla más usada es la de origen doméstico, sedimentadas y almacenadas a 20°C durante 24-36 horas.

Semillas aclimatadas: Se pueden obtener en el laboratorio conteniendo una población específica de microorganismos que utilizan material orgánico para procesos vitales. La selección de la semilla depende del tipo de agua residual que se vaya a analizar.

Control de la glucosa-ácido glutámico: Debido a que la prueba de la DBO es un bioensayo y los resultados pueden ser grandemente influenciados por la presencia de tóxicos o por el uso de un material de inóculo pobre, obteniéndose bajos resultados, se recomienda efectuar periódicamente el control de la calidad del agua de dilución, la efectividad del inóculo y la técnica analítica, haciendo mediciones de la DBO sobre compuestos orgánicos puros. Se ha probado que la mezcla de glucosa y ácido glutámico como solución patrón de control, presenta una tasa de oxidación estable.

## PROCEDIMIENTO

- a) Preparación del agua de dilución: Tomar suficiente agua destilada y saturar con oxígeno utilizando una bomba de vacío. La temperatura del agua debe estar a 20°C. Luego de la saturación, agregar a la botella por cada litro de agua a preparar, un mL de soluciones  $MgSO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $FeCl_3$ , y buffer la cual se agrega un momento antes de ser usada. Así mismo el inóculo se agrega al agua de dilución, 1 a 2 mL por litro, el mismo día de su uso.
  
- b) Pretratamiento de la muestra: Muestras ácidas o alcalinas, deben ser neutralizadas utilizando de  $NaOH$  1N o  $H_2SO_4$  1N respectivamente, a pH 7.

Muestras que presenten cloro residual bajo, deben ser reposadas hasta por 2 horas para que se evapore el  $\text{Cl}_2$ . Si el contenido de cloro es alto, se puede neutralizar con tiosulfato de sodio, tomando 100 ml de muestra a la que se agrega 10 ml de ácido acético 1:1 ó ácido sulfúrico 1:50 y 10 ml de solución de yoduro de potasio al 10%. Titular con solución de tiosulfato de sodio 0.025 n, utilizando almidón como indicador.

Muestras que contienen sustancias tóxicas como metales pesados o plaguicidas, deben ser tratadas específicamente.

Muestras sobresaturadas de oxígeno: Son las que contienen niveles de  $\text{O}_2$  por encima de 9 mg/L, características de zonas de gran actividad de algas. En estos casos, el oxígeno debe ser llevado a saturación, agitando la muestra fuertemente o aireando artificialmente.

c) Técnica de dilución: Para obtener un residual de oxígeno apropiado deben hacerse varias diluciones de la muestra. De acuerdo con la muestra de pueden hacer las siguientes diluciones:

Tabla 8. Diluciones recomendadas para tipos de aguas mas comunes.

Tipo de Agua	% De Dilución
Aguas residuales industriales	0.1 – 1
Aguas crudas	1 – 5
Aguas residuales domésticas	1 – 5
Efluentes de plantas de oxidación	5 – 25
Ríos poluídos	25 - 100

La técnica de dilución más apropiada es colocando dentro de la botella de incubación un volumen de muestra determinado utilizando pipeta volumétrica y completando con el agua de dilución inoculada el volumen de la botella, cuidando de que no queden burbujas de aire. El volumen de muestra no debe ser muy pequeño. Es preferible hacer diluciones previas utilizando balón aforado.

d) Determinación del oxígeno disuelto(O.D.): Si la muestra representa el 1% o más de la dilución más baja de DBO, se le determina el O.D. a la muestra sin diluir. No se determina para aguas residuales domésticas o industriales, ya que estas muestras contienen O.D. cercano a cero.

e) Incubación: incubar muestras diluidas y el blanco, que es agua de dilución inoculada, por cinco días en la oscuridad y a 20°C. Después de ese tiempo se debe determinar el O.D. utilizando el método yodométrico con la modificación de azida o el método del electrodo de membrana. Las mejores diluciones son las que contienen un residual de O.D. mínimo de 1 mg/L y presentan un consumo de oxígeno mínimo de 2 mg/L.

f) Determinación del O.D. por el método yodométrico con modificación de azida: A la muestra colocada en la botella Winkler se añade 1 ml de solución de sulfato maganoso, seguida de 1 ml de solución de alcaliyoduro-nitruro introduciendo la pipeta dentro del líquido. Tapar evitando las burbujas y mezclar bien, dejar asentar el precipitado y mezclar otra vez. Se deja sedimentar de nuevo y se agrega 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado por el cuello de la botella. Tapar y agitar de nuevo hasta la disolución del precipitado.

Para titular medir 200 ml de la muestra original o sea 203 ml de la mezcla final. Los 3 ml son correctivos por pérdida de muestra, cuando se agregan los reactivo. Titular con tiosulfato de sodio 0.025N hasta color amarillo pálido y añadir 1 ml de solución de almidón. Continuar titulado hasta desaparición del color azul formado.

g) Corrección por inóculo: Si el agua de dilución es inoculada como es el caso de las aguas residuales industriales, determinar la reducción de oxígeno de la semilla, preparando varias diluciones y seleccionando la que a los cinco días presente una disminución de oxígeno entre 40 y 70%. Este valor se utiliza para calcular la corrección por semilla. No debe usarse el blanco para esta corrección porque se producen resultados erróneos.

h) Control del agua de dilución: Llenar 2 botellas de DBO con agua de dilución sin inocular y tapar una de ellas para incubación a 20 °C. Determinar el OD de la otra botella y a los cinco días el de la primera. La diferencia entre el OD inicial y final no debe ser mayor de 0.1 mg/L y la máxima diferencia de 0.2 mg/L.

i) Control de la glucosa-Ácido glutámico: Preparar una mezcla de 150 mg/L de glucosa y 150 mg/L de ácido glutámico como solución patrón y tomar una muestra diluida al 2% para determinar la DBO<sub>5</sub> a 20°C, como se describe arriba. Si la DBO<sub>5</sub> está fuera del rango de  $200 \pm 37$ , se debe rechazar cualquier determinación de la DBO<sub>5</sub> hecha con el inóculo.

#### CALCULOS

Muestras sin inóculo:

$$\text{mg/L de DBO}_5 = D_1 - D_2 / P \text{ (A)}$$

P: Volúmen de muestra en ml,  $V_1$ /Volumen total (300 ml)

Muestras con inóculo:

$$\text{mg/L de DBO}_5 = (D_1 - D_2) - (B_1 - B_2) * f / P$$

D<sub>1</sub>: Oxígeno D. de la muestra diluida inicialmente.

D<sub>2</sub>: Oxígeno D. de la muestra diluida después de cinco días de incubación.

B<sub>1</sub>: Oxígeno disuelto del control de la semilla antes de la incubación.

B<sub>2</sub>: Oxígeno disuelto del control de la semilla después de la incubación.

P: Fracción decimal de muestra usada.

f: Relación de semilla en la muestra a la semilla en el control.

f: % de semilla en D<sub>1</sub>/% de semilla en B<sub>1</sub>.

Corrección por semilla=(B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>)f.

Determinación de la diluciones necesarias: Dado que la DBO nunca excede el valor de la DQO, se puede asumir que la DBO es un porcentaje de la DQO cuyo valor depende de la naturaleza de la muestra a analizar, con valores entre 20 y 80%. Así por ejemplo, para una muestra de agua superficial con DQO de 30 mg/L, los volúmenes a tomar serían:

$$\text{DBO} = 20\% \text{ DQO}$$

$$\text{DBO} = 40\% \text{ DQO}$$

$$\text{DBO} = 50\% \text{ DQO}$$

$$\text{DBO} = 60\% \text{ DQO}$$

$$\text{DBO} = 80\% \text{ DQO}$$

Si se asume:

$$D_1 = 9 \text{ mg/L (Oxígeno de saturación del agua a } 20^\circ\text{C)}$$

$$D_2 = 3 \text{ mg/L (nivel mínimo de consumo de Oxígeno)}$$

Y sustituyendo en (A):

$$\text{mg/L DBO}_5 = D_1 - D_2/P$$

$$\text{mg/L DBO}_5 = \frac{D_1 - D_2}{V_1} * 300 \text{ ml}$$

$$V_1 = 1800/\text{DQO} * (20-80\%)$$

$$V_1: 1800/(0.2)*30 = 300\text{ml}$$

Así mismo se determinan los restantes volúmenes para los otros rangos de porcentaje.

## OXIGENO DISUELTO

Método: Yodométrico (modificación con azida de sodio)

Rango : 0 a 4 mg/L

## INTRODUCCION

EL Oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno del aire, siendo producido por las plantas acuáticas durante el proceso de fotosíntesis y de actividad microbologica de los organismos presentes en ella.

La Solubilidad del oxígeno en el agua depende de la presión parcial del oxígeno del aire, de la temperatura del agua y del contenido mineral de ésta.

La concentración de oxígeno disuelto es importante para la evaluación de las aguas superficiales y en procesos de tratamiento de aguas residuales. Su contenido se asocia con la tendencia corrosiva del agua, la actividad fotosintética y contaminación. Su determinación es usada en el análisis de la demanda bioquímica de oxigeno (DBO) y es importante de analizar en agua cruda.

El oxigeno disuelto puede ser analizado por el método de membrana utilizando un medidor de oxigeno, o por titulación con el método Yodométrico el cual se a continuación.

## PRINCIPIO

La prueba Yodometrica es el método de titulación más preciso y confiable para el análisis de oxigeno disuelto, se basa en la adición de solución de magnesio divalente seguido por un álcali fuerte a la muestra en una botella Winkler con tapa esmerilada. El oxigeno disuelto oxida rápidamente una cantidad equivalente de hidróxido de manganeso divalente precipitando a hidróxidos de estado de valencia altos. En la presencia iones de yoduro en una solución ácida, el manganeso oxidado reverte al estado divalente con la liberación de yoduro, equivalente al contenido original de oxigeno disuelto. El yoduro es entonces titulado con una solución estándar de tiosulfato. El punto final de la titulación puede ser detectado visiblemente, con una solución indicadora de almidón. Usar el método de modificación de azida para la mayoría de aguas residuales, efluentes, y muestras de causes

naturales, si las muestras contienen más de 50  $\mu\text{g}$  de  $\text{NO}_2^-$  -N/L y no más de 1 mg de hierro ferroso/L.

### INTERFERENCIAS

Las sustancias oxidantes inducen a resultados por exceso, y las sustancias reductoras a resultados por defecto. La presencia de sulfitos, tiosulfatos, cromatos y cloro libre hacen que no se pueda usar este método.

El hierro ferroso en concentraciones superiores a 1mg/L induce a resultados por defecto y el hierro férrico a resultados por exceso. Sin embargo en presencia de hierro férrico con contenidos inferiores a 100 mg/L, el método puede aplicarse añadiendo 1 mL de solución de fluoruro potásico antes de añadir el ácido sulfúrico concentrado.

### MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Tomar las muestras de aguas superficiales en botellas Winklers con tapa y cuello esmerilado de 300 mL de capacidad. Evitar la entrada o disolución de oxígeno atmosférico introduciendo completamente la botella en el sitio de muestreo; sacarla cuando deje de burbujear. En muestreos de una línea bajo presión, se une un tubo de vidrio a la fuente u punto de muestreo para introducirlo en la botella Winkler hasta el fondo. Dejar que la botella rebose su volumen dos o tres veces, retirar el tubo y tapar para que no entren burbujas de aire. Inmediatamente después de tomada la muestra, se inicia el procedimiento de análisis.

### EQUIPOS Y MATERIALES

Microbureta automática o manual de 5 mL.

Agitador magnético.

Frascos Winkler con tapa esmerilada de 300 mL.

Pipetas graduadas de 1.0, 2.0, 5.0, y 10.0 mL.

Balones aforados de 200, 500 mL y un litro.

Erlenmeyer de 250 mL.

## SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Método: Gravimétrico

Rango: 0.1 – 1.000 mg/L

### INTRODUCCION

Los elementos susceptibles de ser encontrados como sólidos en suspensión pueden ser de origen mineral, vegetal o animal, como: Carbonatos alcalinotérreos (Ca, Mg) y carbonatos de hierro hidratados, así como materias silíceas o arcillosas, originadas por el arrastre del agua.

Sustancias vegetales constituidas por elementos mezclados con el agua o por organismos que viven en ella como restos de semilla y de plantas así como desechos domésticos e industriales u organismos vivos como hongos, algas, etc.

Sustancias animales como fibras musculares, células epiteliales, fragmentos de insectos y huevos de parásitos.

### PRINCIPIO

Se filtra un volumen de agua seleccionado de acuerdo a la turbiedad a través de un filtro de fibra de vidrio de tamaño de poro de  $1.2 \mu\text{m}$  y el peso del material retenido por el filtro se determina por diferencia de peso.

### INTERFERENCIA

Restos de hojas, palos, hierbas y partículas flotantes o aglomeradas de materiales no homogéneos que deben ser excluidos de la muestra.

### MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Tomar la muestra en envases de plástico o vidrio Refrigerar las muestras a 4°C para minimizar la descomposición de los sólidos por actividad bacteriana, y realizar el análisis lo mas pronto posible. El tiempo máximo de almacenamiento de la muestra es de 7 días.

#### EQUIPOS Y MATERIALES

Equipo de filtración al vacío

Horno de 0 - 150 °C

Balanza analítica

Papel filtro de fibra de vidrio Whatman 934-AH o equivalente

Desecador

Probeta del 00 ml

Frasco lavador

#### PROCEDIMIENTO

Colocar el papel filtro de fibra de vidrio en el horno a 103 - 105 °C durante una hora. Sacar el papel filtro y dejarlo unos minutos al aire. Pasarlo al desecador. Pesar el papel filtro. (A) Armar el equipo de succión con el papel filtro colocando la parte corrugada hacia arriba y prender la bomba. Medir un volumen apropiado de muestra que deje un residuo entre 100 y 250 mg, para evitar obstrucción del filtro. Se recomienda tomar el volumen de muestra, teniendo en cuenta la turbiedad de la muestra como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Volumen de muestra analizar para sólidos suspendidos de acuerdo a la turbiedad.

Rango de Turbiedad UNT	Rango de volumen de muestra analizar de sólidos suspendidos (ml)
0 - 20	< 2000
20.50	750 - 300
50 - 100	250 - 100
> 100	20 - 100

La exactitud en el análisis de sólidos suspendidos depende de muchos factores como es el tiempo de secado que debe ser preciso, homogenización de la muestra, que debe hacerse agitándola continuamente durante la filtración para que los sólidos permanezcan niformente distribuidas.

Pasar la muestra a traves del filtro teniendo en cuenta el volumen de filtracion (C), secar el filtro de fibra de vidrio en el horno a 103 - 105 'C durante una hora. Sacar el papel filtro y dejarlo unos minutos al aire. Pasarlo al desecador. Pesar el papel filtro. ( B )

### CALCULOS

$$\text{mg/l de sólidos suspendidos totales} = \frac{A - B}{C} * 1000$$

A = Peso del filtro seo (mg)

B = Peso del filtro seco con la muestra (mg)

C = Volumen de muestra filtrada (mL).

### SÓLIDOS TOTALES

Método: Gravimétrico

Rango: 10 - 1 000 mg/L

### INTRODUCCION

Los sólidos totales están compuestos por materia orgánica como algas y pequeños micro organismos vivos y muertos, disueltos o en suspensión en el agua, materia inorgánica como arcillas, humus y otros tipos de sedimentos. Los iones incrustados en pequeñas partículas de suelo como hierro, manganeso y otros metales también hacen parte de los sólidos aquí analizados.

### PRINCIPIO

Una muestra bien mezclada es evaporada en una cápsula tarada y secada a peso constante en un horno a 103-105°C. El incremento de peso sobre la cápsula vacía representa el residuo total o sólidos totales.

#### INTERFERENCIAS

Partículas grandes como palos y hojas y partículas largas flotantes o aglomeradas. Todos estos materiales deben ser excluidos de la muestra.

#### MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Tomar la muestra en envase plástico o de vidrio y realizar el análisis lo más pronto posible. En otras circunstancias, se debe refrigerar hasta por siete días a 4°C.

#### EQUIPOS Y MATERIALES

Baño de María

Horno de 0 – 150°C

Balanza analítica

Desecador

Probeta graduada de 100 mL

Cápsula de porcelana de 100 ml

Pinzas para cápsula

#### PROCEDIMIENTO

Secar una cápsula de porcelana de 150-200 ml de capacidad a 103-105°C, 1 hora en el horno, luego desecar 10 minutos y pesar. Si se van a determinar sólidos fijos totales se debe secar la muestra a 550°C en una mufla durante media hora, luego llevar al desecador 10 minutos y pesar.

Vertir en la cápsula un volumen de la muestra bien mezclada que deje un residuo entre 100 y 250 mg. Colocar en baño de María hasta que se evapore toda el agua. Pasar a un horno a

103-105°C, 1 hora. Dejar reposar la cápsula y pasarla a un desecador 10 minutos. Pesar la cápsula.

#### CALCULOS

$$\text{Mg/l de sólidos totales} = \frac{A - B}{C} * 1000$$

A = Peso de la cápsula más sólidos (mg)

B = Peso de la cápsula vacía (mg)

C = Volumen de muestra evaporada (mL).

#### SÓLIDOS VOLATILES

Método: Gravimétrico

Rango: 10 - 1000 mg/L

#### INTRODUCCION

Los sólidos volátiles corresponden en su gran mayoría a material orgánico animal o vegetal presente en la muestra y puede determinarse por calcinación de los sólidos totales a  $550 \pm 50^\circ\text{C}$ . La determinación es útil en el control de plantas de tratamiento de agua.

La pérdida de peso por calcinación corresponde aproximadamente al contenido de sustancias orgánicas y el residuo calcinado al contenido de sustancias minerales. Sin embargo, si a  $110^\circ\text{C}$  se produce una descomposición parcial de la materia, orgánica, contrariamente, puede tener lugar una retención de agua de cristalización o de origen higroscópico (sílice y alúmina).

Esta técnica es una medida indirecta de carbono orgánico ya que puede reflejar pérdida del agua de cristalización, pérdida de materia orgánica antes de la combustión y oxidación

incompleta de compuestos orgánicos complejos, pero también, descomposición de sales minerales como carbonatos, cloruros, nitratos y sales amoniacales durante la calcinación.

#### PRINCIPIO

Se basa en la calcinación de los sólidos totales presentes en una muestra a  $550 \pm 50^\circ\text{C}$  durante 1 hora. La diferencia entre el peso de los sólidos totales y el peso del residuo después de la calcinación da como resultado los sólidos volátiles.

#### MUESTREO Y ALMACENAMIENTO

Tomar las muestras en envases de vidrio o plástico y realizar el análisis lo más pronto posible. El tiempo máximo de almacenamiento de la muestra es de 7 días, refrigerada a  $4^\circ\text{C}$ .

#### EQUIPOS Y MATERIALES

Baño maría

Horno de  $0 - 150^\circ\text{C}$

Mufla a  $600^\circ\text{C}$

Balanza analítica

Desecador

Cápsulas de porcelana de 100 ml

Probeta de 100 ml

Pinzas para mufla

#### PROCEDIMIENTO

Se introduce la cápsula con el residuo total en una mufla a  $550^\circ\text{C}$ , 1 hora. Se deja enfriar la cápsula al aire, unos minutos y se pasa al desecador 10 minutos. Pesar la cápsula.

#### CALCULOS

mg/L de sólidos volátiles =  $\frac{A - B}{C} * 1000$

C

A = Peso en mg de los sólidos totales

B = Peso en mg de los sólidos fijos

C = Volumen de muestra (ml).

APÉNDICE 2. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS OBTENIDOS EN LA  
EVALUACIÓN DE LA PTARD DEL MUNICIPIO DE EL TAMBO

Tabla 10. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 1.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO1									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOl (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.59	-	24.50	342.50	27.50	315.00	-	77.35	-	77.35
	23-Mar-05	2	-	73.00	-	242.50	76.00	166.50	12.78	102.56	37.81	64.75
	26-Mar-05	5	6.86	112.00	94.00	250.50	68.00	182.50	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.78	255.00	365.57	477.05	191.80	285.25	39.82	203.38	156.27	47.11
	30-Mar-05	9	-	339.00	192.00	-	-	-	24.84	47.11	-	47.11
	3-Abr-05	13	-	102.00	60.00	322.00	133.00	189.00	42.81	157.02	107.40	49.63
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	129.00	149.00	386.00	148.00	238.00	68.80	200.86	163.84	37.02
	8-Abr-05	4	-	56.00	21.50	231.50	64.50	167.00	44.84	87.44	47.89	39.55
	10-Abr-05	6	6.38	73.00	40.00	258.00	79.50	178.50	42.04	115.16	63.01	52.15
	11-Abr-05	7	6.61	80.00	61.33	290.00	90.40	199.60	42.04	97.52	63.01	34.50
	13-Abr-05	9	6.58	54.00	91.20	331.20	112.80	218.40	36.07	188.26	171.40	16.86
	17-Abr-05	13	-	-	-	474.00	163.20	310.80	87.69	362.17	304.99	57.19
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.64	151.00	-	426.00	188.40	237.60	-	319.33	267.18	52.15
	23-Abr-05	5	6.78	192.00	-	427.33	174.67	252.67	39.82	367.22	274.74	92.48
	27-Abr-05	9	6.63	75.00	-	245.33	59.00	186.33	28.44	190.78	146.19	44.59
	29-Abr-05	11	6.36	134.00	-	291.33	73.33	218.00	51.19	193.30	141.15	52.15
	4-May-05	16	6.51	101.00	39.00	268.00	86.50	181.50	37.19	72.31	30.25	42.07
	6-May-05	18	6.45	84.00	22.00	280.00	90.40	189.60	-	59.71	12.60	47.11
	8-May-05	20	6.44	85.00	18.67	350.00	106.00	244.00	-	137.85	85.70	52.15
	10-May-05	22	6.40	25.00	24.00	319.20	80.00	239.20	41.57	72.31	20.16	52.15
	13-May-05	25	-	-	15.43	253.20	65.20	188.00	-	77.35	5.04	72.31
16-May-05	28	6.63	53.00	18.00	198.50	60.00	138.50	15.80	95.00	17.64	77.35	

Tabla 11. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 2.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO2									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQO1 (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.57	-	105.33	466.67	143.33	323.33	-	89.96	25.21	64.75
	23-Mar-05	2	-	2635.00	-	636.67	216.67	420.00	183.24	795.71	799.01	-
	26-Mar-05	5	6.87	33.00	46.00	233.00	89.00	144.00	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.79	409.00	-	650.00	240.00	410.00	99.54	546.68	484.45	62.23
	30-Mar-05	9	-	318.00	304.00	580.00	336.00	244.00	64.97	345.04	295.41	49.63
	3-Abr-05	13	-	107.00	-	274.50	69.00	205.50	68.80	117.68	47.89	69.79
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	87.00	81.00	268.00	82.00	186.00	48.92	79.87	20.16	59.71
	8-Abr-05	4	-	59.00	12.50	256.50	104.50	152.00	26.75	69.79	20.16	49.63
	10-Abr-05	6	6.87	83.00	54.00	296.00	112.50	183.50	-	97.52	42.85	54.67
	11-Abr-05	7	6.62	108.00	112.82	287.20	94.40	192.80	55.04	142.89	83.18	59.71
	13-Abr-05	9	6.61	79.00	164.80	391.20	129.60	261.60	51.12	221.02	199.12	21.90
	17-Abr-05	13	-	-	120.80	320.00	122.80	197.20	52.14	190.78	68.05	122.72
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.64	101.00	-	-	-	-	-	195.82	118.47	77.35
	23-Abr-05	5	6.78	145.00	-	391.33	130.67	260.67	41.08	233.63	168.88	64.75
	27-Abr-05	9	6.61	84.00	-	247.00	72.33	174.67	-	112.64	50.41	62.23
	29-Abr-05	11	6.41	74.00	-	226.00	55.50	170.50	37.92	82.39	22.68	59.71
	4-May-05	16	6.50	71.00	23.14	149.60	36.40	113.20	37.92	62.23	25.21	37.02
	6-May-05	18	6.50	153.00	93.33	195.20	80.40	114.80	-	147.93	95.78	52.15
	8-May-05	20	6.52	68.00	5.26	363.50	98.00	265.50	-	100.04	5.04	95.00
	10-May-05	22	6.43	24.00	23.43	292.00	72.80	219.20	-	52.15	12.60	39.55
	13-May-05	25	-	-	17.33	246.80	68.40	178.40	-	72.31	12.60	59.71
	16-May-05	28	6.67	63.00	31.43	244.00	71.00	173.00	24.89	67.27	20.16	47.11

Tabla 12. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 3.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO3									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.60	-	4090.00	5765.00	2785.00	2980.00	-	1176.82	1114.59	62.23
	23-Mar-05	2	-	-	890.00	900.00	406.67	493.33	239.94	1403.67	1333.88	69.79
	26-Mar-05	5	-	762.00	936.67	1063.33	406.67	656.67	-!	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.82	430.00	-	453.33	183.33	270.00	99.54	471.07	413.88	57.19
	30-Mar-05	9	-	760.00	-	1213.33	753.33	460.00	66.04	1277.64	1215.41	62.23
	3-Abr-05	13	-	1244.00	-	1393.33	723.33	670.00	91.73	1202.02	1114.59	87.44
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	369.00	202.00	616.67	256.67	360.00	66.25	336.97	299.94	37.02
	8-Abr-05	4	-	2558.00	3263.33	3886.67	2036.67	1850.00	-	392.42	330.19	62.23
	10-Abr-05	6	6.72	581.00	2166.67	2920.00	1526.67	1393.33	220.15	2084.21	2016.94	67.27
	11-Abr-05	7	6.60	2273.00	1676.00	3741.00	1973.00	1768.00	103.96	387.38	320.11	67.27
	13-Abr-05	9	6.04	475.00	-	874.67	406.67	468.00	192.04	2386.68	2354.70	31.98
	17-Abr-05	13	-	-	1371.00	1580.00	810.00	770.00	99.54	823.94	756.67	67.27
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.62	488.00	-	-	-	-	-	975.18	912.95	62.23
	23-Abr-05	5	6.75	2146.00	-	2860.00	1392.00	1468.00	96.70	2487.50	2334.53	152.97
	27-Abr-05	9	6.60	389.00	-	1069.33	429.33	640.00	-	1479.28	1399.41	79.87
	29-Abr-05	11	6.33	2988.00	-	3693.33	1957.33	1736.00	216.14	2714.35	2591.63	122.72
	4-May-05	16	6.60	235.00	310.00	826.67	286.67	540.00	61.62	420.66	383.63	37.02
	6-May-05	18	6.45	625.00	552.00	937.33	462.67	474.67	-	319.83	275.25	44.59
	8-May-05	20	6.57	1195.00	784.00	1810.00	826.00	984.00	-	1554.90	1462.42	92.48
	10-May-05	22	6.46	285.00	1080.56	1738.00	836.00	902.00	47.40	823.94	789.44	34.50
	13-May-05	25	-	-	20.29	371.25	133.75	237.50	-	223.54	146.19	77.35
16-May-05	28	6.60	3624.00	-	1821.67	658.33	1163.33	180.12	874.35	824.73	49.63	

Tabla 13. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 4.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO4									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQO1 (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.59	-	-	357.00	78.50	278.50	-	77.35	20.16	57.19
	23-Mar-05	2	-	33.00	-	168.00	58.50	109.50	16.27	105.08	108.38	-
	26-Mar-05	5	6.89	39.00	45.00	195.50	41.00	154.50	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.78	60.00	45.00	221.50	62.50	159.00	20.31	112.64	52.93	59.71
	30-Mar-05	9	-	39.00	36.00	246.00	82.00	164.00	31.67	77.35	20.16	57.19
	3-Abr-05	13	-	84.00	-	235.50	94.50	141.00	56.06	105.08	42.85	62.23
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	55.00	29.80	198.50	79.50	119.00	39.75	87.44	27.73	59.71
	8-Abr-05	4	-	66.00	14.00	218.50	78.50	140.00	35.28	95.00	22.68	72.31
	10-Abr-05	6	7.07	47.00	15.40	240.50	89.50	151.00	24.46	87.44	15.12	72.31
	11-Abr-05	7	6.62	73.00	13.60	246.67	74.33	172.33	48.92	92.48	32.77	59.71
	13-Abr-05	9	6.65	36.00	22.40	243.00	86.00	157.00	53.04	89.96	50.41	39.55
	17-Abr-05	13	-	-	51.40	199.33	72.00	127.33	62.57	102.56	25.21	77.35
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.62	80.00	-	265.33	86.33	179.00	-	107.60	25.21	82.39
	23-Abr-05	5	6.77	99.00	-	291.14	69.43	221.71	45.50	87.44	17.64	69.79
	27-Abr-05	9	6.65	66.00	-	237.50	77.50	160.00	-	79.87	20.16	59.71
	29-Abr-05	11	6.46	69.00	-	185.00	36.00	149.00	39.82	107.60	10.08	97.52
	4-May-05	16	6.55	84.00	8.29	213.00	86.00	127.00	34.13	64.75	22.68	42.07
	6-May-05	18	6.59	171.00	57.00	305.43	147.71	157.71	-	173.13	105.86	67.27
	8-May-05	20	6.56	111.00	5.67	349.43	112.57	236.86	-	125.24	42.85	82.39
	10-May-05	22	6.50	23.00	15.00	274.29	66.00	208.29	-	54.67	32.77	21.90
	13-May-05	25	-	-	12.00	210.86	41.43	169.43	-	89.96	20.16	69.79
	16-May-05	28	6.69	62.00	16.20	220.00	80.00	140.00	18.96	67.27	-	-

Tabla 14. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 5.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO5									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.30	-	-	333.50	56.00	277.50	-	62.23	20.16	42.07
	23-Mar-05	2	-	30.00	-	269.29	85.71	183.57	56.70	97.52	20.16	77.35
	26-Mar-05	5	7.13	31.00	3.00	175.00	23.50	151.50	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.80	48.00	37.00	231.50	97.00	134.50	28.44	87.44	20.16	67.27
	30-Mar-05	9	-	42.00	3.00	236.00	90.00	146.00	27.30	74.83	17.64	57.19
	3-Abr-05	13	-	81.00	19.00	238.50	84.50	154.00	64.21	105.08	30.25	74.83
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	51.00	20.20	231.00	100.50	130.50	-	74.83	12.60	62.23
	8-Abr-05	4	-	63.00	30.00	216.00	77.00	139.00	43.32	89.96	17.64	72.31
	10-Abr-05	6	7.08	45.00	-	246.50	92.00	154.50	30.58	82.39	22.68	59.71
	11-Abr-05	7	6.62	59.00	24.40	235.00	68.67	166.33	48.92	89.96	30.25	59.71
	13-Abr-05	9	6.62	26.00	16.60	238.00	60.67	177.33	45.92	87.44	47.89	39.55
	17-Abr-05	13	-	-	13.20	332.00	176.57	155.43	-	92.48	25.21	67.27
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.64	80.00	-	297.67	91.67	206.00	-	97.52	10.08	87.44
	23-Abr-05	5	6.83	102.00	-	195.00	68.00	127.00	64.46	-	22.68	-
	27-Abr-05	9	6.70	74.00	-	233.00	82.75	150.25	-	79.87	15.12	64.75
	29-Abr-05	11	6.41	61.00	-	178.86	42.29	136.57	43.61	170.61	78.14	92.48
	4-May-05	16	6.67	85.00	7.43	180.67	80.33	100.33	36.02	54.67	20.16	34.50
	6-May-05	18	6.57	83.00	4.22	224.57	82.57	142.00	-	57.19	25.21	31.98
	8-May-05	20	6.57	98.00	6.29	307.43	-	-	-	115.16	27.73	87.44
	10-May-05	22	6.49	36.00	13.43	277.71	75.14	202.57	-	52.15	30.25	21.90
	13-May-05	25	-	-	9.75	178.86	13.14	165.71	-	79.87	-	-
16-May-05	28	6.65	58.00	7.20	218.86	70.86	148.00	17.38	57.19	12.60	44.59	

Tabla 15. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 6.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO6									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.35	-	-	333.00	67.50	265.50	-	54.67	10.08	44.59
	23-Mar-05	2	-	23.00	-	184.00	58.00	126.00	56.62	89.96	93.26	-
	26-Mar-05	5	6.92	25.00	50.50	168.00	39.00	129.00	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.83	47.00	23.00	221.50	73.50	148.00	36.57	89.96	-	-
	30-Mar-05	9	-	43.00	9.00	232.50	85.50	147.00	40.10	110.12	52.93	57.19
	3-Abr-05	13	-	58.00	25.00	230.00	70.00	160.00	39.75	95.00	27.73	67.27
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	45.00	15.67	212.50	80.00	132.50	-	74.83	2.52	72.31
	8-Abr-05	4	-	56.00	32.80	216.00	80.00	136.00	30.58	89.96	25.21	64.75
	10-Abr-05	6	7.08	43.00	19.40	237.00	87.50	149.50	23.78	79.87	20.16	59.71
	11-Abr-05	7	6.55	58.00	51.80	247.33	74.67	172.67	37.37	74.83	15.12	59.71
	13-Abr-05	9	6.51	37.00	22.40	184.67	63.00	121.67	49.47	92.48	57.97	34.50
	17-Abr-05	13	-	-	29.20	213.43	72.86	140.57	54.98	95.00	30.25	64.75
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.62	79.00	-	292.00	90.33	201.67	-	117.68	45.37	72.31
	23-Abr-05	5	6.82	75.00	-	216.40	52.40	164.00	41.71	82.39	12.60	69.79
	27-Abr-05	9	6.71	71.00	-	230.00	77.50	152.50	-	77.35	22.68	54.67
	29-Abr-05	11	6.35	70.00	-	201.14	44.86	156.29	41.71	84.91	7.56	77.35
	4-May-05	16	6.67	77.00	9.14	211.33	57.33	154.00	30.34	52.15	-	-
	6-May-05	18	6.57	77.00	3.33	265.14	81.71	183.43	-	52.15	17.64	34.50
	8-May-05	20	6.57	97.00	3.71	281.14	119.43	161.71	-	102.56	27.73	74.83
	10-May-05	22	6.49	42.00	5.43	260.86	62.00	198.86	-	-	27.73	16.86
	13-May-05	25	-	-	6.25	212.86	37.43	175.43	-	97.52	-	-
16-May-05	28	6.75	60.00	9.20	232.00	98.57	133.43	15.80	59.71	-	-	

Tabla 16. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 7.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO7									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.50	-	-	313.50	40.00	273.50	-	64.75	10.08	54.67
	23-Mar-05	2	-	17.00	-	168.00	45.50	122.50	20.97	97.52	-	-
	26-Mar-05	5	6.88	22.00	7.00	209.50	71.00	138.50	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.86	33.00	40.50	227.00	67.50	159.50	20.86	84.91	12.60	72.31
	30-Mar-05	9	-	35.00	7.50	231.00	73.50	157.50	27.29	-	15.12	57.19
	3-Abr-05	13	-	46.00	37.00	223.00	76.00	147.00	30.58	74.83	15.12	59.71
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	29.00	17.03	217.50	63.00	154.50	35.97	97.52	-	-
	8-Abr-05	4	-	45.00	20.40	222.50	71.00	151.50	42.47	173.13	93.26	79.87
	10-Abr-05	6	7.15	39.00	19.80	234.50	81.00	153.50	17.99	79.87	20.16	59.71
	11-Abr-05	7	6.65	36.00	57.60	203.67	53.67	150.00	34.17	84.91	22.68	62.23
	13-Abr-05	9	-	33.00	13.60	185.50	64.50	121.00	37.29	100.04	60.49	39.55
	17-Abr-05	13	-	-	4.00	60.29	52.29	8.00	42.66	79.87	20.16	59.71
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.62	75.00	-	347.14	96.29	250.86	-	110.12	35.29	74.83
	23-Abr-05	5	6.84	53.00	-	170.00	44.00	126.00	39.50	77.35	-	-
	27-Abr-05	9	6.70	58.00	-	217.25	61.75	155.50	36.80	77.35	20.16	57.19
	29-Abr-05	11	6.48	60.00	-	195.43	7.14	188.29	39.50	79.87	10.08	69.79
	4-May-05	16	6.71	56.00	5.40	248.50	76.25	172.25	-	57.19	25.21	31.98
	6-May-05	18	6.62	70.00	7.82	276.86	92.29	184.57	-	49.63	5.04	44.59
	8-May-05	20	6.62	94.00	6.50	254.00	74.57	179.43	-	92.48	2.52	89.96
	10-May-05	22	6.60	29.00	6.00	292.00	70.29	221.71	-	47.11	35.29	11.82
	13-May-05	25	-	-	7.60	187.43	8.29	179.14	-	72.31	-	-
16-May-05	28	6.78	58.00	8.00	191.14	92.86	98.29	23.70	72.31	-	-	

Tabla 17. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 8.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo	PUNTO8									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA 1	21-Mar-05	0	6.51	-	78.69	435.50	131.50	304.00	-	120.20	32.77	87.44
	23-Mar-05	2	-	209.00	-	241.18	72.35	168.82	99.09	369.74	-	-
	26-Mar-05	5	6.96	321.00	164.00	585.60	309.60	276.00	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.85	168.00	166.67	450.83	170.83	280.00	135.09	301.68	100.82	200.86
	30-Mar-05	9	-	195.00	104.17	421.67	247.50	174.17	107.32	273.96	120.99	152.97
	3-Abr-05	13	-	265.00	245.00	885.00	503.00	382.00	152.88	427.71	236.93	190.78
CARRERA 2	5-Abr-05	1	-	224.00	103.00	385.00	206.00	179.00	160.52	352.09	209.21	142.89
	8-Abr-05	4	-	265.00	65.00	380.00	202.00	178.00	142.69	369.74	181.48	188.26
	10-Abr-05	6	7.03	299.00	276.00	491.00	262.00	229.00	160.52	485.68	284.82	200.86
	11-Abr-05	7	6.75	259.00	231.00	429.60	226.80	202.80	244.61	440.31	247.01	193.30
	13-Abr-05	9	-	208.00	63.00	443.60	195.60	248.00	143.99	405.02	360.44	44.59
	17-Abr-05	13	-	-	149.20	-	-	-	175.38	420.15	211.73	208.42
CARRERA 3	20-Abr-05	2	6.57	252.00	-	442.00	219.60	222.40	-	533.57	335.23	198.34
	23-Abr-05	5	7.00	222.00	-	434.00	211.50	222.50	99.54	-	-	-
	27-Abr-05	9	6.79	203.00	-	300.00	143.50	156.50	104.28	291.60	146.19	145.41
	29-Abr-05	11	6.65	216.00	-	320.67	131.33	189.33	142.20	309.24	126.03	183.22
	4-May-05	16	6.80	202.00	95.00	292.40	101.20	191.20	113.76	314.28	178.96	135.33
	6-May-05	18	6.56	133.00	30.00	282.00	115.20	166.80	71.10	160.53	88.22	72.31
	8-May-05	20	6.70	377.00	60.00	395.20	152.00	243.20	-	523.49	302.47	221.02
	10-May-05	22	6.65	300.00	142.00	430.80	225.20	205.60	161.16	412.59	284.82	127.76
	13-May-05	25	-	-	104.00	281.20	69.20	212.00	-	301.68	85.70	215.98
16-May-05	28	6.84	173.00	132.00	292.00	127.20	164.80	32.00	256.31	85.70	170.61	

Tabla 18. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante la evaluación del reactor anaeróbico en el punto 9.

Carrera #	Fecha muestreo	Día de muestreo #	SALIDA									
			PH	Turb.	SST (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQOm (mg/L)	DQOs (mg/L)	DQOI (mg/L)
CARRERA1	21-Mar-05	0	6.63	-	-	372.00	54.50	317.50	-	79.87	10.08	69.79
	23-Mar-05	2	-	27.00	-	344.50	171.50	173.00	47.31	-	-	-
	26-Mar-05	5	6.82	34.00	21.50	209.00	54.00	155.00	-	-	-	-
	28-Mar-05	7	6.76	42.00	21.00	235.00	74.00	161.00	40.29	84.91	-	-
	30-Mar-05	9	-	44.00	13.00	235.50	94.00	141.50	38.86	82.39	15.12	67.27
	3-Abr-05	13	-	77.00	33.50	236.00	86.00	150.00	20.38	105.08	32.77	72.31
CARRERA2	5-Abr-05	1	-	48.00	7.95	201.00	76.50	124.50	51.74	89.96	22.68	67.27
	8-Abr-05	4	-	65.00	14.00	233.00	88.00	145.00	39.07	84.91	5.04	79.87
	10-Abr-05	6	7.12	46.00	24.75	270.00	99.00	171.00	25.87	79.87	17.64	62.23
	11-Abr-05	7	6.60	55.00	91.40	287.67	76.33	211.33	58.80	77.35	10.08	67.27
	13-Abr-05	9	-	37.00	30.80	231.00	70.67	160.33	38.80	97.52	70.58	26.94
	17-Abr-05	13	-	-	13.80	264.57	158.00	106.57	44.24	95.00	32.77	62.23
CARRERA3	20-Abr-05	2	6.59	87.00	-	302.00	94.00	208.00	-	120.20	42.85	77.35
	23-Abr-05	5	6.80	72.00	-	171.00	49.20	121.80	53.72	79.87	5.04	74.83
	27-Abr-05	9	6.67	71.00	-	213.25	68.25	145.00	-	77.35	12.60	64.75
	29-Abr-05	11	6.52	70.00	-	186.00	27.43	158.57	41.08	92.48	-	-
	4-May-05	16	6.69	83.00	3.56	233.50	56.25	177.25	39.50	64.75	22.68	42.07
	6-May-05	18	6.62	80.00	5.09	246.50	95.75	150.75	-	59.71	22.68	37.02
	8-May-05	20	6.57	113.00	3.25	265.14	76.86	188.29	-	112.64	-	-
	10-May-05	22	6.54	29.00	7.50	267.71	63.71	204.00	52.14	59.71	47.89	11.82
	13-May-05	25	-	-	9.20	216.57	99.14	117.43	-	87.44	-	-
16-May-05	28	6.67	69.00	-	203.43	68.86	134.57	21.33	69.79	-	-	

APÉNDICE 3. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS BÁSICOS EN LA ENTRADA AL SISTEMA DE TRATAMIENTO DURANTE EL PERIODO DE EVALUACIÓN.

Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos básicos de las aguas residuales del municipio de El Tambo.

	Tiempo (días)	DQOm (mg/L)	DQOI (mg/L)	DBO (mg/L)	ST (mg/L)
Carrera 1	0	120.20	87.44	453.60	435.50
	2	369.74	-	99.09	241.18
	5	-	-	-	585.60
	7	301.68	200.86	135.09	450.83
	9	273.96	152.97	107.32	421.67
	13	427.71	190.78	152.88	885.00
Carrera 2	15	352.09	142.89	160.52	103.00
	18	369.74	188.26	142.69	65.00
	20	485.68	200.86	160.52	276.00
	21	440.31	193.30	244.61	231.00
	23	405.02	44.59	143.99	63.00
	27	420.15	208.42	175.38	149.20
Carrera 3	30	533.57	198.34	-	442.00
	33	-	-	99.54	434.00
	37	291.60	145.41	104.28	300.00
	39	309.24	183.22	142.20	320.67
	44	314.28	135.33	113.76	292.40
	46	160.53	72.31	71.10	282.00
	48	523.49	221.02	-	395.20
	50	412.59	127.76	161.16	430.80
	53	301.68	215.98	-	281.20
	56	256.31	170.61	32.00	292.00

Promedio		353.48	162.12	149.99	335.33
Desv. Estándar		108.36	50.50	88.45	182.51
Coef. Variación		0.31	0.31	0.59	0.54
Intervalo Confianza		41.92	20.04	36.28	70.60

Fuente: esta investigación

Tabla 20. Factor de biotratabilidad, relación DQOI/DQOm y pH en las aguas residuales del municipio de El Tambo.

	Tiempo (días)	pH*	Relación DQOI/ DQOm	Factor de Biotratabilidad (Fb)**
Carrera 1	0	6.51	72.74%	-
	2	-	-	0.41
	5	6.96	-	-
	7	6.85	66.58%	0.69
	9	-	55.84%	0.60
	13	-	44.60%	0.55
Carrera 2	15	-	40.58%	0.70
	18	-	50.92%	0.59
	20	7.03	41.36%	0.51
	21	6.75	43.90%	0.85
	23	-	11.01%	0.55
	27	-	49.61%	0.64
Carrera 3	30	6.57	37.17%	-
	33	7.00	-	-
	37	6.79	49.87%	0.55
	39	6.65	59.25%	0.71
	44	6.80	43.06%	0.56
	46	6.56	45.05%	0.68
	48	6.70	42.22%	-
	50	6.65	30.97%	0.60
	53	-	71.59%	-
	56	6.84	66.56%	0.19

Promedio		6.76	48.57%	0.59
Desv. Estándar		0.17	0.15	0.15
Coef. Variación		0.02	0.31	0.25
Intervalo Confianza		0.08	0.06	0.06

\* medido en el laboratorio.

\*\* Fb =  $DBO_5 / (0.65 * DQO)$

Fuente: esta investigación

Tabla 21. Clasificación de factores de biodegradabilidad.

Factor de biodegradabilidad	Condición de biodegradabilidad	Ejemplos de efluentes
entre 0.8 y 0.9	Muy buena	Sanitario
entre 0.7 y .08	Buena	Frigoríficos
entre 0.5 y 0.7	Media	Curtumes compleos
entre 0.4 y 0.5	Media/baja	Testéis / acab. couro
entre 0.2 y 0.4	Muy baja	Celulosa / pesticidas
menor de 0.2	No biodegradable	Efluentes tratamiento biológico

Fuente: Memorias XI encuentro ACOLCUR.

APÉNDICE 4. VALORES DE CAUDALES T° Y PH MEDIDOS EN CAMPO.

Tabla 22. Valores de caudales temperatura y pH medidos en campo.

	Días de muestreo	Q Promedio (L/s)	pH*	T° agua	T° ambiente
Carrera 1	0	5.49	6.43	22.75	-
	2	3.66	6.49	22.63	-
	5	1.29	6.44	22.9	-
	7	1.39	6.49	22.73	21.3
	9	1.09	6.46	22.77	24.83
	13	1.27	6.36	23.58	22.52
Lavado 1	<i>Antes**</i>	<i>1.1</i>	-	-	-
	<i>Después***</i>	<i>2.82</i>	-	-	-
Carrera 2	1	3.42	6.59	22.3	23.2
	4	1.17	6.49	22.1	24.2
	6	1.08	6.46	22.03	24.13
	7	1.11	6.42	22.86	24.68
	9	1.03	6.5	22.36	24.8
	13	0.89	6.56	23.06	24.66
Lavado 2	<i>Antes**</i>	<i>0.77</i>	-	-	-
	<i>Después***</i>	<i>3.43</i>	-	-	-
Carrera 3	2	1.75	6.56	22.96	25.5
	5	1.02	6.48	21.86	22.1
	9	0.96	5.08	21.6	22.25
	11	0.55	6.32	22.8	23.5
	16	1.01	6.52	23.53	24.17
	18	1.08	6.37	22	25
	20	1.18	6.34	22.1	23.33
	22	0.89	6.29	22.4	26.1
	25	0.61	6.44	22.8	26
	28	0.38	6.5	22.45	21.95
Lavado 3	<i>Antes**</i>	<i>0.35</i>	-	-	-
	<i>Después***</i>	<i>2.54</i>	-	-	-
Promedio		1.55	6.39	22.57	23.91
Desv. Estándar		1.19	0.30	0.51	1.40
Coef. Variación		0.77	0.05	0.02	0.06
Intervalo Confianza		0.38	0.11	0.19	0.56

\* medido en campo en la salida del sistema.

\*\* medido antes de cada lavado.

\*\*\* medido después de cada lavado.

Fuente: esta investigación.

APÉNDICE 5. GRAFICAS DE REMOCIONES ALCANZADAS EN DBO<sub>5</sub>, DQO Y ST A TRAVÉS DEL SISTEMA EN LAS CARRERAS 1 Y 3.

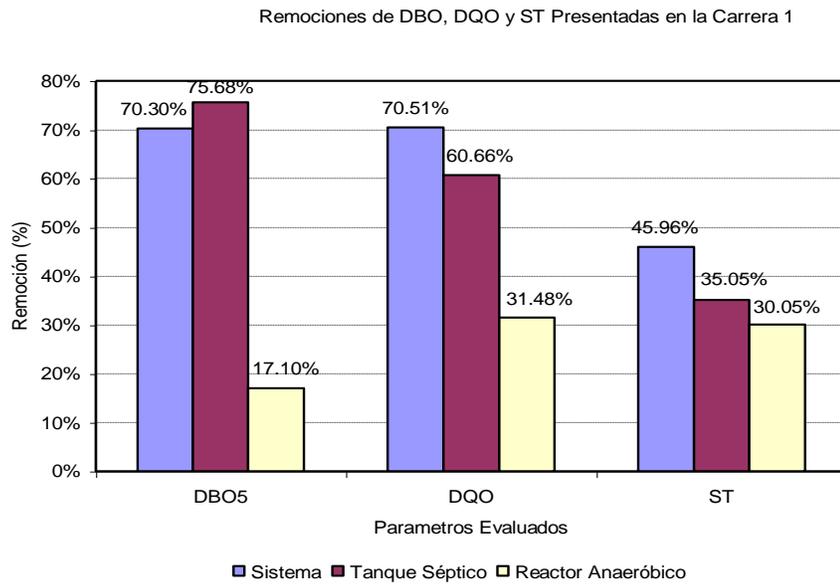


Figura 18. Remociones alcanzadas en DBO<sub>5</sub>, DQO y ST a través del sistema carrera 1.

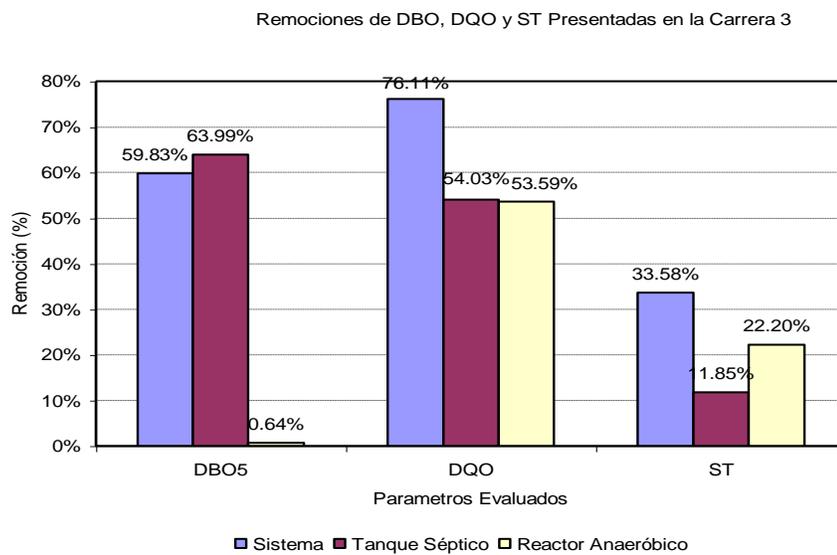


Figura 19. Remociones alcanzadas en DBO<sub>5</sub>, DQO y ST a través del sistema carrera 3.

APÉNDICE 6. VARIACIÓN DE SF Y SST A TRAVÉS DEL REACTOR ANAERÓBICO EN LA CARRERA 2.

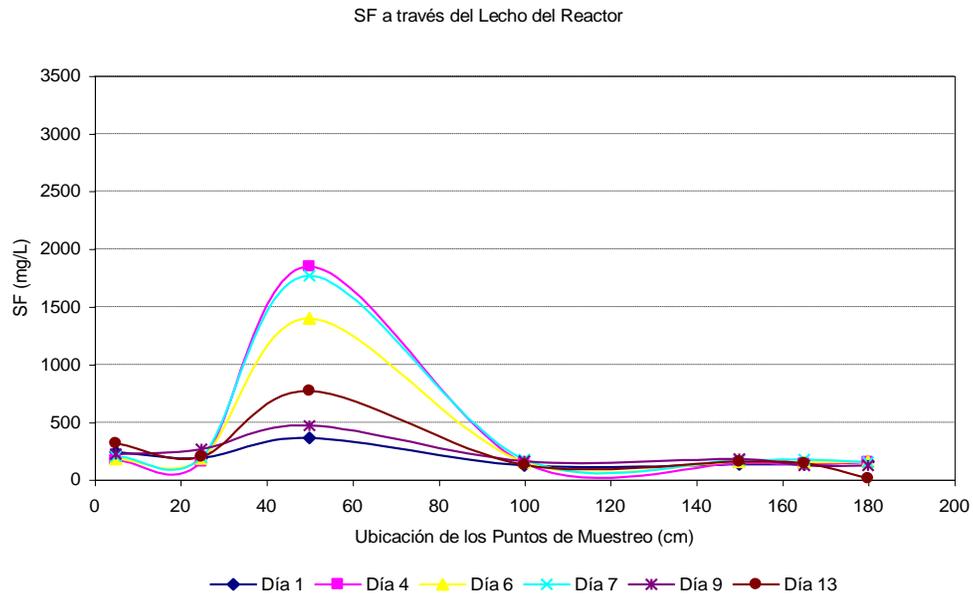


Figura 20. Variación de SF a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.

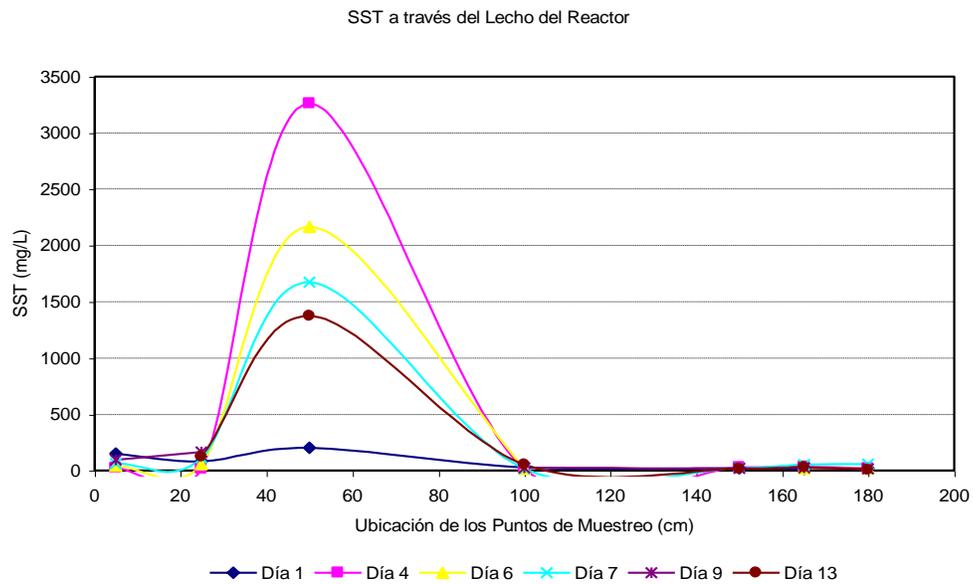


Figura 21. Variación de SST a través del Reactor Anaeróbico en la Carrera 2.