

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

**“Determinación de las condiciones óptimas para la biodegradación anaeróbica de las aguas residuales de una industria de café a escala de laboratorio”**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presentado por:

Sr. Tyrone Fernando Alcívar Reyna

Guayaquil – Ecuador

2014

## AGRADECIMIENTO

A todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis, en especial a la PhD. María de Lourdes Mendoza, (directora de la Tesis), al igual que a mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

## DEDICATORIA

Dedicada a.

Tyrito

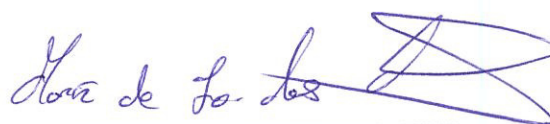
# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

**PRÉSIDENTE**

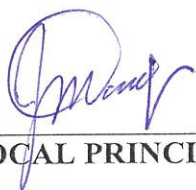
**Msc. Oswaldo Valle**



---

**DIRECTORA**

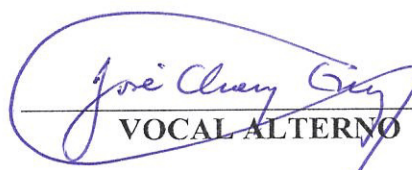
**PhD. María de Lourdes Mendoza**



---

**VOCAL PRINCIPAL**

**PhD. José Manuel País**



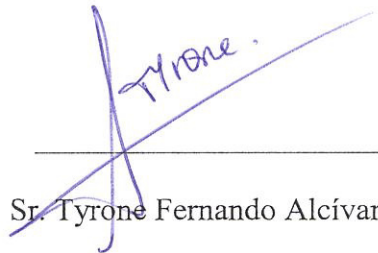
---

**VOCAL ALTERNO**

**PhD. José Chang Gómez**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido  
de esta Tesis de Grado  
me corresponde exclusivamente;  
y el patrimonio intelectual de la misma  
a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”  
(Reglamento de graduación de la ESPOL)



---

Sr. Tyrone Fernando Alcívar Reyna

## RESUMEN

La presente tesis desarrolla el estudio del tratamiento de aguas residuales de una empresa productora de café soluble, la cual posee un sistema de tratamiento de tipo aeróbico, por lo que la presente tesis, sugiere una alternativa de tratamiento de los residuales de la empresa por vía anaeróbico.

Para llevar a cabo el sistema de tratamiento de agua residuales se determinaron las condiciones óptimas de tratamiento, tales como: la temperatura, pH, concentración del efluente (mg DQO/L); todo esto a escala laboratorio, para lo cual se realizaron pruebas variando cada una de estas variables de control.

La modificación de las variables de control del sistema de tratamiento, afectan directamente a las bacterias anaeróbicas, pues presentan la respuesta adecuada ante las diversas condiciones a las que se las sometió. A estas bacterias se les realizaron las respectivas pruebas de aclimatización, a través de pruebas *Batch* y luego las respectivas pruebas a través del reactor anaeróbico de flujo ascendente *UASB*, (por sus siglas en inglés).

Se tuvo una muestra patrón basado en un compuesto biodegradable conocido, con la cual se llevó a cabo pruebas de óptimas condiciones, las cuales sirvieron de referente para el agua residual industrial a tratarse. Además Para conocer las características del agua residual de café, se realizaron análisis físicos y químicos.

Se realizó un estudio detallado de los diferentes procesos que se manejan en la planta, los mismos que son responsables de la generación del agua residual que se va a tratar; así como, también un análisis detallado del sistema de tratamiento de aguas residuales presente en la empresa, para su posterior comparación con el sistema de tratamiento de agua propuesto en la presente tesis.

Para la realización del sistema de tratamiento anaeróbico se procedió una simulación computarizada del funcionamiento del reactor anaeróbico UASB, en la cual se calculan otras variables de control tales como: el tiempo de retención hidráulica, velocidad ascensional de fluido, velocidad lineal de flujo, y la velocidad de sedimentación.

Se realizaron los respectivos análisis de los parámetros de control del agua y el estudio se centró en el seguimiento permanente del pH, carga orgánica suministrada a la biomasa, temperatura y caudales. Con el análisis del agua residual actual de la empresa, y los respectivos análisis del agua del sistema de tratamiento anaeróbico propuesto en la presente tesis, se efectuaron las respectivas comparaciones de los porcentajes de remoción y de los costos de estos dos sistemas.

La parte experimental de la tesis se desarrolló principalmente en el laboratorio de Bioprocesos ubicado en el interior del laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOL. Además, ciertas pruebas experimentales se llevaron a cabo en el laboratorio de fisicoquímica y también en el laboratorio de microbiología del DCQA

Los resultados muestran que el agua del café, cuando fue tratada en el reactor anaeróbico UASB al 100% de su totalidad, presentó una DQO aproximada de 5000 mg DQO/l, correspondiente a un porcentaje de remoción de materia orgánica de 68%. La elección de una alternativa para el tratamiento de aguas residuales necesitó el respectivo análisis de costos tanto del sistema actual como del sistema propuesto en la presente tesis, teniendo en cuenta los costos que acarrea cada uno de los sistemas de tratamiento.

Finalmente, se concluye que es posible realizar la degradación de la materia orgánica por medio de procesos anaeróbico de una manera eficiente, si se lo compara con el proceso de tratamiento de agua aeróbico que se realiza en la empresa y además el sistema de tratamiento anaeróbico de aguas residuales es más amigable con el medio ambiente.



## **ABREVIATURAS**

UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket, Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente
COFENAC	Consejo Cafetero Nacional
TULSMA	Texto Único de Legislación Secundaria del Medio Ambiente
CONSEP	Consejo Nacional de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas
pH	Potencial de Hidrógeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno o Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
F/M	Relación Alimento (Food) / Microorganismo

## SÍMBOLOS Y UNIDADES

°C	Grados Centígrados
°Bx	Grados Brix
%	Porcentaje
g	Gramo
mg	Miligramo
L	Litro
mL	Mililitro
μS/cm	MicroSiemens por centímetro
FAU	Formazin Attenuation Units ;Unidades de Atenuación de Formazin o Unidades de Turbidez
C/N/P	Relación Carbono / Nitrógeno /Fosforo
ha	Hectárea (1ha =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE gráficos.....	xix
1. Antecedentes.....	21
1.1. Justificación.....	23
1.2. Hipótesis.....	25
1.3. Objetivos.....	26
1.3.1. Objetivo general.....	26
1.3.2. Objetivos específicos.....	26
2. Marco teórico.....	28
2.1. Aguas residuales industriales orgánicas.....	28
2.2. Fundamentos del proceso anaeróbico.....	29
2.3. Inhibiciones del proceso anaeróbico.....	35
2.4. Reactores anaeróbicos UASB.....	35
2.4.1. Parámetros de control en un reactor UASB.....	37
2.4.2. Otros parámetros.....	40
3. Descripción de los procesos productivos de la industria cafetera.....	46

3.1. Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales de la empresa productora de café .....	52
3.2. Características físico químicas del agua residual del café .....	59
Porcentajes de remoción del contaminante en el agua residual .....	60
4. Parte Experimental .....	62
Materiales y reactivos .....	62
4.1. Análisis preliminares del agua residual de café .....	63
4.2. Variación Diurna del Potencial de Hidrogeno del agua residual en la empresa de café .....	64
4.3. Ajuste del pH en el agua residual de café .....	66
4.4. Pruebas Batch .....	68
4.4.1 Análisis de la biomasa anaeróbica .....	68
4.4.2 Preparación del sustrato de acetato de sodio.....	69
4.4.3 Pruebas Batch y Producción de Biogás.....	69
4.5 Pruebas con el Biodigestor UASB .....	70
4.5.1 Descripción del biodigestor.....	70
4.5.2 Bombas peristálticas .....	75
4.6 Pruebas hidrostáticas del biodigestor .....	76
4.7 Fase Pre-Experimental .....	77
4.8 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL BIODIGESTOR CON ACETATO DE SODIO.....	78

4.9	Arranque de las pruebas continuas en el reactor UASB con el agua residual de café .....	80
	Cálculo de la relación F/M para el agua residual de café .....	82
4.10	Análisis de DQO, SST, y pH del afluente y del efluente del tratamiento anaeróbico de agua residual del café.....	83
4.11	Prueba de jarras con coagulantes y floculantes. ....	84
5.	RESULTADOS.....	85
5.1.	Resultados de las Pruebas Batch .....	85
5.2.	Resultado de la fase pre-experimental.....	85
5.3.	Resultados de las Pruebas en el biodigestor con el sustrato de Acetato de Sodio 87	
5.4.	Resultados de las Pruebas en el biodigestor con el agua residual de café....	88
5.5.	Resultados de las Pruebas al agua residual del café tratada .....	90
	Resultados de los Solidos Suspendidos Totales (SST) .....	92
	Resultados de la determinación de pH.....	93
5.6.	Resultados de la Prueba de Jarras.....	93
	Análisis de resultados.....	97
6	Propuesta de tratamiento y análisis de costos .....	105
6.1.	Análisis de costos de los reactivos. ....	105
6.2.	Costo aproximado del tratamiento aeróbico en la planta de aguas residuales de la empresa.....	108
	CONCLUSIONES .....	110

RECOMENDACIONES .....	113
ANEXO I.- Caudales de bombas .....	115
ANEXO II.- datos de producción de biogás con cargas orgánicas de acetato de sodio .....	117
ANEXO III.- datos de producción de biogás con el agua residual de café.....	127
ANEXO IV.- DATOS DEL CAMBIO DEL POTENCIAL DE HIDROGENO EN EL AGUA RESIDAL DE LA EMPRESA PRODUCTORA DE café .....	134
ANEXO V.- DATOS DEL AJUSTE DEL pH EN EL AGUA RESIDUAL DE CAFÉ .....	138
ANEXO VI.- DATOS SOCIO-ECONOMICOS DE LA INDUSTRIA CAFETERA ECUATORIANA .....	139
ANEXO VII.- LÍMITES DE DESCARGA AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO PÚBLICO.....	141
BIBLIOGRAFÍA .....	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Oxidación Anaeróbica de compuestos orgánicos.- FUENTE: Tratamiento De Aguas Residuales; Autor: Jairo Alberto Romero Rojas; Octava Edición.....	36
Figura 3.1.- Diagrama de flujo de procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	56
Figura 3.2.- Diagrama de flujo de la producción de café.....	57
Figura 3.3.- Diagrama de Flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa.....	58
Figura 3.4.- Porcentaje de remoción de la empresa.....	60
Figura 4.1.- Fotografía del reactor UASB.....	71
Figura 4.2.- Simulación del funcionamiento del reactor UASB en ANSYS.....	74
Figura 4.3.- Simulación del funcionamiento del reactor UASB en ANSYS.....	74
Figura 4.4.- Pruebas hidrostáticas del reactor UASB.....	76
Figura 4.5.- Reactor UASB en funcionamiento.....	79
Figura 4.6.- Visualización Completa del sistema de tratamiento de Agua residual a nivel de laboratorio.....	79
Figura 5.1.- imagen antes de la realización del test de jarras.....	95
Figura 5.2.- Resultados del test de jarras.....	95

Figura 5.3.- Esquema del sistema de tratamiento anaeróbico con los porcentajes de remoción. ....96

Figura 5.4.-Porcentaje de Remoción, floculación y coagulación–digestión anaeróbica.....96



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Parámetros medidos en la planta de tratamiento de Aguas Residuales en un día de producción.....	59
Tabla 4.1.- Resultados de Análisis Preliminares realizados al agua residual de café.....	63
Tabla 4.2.- pH promedio del agua residual de la empresa.....	66
Tabla 4.3.- Propiedades del fluido a ingresar en el reactor UASB en el programa ANSYS.....	73
Tabla 4.4.- Condiciones de arranque con condiciones óptimas sin elementos trazas.....	77
Tabla 4.5.- Dilución de agua residual para diferentes cargas orgánicas.....	81
Tabla 4.6.- condiciones de arranque con el agua residual de café.....	82
Tabla 5.1.- Producción de biogás de la prueba Batch.....	85
Tabla 5.2.- Producción de biogás con una carga de 900 mg DQO/L sin oligoelementos.....	86
Tabla 5.3.- Producción de biogás promedio con respecto a la carga orgánica suministrada.....	87
Tabla 5.4.- Relación entre la carga orgánica, relación F/M, y la producción promedio de biogás.....	89

Tabla 5.5.- Porcentaje de remoción de la DQO.....	90
Tabla 5.6.- Carga orgánica suministrada, Porcentaje de remoción de contaminante, producción de biogás promedio.....	91
Tabla 5.7.- Resultados de los sólidos suspendidos para el afluente y efluente.....	91
Tabla 5.8.- pH medido al agua residual de café del afluente y efluente.....	93
Tabla 5.9.- Dosificación, DQO del agua tratada y porcentaje de remoción en el Test de Jarras.....	94
Tabla 6.1.- Costos de operación del sistema de tratamiento anaeróbico.....	107
Tabla 6.2.- Costos del sistema de tratamiento aeróbico de agua utilizado actualmente en la empresa.....	108
Tabla 6.3.- Comparación de costos de los tipos de tratamiento.....	109

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.- pH promedio del agua residual de la empresa.....	66
Gráfico 5.1.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánicas 900 mg DQO/l, sin oligoelementos.....	86
Gráfico 5.2.-F/M y Producción de biogás vs Carga Orgánica.....	88
Gráfico 5.3.- F/M y Producción de biogás promedio vs la carga orgánica suministrada.....	89
Gráfico 5.4.- porcentaje de remoción vs. Carga orgánica suministrada.....	91
Gráfico 5.5.- Producción de Biogás y el Porcentaje de remoción de DQO vs la carga orgánica alimentada.....	92

# **Capítulo 1**

## **Antecedentes**

## 1. Antecedentes

Ecuador es uno de los grandes productores de café teniendo el cuarto lugar en Latinoamérica en producción de este grano después de Colombia Brasil y Perú, (Anexo 6). Según datos obtenidos del Consejo Cafetero Nacional a finales del año 2012 se tiene que Ecuador posee una superficie total de 199215 hectáreas de sembríos de café que entre ellos se encuentra el café arábigo y el café robusto. Siendo el café arábigo el más producido, obteniendo finalmente una producción nacional de 650 mil sacos de 60 kg por día, datos tomados del Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC). En Ecuador, las cosechas se encuentran principalmente en la provincia de Manabí, Loja, Orellana y Sucumbíos, teniendo las mayores áreas cafetaleras. Y las industrias del café se encuentran principalmente en la provincia del Guayas, Manabí y Pichincha y generan desechos líquidos contaminantes con cargas que oscilan entre 1500 a 7500 mg DQO/L.

Los residuos orgánicos generados en las industrias, poseen altas cargas contaminantes que son capaces de diluirse a lo largo de un cuerpo hídrico, contaminando así, extensas fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas. Estos contaminantes orgánicos son difíciles de degradar si no se tienen las condiciones adecuadas para su tratamiento; es por eso que se deben buscar estas condiciones, en especial la biomasa adecuada que pueda degradar el contaminante orgánico respectivo. Este tipo de biomasa puede ser de carácter anaeróbico.

En las industrias por lo general se suele mezclar el agua residual industrial y el agua residual doméstica de la misma planta, produciendo así un agua residual compleja y aún más difícil de degradar, se corre con la “suerte” de que la diferencia de caudales entre el agua residual del proceso y el agua residual doméstica es muy amplia dejando así una pequeña porción del agua residual doméstica en el agua residual final a tratarse.

Para tratar este tipo de aguas residuales puede emplearse tanto el tratamiento anaeróbico como el aeróbico. Además, es conocido por estudios realizados (Romero, 2003) que el tratamiento de aguas residuales por procesos anaeróbicos es más práctico para este tipo de aguas residuales. Para un correcto tratamiento se debe de tener un control sobre todas las variables que predominan en el sistema, el logro de esto, permitirá obtener un efluente menos contaminado que el generado en la planta procesadora de café.

Para un análisis completo del sistema de tratamiento de agua se determinará y controlará experimentalmente las condiciones óptimas de operación a escala de laboratorio a una temperatura estandarizada, lo cual servirá para futuras investigaciones a escala piloto.

Se realizaron las pruebas de laboratorio inicialmente en condiciones normales de presión y temperatura, para luego llevar los ensayos a una temperatura mayor de

aproximadamente 32°C, considerada para el sistema de tratamiento que se realizará con el agua residual orgánica proveniente de una industria alimenticia de café.

Se realizarán pruebas tipo Batch para determinar la biodegradabilidad del sustrato, la cantidad tentativa de biogás generado y la tasa de carga orgánica a la cual se alimentará a las bacterias. Además, las pruebas tipo Batch sirven para climatizar previamente a las bacterias para luego llevarlas a un sistema continuo, en este caso, utilizando un biodigestor UASB, uno de los más conocidos a nivel mundial por su diseño ingenieril.

### **1.1. Justificación**

Con el desarrollo de la siguiente tesis, se está encaminando a mitigar la contaminación hídrica en nuestros ecosistemas, ya que las bacterias presentes en el agua residual al descomponer la materia orgánica, agotan el oxígeno disuelto, producen malos olores, y generan deposición de sólidos bacterianos, lo cual provoca la modificación de la biota, cambios físicos en el medio, además del aumento de los sólidos suspendidos, y la turbidez.

Gran parte de estas aguas residuales se dirigen hacia el ambiente, pero antes de desecharlas, se deberían aprovechar, pues constituyen una fuente significativa de

nutrientes para las bacterias anaeróbicas las cuales generan CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (biogás); el biogás generado es una fuente representativa de energía.

Otras razones por las cuales es conveniente tratar estos residuos líquidos son:

- La industria de productos alimenticios demanda el uso y aplicación de tecnologías favorables al ambiente, de esta forma mitigar la carga contaminante de las aguas residuales orgánicas.
- El uso excesivo de químicos y reemplazarlos por procesos amigables con el medio ambiente
- Finalmente, muestra una alternativa viable a los industriales que existen otros procesos de eliminación de cargas contaminantes en sus desechos líquidos, y ayuda a la imagen que la sociedad tiene del sector industrial como ente de gran contaminación.

La eliminación de aguas residuales es una actividad inherente a todos los sectores productivos, así como también al sector residencial. Para eliminar aguas servidas al sistema sanitario deberán de tener un respectivo proceso.

Las muestras de agua residual que se tienen para la iniciación del proyecto, van a ser tomadas de una empresa ubicada en la ciudad de Guayaquil, la cual se dedicada a la producción de café liofilizado y *freeze*. El agua residual que genera esta industria se



presenta en grandes cantidades las que están alrededor de 130 m<sup>3</sup>/día. La fábrica cuenta actualmente con sistema de tratamiento aeróbico.

Lo que se quiere con este proyecto es dar una alternativa de tratamiento de los desechos líquidos con respecto al tratamiento aeróbico ya implementado, dejando como una posibilidad, que el gas metano que se produce por medio del tratamiento anaeróbico se lo utilice en el proceso de producción, disminuyendo así el consumo energético de la planta, implicando esto en algunos casos, según su uso o aplicación, la adquisición de equipos para la generación o cogeneración de energía, lo cual se podría profundizar más en investigaciones o estudios posteriores. Además se espera obtener el agua en condiciones y parámetros fisicoquímicos de acuerdo a lo establecido en la legislación aplicable del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) en su tabla número 11, la cual indica los valores permisibles de los diferentes parámetros para el vertido de aguas residuales

### **1.2. Hipótesis**

Es posible el tratamiento a escala de laboratorio de los residuales de la empresa cafetera, empleando un reactor anaeróbico de flujo ascendente UASB, lográndose un tratamiento que cumple con las normas de vertimiento vigentes.

### 1.3. **Objetivos**

#### 1.3.1. **Objetivo general**

Identificar las condiciones anaeróbicas óptimas en un biodigestor UASB de laboratorio para biodegradar las aguas residuales de una industria de café.

#### 1.3.2. **Objetivos específicos**

- Definir los distintos parámetros que rigen la eficiencia de los procesos anaeróbicos.
- Determinar la biodegradabilidad del sustrato o agua residual con pruebas tipo Batch y las cantidades teóricas y experimentales de producción de biogás.
- Determinar las condiciones de arranque de un biodigestor UASB tratando aguas residuales de café.
- Caracterizar físico-químicamente el agua residual de café de la industria bajo estudio.
- Determinar experimentalmente la eficiencia máxima del proceso anaeróbico con respecto a eliminación de carga orgánica y generación de biogás, bajo las condiciones de estudio.
- Calcular experimentalmente las variables de control y de operación del proceso en las condiciones bajo estudio.
- Propender a la eficiencia energética de la planta industrial y a su vez con la disminución del consumo energético del sector aledaño a la empresa.

## **Capítulo 2**

### **Marco Teórico**

## 2. Marco teórico

### 2.1. *Aguas residuales industriales orgánicas*

En la actualidad todas las empresas que se dedican a la fabricación de productos orgánicos, especialmente los productos comestibles, generan agua residuales industriales de los diferentes procesos que realizan hasta obtener el producto final. En la presente tesis se van a estudiar los tipos de aguas residuales provenientes de una empresa productora de café soluble en sus diferentes presentaciones comerciales.

Las empresas de tipo cafetero, deben realizar un lavado a la materia prima, además de la correspondiente cocción y procesos respectivos hasta obtener el producto final, es por ello que este tipo de empresa genera aguas residuales con altas cargas orgánicas por los diferentes procesos que en ella se realizan. Por este motivo deben tener un tratamiento de aguas adecuado antes de enviarlas al alcantarillado público. El principal objetivo de este tratamiento es la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y de la demanda química de oxígeno (DQO), los cuales son los principales indicadores del grado de contaminación del agua.

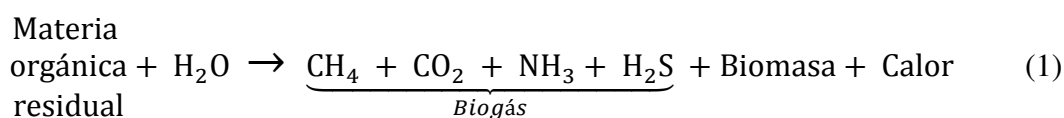
Para este tipo de industrias, dependiendo del tamaño de la misma, se debe tener una correcta selección del tipo de tratamiento de agua residual a seleccionarse. Entre las cuales uno de los principales factores son; la característica del afluente, la calidad deseada en el efluente, y el caudal a tratarse.

Actualmente la empresa cafetera posee un sistema de tratamiento de aguas residuales combinado, de carácter fisicoquímico y aeróbico; en el sistema fisicoquímico se agregan floculantes y coagulantes al agua residual, y luego el agua pasa hacia un sistema de aireación donde se degrada la carga orgánica del agua residual.

## 2.2. Fundamentos del proceso anaeróbico

La digestión anaeróbica o fermentación es el proceso en el cual se degrada la materia orgánica sin presencia de oxígeno para que los organismos anaeróbicos obtengan la energía necesaria para su mantenimiento y crecimiento. Además de esta obtención de energía de los organismos anaeróbicos se obtiene como subproducto biogás, el cual se lo puede aprovechar como combustible.

Un proceso anaeróbico se podría resumir como la obtención de biogás a partir de la materia orgánica. El biogás sirve como indicador de la cantidad de materia orgánica que se está degradando, y además como una fuente energética, ya que su composición aproximada es de 65% de CH<sub>4</sub> y 35% de CO<sub>2</sub> y otros compuestos tales como el N, H, NH<sub>3</sub>, y para el caso de aguas residuales que posean compuestos sulfurados se tiene la presencia de H<sub>2</sub>S, el cual es el principal responsable de los malos olores emitido en el proceso de la digestión anaeróbica.



La descomposición de la materia en los procesos anaeróbicos es posible para todos los compuestos orgánicos que contenga oxígeno en su composición estructural, ya que este es el compuesto necesario para el metabolismo celular. Las bacterias anaeróbicas no pueden degradar la materia orgánica compuesta de grandes moléculas, solo puede realizar este proceso a compuestos más simples, es decir que las macromoléculas tales como los carbohidratos, proteínas y lípidos, deben ser llevados hacia azúcares, aminoácidos y ácidos grasos respectivamente, los cuales son degradados a ácido acético, y finalmente hasta la obtención del biogás. Todo este proceso metabólico se lleva a cabo gracias a tres principales procesos los cuales son:

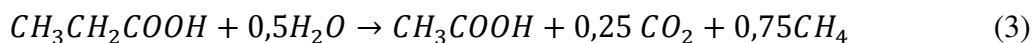
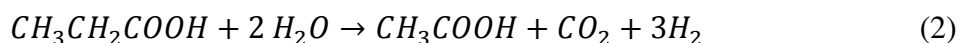
- Hidrólisis
- Acidogénesis- Acetatogénesis
- Metanogénesis

En la primera etapa del proceso anaeróbico, la hidrólisis (liberación de moléculas de agua), una cepa de bacterias hidrolíticas y también las exoenzimas presentes en la membrana celular de las bacterias anaeróbicas, transforman la materia orgánica de alto peso molecular en moléculas simples de bajo peso molecular, tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. La cinética de este proceso hidrolítico depende netamente del tipo de sustrato que se esté tratando.

Las moléculas simples de peso molecular relativamente bajo son aprovechadas en la siguiente etapa del proceso anaeróbico la cual es la acidogénesis, que se lleva a cabo por bacterias acetatogénicas, las cuales absorben estas moléculas a través de la membrana celular para poder llevar a cabo la transformación de estas hacia ácidos grasos, principalmente el ácido acético, propiónico, butírico, valérico y fórmico. Además de esto se obtienen otros subproductos tales como el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ .

Los ácidos grasos formados son convertidos en  $\text{CH}_3\text{COOH}$  en la etapa de la acetatogénesis, la cual es una etapa intermedia entre la acidogénesis y la metanogénesis, por medio de procesos fermentativos. Además de esto se obtienen subproductos como el  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  de igual forma como en la acidogénesis. Todo este proceso es llevado a cabo por bacterias acetatogénicas. La formación de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  e  $\text{H}^+$  son fundamentales en el proceso de la acidogénesis y acetatogénesis, ya que estos son los componentes principales para la etapa de la metanogénesis.

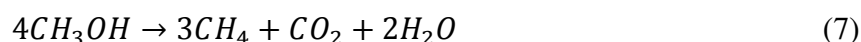
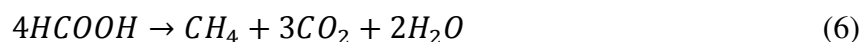
Los procesos de formación de  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , a partir del ácido propiónico se describen a partir de las siguientes ecuaciones.



La última etapa de la degradación de la materia orgánica se lleva a cabo por medio de las bacterias metanogénicas, las cuales principalmente transforman el  $\text{CH}_3\text{COOH}$  en  $\text{CH}_4$ , estos procesos de degradación se detallan a continuación. (Romero, 2003)



Además de esto, el ácido fórmico y el metanol también producen metano los cual se describe a partir de las siguientes ecuaciones químicas:



En la etapa de la metanogénesis en la cual se producen conjuntamente el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$  se tiene que el  $\text{CO}_2$  se puede convertir en  $\text{CH}_4$  mediante la siguiente ecuación:



Es por este motivo que el porcentaje de  $\text{CO}_2$  en el biogás es menor que el porcentaje de  $\text{CH}_4$ ; otro factor que influye en el decaimiento del porcentaje de  $\text{CO}_2$  en el biogás es la solubilidad de este en agua, produciendo  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , es por ello se tienen afluentes acidificados con respecto al pH del afluente (Romero, 2003).

Para las aguas residuales que poseen compuestos sulfurados, la degradación de este tipo de compuestos se lleva a cabo principalmente por procesos químicos de oxidación-reducción, los cuales son importantes ya que la presencia de estos compuestos inhiben



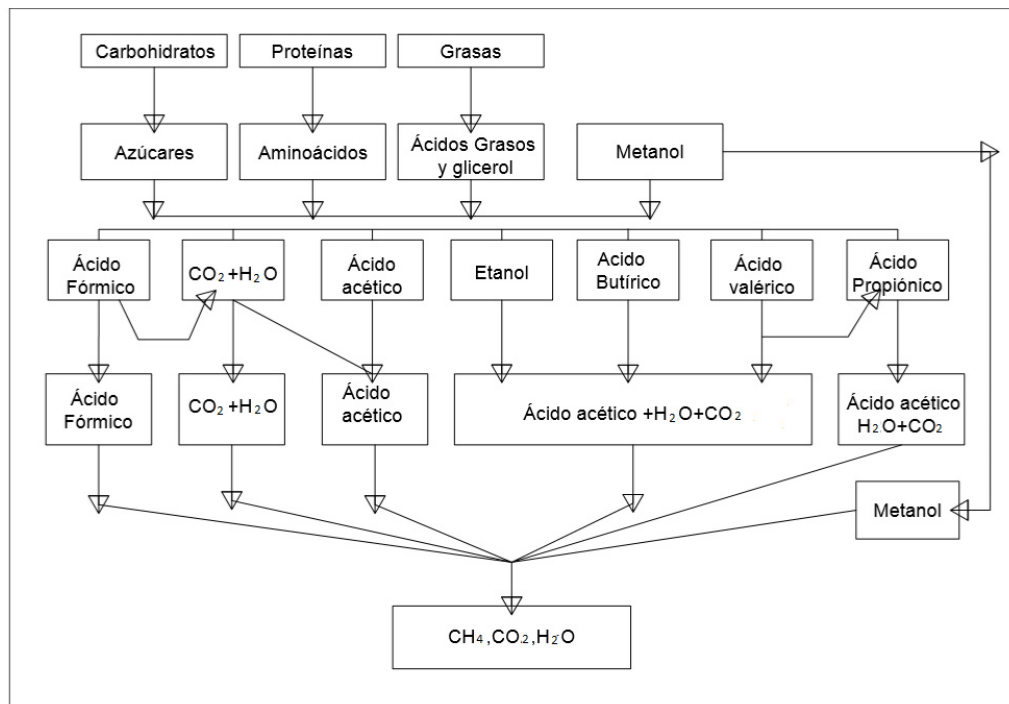
el proceso anaeróbico, especialmente en la etapa de metanogénesis, además reducen el porcentaje de degradación de la materia orgánica y son perjudiciales para el medio ambiente.

Para un correcto tratamiento anaeróbico se deben de tener ciertas condiciones específicas las cuales son:

- pH cercano a la neutralidad (Rango: 6,4-7,6).
- Cantidad de nutrientes suficientes.
- Temperaturas adecuadas, dentro del rango entre 30°C y 38°C para el rango mesofílico (Romero, 2003).
- No tener compuestos nocivos para las aguas residuales tales como los compuestos sulfurados, y compuestos inorgánicos no degradables.
- Correcta hermeticidad para evitar la entrada de O<sub>2</sub>.

Si no se cumple con estas condiciones se puede afectar la remoción de la materia orgánica y la producción de biogás.

El esquema de la digestión anaeróbica se la resume en el siguiente gráfico.



**Figura 2.1.- Oxidación Anaeróbica de compuestos orgánicos.- FUENTE: Tratamiento de Aguas Residuales; Autor: Jairo Alberto Romero Rojas; Octava Edición.**

### **2.3. Inhibiciones del proceso anaeróbico**

Las inhibiciones de un proceso anaeróbico se pueden dar por diferentes circunstancias y factores fisicoquímicos los cuales están ligados al no cumplimiento de las condiciones óptimas del proceso descritas anteriormente.

Los principales efectos que se aprecian en una posible inhibición del proceso anaeróbico son principalmente la disminución de la generación del biogás y la disminución del porcentaje de degradabilidad del compuesto orgánico. Además de esto se tienen otros efectos tales como la falta de estabilidad al someterlo a diferentes cargas orgánicas, y una respuesta lenta a las condiciones de parada y arranque del proceso anaeróbico.

Los componentes inorgánicos que inhiben el proceso anaeróbico son los metales pesados y los cationes mono y divalentes como el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ , y  $\text{Mg}^{++}$ , pero el componente más importante en la inhibición es la presencia de los compuestos sulfurados ya que dan lugar a la formación de  $\text{H}_2\text{S}$ , aumentando el pH del agua. (Romero, 2003)

### **2.4. Reactores anaeróbicos UASB**

Para la realización del sistema de tratamiento anaeróbico se pueden utilizar diversos mecanismos, entre los cuales encontramos al reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Este tipo de reactor posee el sistema de

tratamiento anaeróbico más eficiente comparado con los demás métodos de tratamiento anaeróbico según estudios realizados. Este porcentaje de eficiencia llega hasta un máximo de 85% (Lettinga, 1994).

El sistema de tratamiento de aguas residuales que se lleva a cabo en el reactor UASB, consta de un sistema de alimentación para el afluente en la parte inferior del reactor en donde se encuentran un conjunto de bacterias anaeróbicas que viven en forma simbiótica para la degradación de la materia orgánica presente. La biomasa que aquí se aloja no necesita de un soporte adicional ya que posee una consistencia compacta en forma de pequeños peletes, sin la formación excesiva de lodo residual bacteriano. Además en la parte superior se encuentra el sistema de recolección de biogás.

Para la utilización de un sistema de tratamiento anaeróbico en un reactor UASB se recomienda tener una relación de la DBO/ DQO en un rango de 0,3 a 0,7. La degradación de la materia orgánica ocurre en el lecho donde se encuentran las bacterias, donde se realizan las tres etapas de la digestión anaeróbica en forma simultánea.

El reactor UASB posee una fase sólida compuesta del lodo bacteriano, de una fase líquida compuesta del sustrato de alimentación, y de una fase gaseosa compuesta del biogás generado por las bacterias anaeróbicas. Por este motivo se considera como un sistema trifásico altamente eficiente (Lettinga, 1994).

#### **2.4.1. Parámetros de control en un reactor UASB**

Para el correcto funcionamiento de un reactor UASB se tienen que controlar diferentes parámetros físicos y químicos tanto del sustrato de entrada (agua residual), y de las bacterias anaeróbicas. Estos parámetros son los siguientes:

##### **2.4.1.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno requerida por los compuestos orgánicos o microorganismos existentes en el afluente o sustrato para degradar la materia orgánica presente, las unidades en la cual se mide este parámetro son los miligramos de oxígeno por litro de sustrato alimentado (mg DBO/ L). Esta prueba se la realiza durante un periodo de cinco días a una temperatura de incubación de 20°C en presencia de un caldo de nutrientes (Romero, 2003).

##### **2.4.1.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de materia orgánica e inorgánica oxidable químicamente en un sustrato, esta oxidación se la realiza con un agente químico altamente oxidante que por lo general es el  $K_2Cr_2O_7$ , en un medio ácido y a alta temperatura. La DQO resulta ser un parámetro más eficiente con respecto a la DBO ya que este ensayo se lo puede realizar en pocas horas, en comparación con el ensayo de la DBO que dura 5 días, pero no debe de restar importancia al momento de la realización de ambos parámetros.

Si la muestra posee solo materia orgánica, se considera la DQO y la DBO como iguales (Romero, 2003).

#### **2.4.1.3. pH**

Para la supervivencia de las bacterias anaeróbicas se requiere trabajar con un pH entre 6,5-7,5; valores fuera de este rango provocarían un mal funcionamiento de las bacterias anaeróbicas; y la generación de ácidos grasos los cuales no son degradados hasta la última etapa del proceso, provocando así una acidificación del efluente. (Romero, 2003).

Si se acidifica demasiado el efluente es un indicador que no se está cumpliendo en su totalidad el proceso de la degradación de la materia orgánica sino que más bien se está llegando solo hasta la acidogénesis.

#### **2.4.1.4. Temperatura**

La temperatura de trabajo para un sistema de tratamiento de aguas anaeróbico se pueden clasificar en tres rangos de temperaturas de trabajo las cuales son los psicrófilo (15°C – 25°C), mesofílico (25°C- 45°C), termofílico (55°C – 65°C). Rangos importantes para la determinación de las condiciones de trabajo con las cuales se va tener el reactor UASB.

La temperatura es uno de los factores más importantes en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales ya que de él dependen otros parámetros que están íntimamente relacionados con este, los cuales afectarían al sistema.

En primer lugar se debe realizar el proceso anaeróbico a temperaturas mayores a 15°C ya que por debajo de este valor se tiene una inhibición completa de la degradación de la materia orgánica; además de esto para el sistema de tratamiento anaeróbico en el rango de temperatura mesofílico (25°C- 45°C), una temperatura alrededor de los 32 °C es un valor adecuado para un sistema de tratamiento óptimo (Romero, 2003).

Si existen cambios bruscos de temperatura en el sistema, provocarían un efecto adverso en el proceso de degradación de la materia orgánica. La temperatura además juega un papel importante en el valor del pH ya que al existir un aumento de la temperatura el valor del pH disminuye y al existir un descenso en la temperatura, el valor de pH aumenta. Por ese motivo se debe tener un debido control de la temperatura y pH.

#### **2.4.1.5. Sólidos Totales (ST)**

El análisis de los sólidos totales (ST) es muy importante en un sistema de tratamiento de aguas residuales ya que permiten verificar la cantidad de materia suspendida en el sustrato. Los ST pueden clasificarse como sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Los ST en las aguas residuales están dentro del rango de 350-1200 mg/L. (TULSMA, tabla 11).

Para las bacterias anaeróbicas también se deben realizar un análisis de ST, así como también sólidos totales fijos (STF) y los sólidos totales volátiles (STV). Los STF representan la cantidad de materia inorgánica o estructural presente en las bacterias; son los que se encuentran al final de la ignición de la muestra. Los STV son los sólidos que se han evaporado durante la ignición de la muestra a altas temperaturas representando esto la cantidad de materia orgánica presente en la biomasa.

#### 2.4.2. Otros parámetros

Además de los parámetros anteriores existen otros que hay que tener en cuenta para el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales anaeróbico. Estos son:

- Tiempo de retención hidráulica. (s)
- Velocidad ascensional. (m/s)
- velocidad de sedimentación. (m/s)
- Fosforo total.
- Nitrógeno.
- Relación C/N/P.
- Relación F/M.



### **Tiempo de retención hidráulica (TRH)**

El tiempo de retención hidráulica es la medida de tiempo en la cual se tiene el sustrato dentro del reactor UASB realizando el correspondiente tratamiento. Y se la calcula dividiendo el volumen efectivo del reactor UASB para el caudal de ingreso del sustrato. A mayor tiempo de retención hidráulica, mayor será el contacto sustrato biomasa favoreciendo así el sistema de tratamiento de aguas residuales (Moreno, 2008).

$$t_{RH} = \frac{V}{Q}$$

Donde:

$t_{RH}$ = tiempo de retención hidráulica (s)

$Q$ = caudal del afluente ( $m^3$ )

$V$ = volumen del reactor ( $m^3$ )

### **Velocidad Ascensional**

Se define como velocidad ascensional a la velocidad en la cual un fluido sube por diferencia de presiones teniendo en cuenta el efecto de la gravedad que este produce sobre este (Lettina, 1994). La fórmula utilizada para la determinación de este parámetro se detalla a continuación.

$$V = 2.33 \left( \sqrt{\frac{Q}{g \cdot t^3}} \right)$$

Donde:

- $V$  : velocidad ascensional (m/s)
- $Q$  : caudal ( $m^3/s$ )
- $g$  : aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

- $t$  : tiempo de retención hidráulica (s)

### **Velocidad de Sedimentación**

La velocidad de sedimentación es un fenómeno natural llevado a cabo por efectos gravitatorios en los cuales se tiene la caída de las partículas hacia el fondo del reactor UASB (Conil, 2013), en la cual se tiene que:

$$V_s = 0,22 \left( \frac{\rho_a - \rho}{\rho} g \right)^{2/3} \left[ \frac{d}{(\mu/\rho)^{1/3}} \right]$$

- $V_s$  : velocidad de sedimentación (m/s)
- $d$ : diámetro de la partícula (m)
- $g$ : aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $\rho_a$  : densidad de la partícula (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho$  : densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  : viscosidad del fluido

### **Fosforo total**

La medida del fosforo total es fundamental ya que es un compuesto esencial en la estructura de las bacterias. Las formas usuales de presencia de fosforo son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos, los cuales son necesarios para el metabolismo bacteriano.

La cantidad de fosforo total se determina por colorimetría haciendo reaccionar al sustrato con molibdato de amonio para que los polifosfatos y el fosforo orgánico sean

convertidos en ortofosfatos, los que finalmente son medidos. (Método 957.02, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA AWWA WPCF).

### **Nitrógeno Total**

Al igual que el fósforo, el nitrógeno un componente esencial para el metabolismo bacteriano; las formas de interés del nitrógeno en aguas residuales son las de nitrógeno orgánico (proteínas y ácidos nucleicos), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrógeno de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos( $\text{NO}_3^-$ ), todas estas formas son inconvertibles bioquímicamente. Se denomina Nitrógeno Kjeldahl, al nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal.

### **Relación C/N/P**

La relación C/N/P es la relación de nutrientes que debe existir en el agua residual para un correcto balance de nutrientes hacia las bacterias anaeróbicas. Esta relación también se la conoce como la relación DBO/N/P, ya que todo el carbono presente en esta relación debe ser el carbono orgánico biodegradable. El fósforo de esta relación es el fosforo total presente en el sustrato y el nitrógeno es el nitrógeno Kjeldahl.

La relación C/N/P que debe existir para un tratamiento biológico anaeróbico en un sustrato de alimentación para la biomasa debe ser igual a 100/1/0,1(Romero, 2003).

**Relación F/M**

La relación F/M está definida como la cantidad de masa de DBO que van a ser digeridas por las bacterias dividida por la cantidad de sólidos suspendidos volátiles (cantidad de materia orgánica presente en las bacterias) que ingresan al biodigestor por día.

$$\frac{F}{M} = \frac{g \text{ DBO} / \text{día}}{g \text{ SSV}}$$

Para un tratamiento anaeróbico la relación F/M óptima se encuentra dentro del rango de 0,10-0,25 (Romero, 2003)

## **Capítulo 3**

# **Descripción de los procesos productivos de la industria cafetera**

### **3. Descripción de los procesos productivos de la industria cafetera**

Antes de conocer el sistema de funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria bajo estudio es importante conocer cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la misma, procesos que a su vez producen aguas residuales, y estas aguas convergen en una sola tubería, la cual llega al primer tanque del sistema de tratamiento de aguas residuales.

La empresa fabrica productos de exportación tales como: café instantáneo Spray, y café instantáneo Frezze, además de la venta a nivel local de los mismos productos. Para la elaboración de estos consumibles se realizan los siguientes procesos:

#### **Producción.**

La empresa principalmente produce dos tipos de café solubles: Café instantáneos Spray, y café instantáneo Frezze.

En la producción del café soluble Spray, y el café soluble Frezze parten de un mismo proceso en común, es en la parte final del secado del extracto en donde se separan o se realizan las dos clases de café.

## **Proceso de elaboración de café soluble.**

- **Beneficio (Recepción, Almacenamiento y Limpieza del Grano de Café)**

En la primera fase del proceso, el café en grano se lo acopia en sacos y se almacena en pallets, en la bodega asignada.

Antes de ingresar al proceso, el Café Verde, se somete a un maquinado donde por medio de una zaranda y una despedradora es separado de polvo, clavos, piedras y cualquier otro material extraño. Una vez limpio, se lo envía por transportadores neumáticos a los Silos. Donde se realiza el primer lavado del grano.

- **Torrefacción (Tostado)**

El café en grano transportado desde los silos, es tostado en un equipo continuo a temperaturas entre 220 y 240 °C durante un tiempo de 7 a 12 min; luego de lo cual el café tostado se almacena en Tolvas.

- **Molienda**

Previo al proceso de extracción de sólidos solubles, el café tostado es triturado a una granulometría adecuada en un molino de rodillos.

- **Extracción**

La Extracción, propiamente dicha, es la obtención, a partir del café tostado y molido, de los sólidos solubles presentes en el grano de café.

El café tostado y molido es introducido desde una tolva de alimentación transportable linealmente hacia los extractores (dos líneas de seis extractores cada una), en donde la extracción se lleva a cabo mediante el principio tipo Batch en contra corriente.

Los residuos producidos en el proceso es un desecho sólido insoluble denominado bagazo, que se origina cuando el residuo de la extracción es descargado a través de una tubería a un ciclón, para la separación del vapor de agua que sale a la atmósfera y el bagazo. El bagazo luego es depositado en una tolva para luego ser desechado y recolectado por la compañía recolectora de basura municipal. Parte del bagazo también se lo vende como abono de jardinería.

- **Almacenamiento del extracto bruto**

El extracto de café que sale del proceso de extracción con una concentración de 20 a 26 °Bx (grados Brix), es enfriado de 105 °C a 50 °C; luego es pesado, filtrado y almacenado a un rango de temperatura entre 15 y 20 °C.

- **Centrifugación del extracto**

La fase de centrifugado sirve para separar los sólidos no solubles presentes en el extracto de café. Los residuos sólidos son descargados automáticamente por la centrífuga, junto con el extracto, a un tanque de separación sólido / líquido.

El extracto centrifugado es almacenado, y los residuos sólidos son recogidos y enviados al sistema de recolección de basura municipal.



- **Concentración por evaporación del extracto**

Esta fase del proceso se incrementa o enriquece la concentración de sólidos solubles que sale de la fase de extracción. Para esto se utiliza el proceso de retro-evaporación al vacío, que consiste en un evaporador que permite entrar una capa muy delgada del extracto de café sobre unos conos que rotan y que al mismo tiempo son calentados por vapor de agua. La evaporación se realiza al vacío.

La concentración de sólidos en el extracto del café se incrementa de 20 - 25 °Brix a 41-52 °Brix.

El agua evaporada en el proceso es condensada y eliminada como una descarga líquida al sistema de tratamiento de aguas residuales

- **Enfriamiento del extracto concentrado**

El extracto concentrado final es enfriado a una temperatura entre 12 - 18 °C, por medio de un intercambiador de placas.

- **Almacenamiento del extracto**

Luego del enfriamiento del extracto concentrado se procede al almacenamiento en un tanque dividido en dos, el extracto posteriormente pasa por dos procesos de secado diferentes.

- **Secado del extracto**

Por atomización (*spray dried*)

El extracto concentrado líquido es atomizado en partículas muy pequeñas, que al ser atravesadas por una corriente de aire caliente transfiere la mayor parte de su agua, quedando sólidos en forma de polvo.

Por liofilización (*freeze dried*)

La liofilización es un proceso de secado (eliminación de agua) del extracto de café, previamente congelado (-40 °C), a un alto vacío y a una temperatura bajo el punto de congelamiento del agua. De esta manera, el agua que se encuentra en estado sólido en el extracto del café es removida como vapor de agua sin pasar a través del estado líquido (sublimación).

## **Empaque**

El café secado por atomización o liofilización es finalmente envasado tanto para el consumo local como para la exportación. Las presentaciones del producto son:

- Café liofilizado y atomizado en fundas de polietileno de 25 kg (exportación)
- Café liofilizado en sobres de folio-aluminio de 25 g
- Café liofilizado en frascos de 50, 85 y 150 g

- Café atomizado en sobres de folio-aluminio de 10 y 50 g
- Café atomizado en frascos de vidrio con 50 y 200 g
- Café concentrado líquido en tambores metálicos de 220 kg

El producto terminado y empacado es finalmente almacenado en bodegas hasta su despacho para los diferentes mercados.

#### **Análisis realizados en el Área de Laboratorio de la empresa:**

En el laboratorio se realizan los siguientes análisis:

- Catación
- Color
- Humedad
- pH

Al producto terminado se le realizan los siguientes análisis:

- Densidad no vibrada.
- Densidad vibrada.
- Color humedad.
- Distribución parcial.
- pH.

- Catación.

Cada uno de estos análisis son importantes para una asegurar la fabricación de un buen producto, seguir con los protocolos exigidos para la venta de los mismos, y además de llevar el control de calidad de producción. Con los análisis del producto terminado se puede asegurar lo corroborado en los análisis anteriores, y además un respaldo al momento de entregar la mercadería.

Una vez que tenemos la idea del funcionamiento de la empresa en el proceso de fabricación del café ya podemos proceder con el estudio detallado de planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra en la misma empresa.

### ***3.1. Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales de la empresa productora de café***

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa se compone principalmente de varias etapas, caracterizado por los diferentes tanques presentes en el tratamiento, los cuales son: tanque ecualizador, tanque de floculación-coagulación, reactor biológico, y tanques de clarificación. En los cuales se realiza proceso descrito a continuación.

El sistema de tratamiento de agua comienza con el tanque ecualizador el cual es un tanque circular sin techo, en el cual ingresa el agua cruda (agua residual a tratarse) de

alimentación al sistema, donde en primer lugar el agua pasa por una rejilla donde se retienen las partículas de gran tamaño, en dicho tanque, además de eso, posee una corriente de recirculación, proveniente del fondo del mismo. También posee un sistema de tuberías en el cual cuando se sobrepasa el nivel de recepción de agua residual se envía por diferencia de niveles hacia el tanque de aireación, que se detallara más adelante. Este primer tanque de recepción de agua cruda, consta con un sistema de aireación con el objetivo de mantener uniforme la mezcla de agua cruda que va a ingresar al sistema de floculación-coagulación, además de esto indirectamente se comienza con el tratamiento aeróbico del agua residual

Luego el agua pasa al sistema de floculación y coagulación, compuesta de un sistema de tuberías. La floculación y coagulación, se realiza por medio de agentes químicos los cuales son el sulfato de Aluminio tipo A y el Polímero EXRO 651, este polímero es una poliacrilamida de alto peso molecular de carácter levemente catiónico utilizado eficientemente en los procesos de espesamiento y agua residuales, como floculante en la clarificación de aguas de pozo.

Estos dos compuestos químicos son preparados en tanques de agitación continua que poseen una capacidad aproximada de 55 gal, para luego enviarlos al tanque sedimentador con la disolución correcta, pasando previamente por un sistema de dosificación de estos componentes. Estos tanques de mezclas sirven para suministrar al sistema de floculación-coagulación durante aproximadamente 8 h de trabajo.

La solución de los químicos ya preparados posee una consistencia muy viscosa y pegajosa, y la concentración de los mismos es de aproximadamente 400 ppm. Las dos corrientes poseen líneas individuales las cuales son ingresadas directamente al sistema de floculación y coagulación. La mezcla de estas dos corrientes es de color amarillenta con una consistencia muy viscosa. Cuyos efectos visibles sobre el agua residual son los de formar una masa compacta de lodo.

La recolección de lodos a través de las barredoras se lleva a cabo por medio de compactadoras de lodo los cuales dejan al lodo con una mayor cantidad de sólidos, formando una masa compacta, la cual pasa a través de un filtro prensa, lista para ser desechada a la basura. Este proceso se lo realiza cada 10 h.

El agua que sale del tanque sedimentador pasa hacia el tanque de aireación que esencialmente es el reactor biológico, en el cual se realiza el sistema de tratamiento aeróbico del agua. Por este motivo se debe la constante aireación del tanque, esta aireación además permite el constante movimiento del agua a tratarse, favoreciendo así la cinética de la reacción que producen las bacterias aeróbicas.

El agua tratada pasa hacia tanques de menores dimensiones por diferencias de niveles, este nuevo tanque es el de clarificación, el cual no posee aireación, permitiendo que las partículas se sedimenten y se recojan en otro tanque contiguo a este. El lodo recolectado

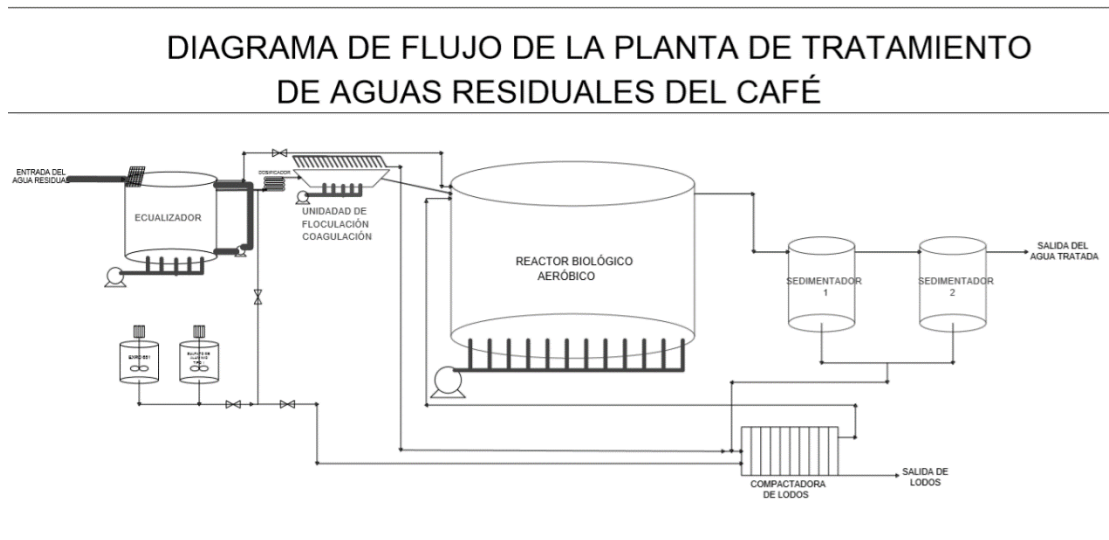
es enviado hacia una tolva en el cual se inyectan flocculantes para precipitar la materia suspendida en forma coloidal, y luego poder tratarlo en el filtro prensa.

El agua sale tanque clarificador por diferencia de niveles, hacia un segundo tanque clarificador, para poder retirar los sólidos que aún podrían quedar en el agua residual, dando lugar a la disposición final del agua hacia el alcantarillado público.

La planta de tratamiento de aguas residuales envía hacia el alcantarillado público alrededor de 125 a 130 m<sup>3</sup>/día aproximadamente, como agua tratada. El agua tratada es enviada por medio de un sistema de tuberías hacia la parte posterior de la fábrica. Las descargas de agua residual tratada poseen una carga orgánica aproximada de 80 mg DBO/L, y 485 mg DQO/L, teniendo así un porcentaje de remoción de carga orgánica significativo, comparado con la carga orgánica inicial que es aproximadamente de 4000 mg DBO/L y de 6500 mg DQO /L, cumpliendo así con la normativa ambiental vigente (ANEXO VI). Todos estos datos técnicos han sido recolectados de las diversas visitas que se realizaron en la planta.

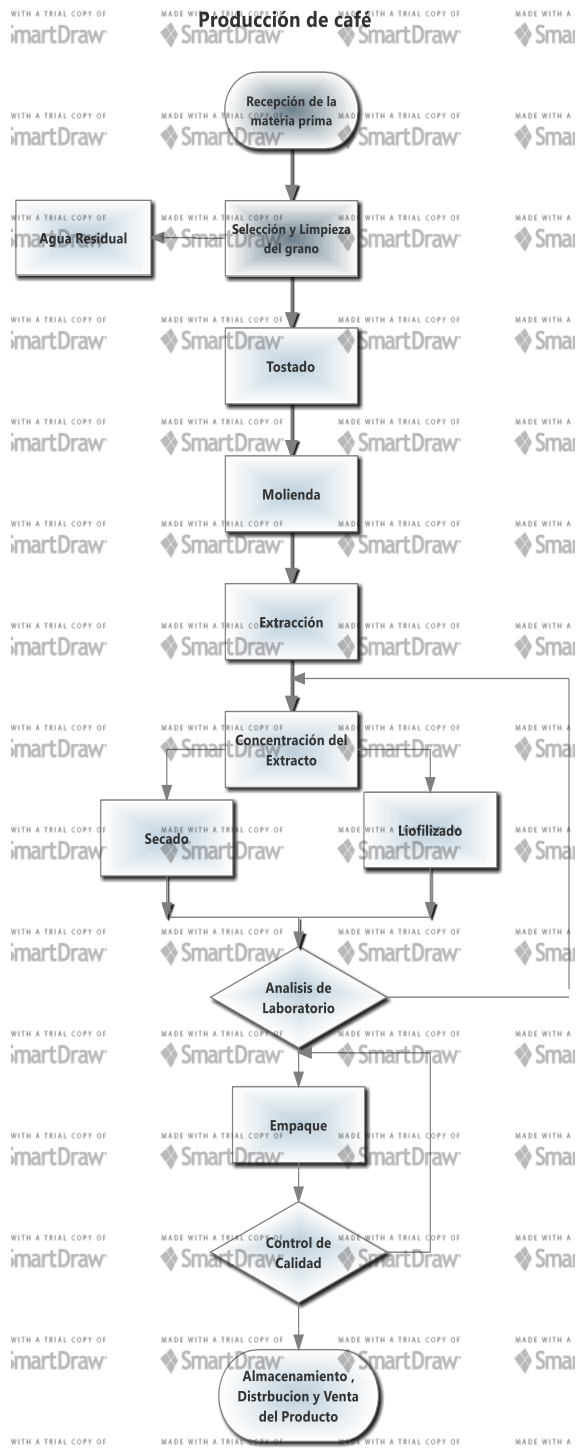
Existe una particularidad en el proceso de producción de la empresa, el cual consiste en el lavado de las tuberías de desagüe con legía (98% de NaOH), que por sus características físico-químicas le da un carácter altamente básico al agua residual que se genera en la planta a esas horas del día donde se realiza esta actividad. Este lavado se lo realiza principalmente al inicio de cada lote de producción, ya que naturalmente el agua residual de la industria cafetera posee un pH de 4-5.

A continuación se detalla el diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa cafetera en estudio.

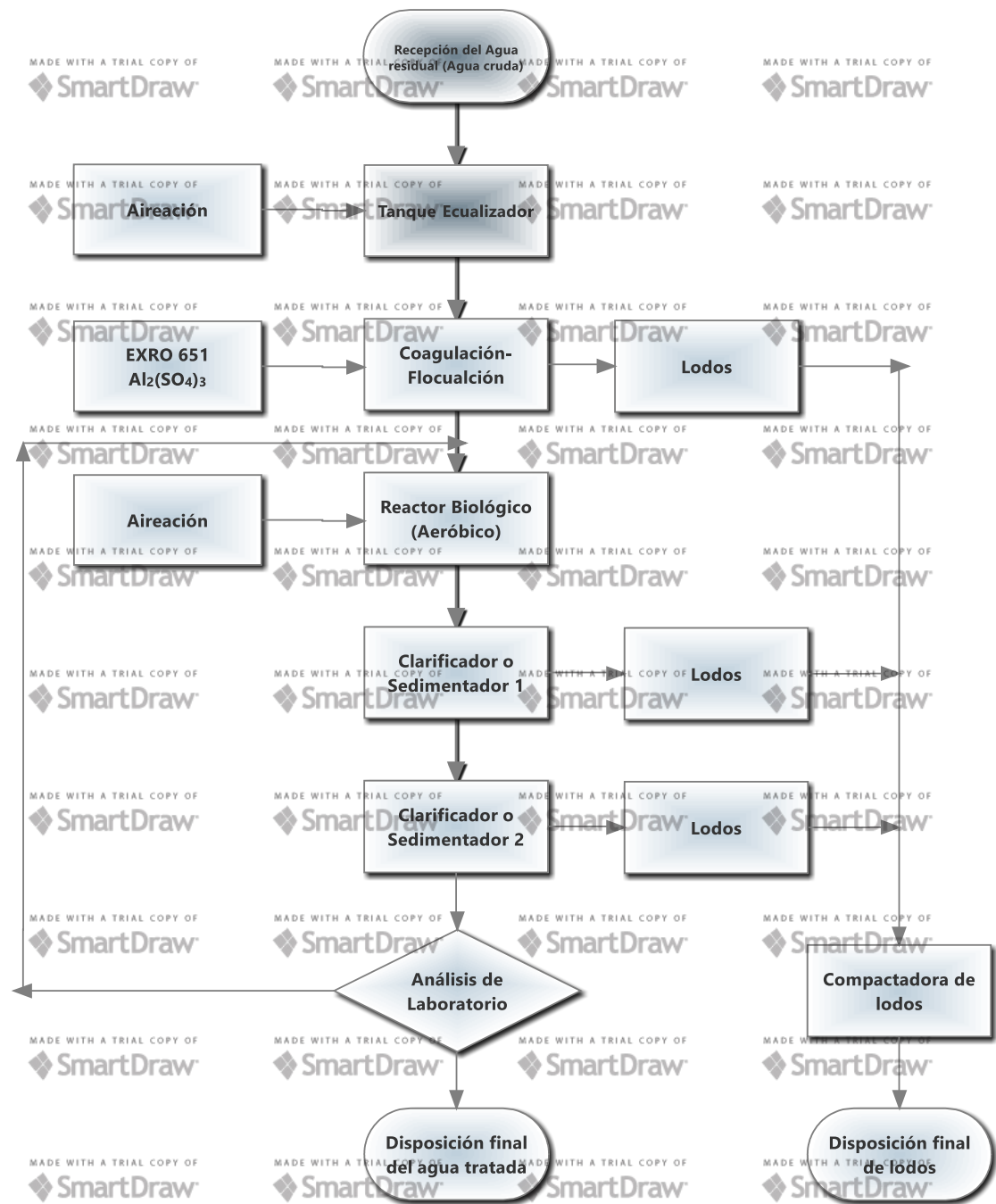


**Figura 3.1.- Diagrama de flujo de procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales.**  
**Fuente: Alcívar 2014**





**Figura 3.2.- Diagrama de flujo de la producción de café. Fuente: Alcívar 2014**



**Figura 3.3.- Diagrama de Flujo del sistema de tratamiento aeróbico de aguas residuales de la empresa. Fuente: Alcívar 2014**

### 3.2. Características físico químicas del agua residual del café

Los análisis que se realizan corrientemente en la empresa para medir la calidad del agua residual tanto de entrada, salida y durante el proceso son: DQO, temperatura, conductividad, SST, turbiedad, y pH.

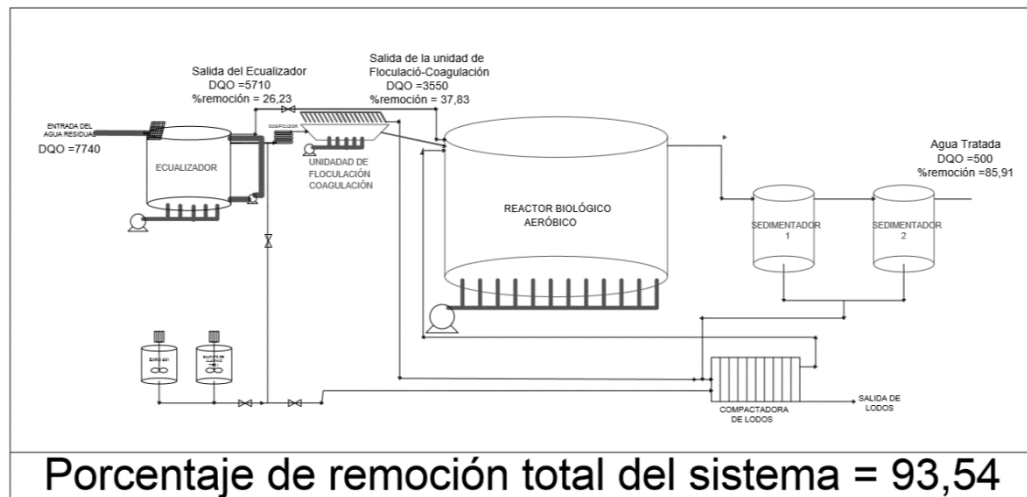
Todos estos análisis se realizan en los diferentes tanques involucrados en el proceso de tratamiento. Los valores promedios de estos análisis se detallan en la siguiente tabla 3.1.

**Tabla 3.1.- Parámetros medidos en la planta de tratamiento de Aguas Residuales en un día de producción. Fuente: Datos de la Empresa.**

Parámetros	DQO	Temperatura.	conductividad	Sólidos suspendidos	turbidez	pH	Volumen de lodo	Oxígeno disuelto
Unidades	mg O <sub>2</sub> /L	°C	μS/cm	mg/L	FAU	u	mg/l	mg/L
Tanque Ecuilizador	7110	36	144,1	1640	2650	4,5	-----	-----
Salida del tanque floculación y coagulación	4950	36	159,6	182	306	4	-----	-----
Reactor biológico	-----	34	1767	7180	-----	7	915	4,19
Salida del tanque Clarificador	485	35	1885	154	304	7	-----	-----

### **Porcentajes de remoción del contaminante en el agua residual**

La figura 3.4 muestra los porcentajes de remoción promedios de contaminante que se dan en la empresa.



**Figura 3.4.-Porcentaje de remoción promedios de la empresa. Fuente: Alcívar 2014**

## **Capítulo 4**

### **Parte Experimental**

#### 4. Parte Experimental

##### Materiales y reactivos

- Matraz Erlenmeyer de 500 y 1000 ml.
- Mangueras plásticas de ½ pulgada.
- Tapones de caucho N° 8.
- Cubeta macetera rectangular de 60 cm longitud, 14 cm alto.
- Torres recolectoras de gas por desplazamiento de H<sub>2</sub>O de capacidad de 1,8 y 3,4 litros.
- Bombas de vacío de 1/6 HP.
- Soporte universal.
- Agarraderas de pinzas.
- Desecador.
- Probetas de (100 ±0,1) ml.
- Balanza Analítica.- capacidad máxima de 250 g.
- pHmetro digital rango (0-14).
- Agitador de vidrio.
- Crisol de 30 ml.
- Estufa .-temperatura máxima de 100°C
- Mufla.- temperatura máxima de 700°C
- Termómetros.
- Bombas de flujo continuo.

- Digestor UASB.

#### 4.1. Análisis preliminares del agua residual de café

Se realizaron para el agua residual bajo estudio (afluente) análisis preliminares de los siguientes parámetros básicos: DBO, DQO, fósforo total ( $P_{TOT}$ ) y, nitrógeno total Kjeldahl. Los resultados se detallan en la tabla 4.1:

**Tabla 4.1.- Resultados de Análisis Preliminares realizados al agua residual de café de un día de muestreo. Fuente: Laboratorio Marcos**

Parámetro	Resultado
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	4040 mg O <sub>2</sub> /L
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	6480 mg O <sub>2</sub> /L
<b>Fosforo Total</b>	6,46 mg/L
<b>Nitrógeno total Kjeldahl</b>	109,8 mg/L

Estos análisis preliminares se realizaron al inicio de la parte experimental en un laboratorio acreditado de la ciudad de Guayaquil (Grupo Químico Marcos), la relación DQO/DBO del agua residual de café se determina de la siguiente manera:

$$\frac{DBO}{DQO} = \frac{4040}{6480} = 0,62$$

Esta relación de DBO/DQO igual a 0.62, está dentro del rango requerido para el tratamiento biológico de aguas residuales, en este caso el anaeróbico, el cual se debe encontrar entre 0,3 y 0.7. (Romero, 2003)

#### ***4.2. Variación Diurna del Potencial de Hidrogeno del agua residual en la empresa de café***

El estudio del agua residual se lo realizó a en la entrada principal de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa durante el período Julio 2014 –Octubre 2014. El pH del agua residual cruda se lo midió en cuatro muestras compuestas tomadas en diferentes fechas. Se midió el pH de las muestras compuestas mezclando volúmenes iguales de cada una de las muestras tomadas durante el día (Romero, 2003).

El primer día de muestreo se pudo constatar los cambios de pH que existen durante un día de producción en la fábrica (anexo 4, tabla A4.1 y grafica 4.1). Estos datos indican una elevación de los niveles de pH a las 11:00 y 13:00 horas, y al final del día de producción, EL pH vuelve a su valor normal para el agua residual de café, que se encuentra entre 3 y 5.

Los datos y la gráfica del segundo día de muestreo se detallan en la tabla A4.2 y grafica A4.2 del anexo 4. Se observa que la limpieza de las tuberías se la realizó en horas posteriores a las 10:00, y luego sigue la misma tendencia de decrecimiento de pH observado el primer día de muestreo (11:00-17:00), hasta llegar a su valor usual de pH. Caber recalcar que el pH de la muestra compuesta (5,47) posee un valor similar al pH del primer día de muestreo (5,34).



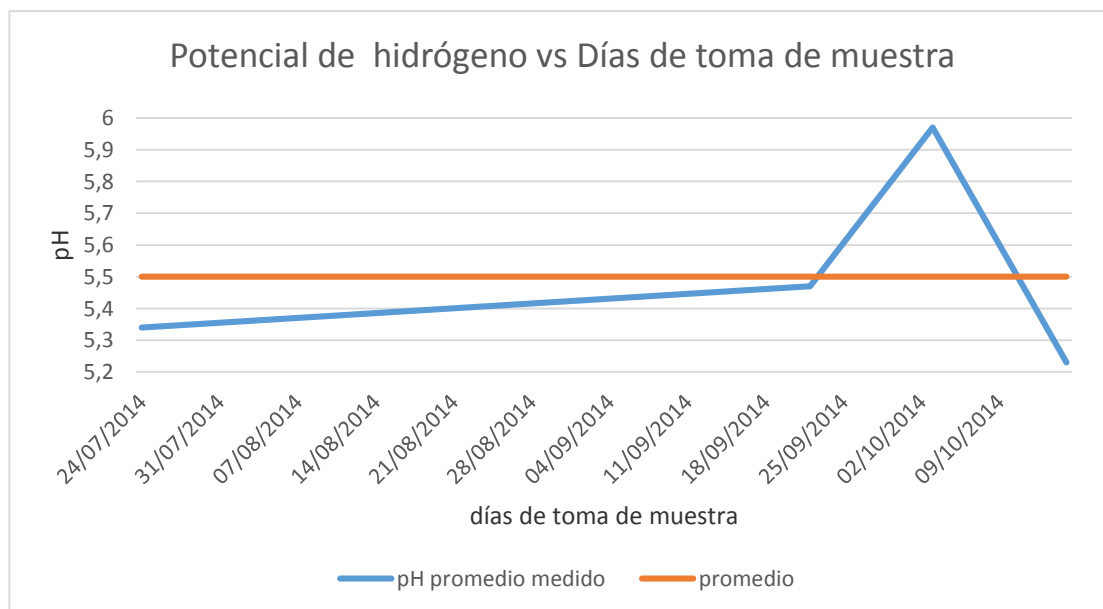
Para el tercer día de muestro se tienen los datos experimentales y la gráfica correspondiente en la tabla A4.3 y gráfica A4.3 del anexo 4. Se puede observar que el lavado de las tuberías se las realizó aproximadamente a las 12:00, y al igual que los días de muestreo anteriores; el pH vuelve a 4,5 considerado como normal para el agua residual de café.

Los datos de la variación de pH y su respectiva gráfica para el cuarto día de muestro se presentan en la tabla A4.4 y grafico A4.4 del Anexo 4. El comportamiento es similar a los días anteriores de muestreo.

A continuación se tiene los datos promedios de pH para cada día de muestreo y su respectiva gráfica.

**Tabla 4.2.- pH promedio del agua residual de la empresa. Fuente: Alcívar 2014**

<b>Día de toma de la muestra compuesta</b>	<b>pH promedio</b>
Primer día de muestreo	5,34±0,33
Segundo día de muestreo	5,47±0,34
Tercer día de muestreo	5,97±0,33
Cuarto día de muestreo	5,23±0,36
<b>pH promedio</b>	<b>5,50±0,32</b>



**Gráfico 4.1.- pH promedio del agua residual de la empresa. Fuente: Alcívar 2014**

Con estos resultados se tiene una estimación del pH promedio de la muestra compuesta de los días de trabajo, siendo este de 5,50. Este pH es bajo y se encuentra fuera del rango de crecimiento de las bacterias anaeróbicas, por lo que se hace imprescindible ajustarlo antes de comenzar el tratamiento anaeróbico.

#### **4.3. Ajuste del pH en el agua residual de café**

El pH de las muestras compuestas de café varió dependiendo si fueron dejadas al aire libre o cubiertas, en el laboratorio. Estos cambios fueron observados durante varios días de pruebas experimentales.

Otros autores sugieren que los cambios de pH de la muestra compuesta de agua residual de café se deben a la entrada del CO<sub>2</sub> presente en el aire y la variación de la temperatura, lo cual se observó como resultado de la estandarización de la misma en el laboratorio (32°C). (Romero,2003)

Los cambios de pH del sustrato estuvieron en el rango de 6,0- 8,1. Este cambio brusco de pH se realizó en un lapso de dos días, repitiéndose en varias ocasiones.

Para estabilizar el pH de las muestras se realizaron ensayos utilizando tres compuestos: NaHCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, y NaOH.

Los ensayos consistieron en preparar replicados de diferentes diluciones de muestras de café, diluciones que generan las diferentes cargas orgánicas con la que se va a trabajar en el biodigestor. Las cargas orgánicas de las diluciones fueron: 1000 mg DBO/L, 1500 mg DBO/L, 2000 mg DBO/L, 2500 mg DBO/L, 3000 mg DBO/L, 3500 mg DBO/L. En la tabla A.5 del anexo 5, se detallan estos cambios de pH.

Para el ajuste del agua residual de café se llevó la muestra de agua residual con un pH inicial de 5.96 a 7.5 con NaHCO<sub>3</sub>. Por cada 100 ml de muestra compuesta se consumieron 1,2609 g de NaHCO<sub>3</sub> lo cual equivale a un consumo de 2,5 g NaHCO<sub>3</sub> por litro de agua residual.

El consumo de  $\text{CaCO}_3$  para llevar a la muestra compuesta desde un pH de 5,96 hasta un pH de 7,5 fue de 1,4915 g por cada 100 ml de muestra compuesta (15 g  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ). Para llevar el pH de 5.96 hasta 7.5, utilizando el NaOH a una molaridad adecuada, se obtuvo un consumo de  $8,5 \times 10^{-4}$  g NaOH por litro de agua residual.

#### **4.4. Pruebas Batch**

El desarrollo de las pruebas *Batch*, además de evidenciar biodegradación y determinar el tiempo previo estimado de arranque del biodigestor; permite una correcta aclimatización de las bacterias anaeróbicas al agua residual.

Se prepararon dos pruebas Batch las cuales consistieron en colocar a la primera una solución estándar de  $\text{CH}_3\text{COONa}$  y a la segunda con agua residual de café, y para cada una de las cuales se agregó 250 ml de lodo bacteriano en los matraz Erlenmeyer, con aproximadamente 100 ml del sustrato respectivo, a una temperatura de 26 °C.

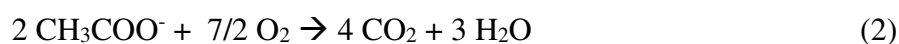
##### **4.4.1 Análisis de la biomasa anaeróbica**

Las bacterias anaeróbicas utilizadas en el estudio fueron traídas desde una empresa cervecera ubicada en la ciudad de Quito, que utiliza procesos anaeróbicos para el tratamiento de sus aguas residuales. Estas fueron utilizadas en las pruebas *Batch* y son un conglomerado de bacterias anaeróbicas conteniendo bacterias metanogénicas.

Se determinó la densidad de las bacterias en la biomasa bacteriana y la cantidad de sólidos suspendidos volátiles (SSV) para la misma. Los resultados de la densidad reportan un valor igual a 0,82 g/ml. Los SSV se realizaron por duplicado y se obtuvo un promedio de 649,11 g SSV. L<sup>-1</sup>. Estos dos parámetros de densidad bacteriana y los sólidos volátiles sirven para la determinación de la relación (F/M).

#### 4.4.2 Preparación del sustrato de acetato de sodio

Se utilizó CH<sub>3</sub>COONa como sustancia estándar, el cual es totalmente biodegradable, con una DQO de 0,95 g DQO/L. Los cálculos se detallan a continuación:



$$\frac{1 \text{ mol CH}_3\text{COO}^-}{59 \text{ g CH}_3\text{COO}^-} \times \frac{7}{2} \frac{\text{mol O}_2}{\text{mol CH}_3\text{COO}^-} \times \frac{32 \text{ g O}_2}{1 \text{ mol de O}_2} = 0,95 \frac{\text{g O}_2}{\text{g CH}_3\text{COO}^-}$$

#### 4.4.3 Pruebas Batch y Producción de Biogás

La recolección de biogás en las pruebas Batch se la hizo por el método de desplazamiento de gas por agua. Para la recolección de biogás se usaron las torres de

recolección de biogás y las respectivas bombas de vacío. El agua utilizada en este sistema debe estar acidulada hasta llegar a un pH menor a 3, debido a que en una solución ácida el CO<sub>2</sub>, no se solubiliza, y se obtiene la producción de biogás de una manera más efectiva.

De acuerdo a la bibliografía, por cada gramo de DBO o DQO biodegradable se produce la mitad del valor en litros de biogás (Romero, 2003), así:

$$200 \text{ ml de biogas} \times \frac{1 \text{ gr de DQO}}{500 \text{ ml de biogas}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}} = 400 \text{ mg de DBO}$$

$$400 \text{ mg de DBO} \div 100 \text{ ml de sustrato} = 4 \frac{\text{mg DBO}}{\text{ml de sustrato}}$$

$$4 \frac{\text{mg DBO}}{\text{ml de sustrato}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} = 4000 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}}$$

## 4.5 Pruebas con el Biodigestor UASB

### 4.5.1 Descripción del biodigestor

El biodigestor utilizado en la parte experimental fue un reactor UASB de flujo ascendente con lecho fluidizado; este tiene en la parte inferior un sistema para alimentación del afluente. Al ascender, el afluente tiene que atravesar el lecho bacteriano, colocado también en el fondo. La biomasa que aquí se aloja, no necesita de un soporte adicional ya que posee una consistencia compacta en forma de pequeños

peletes, sin la formación excesiva de lodo residual bacteriano. En la parte superior se encuentra el sistema de recolección de biogás el cual consiste en una campana ovoidea con una pequeña apertura en la parte superior. Así, el reactor UASB posee una fase sólida compuesta de lodo bacteriano, de una fase líquida denominado sustrato de alimentación, y de una fase gaseosa del biogás generado por las bacterias anaeróbicas. Por este motivo se considera como un sistema trifásico altamente eficiente (Lettinga, 1994).

Para tener un análisis detallado del digester y de las variables físicas involucradas en el mismo, se hará un análisis computarizado realizado con la ayuda del software ANSYS®, el cual nos permite realizar cambios a las variables físicas gobernantes en el reactor.



**Figura 4.1.- Fotografía del reactor UASB. Fuente: Alcívar 2014**

El reactor UASB al tener medidas a escala laboratorio, se trabaja con caudales de ingreso bajos al igual que las otras variables fisicoquímicos que involucran el estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Gracias a la ayuda del programa informático, primero se realiza el diseño del reactor UASB con todas sus correspondientes medidas en un gráfico 3D.

Con la geometría del reactor se procede con la limitación de las fronteras de la geometría del reactor, que en programa se definen como framework, indicando cuales son paredes las paredes del equipo, las entradas y las salidas del mismo.

Con la delimitación correcta de la frontera del equipo, se definen las variables con las cuales se van a trabajar tales como: las características físicas del fluido de entrada, densidad, tipo de fluido, régimen de trabajo, temperatura del sistema, caudales de alimentación, y presión total del sistema. Todos estos datos requeridos por el programa se detallan en la tabla 4.3.



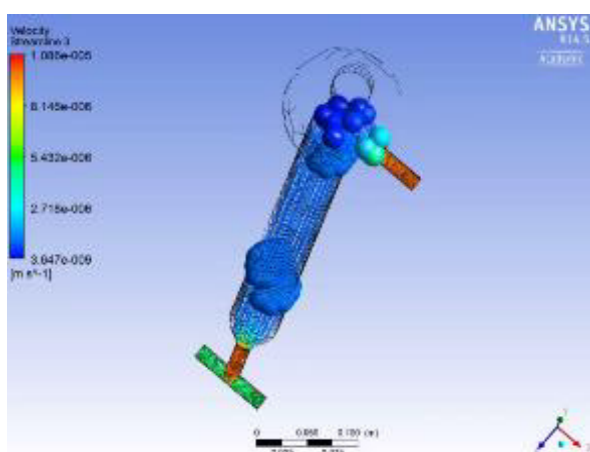
**Tabla 4.3.- Propiedades del fluido a ingresar en el reactor UASB en el programa ANSYS.  
Fuente: Alcívar 2014**

Parámetro	Unidades	Valor ingresado
Densidad del fluido (afluente)	g/ml	1,02
Tipo de fluido	-----	Newtoniano
Régimen del fluido	-----	Laminar
Caudal del afluente	ml/min	2,5
Presión del sistema	atm	1

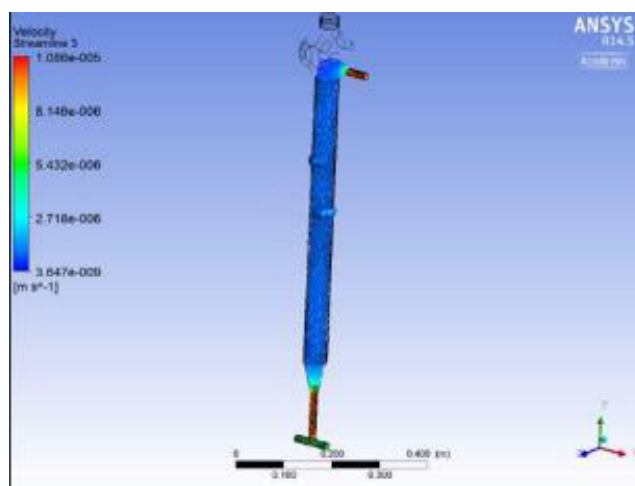
Para cada una de estas condiciones se tiene que la densidad del agua residual es ligeramente superior a la densidad del agua, ya que posee compuestos intrínsecos propios que afectan la densidad. Además de esto se considera un fluido newtoniano ya que no existen cambios en la viscosidad al momento de ejercer esfuerzo cortante longitudinal y transversal sobre la superficie del agua residual.

Se considera que el sistema tiene como entrada un tipo de fluido con régimen laminar ya que al manejar caudales y diámetros bajos, da lugar a este tipo de régimen. El caudal de entrada que se colocó como dato, es el caudal mínimo promedio de las bombas peristálticas con las que se realiza la dosificación del sustrato hacia el bioreactor.

A continuación se muestran las imágenes de la simulación realizada en el software, con los respectivos perfiles de velocidad lineal del mismo, teniendo como condiciones los datos detallados anteriormente.



**Figura 4.2.- Simulación del funcionamiento del reactor UASB en ANSYS.**  
**Fuente: Alcívar 2014**



**Figura 4.3.- Simulación del funcionamiento del reactor UASB en ANSYS.**  
**Fuente: Alcívar 2014**

Los perfiles de velocidad ascensional en el interior del reactor, tienen un valor máximo a la entrada del sistema de  $1,086 \times 10^{-5}$  m/s, que es la velocidad lineal del fluido al momento de ingresar con las condiciones de caudales establecidas, las mismas que se repiten en el afluyente del reactor. Además de esto se tiene que a lo largo del reactor se tiene una velocidad ascensional lineal de  $3,647 \times 10^{-9}$  m/s, la cual es la velocidad mínima del sistema.

Con la respectiva simulación del funcionamiento se tiene la plena seguridad de que el equipo responderá a las pruebas que se vayan a realizar experimentalmente, además de esto se pueden obtener datos de las variables físicas que involucran el sistema sin haber realizado ninguna prueba experimental.

#### **4.5.2 Bombas peristálticas**

Se utilizaron para la implementación del sistema de tratamiento de aguas, un total de 4 bombas peristálticas las cuales tienen como fin, proporcionar un flujo continuo de bajo caudal, controlado y de fácil regulación; las bombas trabajaron dentro del rango de 2 a 4,7 ml/min. En primera instancia se utilizaron 2 bombas peristálticas para la corriente alimentación del sustrato, así como también como para el sistema de reflujo del sistema. Estas bombas peristálticas poseen un rango de caudales comprendido entre 1,3 y 515 ml/min, tal como se detalla en el anexo 1

#### 4.6 Pruebas hidrostáticas del biodigestor

Con la culminación de las pruebas *Batch*, se deben realizar las pruebas hidrostáticas al reactor para que no se presenten fugas de aguas y para que se mantenga estático, al momento de encontrarse en fase operativa y de ensayo.



**Figura 4.4.-Pruebas hidrostáticas del reactor UASB. Fuente: Alcívar 2014**

Finalmente se procede con el arranque de las pruebas experimentales en el reactor UASB para lo cual se colocó el sustrato al mismo, se adiciona una cantidad calculada de biomasa, y se mantienen las condiciones apropiadas para el desarrollo de las bacterias en un ambiente libre de corrientes fluctuantes de aire. Estas condiciones se refieren básicamente al control de la carga orgánica entrante, el control del pH y la temperatura. Se realizó primero una fase pre-experimental que se detalla a continuación.

#### 4.7 Fase Pre-Experimental

Esta primera parte realizada en el biodigestor, con el sustrato estándar  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , teniendo en cuenta las relaciones ya establecidas de temperatura ambiente, a una carga orgánica definida, sin elementos trazas que refuercen la alimentación bacteriana.

En esta fase se utilizó una cantidad adecuada de conglomerado bacteriano anaeróbico las condiciones pre experimentales se reportan en la tabla 4.4

**Tabla 4.4.- Condiciones de arranque con condiciones óptimas sin elementos trazas.**

**Fuente: Alcívar 2014**

Parámetro	Valor Reportado
pH	7,3
Temperatura	26 °C
Caudal del afluente	4 ml/min
Carga orgánica	900 mg DQO/L
Elementos trazas	NO

Con el valor del caudal del afluente se realiza el cálculo del tiempo de retención hidráulica del biodigestor de la siguiente manera:

$$t_{RH} = \frac{V}{Q}$$

Donde:

$t_{RH}$ = tiempo de retención hidráulica (h)

Q= caudal del afluente (mL/min)

V= volumen del reactor (mL)

Teniendo:

$$t_{RH} = \frac{V}{Q} = \frac{1300 \text{ ml}}{4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}} = 325 \text{ min} = 5,42 \text{ horas}$$

#### **4.8 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL BIODIGESTOR CON ACETATO DE SODIO**

Para las pruebas experimentales, se ajustan las condiciones para optimizar los resultados encontrados en la fase pre-experimental el pH del afluente fue similar (7,5)

Estas condiciones fueron:

- Temperatura:  $(32 \pm 2) ^\circ\text{C}$  (utilizando un sistema de calefacción para temperar el laboratorio)
- Elementos trazas (oligoelementos)
- Caudal del afluente: 3,7 ml/min
- TRH:

$$t_{RH} = \frac{V}{Q} = \frac{1300 \text{ ml}}{3,7 \frac{\text{ml}}{\text{min}}} = 351,35 \text{ min} = 5,85 \text{ horas}$$



**Figura 4.5.- Reactor UASB en funcionamiento. Fuente: Alcívar 2014**



**Figura 4.6.- Visualización Completa del sistema de tratamiento de Agua residual a nivel de laboratorio. Fuente: Alcívar 2014**

En primer lugar, se utilizó como sustrato de entrada al reactor UASB, la misma sustancia estándar de las pruebas *Batch* ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ). La cantidad inicial de lodo bacteriano fue 150 ml, de acuerdo a la relación  $\text{C/N/P}=100/1/0,1$ . Para suplir la falta de N y P en el estándar, se utilizó el  $\text{NH}_4\text{Cl}$  y el  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , utilizados en cantidades estequiométricas.

Se corrieron aguas con el estándar en el rango (900- 2500) mg DQO/L como lo muestra la tabla 5.2. Estos valores diferentes de DQO entrante permiten calcular el patrón de variabilidad de la producción de biogás a diferentes cargas orgánicas del sustrato. Estos datos con las respectivas gráficas se detallan en el anexo 2 del presente trabajo.

El cálculo de la relación F/M con el sustrato de CH<sub>3</sub>COONa fue el siguiente:

Valor promedio de los SSV en la biomasa: 649,11 g/L

$$150 \text{ ml lodo bacteriano} \times \frac{649,11 \text{ g SSV}}{1 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 97,37 \text{ g SSV}$$

Utilizando el caudal de entrada y la carga orgánica:

$$3,7 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{900 \text{ mg DBO}}{1} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 4,7952 \frac{\text{g DBO}}{\text{día}}$$

Por lo tanto, la relación F/M será:

$$\frac{F}{M} = \frac{4,7953 \frac{\text{g DBO}}{\text{día}}}{97,37 \text{ g SSV}} = 0,04924 \left[ \frac{1}{\text{día}} \right]$$

#### **4.9 Arranque de las pruebas continuas en el reactor UASB con el agua residual de café**

Las pruebas experimentales con el agua residual del café se realizaron dosificando progresivamente las cargas con varias diluciones del mismo, se empezó con una



dilución al 25%, la cual dio un valor aproximado de 1000 mg DBO/L, ya que el agua residual de café posee un valor de DBO aproximado de 4000 mg /L.

Se prepararon las diluciones en porcentajes que generaban una diferencia aproximada de 500 mg DBO/L, preparando un volumen final de 15 L por cada dilución, para asegurar tiempos equitativos en la toma de datos experimentales de cargas biodegradables y de generación de biogás (aproximadamente 3 días). Estas diluciones están detalladas en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5.- Dilución de Agua Residual para diferentes cargas Orgánicas. Fuente: Alcívar 2014**

<b>Porcentaje de dilución (%)</b>	<b>Carga Orgánica aproximada (mg DBO/l)</b>
25	1000
37,5	1500
50	2000
62.5	2500
75	3000
87.5	3500
100	4000

Se colocó el mismo volumen de lodo bacteriano que se utilizó con el sustrato de CH<sub>3</sub>COONa, asemejando las mismas condiciones experimentales que se utilizaron para el sustrato conocido.

Las condiciones experimentales iniciales aplicadas a cada dilución del agua residual entrante al biodigestor fueron: pH, temperatura, caudal de entrada y el TRH, el cual se calcula de la siguiente manera.

$$t_{RH} = \frac{V}{Q} = \frac{1300 \text{ ml}}{3,2 \frac{\text{ml}}{\text{min}}} = 402,25 \text{ min} = 6,77 \text{ h}$$

En la tabla 4.6 se encuentran detalladas los valores:

**Tabla 4.6.- condiciones de arranque con el agua residual de café. Fuente: Alcívar 2014**

<b>Condiciones de arranque con el agua residual de café</b>	
Parámetro	Valor Reportado
pH	7,3
Temperatura	30 °C
Caudal de entrada del afluente	3,2 ml/min
TRH	6,77 horas

Los resultados detallados de la producción de biogás durante el periodo de trabajo para cada dilución se detallan en el Anexo 3 del presente trabajo.

#### **Cálculo de la relación F/M para el agua residual de café**

La relación F/M se calcula a partir de los siguientes datos experimentales:

- Lodo Bacteriano: 150 ml

- Caudal del afluente: 3,2 ml/min
- Carga orgánica aproximada: 1000 mg DBO/l

Aquí de todos los datos:

$$150 \text{ ml} \times \frac{649,11 \text{ g}}{1 \text{ l}} \text{SSV} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 97,37 \text{ g SSV}$$

$$3,2 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ mg DBO}}{1} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 4,608 \frac{\text{g DBO}}{\text{día}}$$

$$\frac{F}{M} = \frac{4,608 \frac{\text{g DBO}}{\text{día}}}{97,37 \text{ g SSV}} = 0,04732 \left[ \frac{1}{\text{día}} \right]$$

Fórmula en la cual la única variable es la carga orgánica de alimentación a las bacterias anaeróbicas.

#### **4.10 Análisis de DQO, SST, y pH del afluente y del efluente del tratamiento anaeróbico de agua residual del café.**

Realizada todas las experimentaciones de las diferentes diluciones del agua residual de café, se debe determinar la cantidad de materia orgánica removida durante el tratamiento anaeróbico. Los análisis que fueron realizados son:

- Demanda Química de Oxígeno
- Solidos Suspendidos Totales
- pH

Para la determinación de cada uno de estos parámetros se siguieron los procedimientos detallados en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA AWWA WPCF). Para estas pruebas se tomaron muestras de los afluentes y efluentes, de cada una de las cargas orgánicas con las cuales se trabajó.

#### ***4.11 Prueba de jarras con coagulantes y floculantes.***

Con el fin de remover la DQO resultante, se realizó el ensayo de test de jarras al efluente del reactor biológico utilizando simultáneamente diversas dosis de floculantes y coagulantes. Los floculantes y coagulantes utilizados para el test de jarras son los mismos que se utilizan en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de café. Estos son EXRO 651 y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  tipo A.

A partir de este valor de DQO de salida, se procedió con la realización del test de jarras. Las dosificaciones de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  tipo A y EXRO 651 utilizados en el test de jarras junto con los valores finales de DQO y porcentajes de remoción se detallan en la tabla 5.10. Se realizaron también pruebas de remoción total cambiando el orden del tratamiento, con el fin de comprobar su efectividad, es decir, se probó el tratamiento en el siguiente orden: floculación-coagulación, digestión anaeróbica.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Resultados de las Pruebas Batch

Los resultados obtenidos de la prueba plural Batch con agua residual de café se detallan en la tabla 5.1:

**Tabla 5.1.- Producción de biogás de la prueba Batch. Fuente: Alcívar 2014**

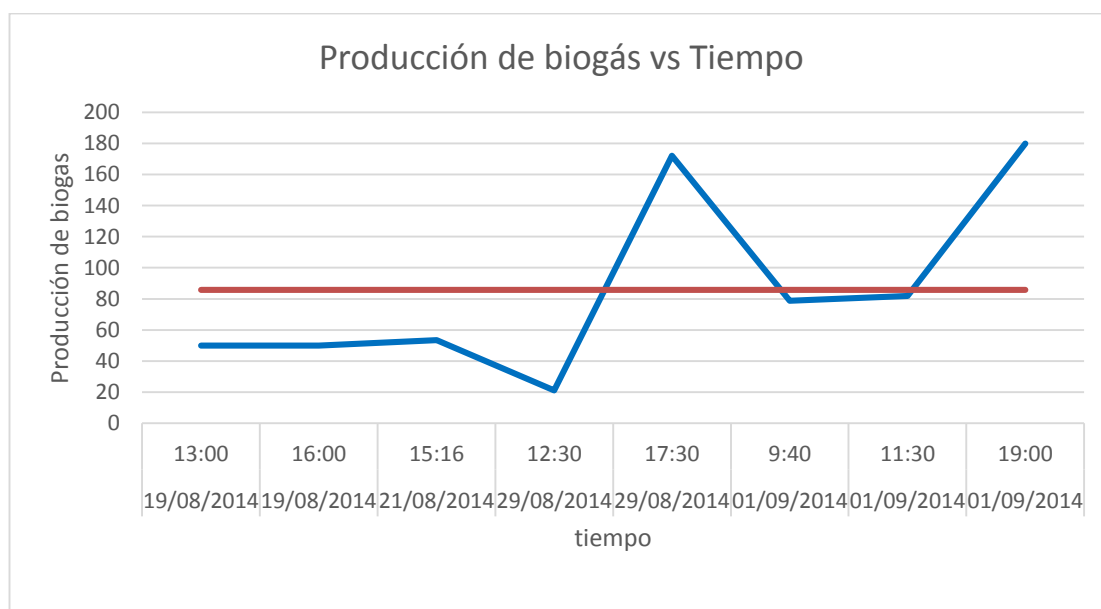
fecha	Hora	Volumen inicial de biogás	fecha	Hora	Volumen final de biogás	Biogás producido (ml)
21/4/14	13:00	0	21/4/14	17:00	100	100
22/4/14	13:00	100	22/4/14	17:30	350	250
23/4/14	12:30	0	23/4/14	16:30	250	250
<b>Promedio de la producción de biogás</b>						200±87

### 5.2. Resultado de la fase pre-experimental

Los datos de producción de biogás en la fase pre experimental se muestran en la tabla 5.2:

**Tabla 5.2.- Producción de biogás con una carga de 900 mg DQO/l sin oligoelementos.**  
**Fuente: Alcívar 2014**

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
19/08/14	10:00	1,6	-----	-----	-----	-----
19/08/14	13:00	1,6	1,75	150	3	50
19/08/14	16:00	1,75	1,9	150	3	50
20/08/14	17:30	1,9	-----	-----	-----	-----
21/08/14	15:16	1,9	2,06	160	3	53,33
28/08/14	17:30	0,75	-----	-----	-----	-----
29/08/14	12:30	0,75	1,15	400	19	21,05
29/08/14	17:30	1,15	2,01	860	5	172
30/08/14	14:00	2,1	-----	-----	-----	-----
01/09/14	11:30	3,65	3,8	150	1,83	81,81
01/09/14	15:00	0,3	---	-----	-----	-----
01/09/14	19:00	0,3	1,02	720	4	180
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>85,87±6,34</b>



**Gráfico 5.1.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánicas 900 mg DQO/l, sin oligoelementos. Fuente: Alcívar 2014**

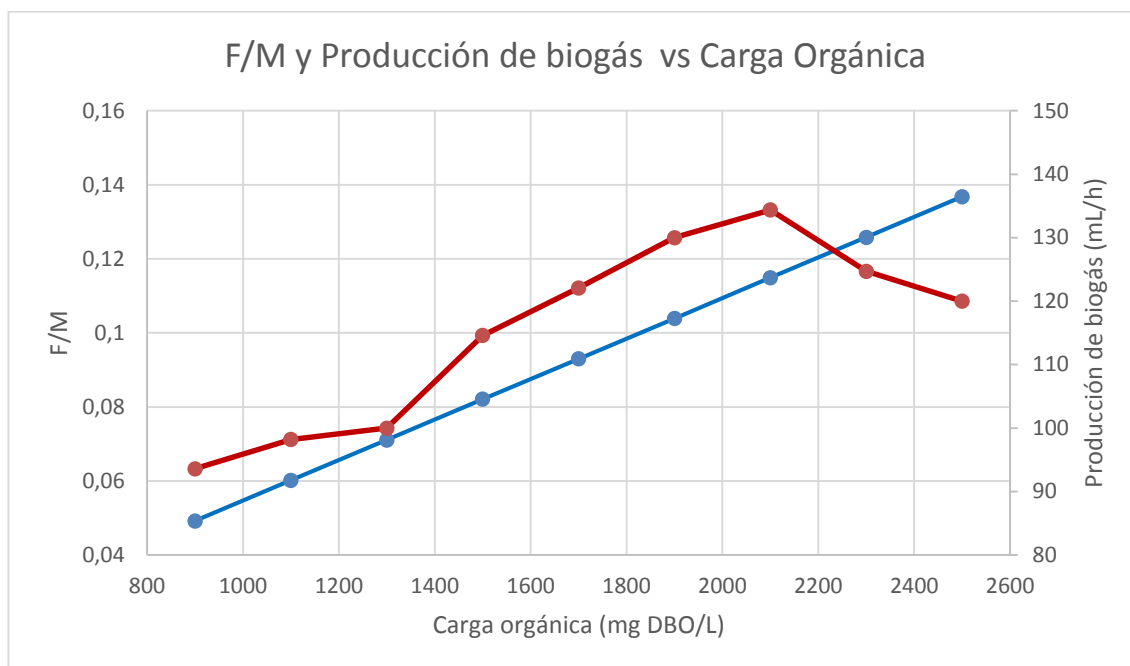
### 5.3. Resultados de las Pruebas en el biodigestor con el sustrato de Acetato de Sodio

La tabla 5.3 muestra el aumento promedio de la producción de biogás con el progresivo aumento de la carga orgánica presente en el sustrato conocido ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ).

**Tabla 5.3.- Producción de biogás promedio con respecto a la carga orgánica suministrada.**  
Fuente: Alcívar 2014

Carga Orgánica (mg DBO/l)	Producción promedio de biogás (ml /día)
900	2246.16±105,45
1100	2356.8±113,57
1300	2400±102,45
1500	2750.64±98,56
1700	2930.16±123,98
1900	3120±96,76
2100	3225.12±106,54
2300	2993.04±100,76
2500	2880±100,65

Con esta relación se tiene que los niveles de la relación F/M incrementan con respecto a la cantidad de carga orgánica que se ingresa al reactor UASB.



**Gráfico 5.2.-F/M y Producción de biogás vs Carga Orgánica. Fuente: Alcívar 2014**

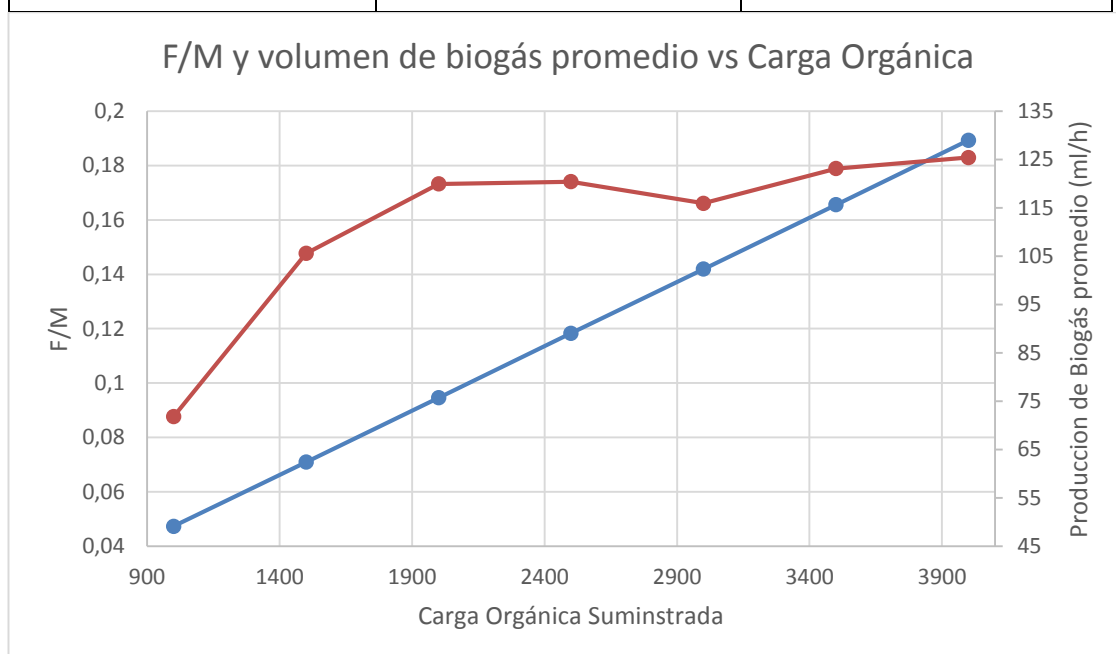
#### 5.4. Resultados de las Pruebas en el biodigestor con el agua residual de café

La tabla 5.4 muestra los volúmenes de producción promedio de biogás obtenidos en todas las diluciones a pH 7,5 y la relación F/M ,resultado del incremento de la carga orgánica suministrada:



**Tabla 5.4.- Relación entre la carga orgánica, relación F/M, y la producción promedio de biogás. Fuente: Alcívar 2014**

Carga Orgánica (mg DBO/L)	F/M	Producción Promedio de Biogás (ml/día)
1000	0,0473	1722.96±104,23
1500	0,0709	2543.04±138,67
2000	0,0946	2879.04±143,87
2500	0,1183	2889.60±97,65
3000	0,1419	2782.32±108,17
3500	0,1656	2954.88±107,88
4000	0,1893	3009.60±105,24



**Gráfico 5.3.- F/M y Producción de biogás promedio vs la carga orgánica suministrada. Fuente: Alcívar 2014**

### 5.5. Resultados de las Pruebas al agua residual del café tratada

Los resultados obtenidos en la prueba de DQO se realiza la determinación del porcentaje de remoción de carga organiza (DQO) utilizando la siguiente fórmula

$$\% \text{ remoción} = \frac{S_o - S_f}{S_o} \times 100$$

Donde:

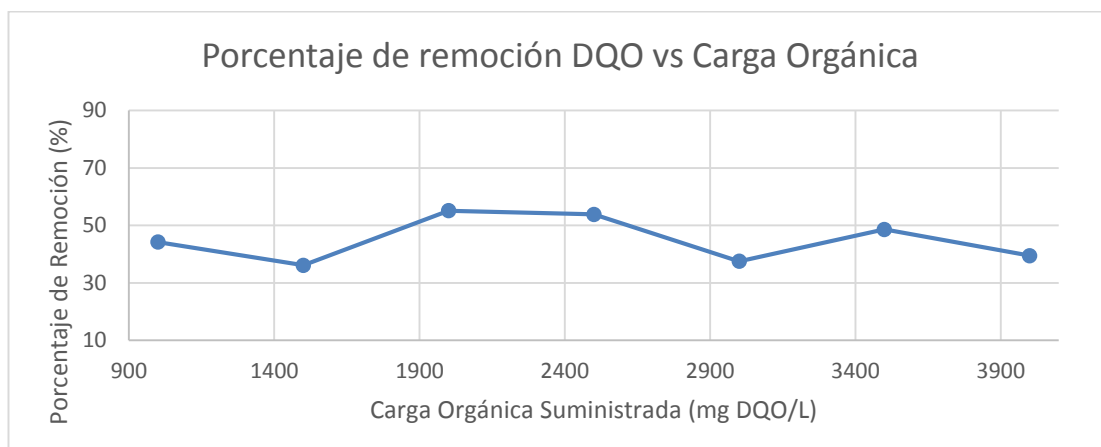
So: es la carga de DQO del afluente, mg DQO/L

Sf: es la carga de DQO del efluente, mg DQO/L

**Tabla 5.5.- Porcentaje de remoción de la DQO. Fuente: Alcívar 2014**

Carga Orgánica aproximada (DQO/L)	DQO del afluente (mg/L)	DQO del efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
1000	1994	1112	44,2
1500	2613	1671	36,1
2000	3812	1712	55,1
2500	3568	1650	53,8
3000	7092	4434	37,48
3500	6480	3280	48,6
4000	7960	4820	39,44

El gráfico 5.4 relaciona el porcentaje de remoción de DQO, con la cantidad de carga orgánica suministrada.

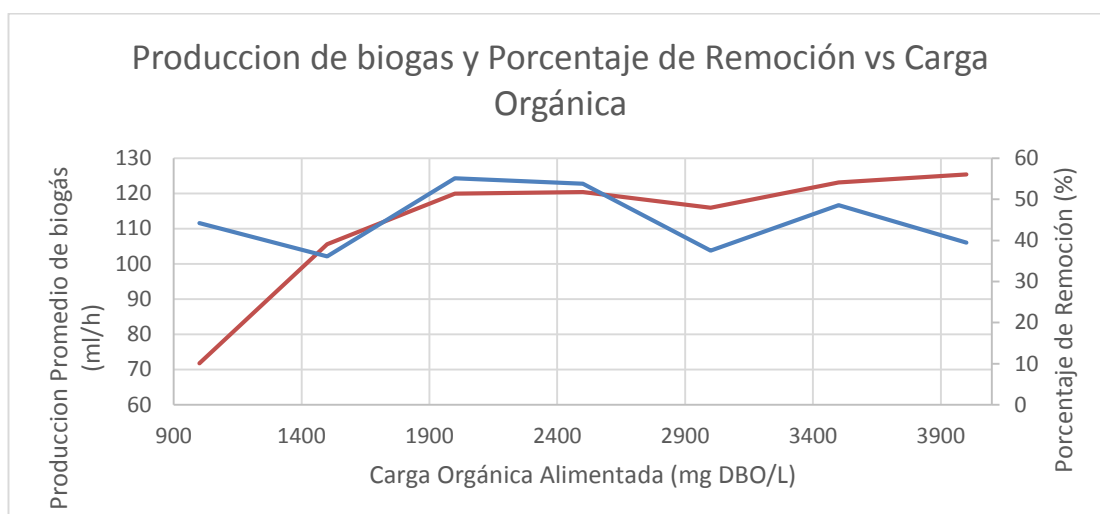


**Gráfico 5.4.- porcentaje de remoción DQO vs. Carga orgánica suministrada. Fuente: Alcívar 2014**

El gráfico 5.5 y tabla 5.6 relaciona la carga orgánica alimentada, el porcentaje de remoción, y la producción promedio de biogás.

**Tabla 5.6.- Carga orgánica suministrada, Porcentaje de remoción de contaminante, producción de biogás promedio. Fuente: Alcívar 2014**

Carga orgánica alimentada (DBO/L)	Porcentaje de remoción (%)	Producción promedio de biogás (ml/día)
1000	44,2	1722.96±104,23
1500	36,1	2543.04±138,67
2000	55,1	2879.04±143,87
2500	53,8	2889.60±97,65
3000	37,48	2782.32±108,17
3500	48,6	2954.88±107,88
4000	39,44	3009.60±105,24



**Gráfico 5.5.- Producción de Biogás y el Porcentaje de remoción de DQO vs la carga orgánica alimentada. Fuente: Alcívar 2014**

#### Resultados de los Sólidos Suspendedos Totales (SST)

La tabla 5.7 muestra los resultados del análisis de los SST, realizados al agua residual de café.

**Tabla 5.7.- Resultados de los sólidos suspendidos para el afluente y efluente. Fuente: Alcívar 2014**

Carga Orgánica aproximada DBO/L)	mg SST/L Afluente	mg SST/L Efluente
1000	220±7	214±4
1500	300±5	300±5
2000	300±6	290±7
2500	280±8	328±6
3000	373±7	140±4
3500	156±9	152±7
4000	480±6	228±8

### Resultados de la determinación de pH

La tabla 5.8 muestra los resultados de la medición del pH al agua residual de café de las diferentes cargas orgánicas, tanto del afluente como del efluente.

**Tabla 5.8.- pH medido al agua residual de café del afluente y efluente. Fuente: Alcívar 2014**

Carga orgánica aproximada (mg DBO/l)	pH Afluente	pH Efluente
1000	7,28	6,91
1500	7,34	6,93
2000	7,02	6,82
2500	7,48	6,99
3000	7,23	6,92
3500	7,21	6,96
4000	7,15	6,97

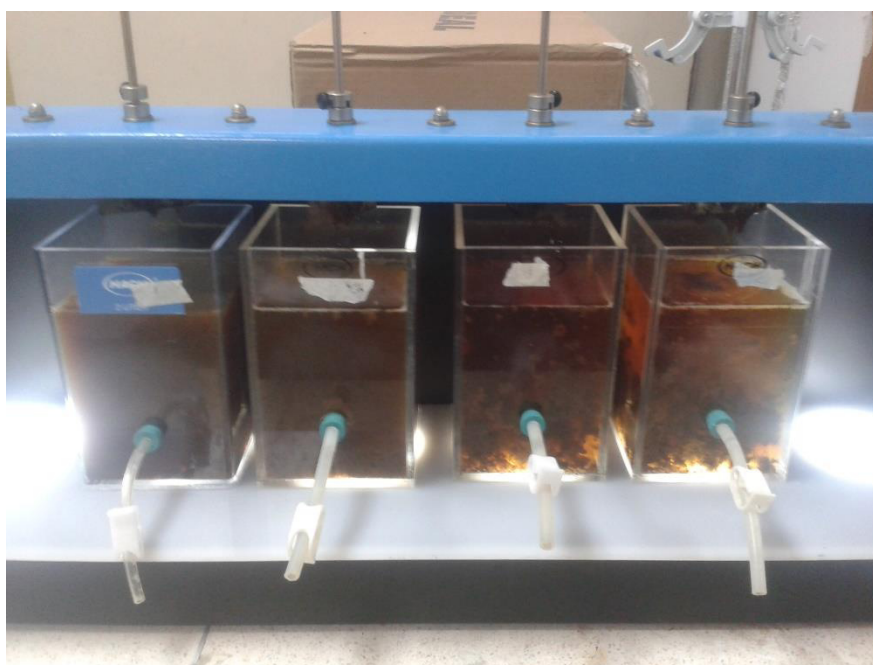
### 5.6. Resultados de la Prueba de Jarras

La dosificación utilizada en la prueba de test de jarras junto con los valores de DQO y porcentajes de remoción se muestran en la tabla 5.9

**Tabla 5.9.-Dosificación, DQO del agua tratada y porcentaje de remoción en el Test de Jarras.**  
**Fuente: Alcívar 2014**

Numero de jarra	Dosificación de EXRO 651 (ppm)	Dosificación de $Al_2(SO_4)_3$ tipo A (ppm)	DQO final (mg DBO/l)	Porcentaje de Remoción (%)
1	300	300	3893	19,23
2	400	400	2980	38,17
3	600	600	3160	34,43
4	800	800	3450	28,42

La figura 5.1 y 5.2 muestra el inicio y el final de la prueba de jarras respectivamente,

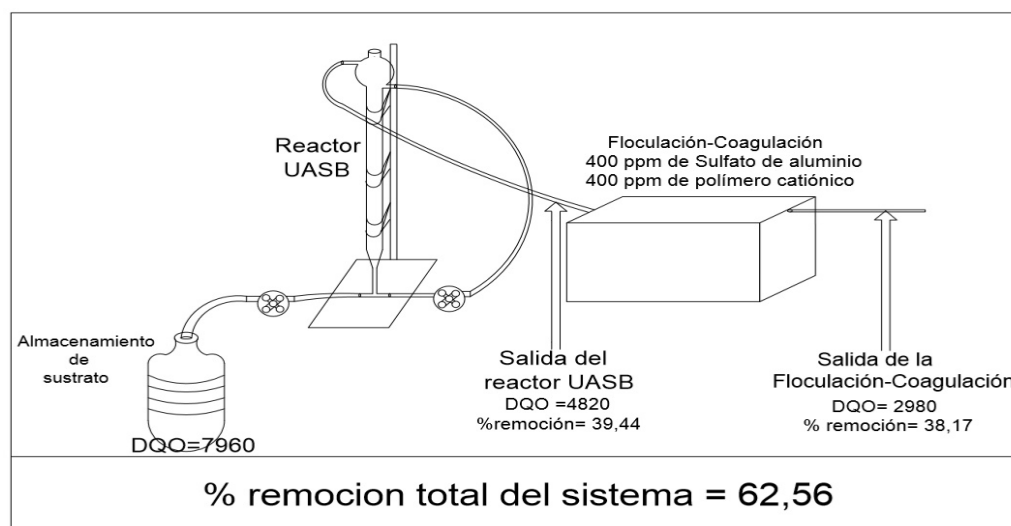


**Figura 5.1.-imagen antes de la realización del test de jarras. Fuente: Alcívar 2014**



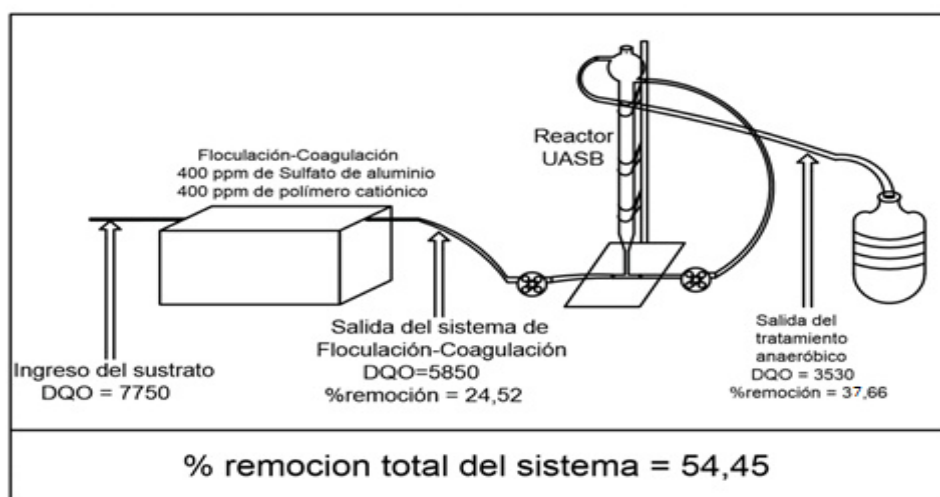
**Figura 5.2.- Resultados del test de jarras. Fuente: Alcívar 2014**

Como se observa en la figura 5.3, el porcentaje de remoción total de DQO del sistema es 62,56%.



**Figura 5.3.- Esquema del sistema de tratamiento anaeróbico con los porcentajes de remoción. . Fuente: Alcívar 2014**

Cambiando el orden del sistema de tratamiento se tiene:



**Figura 5.4.-Porcentaje de Remoción, floculación y coagulación–digestión anaeróbica.**  
**Fuente: Alcívar 2014**



### **Análisis de resultados**

Los resultados de los análisis preliminares realizados al agua residual de café indican que la DBO y DQO son respectivamente 4040 mg O<sub>2</sub>/L y 6480 mg O<sub>2</sub>/L, lo cual permite tener la relación de DBO/DQO igual a 0.62, esto es un indicador de que el tratamiento anaeróbico es factible de realizar según el autor Romero (2003), que dice que para la realización de un tratamiento anaeróbico, la relación de DBO/DQO debe estar en el rango de 0,3 y 0,7.

Con los datos recolectados durante los cuatro días de muestreo del agua residual, se determina que los lavados de la tubería con legía afectan al pH natural del agua residual de la empresa, esos cambios afectan de una manera favorable pues el pH se incrementa desde 4, que es el pH natural del agua residual de café, hasta un pH aproximado de 5,6. Este incremento de pH es favorable, ya que las bacterias realizan el tratamiento anaeróbico en un medio con pH entre 6,50 y 8,50.

Los cambios de pH presentados en la tabla A.5 del Anexo 5, permite llegar a decir de que a menores temperaturas, el pH aumenta y a mayores temperaturas el pH disminuye. Esto no es favorable para el tratamiento de agua residual propuesto. Pero realizando el ajuste del agua residual hasta un pH aproximado de 7,5 se conseguirá la correspondiente degradación de la materia

Cuando se neutralizó el agua residual de café con CaCO<sub>3</sub> no se llegó al pH deseado de 7,5 porque el coeficiente de solubilidad del compuesto es  $1,3 \times 10^{-2}$  g/L a 25 °C, que es

un valor bajo de solubilidad lo cual fue apreciable cuando se formó el precipitado. Este compuesto no es recomendable para la neutralización del agua ya que el precipitado puede afectar a las bacterias anaeróbicas y desfavorecer la actividad metabólica de las mismas. El NaOH es el compuesto que se utilizó para la neutralización, ya que es el compuesto más adecuado debido a su alta solubilidad y a que es una base fuerte que demanda menor cantidad reactivo en comparación con los otros compuestos.

Con respecto a las pruebas *Batch* se obtuvo una producción promedio de 200 ml/h de biogás lo cual fue resultado del ingreso de 100 ml de agua residual que tiene una carga orgánica aproximada de 4000 mg DBO/L, que se traduce en la degradable de 400 mg de DQO por parte de las bacterias anaeróbicas; experimentalmente se aprecia que existe menos producción de biogás durante las horas nocturnas, debido a las caídas de temperatura, lo cual ocasiona un bajo metabolismo de las bacterias anaeróbicas y consecuentemente un decaimiento en la degradación de la materia orgánica.

La fase pre-experimental utilizando el agua residual del café en el biodigestor tuvo como finalidad principal verificar la capacidad de respuesta de las bacterias anaeróbicas ante condiciones mínimas de arranque para su actividad, las cuales son: caudales de 4 ml/min, bajas cargas orgánicas de alimentación (900 mg DBO/L) y especialmente la temperatura ambiente (26° C); con estas condiciones la digestión anaeróbica continúa aún con su proceso, pero no con la efectividad requerida para la

finalidad de esta tesis, que es la de obtener la mayor degradable de materia orgánica y obtener ahorros económicos en el proceso de tratamiento de aguas.

Para las pruebas realizadas en el biodigestor con el sustrato de  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , se tiene un aumento en la producción de biogás la cual va desde 93,59 ml/h con una carga orgánica de 900 mg DBO/L, hasta 120 ml/h con una carga de 2500mg DBO/L, con lo cual existe una mayor degradación de la materia orgánica, esto ocurre a medida que se aumenta la carga orgánica (mg DBO/L) suministrada; resultado esperado ya que las bacterias poseen una mayor cantidad de materia orgánica para degradar. La degradación de la materia orgánica tiene una tendencia lineal creciente con una pendiente aproximada de 45 mg DBO/h. La producción de biogás es un indicador de la degradación de la materia orgánica ya que a mayor cantidad de materia orgánica suministrada mayor producción de biogás.

La relación F/M obtenida con el sustrato de  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , indica que es adecuada y está dentro del rango de 0,13 y 0,15. Esto se aprecia en el gráfico 5.3. Lo que indica la correcta elección de la carga orgánica para el tratamiento con el agua residual del café.

Para las pruebas realizadas con el agua residual de café se tiene un aumento de los volúmenes de producción de biogás los cuales van desde 71,79 ml/h con una carga orgánica de alimentación de 1000 mg DBO/L, hasta un máximo de 125,4 ml/h para una carga orgánica de alimentación de 4000 mg DBO/L, donde se tiene la producción

máxima de biogás promedio de 125,4 ml/h con el agua residual de café al 100% de su composición. Este aumento de la producción de biogás es un indicador de que la degradación del agua residual de café se está cumpliendo. La degradación de la materia orgánica tiene una tendencia lineal creciente de 41,66 mg DQO/h hasta una carga orgánica de alimentación aproximada de 2100 mg DBO/L, luego presenta una tendencia lineal creciente baja de 2,63 mg DQO/h hasta llegar a la muestra sin diluir. Al comparar con los resultados del sustrato de  $\text{CH}_3\text{COONa}$  se tiene una disminución del volumen de producción de biogás debido a que en el sustrato conocido, toda la materia orgánica presente es biodegradable mientras que en el agua residual de café existe materia adicional que no es biodegradable. Este aumento de la producción de biogás es un indicador de que la degradación del agua residual de café se está cumpliendo.

El cálculo de la relación F/M para el agua residual de café para las cargas orgánicas suministradas indica que la mayor cantidad de materia degradada está dentro del rango de 0,14 a 0,19; rango ligeramente mayor al que se obtuvo en las pruebas con el sustrato de  $\text{CH}_3\text{COONa}$ . Esto se debe a que en el sustrato de  $\text{CH}_3\text{COONa}$ , toda la materia orgánica es biodegradable y por eso la relación F/M es menor para poder realizar la misma remoción. Además en el tratamiento del agua residual de café, se encuentran otros agentes no biodegradables que aumentan el valor de esta relación.

Se puede apreciar que el porcentaje de remoción de contaminante (DBO) en el agua residual por medio del tratamiento anaeróbico, se encuentra dentro de un rango aproximado de 35 a 55 %, rango que se encuentra dentro de los límites de aceptación. Además se puede atribuir este amplio rango de porcentaje de remoción a la propagación de errores en los instrumentos de medición y la incertidumbre por la repetitividad y reproducibilidad del ensayo. Cabe recalcar que el porcentaje de remoción de contaminante no depende de la cantidad de materia orgánica suministrada sino más bien de la capacidad de degradación de las bacterias y de la cinética de las mismas, lo cual puede ser base para estudios futuros.

Otro parámetro controlado fue el de los SST que se encuentran en el agua residual, tanto para el afluente como el efluente, en los cuales se observa un cambio significativo, tal como se muestra en la tabla 5.8. Los cuales van desde 480 ppm hasta 228 ppm para el agua residual de café sin diluir.

La medición del pH tanto en el afluente como en el efluente es fundamental para el tratamiento, ya que es un indicador de la formación de ácidos simples en la etapa de la acidogénesis, necesarios para la degradación de la materia orgánica. Esto se cumple en cada uno de los ensayos realizados con diferentes cargas orgánicas suministradas tal como se muestra en la tabla número 5,9. Donde se tiene una disminución del valor de este parámetro en el afluente.

Se realizó además un prueba de test de jarras donde se colocaron diversas dosificaciones de floculantes y coagulantes tal como se detalla en la tabla 5.10. Donde se obtuvo el mejor resultado visual en la jarra número 2 en la cual se colocó 400 ppm del floculante y coagulante. Además se realizaron pruebas de DQO a cada una de las dosificaciones utilizadas dando un mayor porcentaje de remoción de DQO en la jarra número 2 el cual fue de 38,17%, esto se comprueba en la tabla 5.10, y figura 5.2 respectivamente.

Para la realización de este análisis se cuenta con dos alternativas en el proceso anaeróbico, en la primera alternativa se tiene primero la digestión anaeróbica y luego la floculación-coagulación, y en la segunda alternativa se hace lo contrario, es decir primero la floculación-coagulación y luego la digestión anaeróbica. En la primera alternativa se tiene un porcentaje total de remoción de contaminante de 62,56%, con un porcentaje de remoción en la digestión anaeróbica del 39,44%, y para la floculación-coagulación un porcentaje de remoción de 38,17%. Para la segunda alternativa se tiene un porcentaje total de remoción de contaminante de 54,45%, teniendo para el sistema de floculación-coagulación un porcentaje de remoción de 24,52% y para el tratamiento anaeróbico un porcentaje de remoción de 37,66 %, tal como se lo detalla en la figura 5.3 y 5.4 respectivamente. Esta disminución en el porcentaje total de la remoción de contaminante es debido a la cantidad de materia inorgánica que ingresa al reactor UASB, provocando un menor contacto de la materia orgánica biodegradable con las bacterias anaeróbicas.

En los análisis del agua residual que realiza la empresa, se puede apreciar que los resultados de la DQO tienen una gran variación, los cuales van desde 7110 mg DQO/L hasta 485 mg DQO/L, con lo cual se tiene un porcentaje de remoción mayor al 90%, también existe la reducción del valor de los SST y turbidez; para el caso de la conductividad, existe un aumento significativo en el reactor biológico, debido al crecimiento de las bacterias aeróbicas en el agua residual.

## **Capítulo 6**

### **Propuesta de tratamiento y análisis de costos**



## 6 Propuesta de tratamiento y análisis de costos

En base a los datos obtenidos en la parte experimental, se proyecta el valor de inversión del tratamiento y los gastos operativos que acarrea el nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales. Además se realiza una comparación con los costos del sistema de tratamiento de agua que tiene la empresa actualmente.

Se muestra el análisis de costos de los reactivos a utilizarse por ajuste del agua residual; adicionalmente se evalúa el costo de otras variables, tales como la temperatura del afluente y el sistema de bombeo.

### 6.1. Análisis de costos de los reactivos.

Los costos representativos para el tratamiento son: la neutralización del agua residual de café, y el funcionamiento de las bombas peristálticas. Para las bombas peristálticas (escala industrial), asumiendo que trabajan todo el día, se tiene un consumo energético de \$20 diarios aproximadamente, dato tomado de la página web de los distribuidores de bombas peristálticas, con un consumo máximo es de 8,3 kWh, y con un caudal máximo de 7,5 m<sup>3</sup>/h. Lo cual nos permite tener el costo energético por metro cúbico de la siguiente manera:

$$20 \frac{USD}{día} \times \frac{h}{7,5 m^3} \times \frac{1 día}{24 h} = 0,11 \frac{USD}{m^3}$$

El precio del cada kilogramo del NaOH y del NaHCO<sub>3</sub> en el mercado ecuatoriano son respectivamente \$0,45 y \$3,71.

De acuerdo a las pruebas experimentales realizadas, se necesitan 2,5 g NaHCO<sub>3</sub>/L y 8,5x10<sup>-4</sup> g NaOH/L para la neutralización del agua residual; cabe recalcar que el NaOH al ser una base fuerte, necesita menos cantidad para neutralizar el agua residual. Para lograra el pH adecuado se invierte:

$$\frac{2,5 \text{ g NaHCO}_3}{\text{L}} \times \frac{0,45 \text{ USD}}{1 \text{ Kg}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000\text{g}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = \frac{1,125 \text{ USD}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} \frac{8,5 \times 10^{-4} \text{ g NaOH}}{\text{L}} \times \frac{3,71 \text{ USD}}{1 \text{ Kg}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000\text{g}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} &= \frac{0,003153 \text{ USD}}{\text{m}^3 \text{ a tratarse}} \\ &= \frac{0,3153 \text{ ctvs}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Resulta mucho más económico realizar la neutralización de la muestra con una solución de NaOH. El caudal de agua residual que posee la empresa es de 130 m<sup>3</sup>/día aproximadamente, de donde se tiene:

Para el NaHCO<sub>3</sub>:

$$130 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1,125 \times 10^{-3} \text{ USD}}{\text{litro a trarse}} = 146,25 \frac{\text{USD}}{\text{día}}$$

Para el NaOH, se tiene que:

$$130 \frac{m^3}{día} \times \frac{1000 l}{1 m^3} \times \frac{3,153 \times 10^{-6} USD}{litro a trarse} = 0,41 \frac{USD}{día}$$

Con un gasto diario aproximado de 41 centavos se calcula un gasto mensual de \$12,30.

Cabe recalcar que los flujos volumétricos de agua residual en la planta varían cada día y podrían existir fluctuaciones en el valor calculado anteriormente.

La adquisición de floculantes y coagulantes para los ensayos de post tratamiento de las aguas residuales efluentes del tratamiento anaeróbico, se los realizo con el efluente del reactor UASB, luego de tratar el sustrato de café al 100 %; la dosis óptima de tratamiento fue de 400 ppm para el floculante y coagulante, teniendo un costo aproximado de 0,48\$/m<sup>3</sup>

El costo total del sistema de tratamiento se detalla en la tabla 6.1:

**Tabla 6.1.- Costos de operación del sistema de tratamiento anaeróbico. Fuente: Alcívar 2014**

Rubro	Costo por metro cúbico de agua tratado (USD/m <sup>3</sup> )	Costo mensual (USD/mes))
Neutralización del agua residual	0,41	12,29
Energía eléctrica en bombas	0,11	810
Productos químicos para floculantes y coagulantes (opcional)	0,48	1872
<b>Costo total del tratamiento</b>	1,00	2694,90

**6.2. Costo aproximado del tratamiento aeróbico en la planta de aguas residuales de la empresa**

La estimación de todos los costos del sistema de tratamiento de agua de la empresa están calculados en base al caudal promedio de la misma (130 m<sup>3</sup>/día).

El costo del sistema de tratamiento actual en la empresa es de \$65/día (1950 \$/mes). Estos se invierten en la utilización de energía eléctrica, principalmente para el funcionamiento de los aireadores para el sistema aeróbico. Además existe un gasto aproximado de \$3000 mensual en los productos químicos utilizados como coagulantes y floculantes, (datos proporcionados por la empresa). Se tiene un costo por químicos de 0.77 \$/m<sup>3</sup>.

**Tabla 6.2.- Costos del sistema de tratamiento aeróbico de agua utilizado actualmente en la empresa. Fuente: Alcívar 2014**

<b>Rubro</b>	<b>Costo por metro cúbico tratado (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo mensual aproximado (USD/mes)</b>
Productos químicos para floculantes y coagulantes	0,77	3000
Energía eléctrica	0,50	1950
<b>Costo total del tratamiento</b>	<b>1,27</b>	<b>4950</b>

La respectiva comparación de los costos de los dos sistemas de tratamiento de agua se detalla en la tabla a continuación:

**Tabla 6.3.- Comparación de costos de los tipos de tratamiento. Fuente: Alcívar 2014**

<b>Tipo de tratamiento</b>  <b>Costos</b>	<b>Sistema aeróbico actual de la empresa</b>	<b>Sistema de tratamiento anaeróbico</b>
<b>Costo mensual total (USD/mes)</b>	4950	2694,90
<b>Costo por metro cubico (USD/m<sup>3</sup>)</b>	1,27	1,04

Con los costos totales del tratamiento anaeróbico y aeróbico, se tiene que el sistema presentado en esta tesis, tiene un ahorro de 0,3 USD/m<sup>3</sup> y aproximadamente de 2255,10 USD/mes. Además cabe recalcar que se puede tener un ahorro adicional en el proceso anaeróbicos, si se aprovecha el potencial energético de biogás generado.

## CONCLUSIONES

En la presente tesis se determinó las condiciones óptimas para la biodegradación anaeróbica de aguas residuales de una industria de café a escala de laboratorio. Se concluye que el sistema de tratamiento de aguas residuales anaeróbico es más eficiente, tanto por el porcentaje de remoción de la materia orgánica, como por ser económicamente viable con los actuales precios del mercado.

Se determinaron las condiciones óptimas de operación del tratamiento, comenzando en primer lugar con la variación de la temperatura en rangos de trabajo aceptable para el sistema, con los cuales se concluye que a una temperatura de 32°C se consigue un tratamiento de agua anaeróbico eficiente con un 62,56% de remoción de la materia orgánica, es decir que se obtiene una mayor remoción de la materia orgánica suministrada al sistema.

Otro parámetro fundamental en el tratamiento, es la medida del pH con que va a ser tratado el sustrato que va a ser suministrado a las bacterias anaeróbicas, de tal forma que si el valor del pH se encuentra alrededor de 6,5 y 7,5 se tiene una correcta actividad bacteriana.

Como una medida indicadora de la degradación anaeróbica de la materia orgánica se observa un incremento en la generación total de biogás, ya que este, es el producto final en la digestión anaeróbica tal y como se lo especifica en el marco teórico.

El agua residual de café con la que se trabajó en la presente tesis presenta características propias de la misma, tal que a partir de esas características se preparó una solución patrón de  $\text{CH}_3\text{COONa}$  simulando las características del agua residual de café, de donde se concluye que dependiendo del tipo de sustrato que se va a tratar se puede preparar una solución patrón para tener las condiciones ideales de funcionamiento de las bacterias anaeróbicas y realizar las respectivas comparaciones de los dos sistemas tanto el conocido y el que se va a estudiar.

Con las variables de funcionamiento del reactor UASB tales como el caudal de entrada y el volumen del reactor, conjuntamente con las características de las bacterias anaeróbicas se pueden calcular parámetros de operación de gran importancia para la determinación de adecuada de parámetros.

El valor de inversión en el sistema de tratamiento aeróbico que posee la empresa, es alto ( $1,27 \text{ \$/m}^3$ ) con respecto a los costos utilizados en el sistema de tratamiento anaeróbico ( $1,04 \text{ \$/m}^3$ ), con lo cual se puede ultimar que el sistema de tratamiento anaeróbico propuesto posee un menor costo de operación, al actual precio del mercado, esto es debido a que no se presenta aireación en el sistema.

El consumo energético asociado al funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, presenta valores significativos en el costo de operación y mantenimiento, además de presentar mayores impactos ambientales asociados a la descarga de

efluentes y a los niveles de presión sonora asociado al funcionamiento de las bombas aireadoras. La implementación de los resultados generados en la presente tesis, garantiza una disminución en los impactos ambientales asociados, una reducción significativa en el costo de operación, además de garantizar el cumplimiento de la legislación ambiental existente. Ayudando así al desarrollo del país y cooperando a la concepción del Plan Nacional Del Buen Vivir (PNBV).





## **RECOMENDACIONES**

1. Para la realización de un correcto metabolismo de las bacterias anaeróbicas se debe de tener un pH cercano a la neutralidad, por lo que se recomienda un plan de manejo de control de pH en el sistema de tratamiento anaeróbico.
2. En la determinación de las condiciones óptimas para la biodegradación anaeróbica, no incluye el estudio del aprovechamiento del biogás por lo cual se recomienda un estudio completo del mismo para su posible utilización y generación de energía la cual puede ser térmica o eléctrica, o para otros fines sostenibles y sustentables.
3. Para un sistema de tratamiento de aguas residuales anaeróbico se recomienda tener un sistema totalmente hermético para así no alterar las condiciones fisicoquímicas de la biomasa.
4. El sistema de tratamiento de aguas residuales anaeróbico, necesita de una constante alimentación de sustrato por medio del cual se recomienda tener un plan de mantenimiento de las bombas peristálticas a utilizarse para evitar taponamientos y posibles obstrucciones en las mismas.

## **ANEXOS**

## ANEXO I.- CAUDALES DE BOMBAS

Bomba N ° 1				
				
	datos experimentales		dato calculado	caudal promedio
Potencia	Volumen	Tiempo	Caudal (ml/min)	Caudal Promedio (ml/min)
0	10	112,38	5,34	<b>5,34</b>
0	10	106,38	5,64	
0	10	119,26	5,03	
1	10	44,57	13,46	<b>13,46</b>
1	10	46,37	12,94	
1	10	42,87	13,99	
2	10	29,79	20,14	<b>20,54</b>
2	10	28,54	21,02	
2	10	29,35	20,44	
3	10	19,88	30,18	<b>29,23</b>
3	10	20,83	28,80	
3	10	20,9	28,71	
4	10	16,53	36,29	<b>36,15</b>
4	10	16,75	35,82	
4	10	16,51	36,34	
5	10	13,7	43,79	<b>44,56</b>
5	10	13,5	44,44	
8	10	8,19	73,26	
9	10	7,29	82,30	<b>82,42</b>
9	10	7,23	82,98	
9	10	7,32	81,96	
10	10	7,03	85,35	<b>85,47</b>

Bomba N ° 2				
				
	datos experimentales		dato calculado	caudal promedio
Potencia	Volumen	Tiempo	Caudal (ml/min)	Caudal Promedio (ml/min)
<b>caudal mínimo de la bomba</b>				<b>6</b>
1	10	52,18	11,45	<b>11,49</b>
1	10	52,22	11,49	
1	10	52,14	11,51	
2	10	8,93	67,18	<b>65,36</b>
2	10	9,31	64,45	
2	10	9,31	64,45	
3	20	10,07	119,16	<b>119,76</b>
3	20	9,92	120,96	
3	20	10,07	119,16	
4	30	9,37	192,10	<b>189,30</b>
4	30	9,66	186,33	
4	30	9,5	189,47	
5	30	7,13	252,45	<b>250,01</b>
5	30	7,25	248,27	
5	30	7,22	249,31	
6	40	7,36	326,08	<b>329,09</b>
6	40	7,32	327,86	
6	40	7,2	333,33	
7	40	6,65	360,90	<b>372,14</b>
7	40	6,25	384	
7	40	6,46	371,52	
8	50	7,01	427,96	<b>435,48</b>
8	50	6,81	440,53	
8	50	6,85	437,96	
10	50	5,78	519,03	

ANEXO II.- datos de producción de biogás con cargas orgánicas de acetato de sodio  
Carga orgánica: 900 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
02/09/14	17:45	1,2	---	-----	-----	-----
02/09/14	18:45	1,2	1,3	100	1	100
04/09/14	14:00	2,2	2,9	700	22,75	30,77
04/09/14	20:00	2,9	3,8	900	6	150
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>93,59</b>

Tabla A2.1.-Producción de biogás con una carga de 900 mg DQO/l

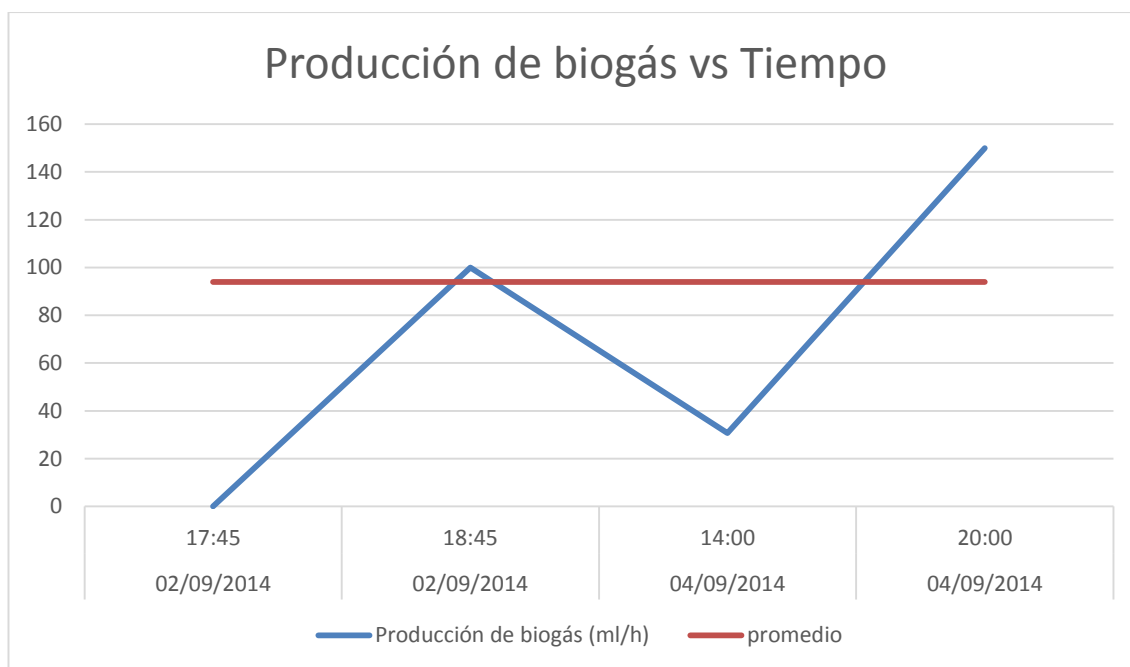


Gráfico A2.1.-Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánicas 900 mg DQO/l

Carga orgánica: 1100 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
06/09/14	10:00	1,25	1,347	97	1	97
06/09/14	11:00	1,35	1,46	110	1	110
08/09/14	12:00	0	-----	-----	-----	-----
08/09/14	13:00	0	0,1	100	1	100
08/09/14	14:00	0,1	0,184	84	1	84
08/09/14	15:00	0,19	0,20	100	1	100
<b>Producción de biogás promedio</b>						98,2

Tabla A2.2.- Producción de biogás con una carga de 1100 mg DQO/l

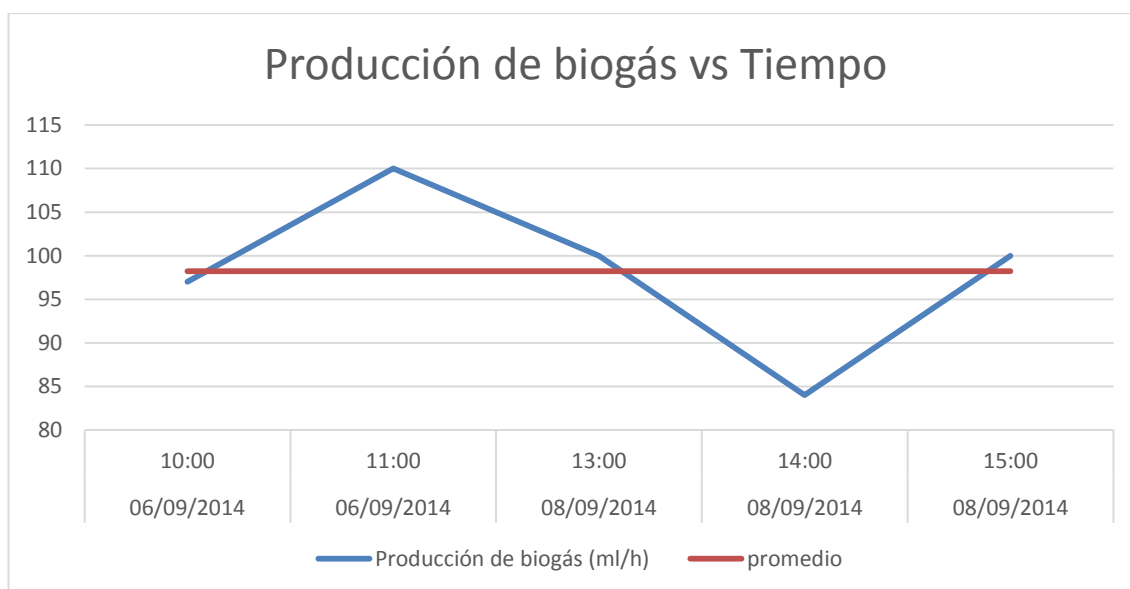


Gráfico A2.2.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1100 mg DQO/l

Carga orgánica: 1300 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
12/09/14	8:30	0,1	-----	-----	-----	-----
15/09/14	13:30	0,1	0,6	500	5	100
<b>Producción de biogás promedio</b>						100

Tabla A2.3.- Producción de biogás con una carga de 1300 mg DQO/l

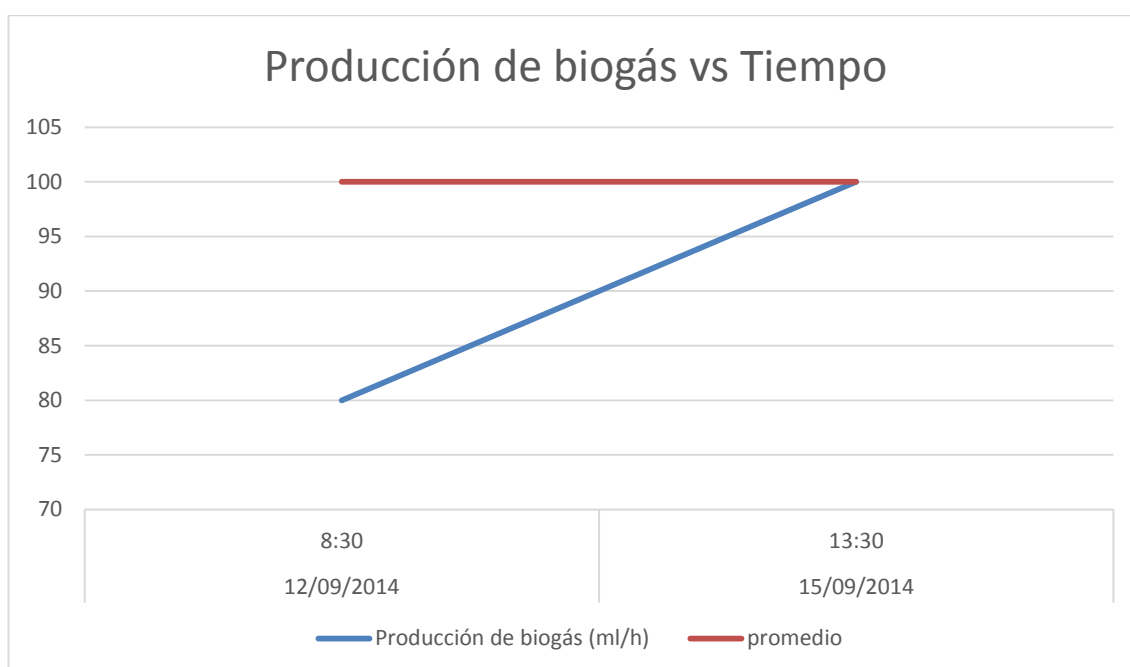


Gráfico A2.3.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1300 mg DQO/l

Carga orgánica: 1500 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
18/09/14	11:00	0,3	-----	-----	-----	-----
18/09/14	18:30	0,3	0,95	650	7,5	86,66
19/09/14	7:45	0,95	2,8	1850	13,25	139,62
19/09/14	14:00	2,8	3,35	550	6,25	88
19/09/14	15:00	3,35	3,45	100	1	100
19/09/14	16:00	3,45	3,57	120	1	120
20/09/14	12:50	0	-----	-----	-----	-----
20/09/14	2:30	0	0,2	200	1,66	120,48
20/09/14	6:30	0,2	0,79	590	4	147,5
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>114,61</b>

Tabla A2.4.- Producción de biogás con una carga de 1500 mg DQO/l

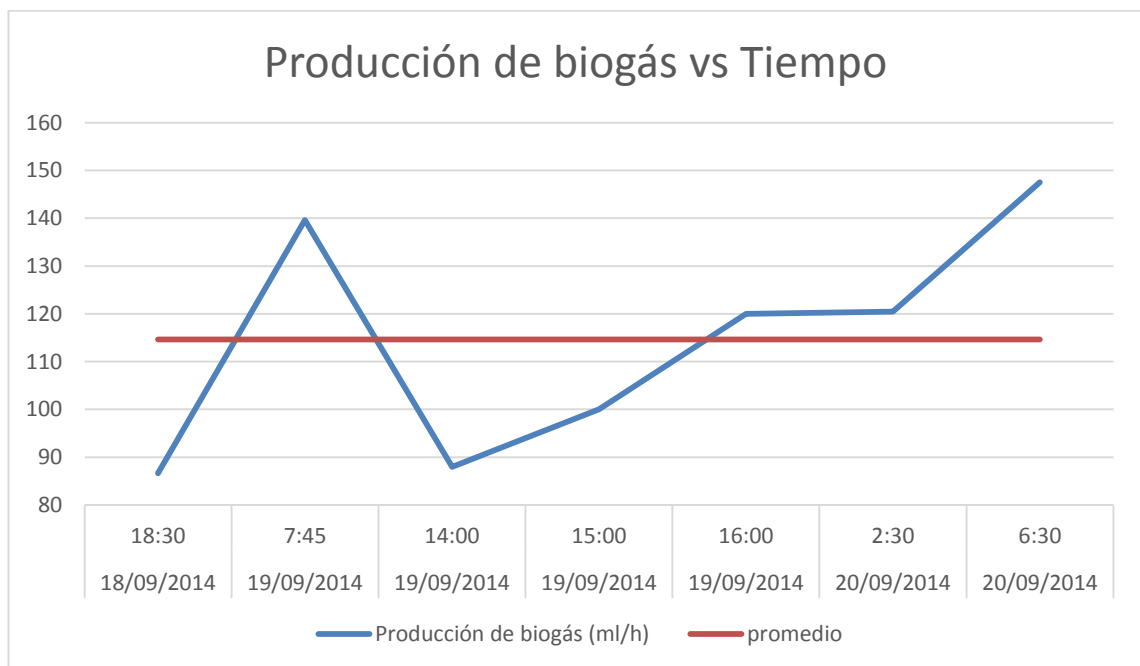


Gráfico A2.4.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1500 mg DQO/l



Carga orgánica: 1700 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
23/10/14	11:30	0,5	---	-----	-----	-----
23/10/14	16:30	0,5	1	500	5	100
24/09/14	9:30	1	2,4	1400	17	82,35
24/09/14	11:00	2,4	2,6	200	1,5	133,33
24/09/14	11:30	2,6	2,67	70	0,5	140
24/09/14	14:00	2,67	2,99	320	2,5	128
24/09/14	16:30	2,99	3,32	330	2,5	132
25/09/14	12:30	0	2,78	2780	20	139
<b>Producción de biogás promedio</b>						122,09

Tabla A2.5.- Producción de biogás con una carga de 1700 mg DQO/l

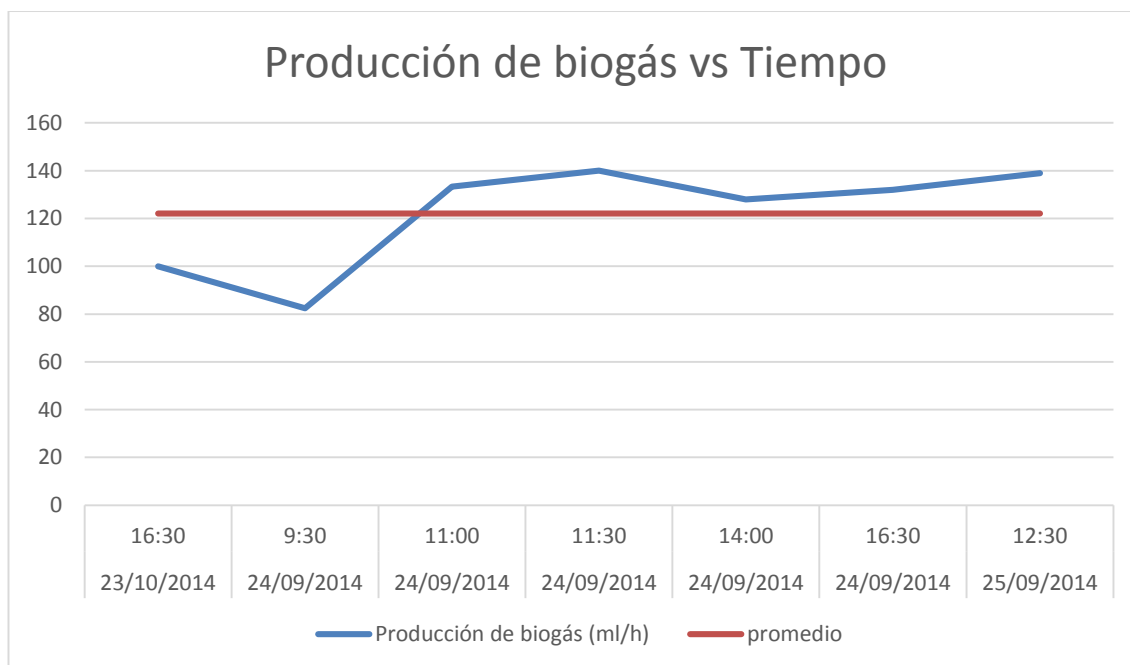


Gráfico A2.5.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1700 mg DQO/l

Carga orgánica: 1900 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
25/09/14	16:20	0	0,5	500	1,83	272,73
26/09/14	14:00	0	0,2	200	2,5	80
28/09/14	14:00	0	0,13	150	1,5	100
29/09/14	13:00	0	0,0673	67,3	1	67,3
<b>Producción de biogás promedio</b>						130

Tabla A2.6.- Producción de biogás con una carga de 1900 mg DQO/l

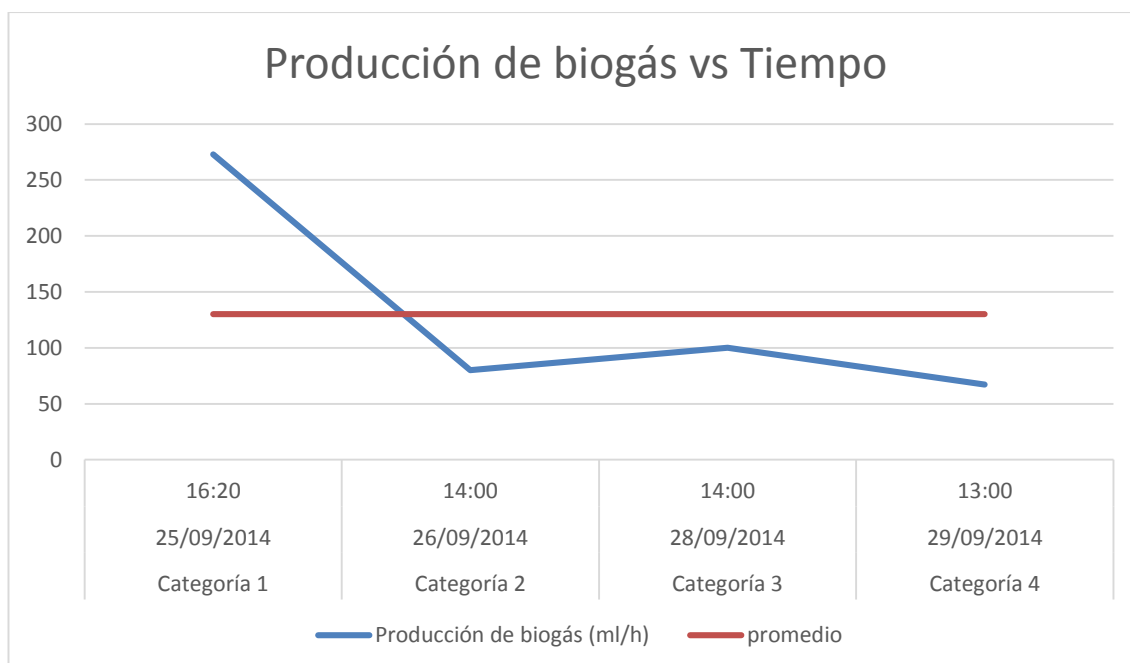


Gráfico A2.6.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1900 mg DQO/l

Carga orgánica: 2100 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
30/09/14	11:00	0,1	-----	-----	-----	-----
01/10/14	9:00	0,1	1,9	1800	22	81,82
01/10/14	10:00	1,9	2,1	200	1	200
01/10/14	11:00	2,1	2,2	100	1	100
02/10/14	11:00	0,15	-----	-----	-----	-----
02/10/14	12:00	0,15	0,25	100	1	100
02/10/14	13:00	0,25	0,35	100	1	100
02/10/14	14:00	0,35	0,42	70	1	70
02/10/14	15:00	0,42	0,6	180	1	180
02/10/14	16:00	0,6	0,7	100	1	100
02/10/14	16:20	0,7	0,75	50	0,33	150
03/10/14	8:00	0,75	3,27	2517	15,67	160,63
03/10/14	9:00	3,27	3,45	180	1	180
03/10/14	10:00	3,45	3,64	190	1	190
<b>Producción de biogás promedio</b>						134,38

Tabla A2.7.-Producción de biogás con una carga de 2100 mg DQO/l

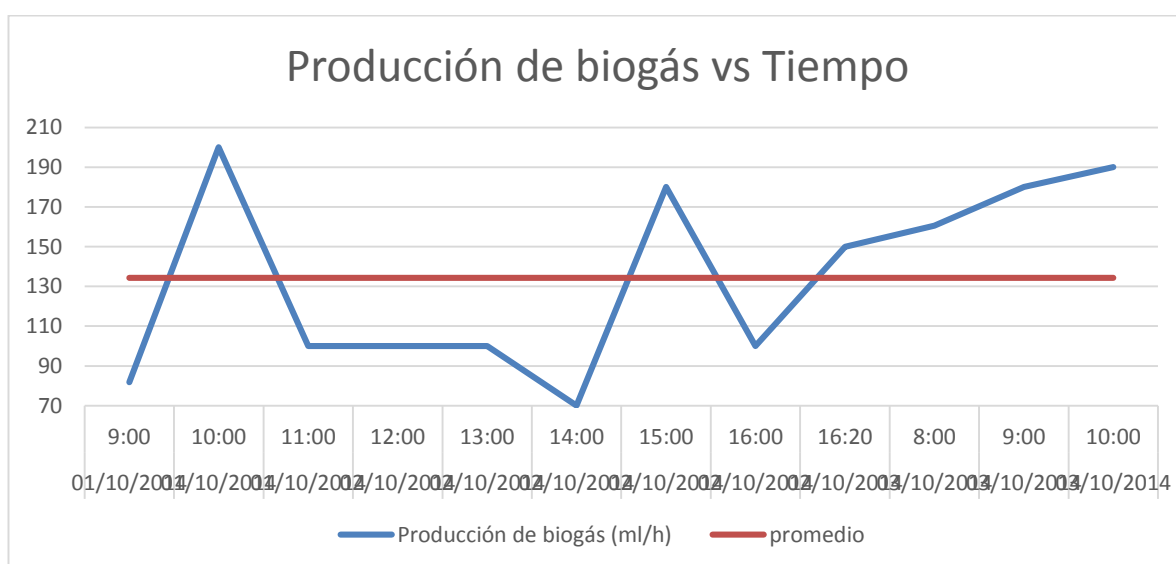


Gráfico A2.7.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 2100 mg DQO/l

Carga orgánica: 2300 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
03/10/2014	16:00	0,35	0,4	50	1	50
03/10/2014	16:20	0,4	0,45	50	0,33	150
06/10/2014	11:20	0,1	0,2	100	1	100
06/10/2014	13:30	0,2	0,25	50	1,167	42,86
06/10/2014	14:30	0,25	0,3	50	1	50
06/10/2014	15:30	0,3	0,31	10	1	10
06/10/2014	16:30	0,31	0,375	65	1	65
07/10/2014	14:00	0,6	0,7	100	1	100
08/10/2014	8:30	2	2,1	100	0,5	200
08/10/2014	10:00	0,4	0,6	200	1	200
08/10/2014	11:00	0,6	0,625	25	1	25
08/10/2014	12:00	0,625	0,74	115	1	115
08/10/2014	13:00	0,74	0,85	110	1	110
08/10/2014	14:00	0,85	0,9	50	1	50
08/10/2014	15:00	0,9	1,1	200	1	200
08/10/2014	16:00	1,1	1,15	50	1	50
08/10/2014	16:20	1,15	1,2	50	0,33	150
09/10/2014	12:00	1,7	1,72	20	1	20
09/10/2014	13:00	1,72	1,85	130	1	130
09/10/2014	14:00	1,85	1,95	100	1	100
09/10/2014	15:00	1,95	2,05	100	1	100
09/10/2014	16:00	2,05	2,1	50	1	50
09/10/2014	16:20	2,1	2,15	50	0,33	150
13/10/2014	14:00	0,18	0,2	20	1	20
13/10/2014	15:00	0,2	0,24	40	1	40
13/10/2014	16:00	0,24	0,28	40	1	40
14/10/2014	10:00	0,4	0,41	10	1	10
14/10/2014	12:00	0,41	0,5	90	1	90
15/10/2014	9:00	0,5	0,7	200	0,5	400
15/10/2014	11:00	0,12	0,6	480	1	480
15/10/2014	12:00	0,6	0,61	10	1	10
15/10/2014	14:00	0	0,7	700	1	700
15/10/2014	15:00	0,7	0,86	160	1	160
15/10/2014	16:00	0,86	1,06	960	1	200
15/10/2014	16:20	1,06	1,19	130	0,33	390
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>124,71</b>

Tabla A2.8.- Producción de biogás con una carga de 2300 mg DQO/l

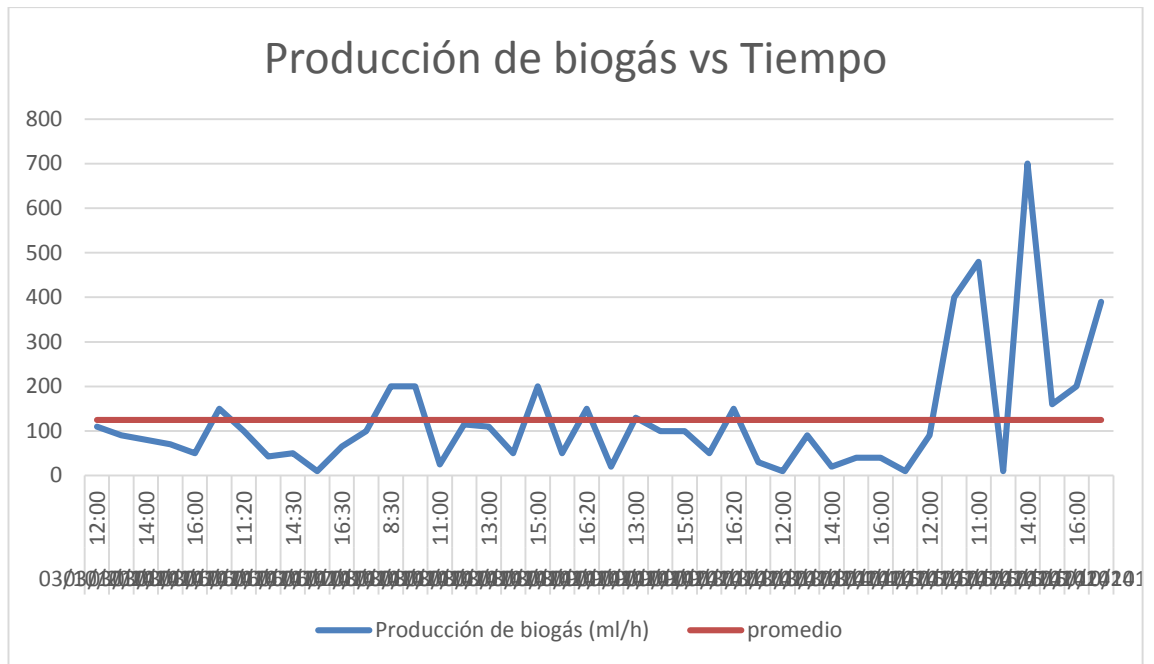


Gráfico A2.8.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 2300 mg DQO/l

Carga orgánica: 2500 mg DQO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de Biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
16/10/14	10:30	0,05	-----	-----	-----	-----
16/10/14	11:00	0,05	0,08	30	0,5	60
16/10/14	12:00	0,08	0,17	90	1	90
16/10/14	13:00	0,17	0,27	100	1	100
16/10/14	14:00	0,27	0,43	160	1	160
17/10/14	8:00	0	-----	-----	-----	-----
17/10/14	9:00	0	0,13	130	1	130
17/10/14	10:00	0,13	0,24	110	1	110
17/10/14	11:00	0,24	0,36	120	1	120
17/10/14	12:00	0	-----	-----	-----	-----
17/10/14	13:30	0	0,18	180	1,5	120
17/10/14	14:00	0,18	0,23	50	0,5	100
17/10/14	14:20	0,23	0,3	70	0,33	210
<b>Producción de biogás promedio</b>						120

Tabla A2.9.- Producción de biogás con una carga de 2500 mg DQO/l

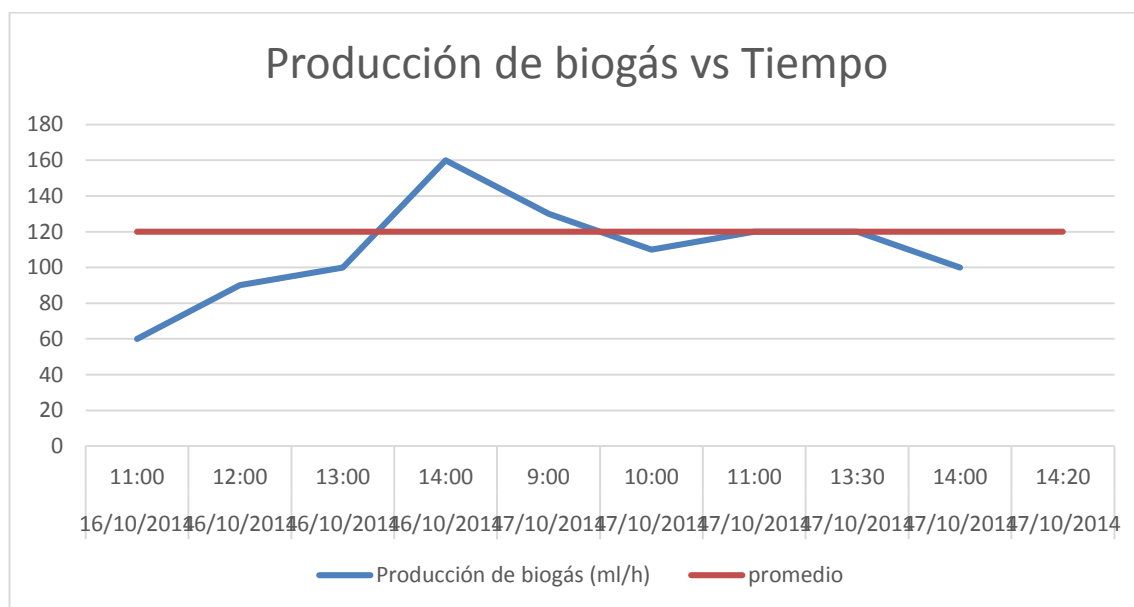


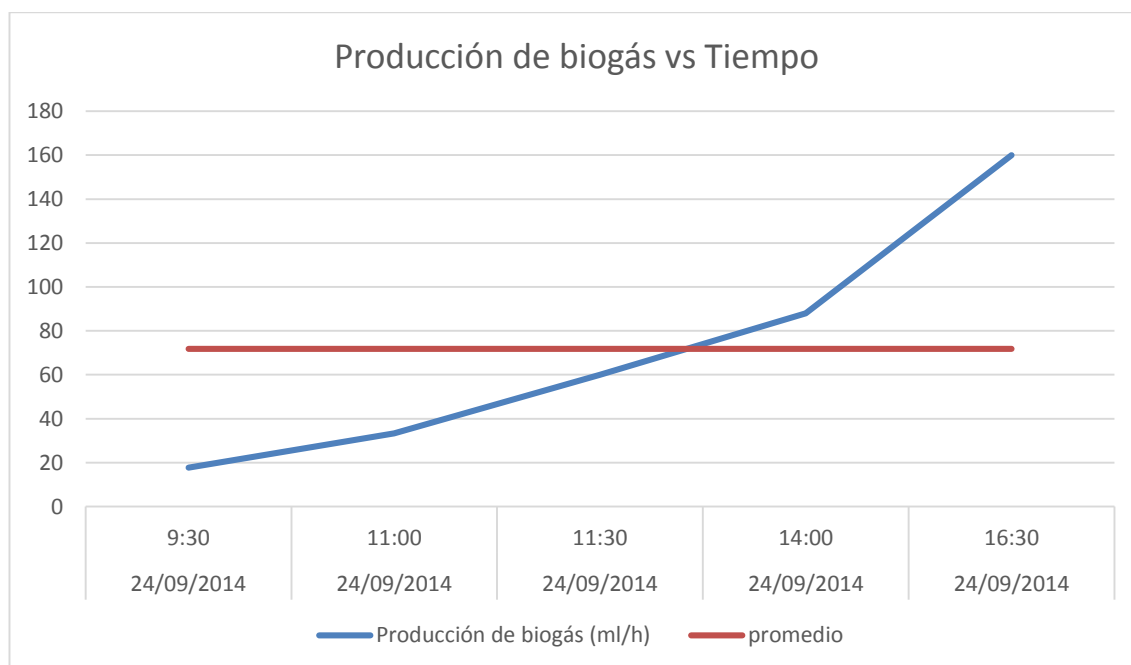
Gráfico A2.9.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 2500 mg DQO/l

## ANEXO III.- DATOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON EL AGUA RESIDUAL DE CAFÉ

Carga Orgánica aproximada: 1000 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
24/09/2014	9:30	0,3	0,6	300	17	17,65
24/09/2014	11:00	0,6	0,65	50	1,5	33,34
24/09/2014	11:30	0,65	0,68	30	0,5	60
24/09/2014	14:00	0,68	0,9	220	2,5	88
24/09/2014	16:30	0,9	1,3	400	2,5	160
<b>Producción de biogás promedio</b>						71,79

*Tabla A3.1.- Producción de biogás con una carga de 1000 mg DBO/l*



*Gráfico A3.1.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1000 mg DBO/l*

Carga Orgánica aproximada: 1500 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
25/09/2014	15:00	0	----	-----	-----	-----
25/09/2014	16:20	0	0,07	70	1,3333333333	52,5
26/09/2014	11:30	0,07	1,3	1230	19,166666667	64,17
26/09/2014	14:00	1,3	1,8	500	2,5	200
<b>Producción de biogás promedio</b>						105,56

Tabla A3.2.- Producción de biogás con una carga de 1500 mg DBO/l

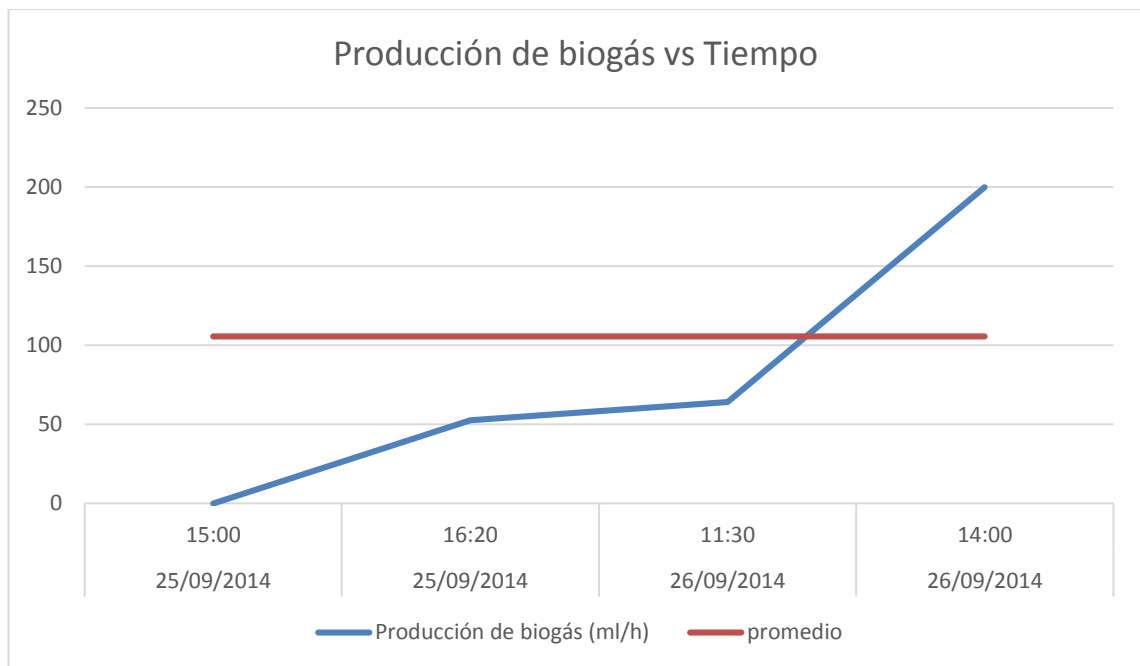


Gráfico A3.2.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 1500 mg DBO/l



Carga Orgánica aproximada: 2000 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
01/10/2014	13:00	0	0,155	155	1,5	103,33
01/10/2014	14:00	0,155	0,3	145	1	145
02/10/2014	11:00	0	0,25	250	1	250
02/10/2014	12:00	0,05	0,1	50	1	100
02/10/2014	13:00	0,1	0,23	130	1	130
02/10/2014	14:00	0,23	0,26	30	1	90
03/10/2014	11:00	0	0,05	50	1	50
06/10/2014	10:20	0	0,075	75	1	95
06/10/2014	11:20	0,075	0,17	95	1	115
06/10/2014	12:20	0,17	0,25	80	1	116
<b>Producción de biogás promedio</b>						119,96

Tabla A3.3.- Producción de biogás con una carga de 2000 mg DBO/l

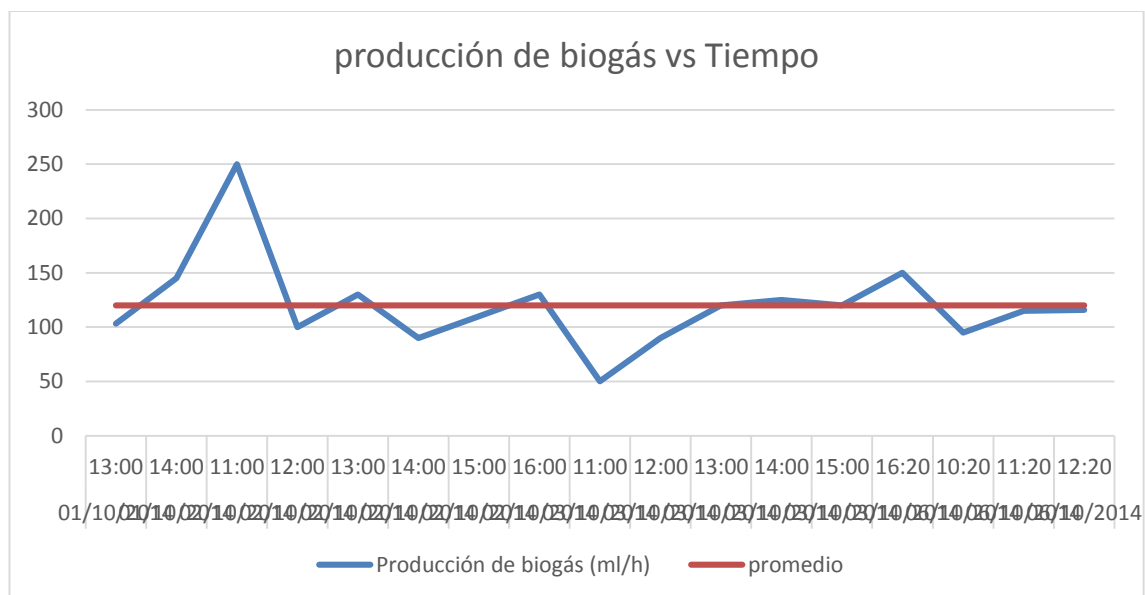


Gráfico A3.3.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 2000 mg DBO/l

Carga Orgánica aproximada: 2500 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
08/10/2014	12:00	0,218	0,116	102	1	102
08/10/2014	13:00	0,116	0,236	120	1	120
08/10/2014	14:00	0,236	0,361	125	1	125
08/10/2014	15:00	0,361	0,481	120	1	120
08/10/2014	16:00	0,481	0,611	130	1	130
08/10/2014	16:20	0,611	0,652	41,25	0,33	125
09/10/2014	9:30	0	-----	-----	-----	-----
09/10/2014	10:00	0	0,11	110	0,5	110
09/10/2014	11:00	0,11	0,26	150	1	150
09/10/2014	12:00	0,26	0,41	150	1	150
09/10/2014	13:00	0,41	0,53	120	1	120
09/10/2014	14:00	0,53	0,64	110	1	110
09/10/2014	15:00	0,64	0,74	100	1	100
09/10/2014	16:00	0,74	0,85	110	1	130
09/10/2014	16:20	0,85	0,879	29,7	0,33	90
<b>Producción de biogás promedio</b>						120,14

Tabla A3.4.- Producción de biogás con una carga de 2500 mg DBO/l

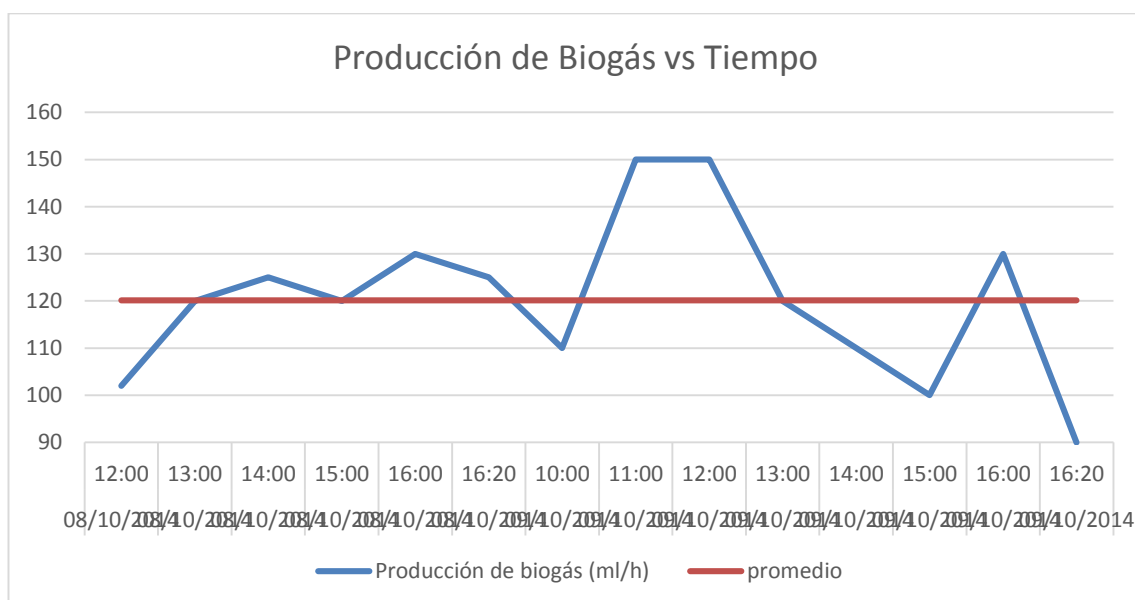


Gráfico A3.4.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 2500 mg DBO/l

Carga Orgánica aproximada: 3000 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
14/10/2014	10:00	0	0,09	90	1	90
14/10/2014	15:00	0,09	0,19	100	1	100
14/10/2014	16:00	0,19	0,315	125	1	125
15/10/2014	15:00	0,585	0,71	125	1	125
15/10/2014	16:00	0,71	0,8	100	1	100
15/10/2014	16:20	0,8	0,838	37,95	0,33	115
<b>Producción de biogás promedio</b>						115,83

Tabla A3.5.- Producción de biogás con una carga de 3000 mg DBO/l

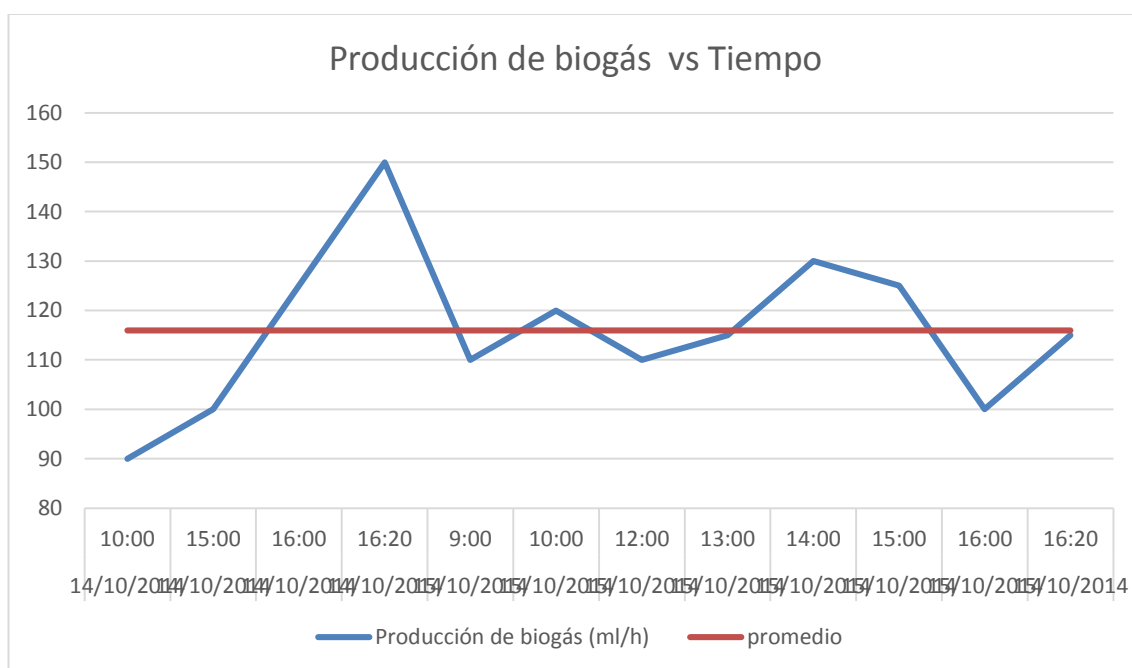


Gráfico A3.5.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 3000 mg DBO/l

Carga Orgánica aproximada: 3500 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
16/10/2014	16:00	0	0,05	90	1	90
16/10/2014	16:20	0,05	0,089	39,6	0,33	120
17/10/2014	8:00	0,08	2,087	2037,1	15,67	130
17/10/2014	10:00	0	0,14	140	1	140
17/10/2014	11:00	0,14	0,27	130	1	130
17/10/2014	12:00	0,27	0,395	125	1	125
17/10/2014	13:00	0,395	0,525	130	1	130
17/10/2014	14:00	0,525	0,645	120	1	120
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>123,12</b>

Tabla A3.6.- Producción de biogás con una carga de 3500 mg DBO/l

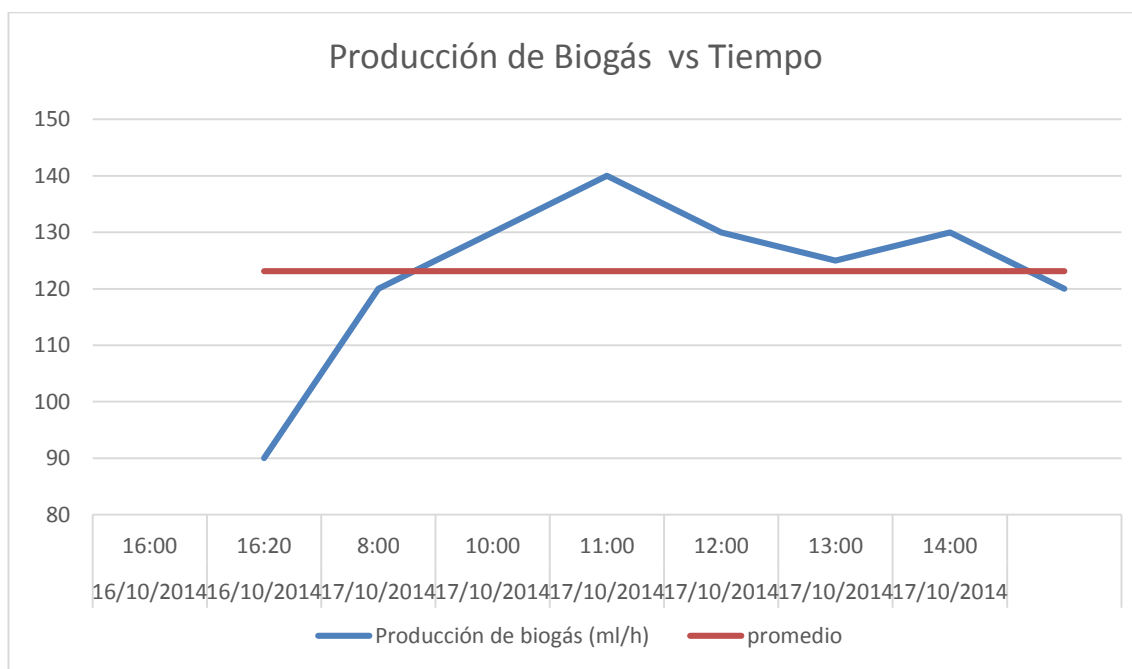


Gráfico A3.6.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 3500 mg DBO/l

Carga Orgánica aproximada: 4000 mg DBO/l

Fechas	Hora del día	Volumen inicial de biogás (l)	Volumen final de biogás (l)	Volumen de biogás producido (ml)	Número de horas transcurridas	Producción de biogás (ml/h)
18/10/2014	16:00	0	0,05	50	0,75	66,67
18/10/2014	16:20	0,05	0,089	39,6	0,33	120
19/10/2014	10:00	0	0,124	124	1	124
19/10/2014	11:00	0,124	0,254	130	1	130
19/10/2014	12:00	0,254	0,436	182	1	182
19/10/2014	13:00	0,436	0,561	125	1	125
19/10/2014	14:00	0,561	0,691	130	1	130
<b>Producción de biogás promedio</b>						<b>125,4±34.96</b>

Tabla A3.7.- Producción de biogás con una carga de 4000 mg DBO/l

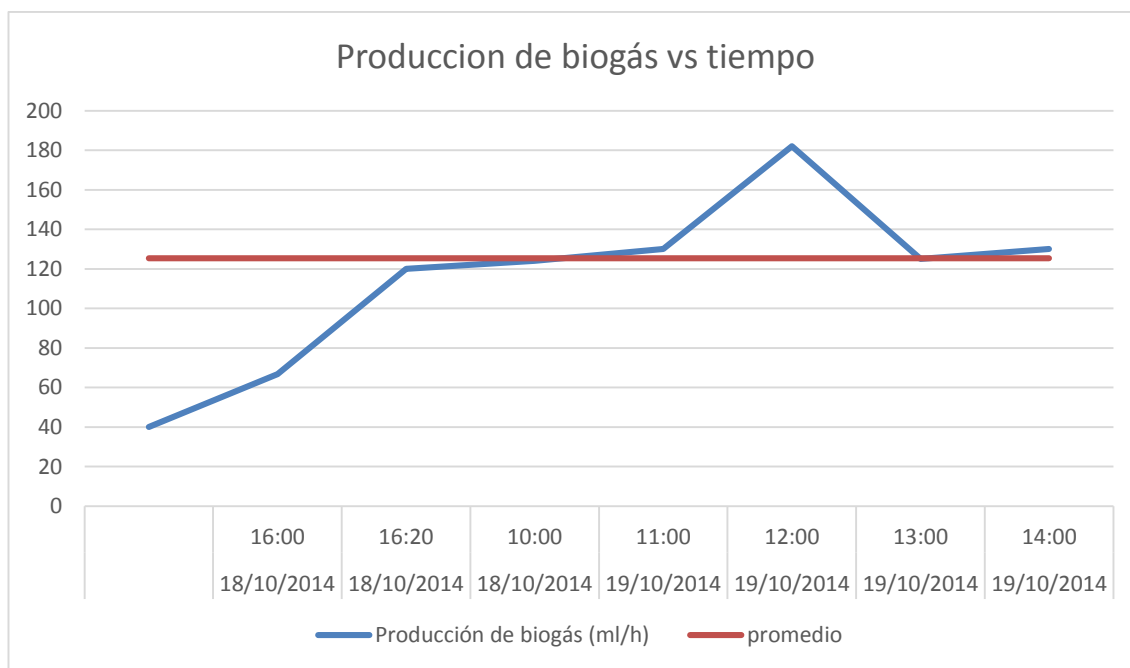


Gráfico A3.7.- Producción de Biogás vs tiempo, con una carga orgánica de 4000 mg DBO/l

## ANEXO IV.- DATOS DEL CAMBIO DEL POTENCIAL DE HIDROGENO EN EL AGUA RESIDAL DE LA EMPRESA PRODUCTORA DE CAFÉ

Hora	pH
10:30	4,73
11:30	11,70
12:30	11,75
13:30	5,36
14:30	4,52
15:30	4,38
16:30	4,43
17:30	4,46
<b>pH muestra compuesta</b>	<b>5,34±0,33</b>

Tabla A4.1.- medición de pH del primer día de muestreo

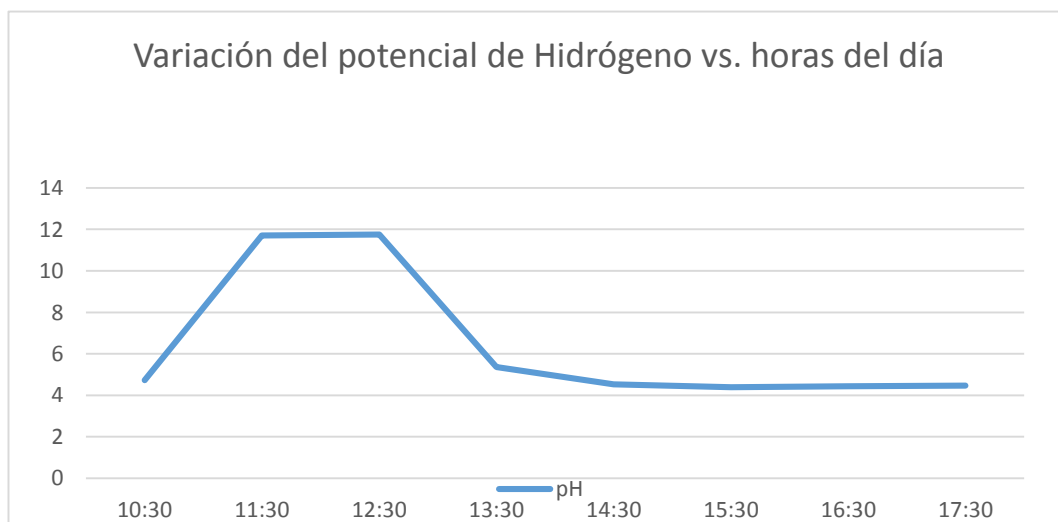


Gráfico A4.1.- Cambio de pH durante el primer día de muestreo

<b>Hora</b>	<b>pH</b>
10:00	6,50
11:00	3,75
12:00	3,40
13:00	3,75
14:00	3,45
15:00	3,32
16:00	3,00
17:00	2,97
<b>pH muestra compuesta</b>	<b>5,47</b>

Tabla A4.2.-Cambio de pH durante el segundo día de muestreo

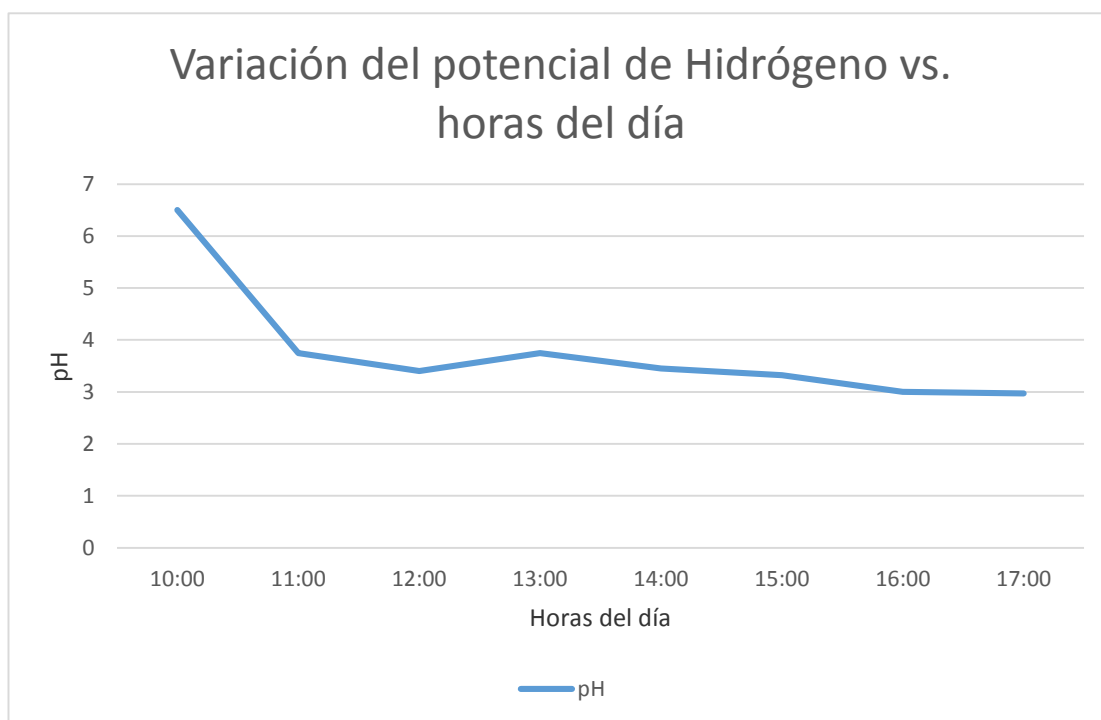


Gráfico 4.2.- Cambio de pH durante el segundo día de muestreo

hora	pH
10:00	8,02
11:00	9,05
12:00	11,94
13:00	5,05
14:00	4,70
15:00	4,59
16:00	4,46
17:00	4,24
<b>pH muestra compuesta</b>	<b>5.97</b>

Tabla A4.3.- Cambio de pH durante el tercer día de muestreo

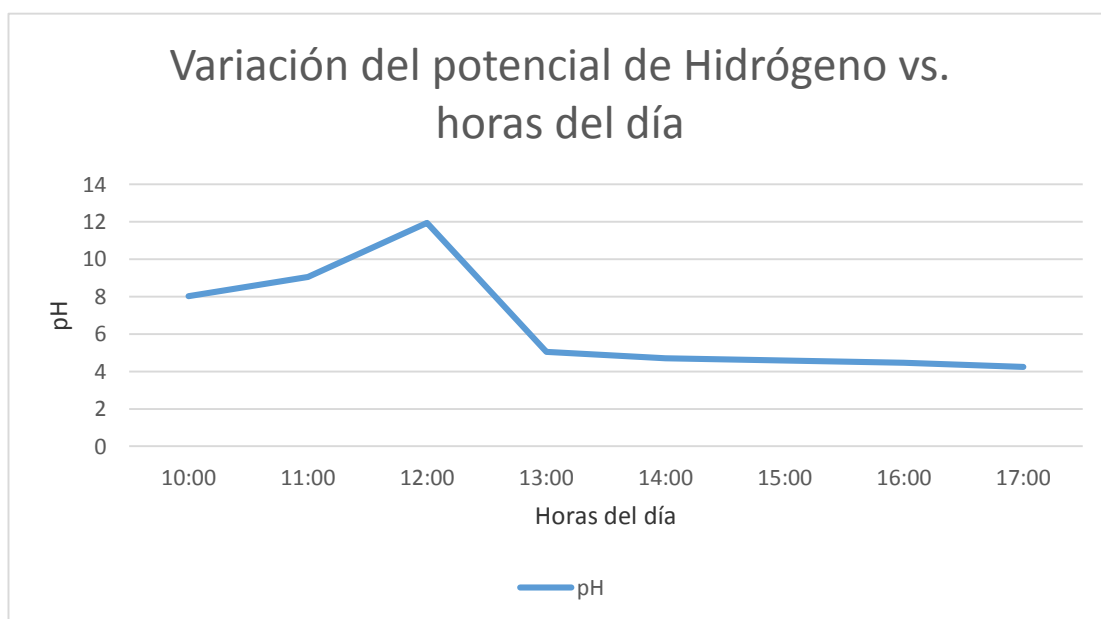


Gráfico 4.3.- Cambio de pH durante el tercer día de muestreo



<b>Hora</b>	<b>pH</b>
10:00	9,27
11:00	11,21
12:00	7,47
13:00	5,19
14:00	4,59
15:00	4,44
16:00	5,49
17:00	5,48
<b>pH muestra compuesta</b>	<b>5.23</b>

Tabla A4.4.- Cambio de pH durante el cuarto día de muestreo

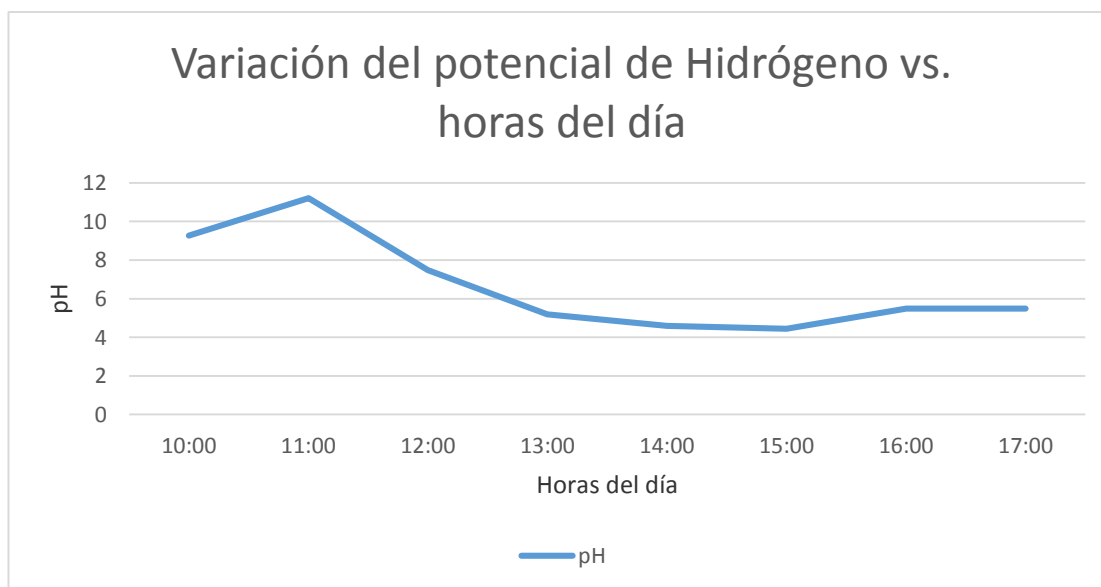


Gráfico 4.4.- Cambio de pH durante el cuarto día de muestreo

## ANEXO V.- DATOS DEL AJUSTE DEL pH EN EL AGUA RESIDUAL DE CAFÉ

	Muestra de café a diferentes concentraciones de carga orgánica dejadas al aire libre							Muestra de café a diferentes concentraciones de carga orgánica tapadas con papel aluminio						
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg	mg
DB	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	DBO	
O/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	/L	
1:00	6,49	6,30	6,19	6,10	6,04	5,99	5,95	6,50	6,29	6,19	6,10	6,05	5,98	5,93
1:15	6,48	6,30	6,19	6,11	6,03	5,98	5,94	6,36	6,22	6,13	6,05	6,00	5,99	5,94
1:30	6,44	6,26	6,16	6,09	6,02	5,97	5,93	6,38	6,23	6,15	6,06	6,00	5,99	5,95
2:00	6,35	6,29	6,11	6,03	5,98	5,94	5,89	-	-	-	-	-	-	-
3:00	6,29	6,26	6,22	6,11	6,04	5,99	5,93	6,43	6,25	6,18	6,05	5,98	5,98	5,94
4:30	6,30	6,25	6,17	6,09	6,02	5,98	5,90	6,42	6,19	6,09	6,00	5,94	5,95	5,91
8:15	7,00	6,63	6,57	6,68	6,63	6,65	6,36	6,80	6,46	6,48	6,27	6,20	6,58	6,55

**Tabla A.5.- AJUSTE DEL PH -EN EL AGUA RESIDUAL DEL CAFÉ**

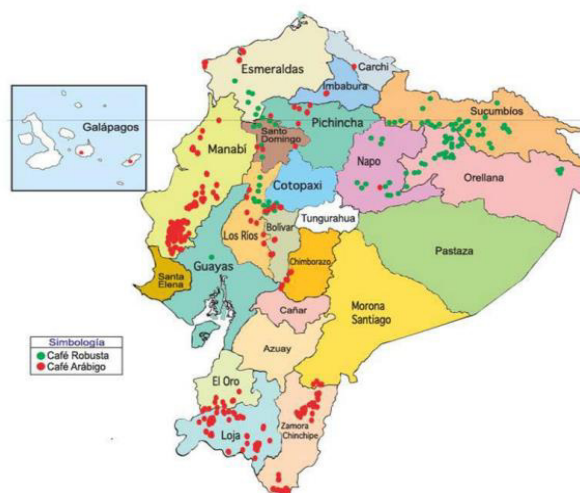
## **ANEXO VI.- DATOS SOCIO-ECONOMICOS DE LA INDUSTRIA CAFETERA ECUATORIANA**

De acuerdo a un estudio realizado por el Consejo Cafetalero Nacional COFENAC, la situación de la caficultura a diciembre del 2012 se describe en los siguientes datos:

- Superficie Total: 199,215 ha
- Área de café arábigo: 136,385 ha
- Área de café robusta: 62,830 ha
- Área cosechada: 149,411 ha
- Unidades de producción cafetalera: 105,000 UPA's
- Producción nacional: 650.000 sacos de 60 kg
- Producción de café arábigo (%): 62%

Considerando que existen cafetales abandonados y otras áreas en crecimiento, se estima que solo el 75% de la superficie total corresponde a cafetales en producción efectivamente cosechados. Al analizar la distribución de la superficie cafetalera por provincias se destaca que Manabí, Loja, Orellana y Sucumbíos tienen las mayores áreas de cosecha.

Imagen N° 1  
Principales zonas cafetaleras del Ecuador



Fuente y Elaboración: COFENAC, GTZ 2009

7

**Figura A6.1.- Distribución de la producción cafetera en el ECUADOR**

Tabla N° 1  
Superficie cafetalera del Ecuador y Área en producción efectiva 2012

PROVINCIAS	CAFÉ ARÁBIGO		CAFÉ ROBUSTA		ÁREA CAFETALERA NACIONAL	
	SUPERFICIE TOTAL	ÁREA EN PRODUCCIÓN	SUPERFICIE TOTAL	ÁREA EN PRODUCCIÓN	SUPERFICIE TOTAL	ÁREA EN PRODUCCIÓN
Datos en hectáreas						
Esmeraldas	900	675	6.345	4.759	7.245	5.434
Manabí	70.050	52.538	0	0	70.050	52.538
Santa Elena	1.800	1.350	0	0	1.800	1.350
Guayas	6.355	4.766	425	319	6.780	5.085
Los Ríos	3.520	2.640	6.610	4.958	10.130	7.598
El Oro	9.730	7.298	0	0	9.730	7.298
Carchi	195	146	0	0	195	146
Imbabura	300	225	0	0	300	225
Pichincha	850	638	1.300	975	2.150	1.613
Santo Domingo	0	0	2.650	1.988	2.650	1.988
Cotopaxi	1.000	750	800	600	1.800	1.350
Bolívar	3.410	2.558	2.580	1.935	5.990	4.493
Chimborazo	650	488	0	0	650	488
Cañar	270	203	0	0	270	203
Azuay	230	173	0	0	230	173
Loja	29.345	22.009	0	0	29.345	22.009
Sucumbios	0	0	17.320	12.990	17.320	12.990
Orellana	0	0	20.000	15.000	20.000	15.000
Napo	0	0	4.800	3.600	4.800	3.600
Pastaza	40	30	0	0	40	30
Morona Santiago	290	218	120	90	410	308
Zamora Chinchipe	6.350	4.763	0	0	6.350	4.763
Galápagos	1.100	825	0	0	1.100	825
<b>Total</b>	<b>136.385</b>	<b>102.289</b>	<b>62.830</b>	<b>47.123</b>	<b>199.215</b>	<b>149.411</b>

Fuente: COFENAC

Elaboración: Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones, PRO ECUADOR

**Figura A6.2.- Producción de café por provincias en ECUADOR**

## ANEXO VII.- LÍMITES DE DESCARGA AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO PÚBLICO

Continua...

Continuación...  
TABLA 11. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Caudal máximo		l/s	1,5 veces el

LIBRO VI

ANEXO1

326



PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
			caudal promedio horario del sistema de alcantarillado.
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	1,0
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo (ECC)	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cromo Hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,5
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O <sub>5</sub>	mg/l	250
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	500
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Fósforo Total	P	mg/l	15
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20
Manganeso total	Mn	mg/l	10,0
Materia flotante	Visible		<b>Ausencia</b>
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	40
Plata	Ag	mg/l	0,5
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Sólidos Sedimentables		ml/l	20
Sólidos Suspendedos Totales		mg/l	220
Sólidos totales		mg/l	1 600
Selenio	Se	mg/l	0,5

LIBRO VI

ANEXO1

327

## BIBLIOGRAFÍA

1. MORENO JIMÉNEZ, HENRY. Optimización de diseño del sistema de alimentación de reactores U. A. S. B.. Revista Memos de Investigación, No. 284. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
2. LETTINGA, G. VAN VELSEN, A. HOBMA, S. DE ZEEUW, W. y KLAPWIJK, A. use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering* (1994), Vol 22, N° 4, p 699-734.
3. Método 4500 –H<sup>+</sup>B del Standard methods for Examination of Water and Wastewater (AWWA). Edición 22, de 2012
4. Standard Methods for the examination of water and wastewater 22<sup>th</sup> edition, 2012, APHA, AWWA, WEF , Page 5-20, 5-21. Method 5220D, Método colorimétrico de Reflujo Cerrado
5. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA)
6. Standard Methods for the examination of water and wastewater 22th edition, 2012, APHA, AWWA, WEF , Page 2- 54, 2.- 55. Método 2510 B
7. Romero, J. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Editorial Alfaomega. Tercera Edición. Colombia. Año 2003. Páginas: 144-162, 173-200,
8. APHA, AWWA, WPCF. MÉTODOS NORMALIZADOS – Para el análisis de aguas potables y residuales. Editorial Díaz de Santos S.A. Decimoséptima edición. Madrid, España. Año 1992
9. P. Conil. (2013). La tecnología anaerobia U.A.S.B. en el tratamiento de las aguas residuales domesticas: 10 años de desarrollo y maduración en américa latina. Recuperado el 28 de agosto de 2013. [http://200.29.232.126/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/29-PC8-C35C-\\_La-tecnolog%C3%ADa-anaerobia-Sevilla\\_.pdf](http://200.29.232.126/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/29-PC8-C35C-_La-tecnolog%C3%ADa-anaerobia-Sevilla_.pdf), 3-14