

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA EL  
APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE  
LAS PLANTAS EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA DE LA ZONA DE PUERTO WILCHES**

**Autor:  
SONIA RAQUEL DUARTE CELY**

**Director:  
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY  
Ph. D. Ingeniero Químico**

**Entidades Interesadas:  
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES – CEIAM  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA  
2006**



## CONTENIDO

	Pag.
<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>11</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
<b>2. BIOGÁS: FUENTE DE ENERGÍA APROVECHABLE</b>	<b>15</b>
2.1 DEFINICIÓN	15
2.2 OBTENCIÓN: DIGESTIÓN ANAEROBIA	15
2.3 CARACTERÍSTICAS	16
2.3.1 Composición	16
2.3.2 Propiedades Físico – Químicas	16
2.4 APLICACIONES	17
<b>3. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA PARA APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS OBTENIDO EN EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA</b>	<b>19</b>
3.1 AGROINDUSTRIA DEL ACEITE DE PALMA EN COLOMBIA	19
3.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	20
3.2.1 Recepción	20
3.2.2 Esterilización	21
3.2.3 Desfrutamiento	21
3.2.4 Digestión	22
3.2.5 Prensado	22
3.2.6 Clarificación	22
3.2.7 Secado	22
3.2.8 Palmistería	23
3.3 TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EN LA AGROINDUSTRIA PALMERA	23
3.4 TECNOLOGÍA PARA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE EFLUENTES	24
3.4.1 Mecanismos de Acción Anaerobia	24
3.4.2 Lagunas Anaeróbicas	26

3.4.3	Biodigestores	27
3.4.4	Lagunas Facultativas	28
3.5	CICLO DEL BIOGÁS EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	29
3.6	USO DE BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	31
3.7	VALORIZACIÓN DE BIOGÁS EN LA AGROINDUSTRIA DE PALMA COLOMBIANA	32
3.7.1	Palmar de Santa Elena	32
3.7.2	Palmeiras	33
<b>4.</b>	<b>ESTADO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA PALMERA EN COLOMBIA</b>	<b>35</b>
4.1	CONSUMO DE RECURSOS NATURALES Y ENERGÍA	35
4.2	PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN	35
4.2.1	Vertimientos	35
4.2.2	Residuos Sólidos	36
4.2.3	Emisiones Atmosféricas	38
4.2.4	Desechos de Laboratorio	38
4.2.5	Otros Contaminantes	38
4.2.6	Descargas Térmicas Aéreas	38
4.2.7	Descargas Térmicas Líquidas	38
4.3	FACTORES CRÍTICOS AMBIENTALES	38
4.3.1	Efluentes	38
4.3.2	Residuos Sólidos	39
<b>5.</b>	<b>VALORIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DE ACEITE DE PALMA DE PUERTO WILCHES</b>	<b>40</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	40
5.1.1	Palmas Oleaginosas Bucarelia	40
5.1.2	Promociones Agropecuarias Monterrey	40
5.1.3	Palmas Oleaginosas Las Brisas S. A.	41
5.1.4	Palmeras de Puerto Wilches	41
5.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	42
5.3	PRODUCCIÓN ESTIMADA DE BIOGÁS	44
5.4	REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	45
<b>6.</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL</b>	<b>46</b>
6.1	ELIMINACIÓN DE VERTIMIENTO	46
6.2	PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO	47
6.3	REDUCCIÓN DE EMISIONES	47
6.4	INFRAESTRUCTURA REQUERIDA	48
6.5	ANÁLISIS ECONÓMICO	49
<b>7.</b>	<b>VALORIZACIÓN DE BIOGÁS COMO PROYECTO MDL</b>	<b>50</b>

7.1	DESARROLLO, MEDIO AMBIENTE Y COMPROMISOS INTERNACIONALES	52
7.2	CICLO DEL PROYECTO MDL	54
7.3	PROYECTOS COLOMBIANOS DE REDUCCIÓN DEL GEI	55
7.4	CAPTURA DE CO <sub>2</sub> EN EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA DE PUERTO WILCHES	55
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>58</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>65</b>

**LISTA DE FIGURAS**

	Pag.
1. Diagrama de Bloques del Proceso de Extracción de Aceite de Palma	21
2. Diagrama de la Digestión Anaeróbica de Materia Orgánica	26
3. Clases Típicas de Biodigestores	28
4. Zonas de Degradación de Materia Orgánica en un Sistema Facultativo	29
5. Ciclo del Biogás para el Proceso de Extracción de Aceite de Palma	30
6. Diagrama de una Línea de Conducción de Biogás	48
7. Accesorios para Conducción y Limpieza de Biogás	49
8. Ciclo de un Proyecto MDL	54

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
1. Composición Aproximada del Biogás	16
2. Propiedades Físico – Químicas del Biogás	17
3. Consumo de Biogás en Algunas Aplicaciones	17
4. Rendimientos del Procesamiento del Fruto de la Palma de Aceite	20
5. Especificaciones Operativas de Una Laguna Anaeróbica	27
6. Características del Sistema de Valorización de Biogás en el Palmar de Santa Elena	33
7. Características del Sistema de Valorización de Biogás en la Planta Palmeiras	34
8. Consumo de Recursos y Energía en Proceso de Extracción de Aceite de Palma	35
9. Vertimientos que Conforman los Efluentes de una Extractora de Aceite de Palma	36
10. Caracterización de Efluentes de Plantas Extractoras en Colombia	36
11. Poder Calorífico de Residuos Sólidos de una Extractora de Aceite de Palma	37
12. Parámetros del Tratamiento de Efluentes en Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches	43
13. Remoción de Contaminantes en Vertimientos de Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches	43
14. Normatividad Nacional para Vertimientos – Decreto 1594/84 Art. 72	44
15. Indicadores Energéticos y de Producción de Biogás para la Agroindustria de Palma	44
16. Consumo de EE, Producción de Biogás y Generación de EE Estimadas para las Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches	45
17. Cantidad de Efluente Vertido por Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches	46
18. Consideraciones Técnicas y Económicas para Análisis Económico	49
19. Inversión Fija para Conducción del Biogás	50
20. Inversión y Costos Anuales para Captación, Almacenamiento y Conducción de Biogás	50
21. Ingresos Anuales y Excedentes Diarios de Biogás por Sustitución de ACPM	50
22. Indicadores del Análisis Económico	51
23. Proyectos Colombianos para Reducción de GEI	55
24. Potencial de Calentamiento Global de los GEI	56
25. Emisión Equivalente de CO <sub>2</sub> en Extractoras de Aceite de Puerto Wilches	56

**LISTA DE ANEXOS**

	Pag.
A. Memoria de Cálculo	65
B. Metodología y Técnicas para Análisis de Efluentes en Plantas de Puerto Wilches	66

## RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LAS PLANTAS EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA DE LA ZONA DE PUERTO WILCHES. \*

AUTOR: DUARTE C., Sonia R. \*\*

PALABRAS CLAVES: BIOGÁS, EFLUENTES, ACEITE, PALMA, ELECTRICIDAD, EMISIÓN

Este documento contiene un estudio de viabilidad técnica, económica y ambiental de la producción de energía eléctrica, a partir del Biogás obtenido del tratamiento anaeróbico de efluentes en extractoras de aceite de palma, ubicadas en la región de Puerto Wilches.

El Biogás se inyecta mezclado con ACPM en motores Diesel para generar energía eléctrica, reemplazando hasta el 50% del combustible y reduciendo hasta el 47% los costos de producción de energía. La captura y aprovechamiento del Biogás en extractoras de aceite de palma de la zona de Puerto Wilches, favorece la operación de las plantas en varios aspectos:

- Técnico: porque se aprovecha un subproducto obtenido en los sistemas de tratamiento de efluentes, el cual se emite actualmente a la atmósfera causando una contaminación ambiental.
- Ambiental: ya que la combustión del Biogás en el generador de energía eléctrica, permite eliminar la emisión del metano contenido en el Biogás, causando una reducción considerable en la emisión de gases promotores de efecto invernadero (GEI).
- Económico: debido a que se disminuye el consumo de ACPM para generar energía eléctrica en cada planta, reduciendo los costos operativos del producto; adicionalmente la reducción de GEI, califica esta propuesta como un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL) para captura de dióxido de carbono, de acuerdo con las alternativas planteadas en el Protocolo de Kyoto para alcanzar las metas de reducción de GEI.

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Especialización en Ingeniería Ambiental, Director: CASTILLO M., Edgar F.

## ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY STUDY TO USE BIOGAS, THAT IS PRODUCED IN TREATMENT SYSTEM OF EFLUENTS AT OIL PALM PLANTS AT PUERTO WILCHES TOWN (COLOMBIA). \*

AUTHOR: DUARTE C., Sonia R. \*\*

KEY WORDS: BIOGAS, EFLUENTS, OIL, PALM, ELECTRICITY, EMISSION

This document contains a technical, economic and environmental viability study for electric power production starting from produced Biogas at anaerobic treatment systems of effluents in palm oil plants located at Puerto Wilches's municipality.

Biogas is injected blended with fuel oil in Diesel generators producing electric power, reducing fuel oil consumption until 50%, through replacement with Biogas, decreasing until 47% electric power cost. The capture and use of the Biogas in palm oil plants at Puerto Wilches's municipality, improvement the operation of the process in several workspaces:

- Technical: because it use a by-product obtained in effluents treatment systems, removing the atmospheric emission of Biogás causing an improvement environmental.
- Environmental: because Biogas combustion using to generate electric power, allows eliminating emission of contained methane in Biogas, reducing considerably emission of greenhousing gases (GHG).
- Economic: because plants diminish consumption of fuel oil to generate electric power and they reduce operative costs of product. Additionally reduction of GHG, qualifies this proposal like a clean development mechanism project (CDM) for capture of carbon dioxide, in accordance with the alternatives outlined in the Kyoto Protocol to reach the objectives of reduction of GHG.

\* Monograph

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Especialización en Ingeniería Ambiental, Director: CASTILLO M., Edgar F.

## INTRODUCCION

La agroindustria de la palma de aceite en su fase de extracción de aceite crudo, genera algunos subproductos de desecho (sólidos y líquidos) en grandes cantidades, los cuales mediante procesos de tratamiento y control ambiental se han logrado acondicionar para viabilizar el aprovechamiento dentro de sus propias plantas y así mismo en cultivos y comunidades vecinas.

Desechos sólidos como racimos vacíos, cáscara y fibra, conforman una biomasa libre de azufre, que se genera constantemente y es usada como combustible en calderas para generar vapor y energía eléctrica (co-generación) mientras que las cenizas obtenidas de la combustión se disponen en plantaciones como fertilizantes.

El efluente (desecho líquido) generado en las plantas extractoras presenta una elevada carga orgánica (hasta 25.000 mg/l DBO) la cual generalmente se remueve eficazmente mediante tratamientos de digestión anaerobia; de esta remoción se obtienen cantidades considerables de Biogás, el cual debe quemarse para reducir su impacto al ambiente y eventualmente puede aprovecharse para generar energía eléctrica o usarse a nivel industrial o residencial como fuente alternativa de combustible energéticamente competente y de bajo costo; el efluente tratado puede aplicarse en la fertilización de plantaciones gracias a que presenta una cantidad aprovechable de nutrientes.

Ante el anterior contexto se demuestra que para lograr mejores índices de competitividad y productividad, la agroindustria de la palma, cuenta con un potencial considerable en la aplicación sostenible de los subproductos de sus sistemas de tratamiento y control ambiental.

El presente estudio de viabilidad técnico – económica y ambiental del aprovechamiento del Biogás obtenido del tratamiento de efluentes en las plantas extractoras de aceite de palma, evalúa básicamente la eventual cogeneración de energía eléctrica en cada una de las plantas en la región de Puerto Wilches, tomando como base la posibilidad actual para captar y tratar el bio-combustible obtenido en dichas plantas y aplicarlo en generadores eléctricos Dual-Fuel, reemplazando el ACPM hasta un 50%, lo cual permitiría una reducción hasta del 47% en costos de generación de energía eléctrica.

Iniciativas como esta buscan que la agroindustria de la palma en la zona de Puerto Wilches, pueda consolidarse a nivel nacional y mundial, ya que conducen a una considerable disminución de costos energéticos y de producción, permitiéndole lograr una mayor competitividad técnica, ambiental y económica soportada en estándares de calidad, eficiencia productiva y mayor valor agregado.

Ambientalmente, se podría hacer un aporte considerable en la reducción del calentamiento global, ya que la combustión del metano contenido en el Biogás que se viene emitiendo a la atmósfera, causa un efecto invernadero muy superior a una emisión de dióxido de carbono, que se obtendría como gas de combustión. Además, mediante la cuantificación de esta reducción de GEI que se obtendría con el aprovechamiento del Biogás, el estudio puede calificar como un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL) para captura de dióxido de carbono, de acuerdo con los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kyoto para alcanzar las metas de reducción de GEI por parte de los países industrializados.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de la generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás producido en las piscinas de oxidación de las plantas procesadoras de Palma de la Zona de Puerto Wilches.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Plantear alternativas y/o sistemas de tratamiento de efluentes que permitan la recolección de Biogás producido por descomposición anaerobia de la materia orgánica.
- Cuantificar los volúmenes de Biogás producido en cada una de las plantaciones en estudio.
- Definir los parámetros de operación adecuados para las plantas generadoras de energía eléctrica a partir de Biogás.
- Comparar los costos de producción de energía eléctrica por los medios tradicionales y a través de la utilización de Biogás.
- Determinar el monto de las inversiones necesarias para el autoabastecimiento energético de las plantaciones de palma a partir de Biogás y la posible inserción de los excedentes de energía eléctrica en el Sistema de Interconexión Eléctrica Nacional.
- Documentar a los inversionistas palmeros con la información técnica y financiera necesaria para la realización de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de Biogás.

- Evaluar los efectos ambientales y socioeconómicos de la generación de energía eléctrica a través de esta alternativa.
- Proponer las estrategias para impulsar la introducción de este sistema de generación en las plantas productoras de palma africana.

## 2. BIOGAS: FUENTE DE ENERGIA APROVECHABLE

### 2.1 DEFINICIÓN

El Biogás es un combustible compuesto por una mezcla de gases producto de la descomposición de materia orgánica por acción de bacterias metanogénicas en ausencia de oxígeno, fenómeno que se denomina Digestión Anaerobia; su carácter combustible y valor energético está determinado por el contenido de Metano; tales características lo hacen comparable con el gas natural <sup>(3, 4)</sup>.

### 2.2 OBTENCION: DIGESTION ANAEROBIA <sup>(3, 4, 8, 10, 12)</sup>

El Biogás se produce por fermentación de Materia Orgánica (MO) en ausencia de aire, fenómeno conocido como Digestión Anaerobia (DA) la cual es una fermentación microbiana de MO en ausencia de oxígeno, que se transforma en una mezcla de gases (Biogás) y una suspensión acuosa o solución orgánica estabilizada que contiene compuestos difíciles de degradar y minerales presentes inicialmente en la biomasa; dicha solución obtenida es un excelente reparador de suelos de alto valor fertilizante, por lo cual suele usarse como fertilizante, para riego y piscicultura. Este bioproceso se desarrolla en cuatro etapas en las que la biomasa se descompone en moléculas más simples (como el metano y dióxido de carbono) mediante la acción de diferentes tipos de bacterias.

La DA es un proceso que se realiza en la naturaleza en pantanos, mangles, lagos y ríos, como parte del ciclo del carbono y de la cadena alimenticia de ciertos microorganismos (bacterias anaerobias) no obstante, el Biogás obtenido por esta vía no es aprovechable.

Una gran cantidad de residuos orgánicos pueden degradarse mediante DA (estiércol de animales, agua residual, residuos domésticos o agrícolas, efluentes industriales, entre otros); preferiblemente MO o biomasa residual con alto contenido de humedad. La DA de residuos orgánicos se lleva a cabo en un recipiente o tanque sellado denominado Biodigestor, especialmente diseñado en diversos materiales (ladrillo, metal, polímeros) con formas cilíndrica o esférica, dentro del cual se crean las condiciones ideales para que las

bacterias metanogénicas fermenten la MO en ausencia de oxígeno. La transformación de desechos orgánicos mediante DA ofrece enormes ventajas:

- **Mejora la capacidad fertilizante del residuo:** nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y elementos menores son conservados en el efluente tratado; buena parte del nitrógeno presente en forma de macromoléculas es transformado a moléculas simples como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) que son de fácil aprovechamiento por las plantas
- **Reduce Malos Olores:** el efluente tratado es mucho menos oloroso que el afluente
- **Control de patógenos:** se ha demostrado experimentalmente que cerca del 85% de los patógenos no sobreviven a la DA, no obstante, el nivel de destrucción de patógenos varía con la temperatura y tiempo de retención.

## 2.3 CARACTERISTICAS

### 2.3.1 Composición

La composición del Biogás depende de las condiciones de la DA y las características de la MO involucrada en la misma, no obstante, el Metano ( $\text{CH}_4$ ) y el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) son sus principales componentes (Tabla 1); además, presenta trazas de otros gases como nitrógeno, monóxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), el cual por su carácter corrosivo y tóxico, especialmente al mezclarse con agua, debe ser removido para facilitar su aprovechamiento <sup>(12)</sup>.

**Tabla 1. Composición Aproximada del Biogás** <sup>(3, 4, 12)</sup>

Compuesto		% Volumen
Metano	$\text{CH}_4$	60 – 80
Dióxido de Carbono	$\text{CO}_2$	30 – 40
Hidrógeno	$\text{H}_2$	0 – 1
Nitrógeno	$\text{N}_2$	1 – 2
Monóxido de Carbono	$\text{CO}$	0 – 1,5
Oxígeno	$\text{O}_2$	0,1
Sulfuro de Hidrógeno	$\text{H}_2\text{S}$	0 – 1
Vapor de Agua	$\text{H}_2\text{O}$	0,3

### 2.3.2 Propiedades Físico – Químicas

El Biogás es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación cercana a los 700 °C

(Diesel 350 °C, gasolina y propano cerca de 500 °C) la temperatura de llama alcanza los 870 °C, se quema con llama azul prácticamente sin producir olor y su poder calorífico oscila entre 20 y 25 MJ/m<sup>3</sup> (gas natural oscila entre 33 y 38 MJ/m<sup>3</sup>) que corresponde a 6 KWh/m<sup>3</sup> y es aproximadamente equivalente a medio litro de diesel. Mezclas de Biogás con aire en una relación de 1 a 20 forman una mezcla gaseosa altamente explosiva <sup>(3,4)</sup>.

**Tabla 2. Propiedades Físico – Químicas del Biogás** <sup>(12, 18)</sup>

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad	Kg / m <sup>3</sup>	1,09
Solubilidad en Agua	-	Baja
Presión Crítica	Psia	673,1
Temperatura Crítica	°C	82,5
Poder Calorífico	Kcal / m <sup>3</sup>	de 4.500 a 6.500

## 2.4 APLICACIONES <sup>(12, 18)</sup>

Las aplicaciones para aprovechar el Biogás pueden agruparse en las siguientes opciones:

- Generación de Electricidad: utilizando motores diesel o gasolina acoplados para generación de energía eléctrica
- Combustión Directa: en operaciones de calentamiento (hornos, calderas de vapor convencionales) y refrigeración
- Consumo: mediante la adaptación para Biogás de gasodomésticos que usualmente utilizan propano o gas natural (estufas de cocina, lámparas, sistemas de alumbrado, calentadores, neveras, motores).

**Tabla 3. Consumo de Biogás en Algunas Aplicaciones** <sup>(12)</sup>

Equipo	Consumo en m <sup>3</sup> / h
Estufa de Cocina	0,15 – 0,20
Lámpara de Gas equivalente a una bombilla de 60 W	0,10
Calentadores para cría de animales	0,15 – 0,25
Motor Biogás – diesel por b. h. p.	0,42
Producción de 1 KWh de corriente eléctrica con una mezcla diesel – Biogás	0,70

La energía utilizable del biogás corresponde al aporte calorífico del Metano, ya que los componentes

restantes no participan en el proceso de combustión, a pesar de contar con un contenido energético. Un metro cúbico de Biogás totalmente combustionado es suficiente para:

- Generar 1,25 Kwh de energía eléctrica
- 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 watts
- Poner a funcionar un refrigerador de 1 m<sup>3</sup> de capacidad durante una hora
- Hacer funcionar una incubadora de 1 m<sup>3</sup> de capacidad durante media hora
- Hacer funcionar un motor de 1 Hp durante 2 horas.

El Biogás puede quemarse en su estado original en instalaciones de gas natural o butano, en cuyo caso basta con adaptar los quemadores a las características de combustible. En motores de combustión interna es posible alcanzar hasta 90% de aprovechamiento de la energía contenida en el Biogás gracias a la potencia y calor desarrollados por el motor con este combustible.

A diferencia del Biogás, el Gas Natural es un recurso no renovable que generalmente se encuentra en yacimientos solo o con petróleo; la similitud fundamental en sus características radica en que el principal componente es el Metano. Biogás y Gas Natural son considerados fuentes de energía más ecológicas que los combustibles líquidos, gracias a que su combustión no libera monóxido de carbono (CO) por lo tanto, son ampliamente utilizados en sistemas de combustión <sup>(3)</sup>.

### 3. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA PARA APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS OBTENIDO EN EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA

#### 3.1 AGROINDUSTRIA DEL ACEITE DE PALMA EN COLOMBIA

La palma de aceite (*Elaeis Guineensis* Jacq) es un cultivo tropical tardío de largo rendimiento, su vida productiva, puede durar hasta 50 años, pero se maneja comercialmente hasta los 25 años por las dificultades de cosecha debido a la altura del tallo. Cada hectárea sembrada con palma de aceite puede rendir hasta cinco toneladas de aceite anualmente, mucho más que cualquier otra planta oleaginosa. Las primeras semillas de palma de aceite llegaron al país desde el Congo Belga y fueron sembradas en Palmira (Valle) en 1932. Las primeras plantaciones con importancia económica se iniciaron en 1960; para 1968 existían en el país plantas extractoras de aceite con capacidades entre 350 y 700 Kg de Racimos de Fruta Fresca (RFF) por hora y en 1978 ascendían a 25 las instalaciones con capacidades hasta de 30 T de RFF por hora <sup>(8)</sup>.

De acuerdo con un informe de IRHO de Francia en 1984 se asegura que los procedimientos de extracción de aceite provienen de estudios realizados hace 30 años, sin mayor evolución desde entonces. En la actualidad existen muchas empresas de ingeniería que diseñan plantas extractoras de aceite de palma; la mayoría de los elementos para conformar plantas medianas y pequeñas pueden fabricarse nacionalmente, la importación de equipos especiales solo es necesaria en casos especiales y generalmente para extractoras de grandes dimensiones; el país cuenta con plantas extractoras de aceite de palma con capacidades que van desde 2,2 hasta 60 T de RFF, las cuales importan básicamente sistemas de recuperación mecánica de aceite (como centrífugas y superdecanter) <sup>(8)</sup>.

Colombia es el quinto productor y sexto exportador mundial del aceite de palma, después de Malasia, Indonesia, Nigeria y Tailandia. Actualmente el país cuenta con unas 243.037 Ha cultivadas, 157.328 Ha en beneficio y una producción anual de aceite de palma de 630.388 T y 60.429 T de aceite de palmiste (almendras); valores año 2004 <sup>(6)</sup>. Las principales plantaciones de palma de aceite en Colombia están ubicadas en las siguientes zonas <sup>(8)</sup>:

- **Zona Norte:** Magdalena y Norte del Cesar
- **Zona Central:** del Magdalena Medio Santandereano al Sur del Cesar

- **Zona Oriental:** Meta, Casanare y Caquetá Nariño
- **Zona Occidental:** comprende principalmente las extractoras ubicadas en Tumaco (Nariño).

La extracción del aceite se realiza mediante procesos mecánicos y térmicos sin necesidad de solventes lo que lo hace un aceite completamente natural. De estos procesos se obtienen dos tipos de aceite: el de palma, a partir del mesocarpio del fruto y el de palmiste a partir de la almendra, el cual deja un residuo denominado torta de almendra o de palmiste, de gran valor para producir alimentos concentrados para animales. La industria de la palma de aceite no solo produce aceite de palma y palmiste, adicionalmente genera grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos (Tabla 4); cerca del 80% de las materias primas (RFF y agua) se convierten en residuos del proceso, de los cuales el 50% son efluentes, mientras el 30% restante son residuos sólidos <sup>(8, 17)</sup>.

**Tabla 4. Rendimientos del Procesamiento del Fruto de la Palma de Aceite <sup>(17)</sup>**

Producto	Kg por T de RFF*	%
Aceite Crudo	207,7	15,37
Fibra	151,1	11,18
Racimo Vacío	231,5	17,13
Cáscara	85,0	6,29
Nuez (almendra)	42,2	3,14
Efluentes Líquidos **	614,1	45,46
Aceite Perdido	19,3	1,43

\* RFF: Racimo de Fruta Fresca – \*\* Se agregan 350,9 Kg de agua de proceso

## 3.2 PROCESO DE EXTRACCION DEL ACEITE DE PALMA

El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se realiza en la planta de beneficio o planta extractora, donde se desarrolla la extracción del aceite crudo de palma y de las almendras, mediante un proceso que consta de las operaciones requeridas para esterilizar, desgranar del racimo, y macerar los frutos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante (Figura 1) <sup>(9)</sup>.

### 3.2.1 Recepción

Los RFF obtenidos del cultivo de palma son recibidos en la extractora donde son pesados y clasificados de acuerdo a sus características de maduración.

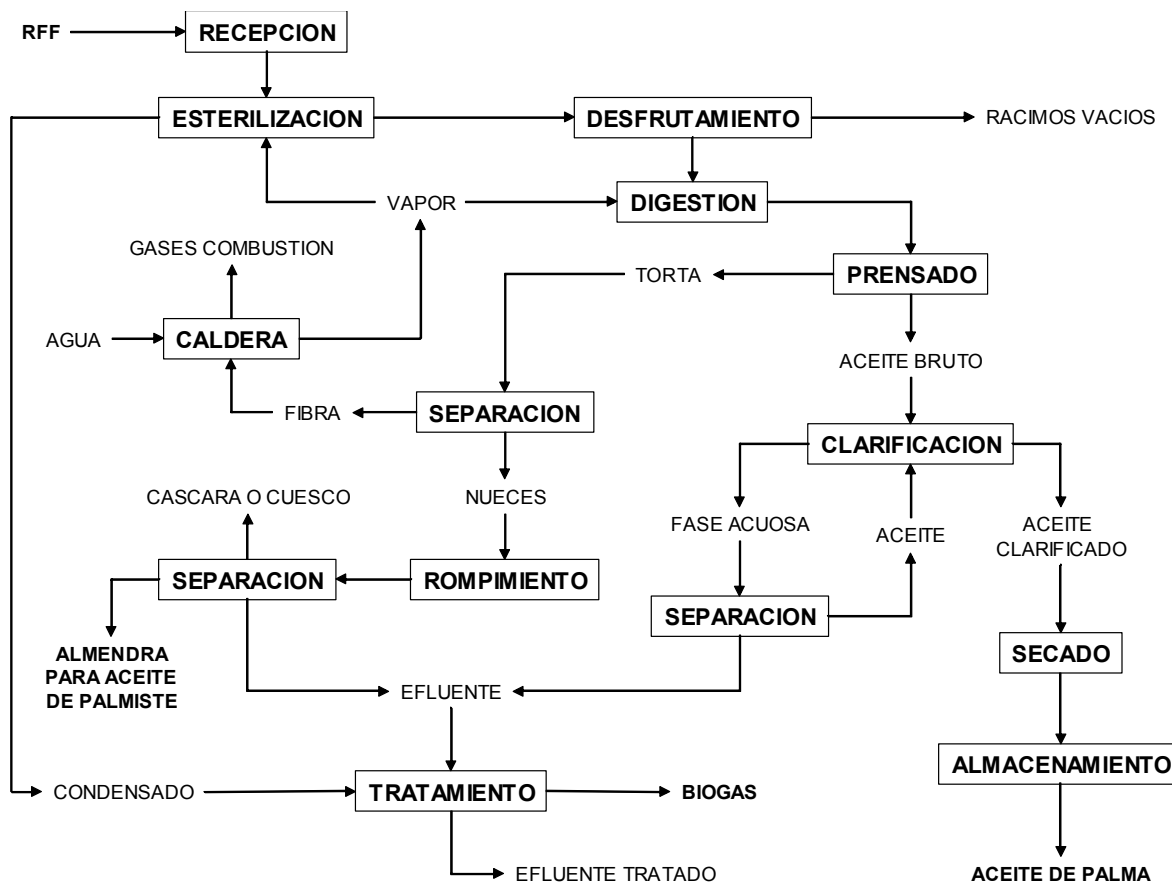


Figura 1. Diagrama de Bloques del Proceso de Extracción de Aceite de Palma <sup>(9)</sup>

### 3.2.2 Esterilización

La maduración natural del fruto de la palma de aceite promueve una hidrólisis de las grasas que contiene, aumentando la cantidad de Ácidos Grasos Libres (AGL) lo cual afecta la producción de aceite; la esterilización corrige el anterior fenómeno y prepara las fibras de la pulpa del fruto para maximizar la extracción de aceite. Los RFF se esterilizan con vapor de agua a una presión de 40 psi (3 Kg/cm<sup>2</sup>) durante 90 minutos, esto inactiva la enzima lipasa evitando el incremento de los AGL, debilita la unión entre los frutos y el racimo facilitando el desfrute, reduce la resistencia de los tejidos de la pulpa para extraer el aceite (coagulación de proteínas y materia mucilagosa), deshidrata parcialmente las almendras contenidas en la nuez del fruto favoreciendo la posterior recuperación y minimiza el rompimiento de las nueces y el quebrado de las almendras durante el prensado.

### 3.2.3 Desfrutamiento

Los racimos esterilizados son alimentados por un extremo de un tambor cilíndrico horizontal rotatorio donde los frutos se desprenden y separan del racimo por la acción de los continuos golpes; los frutos sueltos son

transportados mecánicamente a los digestores, mientras los racimos vacíos que salen por el otro extremo del tambor rotatorio, se llevan a la zona asignada para su disposición.

### **3.2.4 Digestión**

Por medio de la digestión se prepara el fruto para el prensado, la cual se realiza en recipientes cilíndricos o digestores donde el fruto es macerado y calentado hasta 100 °C por medio de vapor. Los digestores constan de un eje rotativo con brazos agitadores que separan el mesocarpio y rompen las células de aceite; cada digestor debe mantenerse al nivel más alto de capacidad para garantizar el máximo tiempo de retención y la mayor presión posible sobre el fruto que se encuentra en el fondo del recipiente, esto último para mejorar el macerado; el fruto digerido se va drenando por el fondo, al tiempo que se repone fruto por lo parte superior para mantener el nivel del digestor. El calentamiento contribuye con la reducción de pérdidas de aceite y aumenta la elasticidad de las nueces, lo cual evita que se quiebren durante el prensado. Una adecuada digestión reduce las pérdidas de aceite en la fibra, la cual es perceptible en la torta obtenida en la prensadora; no obstante, el contenido de aceite en la fibra puede establecerse en laboratorio.

### **3.2.5 Prensado**

El fruto digerido se alimenta a la prensa, donde se comprime hasta extraer el aceite bruto (mezcla de aceite, agua e impurezas orgánicas y minerales) que pasa a través de una canasta perforada, dentro de la cual se forma la torta, compuesta por la fibra del mesocarpio y las nueces que contienen la almendra. Al liberarse la torta de la prensa, se transporta mecánicamente hasta una columna de separación neumática para retirar las nueces de la fibra; generalmente esta fibra se usa como combustible en las calderas que generan vapor para el mismo proceso; las nueces obtenidas se transportan mecánicamente a la etapa de palmistería.

### **3.2.6 Clarificación**

El aceite bruto se lleva a un desarenador para retirar impurezas generalmente provenientes del cultivo. Las fases acuosa y aceitosa se conducen a un clarificador, donde se separan por diferencia de densidad; la fase acuosa (agua, lodo y aceite) obtenida se desaceita en reclarificadores, centrifugas desludadoras y trampas de grasa (florentinos) devolviendo el aceite recuperado a la fase aceitosa y conduciendo el efluente obtenido a la etapa de tratamiento y disposición (lagunas de estabilización); mientras tanto, la fase aceitosa obtenida o aceite clarificado se conduce a la operación de secado.

### **3.2.7 Secado**

Por las características de la extracción, el aceite clarificado contiene una cantidad considerable de humedad

que puede deteriorar la calidad del producto durante el almacenamiento (oxidación), por lo tanto, la humedad del aceite se reduce mediante calentamiento y posteriormente el aceite de palma obtenido se lleva a los tanques de almacenamiento, quedando listo para su despacho.

### **3.2.8 Palmistería**

Cada nuez contiene en su interior una almendra, la cual se obtiene rompiendo la nuez con equipos especiales, luego la cáscara es separada de la almendra en columnas neumáticas o hidrociclones, que clasifican las fases por sus diferencias en la forma y la densidad. La almendra obtenida se seca y empaca quedando lista para su despacho, mientras la cáscara o cuesco se usa generalmente en el mantenimiento de vías en las plantaciones.

## **3.3 TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS EN LA AGROINDUSTRIA PALMERA <sup>(8, 11)</sup>**

Los efluentes provenientes de extractoras de aceite de palma, que se caracterizan por su alto contenido de carga orgánica (hasta 20.000 mg / l de DBO) se han venido tratando mediante procesos físico-químicos (sedimentación, filtración, secado, floculación y centrifugación) los cuales resultan ser de alto costo y baja eficiencia, por la gran cantidad de reactivos usados y la elevada inversión en infraestructura requerida; también se han usado sistemas de tratamiento mediante digestión aerobia en lagunas poco profundas con inyección de aire, que han resultado menos costosos y eficientes, ya que no usa reactivos químicos aunque requieren extensiones de terreno considerables, sin embargo, fue durante mucho tiempo la técnica más usada; actualmente, los precios de la energía eléctrica han elevado considerablemente los costos de los sistemas de tratamiento aerobio, debido al consumo considerable de electricidad de los aireadores.

Durante la crisis energética de los años 70's se abrió paso a investigaciones de viabilidad técnica, económica y ambiental de otras alternativas de tratamiento de efluentes, como la digestión anaerobia (DA) que no requiere de cantidades considerables de insumos, ni de energía eléctrica. Como resultado se desarrolló e implementó la tecnología de la DA, que simula fenómenos naturales de descomposición de la materia orgánica en condiciones controladas y mediante la aplicación de bacterias anaeróbicas, que permiten minimizar considerablemente los tiempos de descomposición, comparado con los procesos que ocurren en la naturaleza; con esta tecnología un grupo de microorganismos sin necesidad de oxígeno (bacterias anaerobias) forman una biomasa que consume la carga orgánica del efluente, aumentando su propia biomasa y desprendiendo como subproductos principales, metano y gas carbónico. En los años 80's se extendió la

aplicación de la tecnología de tratamiento anaerobio de efluentes en extractoras de aceite de palma, debido al impacto ambiental negativo causado por sus vertimientos de residuos líquidos sobre cuerpos de agua.

Posteriormente, aplicando el mismo principio de remoción mediante DA pero en volúmenes más reducidos, se diseñó un sistema más práctico denominado biodigestor con el fin de solucionar los inconvenientes económicos y logísticos generados por el requerimiento de espacio para lagunas de tratamiento de efluentes; estos equipos de fácil construcción e implementación, redujeron el tiempo remoción de MO, facilitaron y optimizaron el aprovechamiento de subproductos obtenidos del proceso de tratamiento: lodo, efluente tratado y Biogás. La desventaja fundamental del biodigestor radica en el control estricto de las variables de operación (como: caudal, producción de ácidos grasos volátiles, alcalinidad, capacidad buffer) para evitar que el sistema presente acidificación.

Actualmente, el sistema más usado en Colombia para tratar efluentes generados en extractoras de aceite de palma son las lagunas de estabilización, que combinan fenómenos de digestión anaerobia, aerobio y facultativos, aplicando el principio de degradación de materia orgánica usada como alimento por microorganismos presentes en los efluentes; estas lagunas son los sistemas de tratamiento más flexibles, con mayor capacidad y que no presentan problemas de acidificación. Generalmente, los sistemas de tratamiento de efluentes en Colombia están compuestos por:

- **Tratamiento Preliminar:** rejillas, desarenadores
- **Tratamiento Primario:** trampa de aceites, lagunas reguladoras (para controlar caudal, pH, temperatura)
- **Tratamiento Secundario:** lagunas anaeróbicas o biodigestores y lagunas facultativas

### 3.4 TECNOLOGIA PARA REMOCION DE MATERIA ORGANICA DE EFLUENTES

#### 3.4.1 Mecanismos de Acción Anaerobia <sup>(3, 4, 12, 18)</sup>

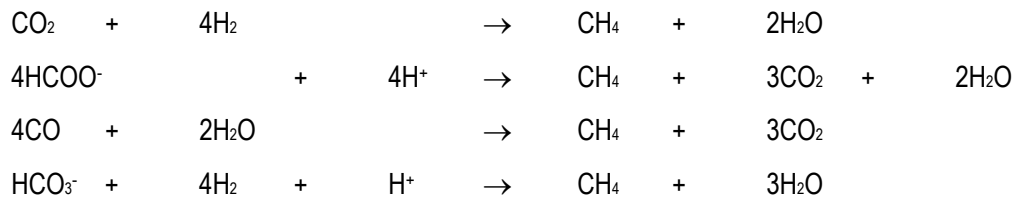
La DA de la Materia Orgánica (MO) convierte grasas, proteínas y carbohidratos en compuestos simples tales como metano, gas carbónico y biomasa, a través de una serie de mecanismos (Figura 2) agrupados en cuatro etapas:

- **Hidrólisis:** es la primera etapa y en ella las bacterias hidrolíticas llevan a cabo el rompimiento de las cadenas poliméricas (como celulosa, proteínas, lípidos, etc.) en compuestos más sencillos a nivel de monómeros cuyo tamaño permite su paso a través de la membrana celular.
- **Acidogénesis:** en esta segunda etapa los monómeros producidos por la hidrólisis son reducidos a

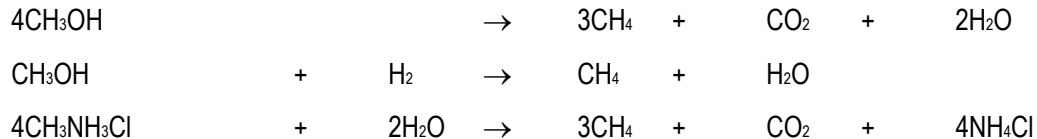
ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes), gas carbónico (CO<sub>2</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) mediante un proceso intracelular de óxido-reducción; estas reacciones ocurren gracias a la acción catalizadora de un grupo de bacterias denominadas fermentativas o acidogénicas.

- **Acetogénesis:** es la tercera etapa, en la cual otro grupo de bacterias denominadas acetogénicas transforman los anteriores compuestos en acetato, produciendo también dióxido de carbono e hidrógeno.
- **Metanogénesis:** es la cuarta y última etapa donde un grupo de bacterias denominadas metanogénicas, cumplen la función de transformar el acetato en metano; adicionalmente pueden producirse otros gases como amoníaco, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno, que junto al metano y gas carbónico conforman lo que se conoce como Biogás; existen por lo menos diez substratos que se convierten en metano por la acción de algún metanógeno, los cuales se dividen en 3 clases:

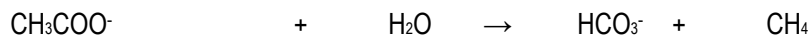
– Tipo CO<sub>2</sub>



– Grupo Metilo



– Acetotróficas



El proceso de DA se ve afectado por diferentes factores ambientales, los cuales son fundamentales para controlar la operación de un sistema de tratamiento de efluentes:

- **Temperatura:** el contenido de metano en el Biogás depende de la temperatura; se obtiene una operación óptima entre 20 y 45 °C; a temperaturas bajas se obtiene alta concentración de metano, pero baja producción de Biogás
- **pH:** determina la cantidad y porcentaje de metano en el Biogás, ya que las bacterias metanogénicas son destruidas a pH bajos, mientras que a pH muy altos se reduce la producción de metano es muy lenta; se estima que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,8
- **Contenido de Sólidos:** se opera en mejores condiciones con menos del 10%, lo cual indica que la biomasa más adecuada sea la de mayor contenido de humedad
- **Nutrientes:** para el crecimiento y actividad de las bacterias, es necesario disponer de carbono orgánico,

nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales; los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima, especialmente, las bacterias metanogénicas se inhiben severamente por falta de nutrientes

- **Relación Carbono – Nitrógeno (C/N):** es un indicador de digestibilidad y rendimiento potencial de la MO, ya que afecta el crecimiento de la población bacteriana; bacterias formadoras de ácido y metano consumen aproximadamente 30 carbonos por cada átomo de nitrógeno para respiración y mantenimiento, por lo tanto, el valor óptimo para esta relación está entre 25 y 30
- **Presión:** un aumento de la presión eleva la concentración de dióxido de carbono disuelto en la suspensión, promoviendo la producción de ácido carbónico, lo cual reduce el pH de la suspensión
- **Tóxicos:** además del oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas
- **Tiempo de Retención:** es el tiempo necesario para la digestión de la MO a la temperatura de operación del sistema; a mayor temperatura el tiempo de retención es menor.

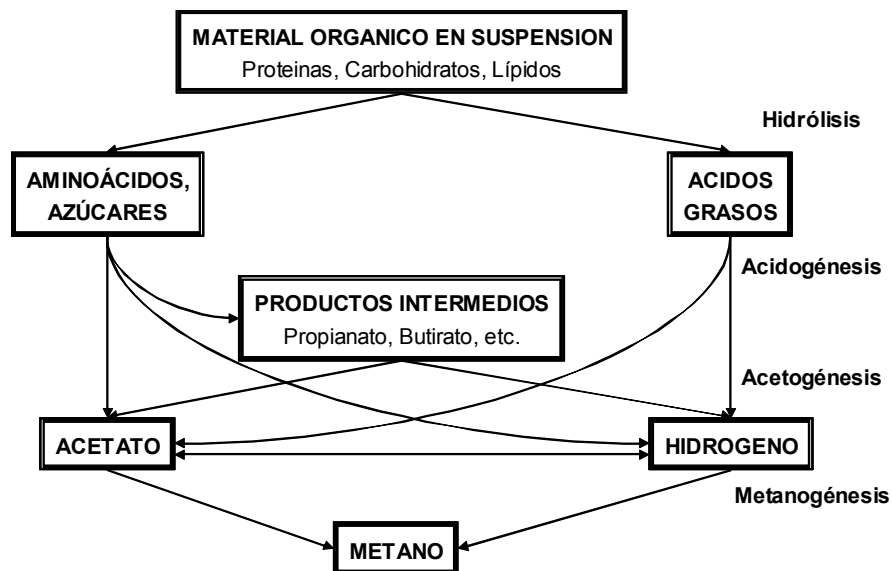


Figura 2. Diagrama de la Digestión Anaeróbica de Materia Orgánica <sup>(12)</sup>

### 3.4.2 Lagunas Anaeróbicas <sup>(8, 10, 17)</sup>

Las lagunas de DA son sistemas estables, en las cuales se garantiza una fácil operación y alta eficiencia de remoción de la materia orgánica, siempre y cuando el inóculo biológico sea adecuado, así como los regímenes de flujo de los residuos líquidos. Es una buena alternativa de tratamiento en zonas rurales donde hay áreas disponibles, tal como ocurre en la mayoría de plantas extractoras de aceite de palma. Los productos obtenidos de este tratamiento son Biogás, lodos y agua tratada. Generalmente, el Biogás

producido se descarga a la atmósfera sin ningún tipo de tratamiento; los lodos se recuperan y se usan como fertilizante en la plantación, ya sea secos o como lodos húmedos; mientras que el agua tratada, por su contenido de nutrientes puede usarse como fertilizante líquido (bioabono) mediante sistemas de irrigación. Normalmente los sistemas de tratamiento de efluentes en plantas extractoras de aceite cuentan con dos lagunas que operan en paralelo; en la Tabla 5 se encuentran las especificaciones operativas de un ejemplo real de laguna anaeróbica.

**Tabla 5. Especificaciones Operativas de Una Laguna Anaeróbica** <sup>(17)</sup>

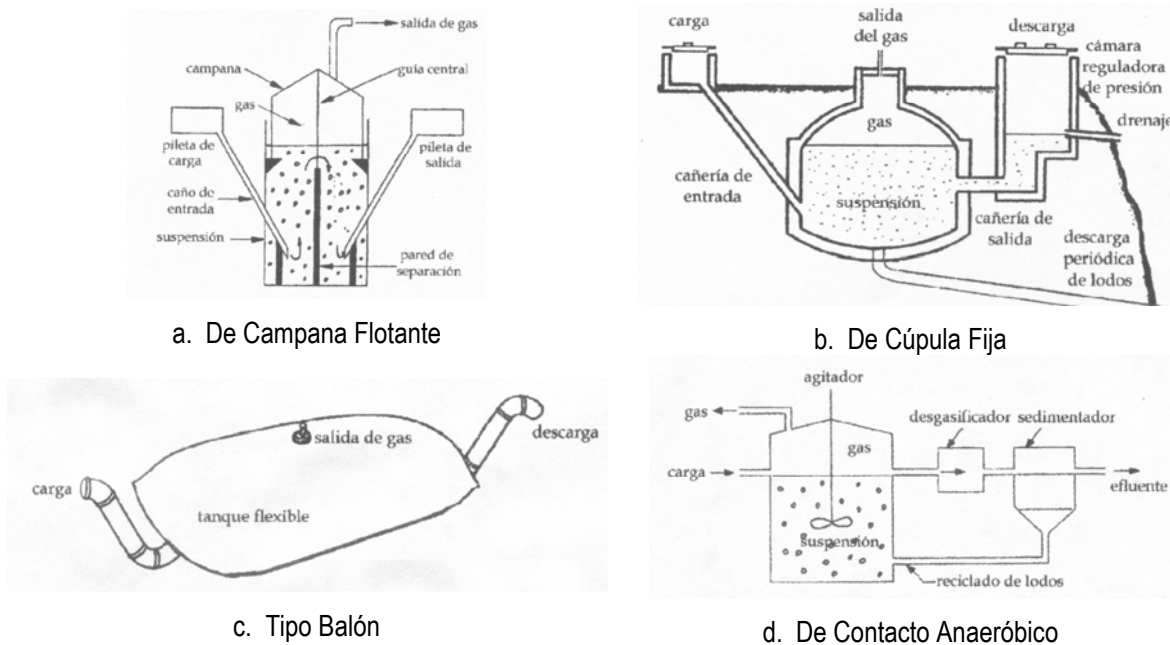
Característica	Unidades	Valor
Profundidad	m	3,5
Volumen Total	m <sup>3</sup>	8.000
Aporte Neto de Efluentes	m <sup>3</sup> / día	350
Carga Volumétrica del Sistema	Kg DBO / [ m <sup>3</sup> · día ]	2,4
Carga Orgánica Total	Kg DBO / [ m <sup>3</sup> · día ]	8.750
Tiempo de Retención Hidráulica	Días	20

### 3.4.3 Biodigestores <sup>(3, 4, 12)</sup>

Son unidades de fermentación biológica que procesan residuos líquidos en un medio anaerobio y neutro; son recipientes cerrados de forma cilíndrica o esférica, contruidos en diversos materiales: metal, ladrillo, plásticos; cuenta con un ducto de entrada a través del cual se alimenta el efluente a tratar, y otro ducto de salida a través del cual el efluente digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor.

El biodigestor puede operarse con alimentación diaria, es decir, cargando diariamente una cantidad dada de biomasa y retirando un volumen equivalente de lodos fertilizantes, generando Biogás continuamente durante todo el día. Si el biodigestor opera por lotes, se carga todo de una sola vez y se descarga la totalidad del residuo después de dos o tres meses; en este caso la cantidad de Biogás producida es mayor en las primeras semanas, disminuyendo al transcurrir el tiempo, por lo tanto suele instalarse una batería de biodigestores, que se cargan en forma alternada para garantizar la disponibilidad de la cantidad requerida de Biogás. Existen diversos diseños del reactor y sistema de almacenamiento del gas, que en ocasiones se combinan en un solo equipo; entre los tipos de biodigestores se clasifican de acuerdo con:

- **Tipo de Carga:** de flujo continuo o discontinuo
- **Estructura:** sólida fija, sólida móvil (campana flotante), de balón plástico
- **Desarrollos Recientes:** filtro anaeróbico, reactor de deflector anaeróbico, procesos de contacto anaeróbico, digestores tubulares, inclinados, de tapón de flujo, de mezcla completa.



**Figura 3. Clases Típicas de Biodigestores** <sup>(12)</sup>

Cada tipo de biodigestor ofrece ventajas y desventajas que son susceptibles de análisis y evaluación para caso particular en el que se quieran aplicar. Generalmente, en Colombia se usan biodigestores de flujo continuo, con campana fija construidos en plástico.

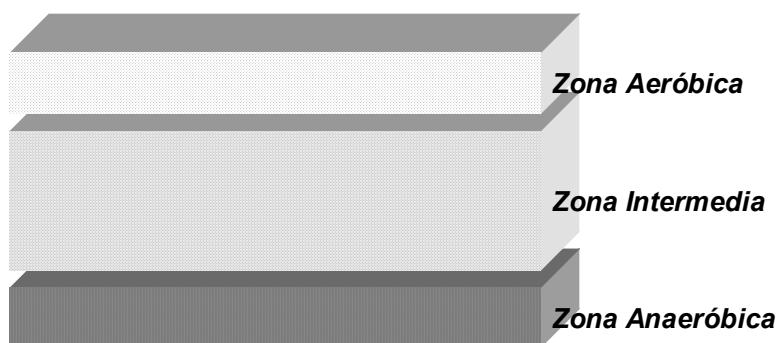
### 3.4.4 Lagunas Facultativas <sup>(8, 10, 11)</sup>

Constituyen un sistema de tratamiento biológico natural, en el cual ocurren una variedad de procesos como oxidación, sedimentación, hidrólisis, fotosíntesis, nitrificación, digestión anaerobia, transferencia de oxígeno, mezcla, etc; los fenómenos de digestión aerobia y anaerobia se presentan con variadas intensidades y predominio; en las extractoras de aceite de palma generalmente se usan después de los sistemas de DA, para brindar apoyo al sistema de tratamiento, alcanzando remociones hasta del 95%; casos concretos de sistemas de tratamiento que combinan estas tecnologías, se encuentran en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío en Bucaramanga, que combina Reactores UASB seguido de lagunas facultativas, y en las plantas extractoras de aceite de palma de la zona de Puerto Wilches que usan lagunas anaeróbicas seguidas de lagunas facultativas o biodigestores seguidos de lagunas facultativas. Las lagunas facultativas presentan tres zonas donde se descompone la materia orgánica:

- **Zona Aeróbica:** ubicada en la parte superior de la laguna, contiene cantidades considerables de oxígeno disuelto, por lo tanto, la oxidación de la MO la realizan fundamentalmente las bacterias aeróbicas, aunque

existe una pequeña participación de hongos y protozoos, transformando la biomasa en dióxido de carbono y vapor de agua.

- **Zona Intermedia:** situada entre las zonas aeróbica y anaeróbica, es una zona con un contenido de oxígeno variable y muy bajo, por lo tanto, allí pueden desarrollarse los dos fenómenos de digestión (aeróbica y anaeróbica)
- **Zona Anaeróbica:** localizada en el fondo de la laguna, donde hay una ausencia total de oxígeno disuelto y se encuentran gran parte de los sólidos suspendidos de la solución en tratamiento; en esta zona se transforma la MO mediante mecanismos propios de la DA, aunque las dos zonas superiores actúan como amortiguador para los gases que aquí se generan.



**Figura 4. Zonas de Degradación de Materia Orgánica en un Sistema Facultativo**

El oxígeno disuelto que interviene en la digestión de la biomasa en las lagunas facultativas, proviene de algas que se desarrollan en la parte superior de la laguna por acción de los vientos, las cuales toman dióxido de carbono y liberan oxígeno mediante fotosíntesis durante el día, es decir, en presencia de la luz solar.

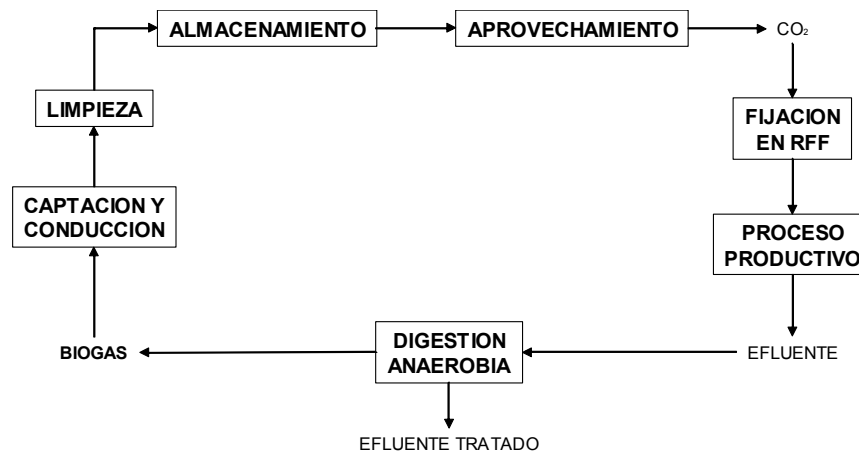
### 3.5 CICLO DEL BIOGÁS EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA <sup>(1, 5, 15)</sup>

El aprovechamiento del Biogás involucra una serie de fenómenos que se entrelazan en un ciclo (Figura 5), así: el cultivo de palma asimila el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del ambiente durante la fotosíntesis para producir biomasa, la cual es usada como combustible junto con el biogás obtenido posteriormente, sin que se genere un incremento neto de dióxido de carbono en la atmósfera; hay que anotar que la producción de energía a partir de combustibles fósiles, generan un incremento neto de dióxido de carbono en el ambiente; para utilizar el Biogás obtenido dentro de este ciclo se requieren las operaciones de:

- **Captación:** el Biogás se capta mediante el cubrimiento en PVC del área o punto donde se produce

(laguna anaerobia o biodigestor); este tipo de captación suele usarse también como almacenamiento del Biogás producido, lo cual permite reducir costos relacionados con tanques o sistemas de compresión

- **Limpieza:** hace referencia a la remoción del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) contenido en el Biogás mediante un sistema de filtración con cal viva o apagada, limadura de hierro, tierras ricas en sustancias ferrosas (hematites parda o limonita) o productos biológicos (bacterias); el sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico está presente en el Biogás en cantidades variables y es inconveniente para su aprovechamiento porque genera contaminación por olores y reacciona con agua produciendo ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que es altamente corrosivo, por lo cual promueve daños graves en equipos
- **Almacenamiento:** si el Biogás no se consume al mismo ritmo que se produce, es necesario almacenarlo temporalmente, mediante una construcción adicional o in situ sobre el biodigestor o laguna; como indicador económico se estima que no es rentable almacenar Biogás por más de doce horas
- **Aprovechamiento:** la mayoría de plantas con tratamiento anaerobio desperdicia el Biogás obtenido, ya que no lo captan o queman en teas. En la agroindustria palmera nacional, muy pocas extractoras usan el Biogás para cogeneración, mientras otras permiten su liberación a la atmósfera, causando un impacto negativo al ambiente, ya que la cantidad producida es considerable (Tabla 6) y además el metano es un gas de invernadero mucho más nocivo que el dióxido de carbono, por lo cual se recomienda quemarlo antes que liberarlo al ambiente; adicionalmente el aprovechamiento de Biogás en las calderas de las plantas extractoras no es viable, debido al uso que se ha dado a la fibra como combustible.



**Figura 5. Ciclo del Biogás para el Proceso de Extracción de Aceite de Palma**

Es importante anotar que todos los sistemas de almacenamiento y conducción del Biogás deben tener sello hidráulico para evitar fugas que puedan generar riesgo por gases combustibles y contaminación por olores, así mismo, se requieren trampas de condensado para recoger el vapor de agua presente en el Biogás.

### 3.6 USO DE BIOGÁS EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA <sup>(3, 5, 18)</sup>

El Biogás puede utilizarse como combustible en motores de combustión interna a gasolina o Diesel para transporte, transmisión mecánica o generación eléctrica. En aplicaciones rurales y a nivel industrial es más común el uso de motores Diesel por su resistencia y bajo costo de operación.

En el motor a gasolina la ignición de la mezcla comprimida de combustible y aire se produce por una chispa eléctrica que producen las bujías, mientras que en el motor Diesel la ignición se lleva a cabo por compresión (autoignición) así: el aire ingresa a la cámara de combustión donde se inicia la compresión, poco antes de alcanzar la máxima compresión se atomiza el combustible dentro de la cámara, encendiéndose al entrar en contacto con el aire comprimido, que ha alcanzado una temperatura de aproximadamente 600 °C, a la cual el ACPM autocombustiona. Por lo anterior, los motores a gasolina pueden funcionar reemplazando la totalidad del combustible por Biogás, mientras en motores Diesel es posible reemplazar hasta el 80% del ACPM, debido a que la baja ignición del Biogás no permite suplir totalmente el combustible en este tipo de motores.

La inyección de combustibles gaseosos en motores Diesel se ha aplicado en diversos propósitos, utilizando gas natural, Biogás, gas de vertederos. La operación de motores Diesel con inyección de Biogás no se altera significativamente, siempre y cuando el poder calorífico del gas no sea muy bajo, es decir que el contenido de metano no sea inferior al 50%.

Para introducir el Biogás en la operación de un motor Diesel como parte del combustible, se requiere de un dispositivo externo donde se mezcla el Biogás con el aire, el cual debe estar conectado a la succión del motor; la mezcla Biogás – Aire es succionada y comprimida en la cámara de combustión del motor y poco antes de alcanzar la máxima compresión el sistema de inyección atomiza dentro de la cámara la cantidad de ACPM requerida para producir la ignición; dicha cantidad varía con el diseño y operación del motor, pero puede restringirse hasta el 20% del total consumido cuando solo se alimenta ACPM.

Los parámetros de diseño, funcionamiento y elementos de operación del motor Diesel (como: relación de compresión, ángulo del cigüeñal de inyección) permanecen inalterados. Para operar el motor con carga parcial se requiere controlar (manual o automáticamente) el suministro de gas. La relación aire – combustible depende de la cantidad de de Biogás alimentado, sin embargo una mezcla muy pobre ( $\lambda = 4,0$ ) enciende

fácilmente con una adecuada atomización de Diesel. Entre las ventajas de utilizar un sistema dual de combustible (Biogás – ACPM) en un motor Diesel se encuentran:

- Cualquier cantidad de Biogás inyectada al motor permite la sustitución de una parte del ACPM requerido (entre 0 y 80%)
- Las emisiones de azufre e hidrocarburos volátiles son menores debido al bajo contenido de azufre en el Biogás y a que la mezcla se quema con mayor facilidad
- Alta eficiencia térmica, prolonga la vida útil del motor, fácil manejo y bajo costo de adaptación
- Versatilidad (el motor pasa fácil y rápidamente del sistema dual al sistema normal con ACPM).

### **3.7 VALORIZACIÓN DE BIOGAS EN LA AGROINDUSTRIA DE PALMA COLOMBIANA** (2, 5, 16)

#### **3.7.1 Palmar de Santa Elena**

Ubicada en la región de Tumaco (Nariño) esta extractora de aceite de palma que opera desde 1991, cuenta con un sistema de tratamiento de efluentes compuesto por dos biodigestores (tipo BIOTEC), amortizando esta inversión mediante la valorización de los subproductos obtenidos de este sistema: Biogás, lodo seco y efluente tratado. Parte del Biogás obtenido se aprovecha en la producción de energía eléctrica para el proceso mediante un generador diesel, logrando disminuir hasta en 50% los requerimientos del combustible (ACPM); mientras tanto, el excedente de Biogás (Tabla 6) se quema diariamente en una tea.

Para evitar problemas de corrosión en el generador eléctrico, se dispone de un filtro químico que remueve hasta el 60% de H<sub>2</sub>S presente en el Biogás. El efluente tratado se utiliza como abono orgánico distribuyéndolo sobre la plantación mediante un sistema de riego de microaspersión. Los lodos de fondo se purgan de los biodigestores y se disponen en lechos de secado para reducir su contenido de humedad y obtener una torta seca, que se empaca en costales y posteriormente se distribuye manualmente sobre la plantación como bioabono.

Los biodigestores están contruidos en concreto, sobre el nivel del suelo y cubiertos por una carpa de PVC para captar y almacenar el Biogás generado. A continuación se presentan las especificaciones de diseño e indicadores operativos relacionados con la planta, sistema de tratamiento de efluentes, biodigestores y aprovechamiento del Biogás en esta planta (Tabla 6). Es importante anotar que cerca de 500 m<sup>3</sup> de Biogás se queman diariamente en el Palmar de Santa Elena (Tabla 6), el cual podría valorizarse a través de su aprovechamiento para consumo residencial o generación de electricidad para comunidades vecinas.

**Tabla 6. Características del Sistema de Valorización de Biogás en Palmar de Santa Elena**

Característica	Cálculos	Unidades	Valor
<b>PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA</b>			
Capacidad de Extracción		[ T de RFF ] / Día	80
Tiempo Operación Diario		Horas	8
Efluente Producido		m <sup>3</sup> / Día	65
Efluente Producido por T de RFF	{ 65 m <sup>3</sup> /Día } ÷ { 80 [ T de RFF ]/Día }	m <sup>3</sup> / [ T de RFF ]	0,8
<b>BIODIGESTORES</b>			
Cantidad		Und.	2
Volumen por Biodigestor		m <sup>3</sup>	250
Volumen Total del Sistema	2 x { 250 m <sup>3</sup> }	m <sup>3</sup>	500
Almacenamiento de Biogás por Biodigestor		m <sup>3</sup>	130
Almacenamiento Total de Biogás	2 x { 130 m <sup>3</sup> }	m <sup>3</sup>	260
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES</b>			
Capacidad de Tratamiento		m <sup>3</sup> / Día	65
Tiempo de Retención	{ 500 m <sup>3</sup> } ÷ { 65 m <sup>3</sup> / Día }	Días	8
Producción de Biogás		m <sup>3</sup> / Día	800
Contenido de CH <sub>4</sub> en Biogás		% Volumen	65
Contenido de CO <sub>2</sub> en Biogás		% Volumen	34
Contenido de H <sub>2</sub> S en Biogás		% Volumen	0,18
Biogás Obtenido por DQO removido		m <sup>3</sup> / Kg DQO <sub>REMOV</sub>	0,55
Biogás Obtenido por T de RFF	{ 800 m <sup>3</sup> /Día } ÷ { 80 [ T de RFF ]/Día }	m <sup>3</sup> / [ T de RFF ]	10
Biogás Obtenido por m <sup>3</sup> de Efluente	{ 800 m <sup>3</sup> / Día } ÷ { 65 m <sup>3</sup> / Día }	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	12
<b>SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA</b>			
EE Requerida para el Proceso		Kwh	200
Consumo Total de ACPM (sin Biogás)		Gal / Día	80
Consumo Actual de ACPM (con Biogás)		Gal / Día	40
Reducción Consumo de (ACPM)	{ 80 – 40 Gal/Día } ÷ { 80 Gal/Día }	%	50
Ahorro Anual de ACPM (Aprox.)		Gal / Año	10.600
Consumo de Biogás		m <sup>3</sup> / Día	320
EE Generada por m <sup>3</sup> de Biogás	{ 100 Kwh } x 8 h ÷ { 320 m <sup>3</sup> / Día }	Kwh / m <sup>3</sup>	2,5
EE Generada por T de RFF	{ 5 Kwh/m <sup>3</sup> } x { 10 m <sup>3</sup> /[T de RFF] }	Kwh/[T de RFF]	25
Excedente de Biogás	800 m <sup>3</sup> / Día – 320 m <sup>3</sup> / Día	m <sup>3</sup> / Día	480

### 3.7.2 Palmeiras

También ubicada en la zona de Tumaco (Nariño) instaló una carpa sobre una de las lagunas anaeróbicas de su sistema de tratamiento de efluente para captar y almacenar el Biogás que allí se produce; dicha laguna tiene un área de 2.000 m<sup>2</sup> y un volumen de 5.000 m<sup>3</sup>. La remoción del sulfuro de hidrógeno contenido en el

Biogás se lleva a cabo mediante un filtro biológico seguido de un filtro con óxido de hierro, que alcanza reducciones hasta del 95%. El lodo obtenido y efluente tratados tienen la misma disposición que en el Palmar de Santa Elena.

Las especificaciones de diseño e indicadores operativos relacionados con la planta, sistema de tratamiento de efluentes, laguna anaeróbica cubierta y aprovechamiento del Biogás en esta planta se presentan a continuación (Tabla 7).

**Tabla 7. Características del Sistema de Valorización de Biogás en la Planta Palmeiras**

Característica	Cálculos	Unidades	Valor
<b>PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA</b>			
Capacidad de Extracción		[ T de RFF ] / Día	100
Tiempo Operación Diario		Horas	12
Efluente Producido		m <sup>3</sup> / Día	100
Efluente Producido por T de RFF	{ 100 m <sup>3</sup> /Día } ÷ { 100 [ T de RFF ]/Día }	M <sup>3</sup> / [ T de RFF ]	1
<b>LAGUNA ANAERÓBICA CUBIERTA</b>			
Área de la Laguna		m <sup>2</sup>	2.000
Profundidad		m	2,5
Volumen de la Laguna	{ 1,25 m } x { 2.000 m <sup>3</sup> }	m <sup>3</sup>	5000
<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES</b>			
Capacidad de Tratamiento		m <sup>3</sup> / Día	50
Tiempo de Retención	{ 5.000 m <sup>3</sup> } ÷ { 50 m <sup>3</sup> / Día }	Días	100
Producción de Biogás		m <sup>3</sup> / Día	860
Biogás Obtenido por T de RFF	{ 860 m <sup>3</sup> /Día } ÷ { 100 [ T de RFF ]/Día }	m <sup>3</sup> / [ T de RFF ]	8,6
Biogás Obtenido por m <sup>3</sup> de Efluente	{ 860 m <sup>3</sup> / Día } ÷ { 50 m <sup>3</sup> / Día }	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	17,2
<b>SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA</b>			
EE Requerida para el Proceso		Kwh	480
Consumo Total de ACPM (sin Biogás)		Gal / Día	260
Consumo Actual de ACPM (con Biogás)		Gal / Día	145
Reducción Consumo de (ACPM)	{ 260-145 Gal/Día } ÷ { 260 Gal/Día }	%	45
Ahorro Anual de ACPM (Aprox.)		Gal / Año	35.000
Consumo de Biogás		m <sup>3</sup> / Día	860
EE Generada por m <sup>3</sup> de Biogás	{ 215 Kwh } x 12 h ÷ { 860 m <sup>3</sup> /Día }	Kwh / m <sup>3</sup>	3
EE Generada por T de RFF	{ 3 Kwh/m <sup>3</sup> } x { 8,6 m <sup>3</sup> /[T de RFF] }	Kwh/[T de RFF]	25,8

#### 4. ESTADO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA PALMERA EN COLOMBIA <sup>(1, 10, 17)</sup>

##### 4.1 CONSUMO DE RECURSOS NATURALES Y ENERGIA

Los recursos naturales requeridos durante el proceso de extracción de aceite crudo de palma son: agua, aire y combustibles (Tabla 8).

**Tabla 8. Consumo de Recursos y Energía en Proceso de Extracción de Aceite de Palma <sup>(17)</sup>**

Recurso	Unidades	Consumo por T de	
		RFF	Aceite Crudo
Agua	T	1,20	5,78
Fibra (Combustible)	T	0,15	0,72
ACPM (Combustible)	Gal	1	4,81
Aire	m <sup>3</sup>	5.300	25.517
Energía	Kwh	28	135

##### 4.2 PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN

La extracción de aceite de palma está relacionada con la contaminación ambiental por la generación de cantidades considerables de biomasa como fibra, cáscaras, racimos vacíos y efluentes, así como la emisión de humo.

###### 4.2.1 Vertimientos

Se generan principalmente en las etapas de clarificación y esterilización; existen otras descargas en la operación de los hidrociclones de la etapa de palmistería, aguas de lavado y en las purgas de los desarenadores y sedimentadores (Tabla 9). Estos efluentes presentan alta carga orgánica por el arrastre de material celular (fibras) y su contenido de aceite, lo cual supone un alto valor en la DBO<sub>5</sub> y DQO; adicionalmente, la presencia de arenillas, piedras y tierra contribuye con el alto nivel de sólidos Totales (Tabla 10). Otra pequeña descarga de efluentes se produce durante la regeneración de las resinas del sistema de tratamiento de agua para calderas.

**Tabla 9. Vertimientos que Conforman los Efluentes de una Extractora de Aceite de Palma <sup>(17)</sup>**

Origen del Efluente	m <sup>3</sup> / [ T de RFF ]
Aguas Lodosas de Clarificación	0,55
Condensados de Esterilización	0,10
Aguas de Palmistería (Hidrociclones)	0,05
Aguas de Lavado (Limpieza de Pisos y Purgas)	45
<b>Efluente Total (sin fugas, ni purgas de desarenador y sedimentador)</b>	<b>0,80</b>

**Tabla 10. Caracterización de Efluentes de Plantas Extractoras en Colombia <sup>(11)</sup>**

Parámetro	Unidades	Intervalo	Promedio
pH	–	3,87 – 5,25	4,55
Temperatura	°C	53 – 77	67,4
DBO <sub>5</sub>	mg / l	18.700 – 175.521	48.873
DQO	mg / l	45.256 – 232.000	79.730
Sólidos Totales (ST)	mg / l	32.482 – 111.029	45.670
Sólidos Suspendidos (SS)	ml / h	19.129 – 88.258	35.105
Sólidos Sedimentables (S. SED)	mg / l	125 – 1.000	677
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg / l	26.530 – 98.445	48.988
Fósforo Total (P – total)	mg / l	15,7 – 113,6	66,1
Nitrógeno Total (N – total)	mg / l	67,5 – 695	284,1
Grasas y Aceites	mg / l	6.480 – 80.701	18.747
Acidez Total	mg / l	750 – 2.548	1.611

Los efluentes de la industria palmera se caracterizan por altos valores en DBO y DQO, altas temperaturas y bajo pH; la presencia de aceite en el efluente no solo es un problema ambiental grave por su baja biodegradabilidad, sino también operacional y económico porque implica una pérdida del producto; la mayor parte del aceite se recupera en el sistema conocido como florentinos (trampa de aceites). La legislación ambiental vigente exige tratamiento para este tipo de efluentes antes de ser vertidos a un cuerpo de agua, para remover hasta el 80% de los contaminantes. Sin embargo, el efluente tratado es otro recurso valioso porque contiene cantidades aprovechables de nutrientes, por lo cual algunas plantas ubicadas cerca de las plantaciones lo aplican allí como fertilizante; esta práctica permite reducir los costos de fertilización y elimina un impacto ambiental por vertimiento a un cuerpo de agua (cero desechos).

#### 4.2.2 Residuos Sólidos

Esta biomasa se genera en diversos puntos del proceso, representa un volumen considerable (45% de RFF) y

está compuesta por:

- **Racimos Vacíos:** también llamados raquis o tusas se obtienen después del desfrutamiento, luego del cual son llevados a las plantaciones y se usan como abono; es el residuo que se genera con mayor frecuencia y que representa el mayor volumen dentro del proceso
- **Cáscara y Cascarilla:** se obtiene en la etapa de palmistería del rompimiento de las nueces de donde se extrae la almendra para aceite de palmiste; se usa como relleno en bolsas de vivero, en la producción de carbón vegetal en briquetas y para la arrancada de la combustión en la caldera aprovechando su alto poder calorífico
- **Fibra:** también se obtienen en la etapa de palmistería después de la separación de las nueces; se alimenta como combustible en las calderas de la planta extractora de aceite de palma.

**Tabla 11. Poder Calorífico de Residuos Sólidos de una Extractora de Aceite de Palma <sup>(1)</sup>**

Residuo	Energía [Kcal / Kg]
Fibra	4.420*
Cáscara	4.950*
Racimo Vacío	3.370

\* Calculado en base seca

La fibra, cáscara e incluso los racimos gracias a su poder calorífico y facilidad para quemarse a medida que se generan, representan un recurso energético tradicional para las plantas extractoras de aceite de palma; en el país la totalidad de estas plantas usan la fibra como combustible para las calderas en la producción de vapor; esta práctica beneficia a la industria del aceite de palma permitiéndole el aprovechamiento de un desecho, facilitando su manejo y disposición, de lo contrario implicaría una carga adicional dentro de la operación y costos del proceso. Esta biomasa (fibra y cáscara) es libre de azufre, por lo que su combustión no genera óxidos de azufre, pero si la combustión no se controla adecuadamente puede causar emisiones de ceniza (humo negro).

Los racimos vacíos son los menos explotados como fuente de energía, debido a que el aporte energético de la fibra y la cáscara es suficiente para los requerimientos de la planta; pueden incinerarse y usar sus cenizas como fertilizante, no obstante esta práctica está prohibida por la autoridad ambiental, debido a las emisiones de humo que se generan; también se están utilizando en grandes plantaciones como cubierta protectora de las plantas, sin embargo requiere un sistema de manejo seguro para optimizar el aprovechamiento y evitar un impacto negativo en el suelo.

#### **4.2.3 Emisiones Atmosféricas**

Existen dos tipos de emisiones a la atmósfera: gases de combustión y material particulado. La combustión de la fibra usada como fuente de energía para las calderas, genera una emisión contaminante compuesta por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), compuestos nitrogenados, cenizas y material particulado; operar la caldera por encima del 70% de su capacidad aumenta la emisión de humo negro, por lo tanto, es necesario utilizar calderas de buena capacidad para evitar sobrecargas que generen este tipo de emisión. Otra fuente de emisión de material particulado se genera en las zonas de transporte y manipulación de materiales que emiten material particulado (fibra, cáscara, ráquis, entre otros).

#### **4.2.4 Desechos de Laboratorio**

En los laboratorios de Control de Calidad se generan fundamentalmente desechos que contienen tricloroetileno (principal reactivo utilizado) aunque con baja frecuencia y en pequeñas cantidades.

#### **4.2.5 Otros Contaminantes**

Corresponden a desechos comunes a cualquier actividad productiva, como son: aguas de lavado, lluvias y servidas domésticas; ya se mencionó que por el arrastre de aceite y sólidos generado por las aguas de lavado, éstas se recogen y envían al sistema de tratamiento de efluentes de la planta.

#### **4.2.6 Descargas Térmicas Aéreas**

Son generadas por las calderas y las operaciones de esterilización, digestión y prensado. Las mayores descargas son producidas por los humos de las chimeneas de las calderas, que pueden llegar a ser hasta de 1.338 MJ / T de RFF y se deben a las altas temperaturas que se alcanzan dentro del horno.

#### **4.2.7 Descargas Térmicas Líquidas**

Los efluentes de una extractora de aceite de palma son descargas líquidas de alto impacto ambiental, ya que se temperatura promedio es de 67 °C, no obstante, mediante el sistema de tratamiento de efluentes es posible reducirla hasta la temperatura ambiente, transfiriendo el impacto térmico a la atmósfera.

### **4.3 FACTORES CRITICOS AMBIENTALES**

#### **4.3.1 Efluentes**

El volumen de los efluentes es considerable (0,8 m<sup>3</sup> / T de RFF) con cargas orgánicas que superan los 40.000

mg / l de DBO<sub>5</sub>, además, del contenido de fibras y aceite; por la cantidad y calidad de este desecho líquido es imperativo y fundamental su procesamiento como operación integrada al proceso de extracción de aceite.

#### **4.3.2 Residuos Sólidos**

Aproximadamente el doble del aceite contenido en los RFF (21%) corresponden a fibras, racimos vacíos, fibras y cáscara (desechos sólidos: 45%); hasta ahora se han aprovechado eficientemente las fibras y racimos, pero aún constituye un reto tecnológico el aprovechamiento industrial de la cáscara y los racimos vacíos no usados.

## 5. VALORIZACIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DE ACEITE DE PALMA DE PUERTO WILCHES

Las características combustibles que posee el Biogás (Numeral 2.3) permiten su aprovechamiento en la generación eléctrica mediante mototes de combustión interna a gasolina y / o Diesel. Para tal fin se estimaron la cantidad de Biogás generado y requerimientos de EE en cada plantas, partiendo de sus capacidades de extracción de aceite y los inventarios de sus sistemas tratamiento de efluentes, incluyendo una descripción de la configuración de tales sistemas e indicadores básicos relacionados con la operación y calidad del tratamiento; a partir de esta información y tomado como base modelos evaluados en otras plantas de tratamiento se estimaron las cantidades generadas de Biogás y EE requerida para las plantas de la región.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

#### 5.1.1 Palmas Oleaginosas Bucarelia

Localizada en el corregimiento El Pedral del municipio de Puerto Wilches, región del Magdalena Medio Santandereano, sobre la margen derecha de la desembocadura del río Sogamoso al Río Magdalena. Opera 16 horas diarias en promedio, con una capacidad de producción promedio anual de 123.410 T de RFF; su sistema de tratamiento de efluentes está compuesto por:

- **Dos Lagunas de Enfriamiento:** con un volumen de 224 m<sup>3</sup> permite el enfriamiento y homogenización del efluente (caudal, pH, temperatura)
- **Dos Lagunas Anaeróbicas:** cada una dispone de 5.200 m<sup>3</sup> para depurar el efluente mediante digestión anaerobia
- **Una Laguna Facultativa:** con un volumen de 4.900 m<sup>3</sup> culmina el proceso de depuración del efluente, el cual es descargado después de esta operación, al Caño Chipres que desemboca en el Tramo 1 de la cuenca del río Sogamoso.

#### 5.1.2 Promociones Agropecuarias Monterrey

Tiene una capacidad de producción promedio anual de 79.414 T de RFF, operando 16 horas diarias aproximadamente; el efluente producido está compuesto por las purgas de las calderas y residuos líquidos

aceitosos de centrifugas y condensadores de esterilización; este último se pasa por los florentinos donde se recupera aceite para el proceso; luego todos los desechos líquidos se reúnen en el sistema de tratamiento, el cual está compuesto por:

- **Una Caja Colectora:** donde las purgas de la caldera y el efluente de las centrifugas se unen con el efluente de los florentinos; tiene un tiempo de residencia de 6 días y permite el enfriamiento y homogenización de los efluentes
- **Dos Lagunas Anaeróbicas:** para depurar el efluente mediante digestión anaerobia
- **Dos Lagunas Aeróbicas:** termina de depurar el efluente, que luego es conducido por un canal abierto que lo descarga en la ciénaga Monte Cristo, ubicada a 500 m de estas lagunas; este vertimiento corresponde al Tramo 7 de la cuenca del Río Magdalena.

### 5.1.3 Palmas Oleaginosas Las Brisas S. A.

Ubicada en el corregimiento de Puente Sogamoso del Municipio de Puerto Wilches, sobre la Margen derecha del río Sogamoso; opera cerca de 16 horas diarias, con una capacidad de producción promedio anual de 53.192 T de RFF, generando en promedio 330 m<sup>3</sup> diarios de efluente, los cuales se tratan en un sistema localizado aproximadamente a 1.000 m de la planta, donde se produce un lodo que es secado en lechos obteniéndose un abono para los cultivos. Las aguas residuales domésticas de oficinas, cafeterías y baños, se disponen en pozos sépticos y campos de infiltración; tales vertimientos se descargan en el tramo uno de la cuenca del río Sogamoso. El sistema de tratamiento de efluentes de la planta está compuesto por cuatro lagunas con la siguiente configuración:

- **Una Laguna de Enfriamiento:** donde el efluente se enfría (por debajo de 40 °C) y homogeniza (caudal, pH, temperatura)
- **Dos Lagunas Anaeróbicas:** donde se lleva a cabo la principal operación de depuración del efluente mediante digestión anaerobia
- **Una Laguna Facultativa:** culmina la digestión de la MO remanente de las lagunas anaeróbicas; el efluente tratado se usa para riego en la plantación aprovechando su contenido de nutrientes y evitando el vertimiento a cuerpos de agua.

### 5.1.4 Palmeras de Puerto Wilches

Procesa anualmente en promedio 81.152 T de RFF operando 16 horas diarias en promedio; su sistema de tratamiento, ubicado aproximadamente a 500 m de la planta, está compuesto por:

- **Tres Lagunas Anaeróbicas:** que operan en paralelo y realizan la operación de depuración más importante del efluente mediante digestión anaerobia

- **Dos Lagunas Facultativas:** operan en serie y buscan ajustar la calidad del efluente para descargarlo en la quebrada la Trece, que corresponde al Tramo Siete de la Cuenca del río Magdalena.

## 5.2 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

La metodología y técnicas usadas para determinar los parámetros de los efluentes en las plantas de Puerto Wilches están descritas en el Anexo B.

La calidad del agua usada en las plantas de la zona de Puerto Wilches (Tabla 12) es similar debido a que usan fuentes de agua que pertenecen a las cuencas de los ríos Sogamoso y Magdalena, que confluyen en la zona donde están ubicadas las plantas. Los caudales de agua captada o requerida para el proceso en cada planta están entre 5 y 10 l / s dependiendo de la capacidades de procesamiento respectivas. Naturalmente, la cantidad de efluentes producidos dependen de la caudal de agua captada o requerida en el proceso de extracción para cada planta. El caudal y contenido de contaminantes en los efluentes aumentan a medida que la capacidad de extracción es mayor, mientras que en los vertimientos (efluente tratado que se vierte al cuerpo de agua) las concentraciones contaminantes se reducen a valores semejantes de una planta a otra, debido a que los sistemas de tratamiento usados en cada planta presentan características de diseño y variables operativas muy similares. A partir de estas características se calcularon otros indicadores que muestran la influencia de la extracción de aceite y el tratamiento de efluentes sobre el recurso agua de la zona de ubicación de las plantas (Tabla 13); tales indicadores son:

- **Carga de Contaminante del Efluente:** cantidad de cada contaminante presente en el efluente sin tratar, obtenido mediante el calculo:

$$Carga\ Cont.\ Efluente = Caudal\ Efluente \times Concentración\ Contaminante \times Horas\ Operadas\ por\ Día \div 24$$

- **Carga Contaminante Vertida al Cuerpo de Agua:** cantidad de contaminante contenida en el vertimiento; usado para determinar el Monto Total a pagar de Tasa Retributiva por Vertimientos, Decreto 901 del 1° de Abril de 1997; se calcula así:

$$Carga\ Cont.\ Vertida = Caudal\ Vertimiento \times Concentración\ Contaminante \times Horas\ Operadas\ por\ Día \div 24$$

- **Cantidad de Contaminante Removido:** para cada contaminante se determinó el porcentaje removido del efluente mediante el sistema de tratamiento; estos valores se compararon con la norma para vertimientos en cuerpos de agua, Artículo 72 del Decreto 1594 de 1984 (Tabla 14); el porcentaje de remoción se obtiene mediante el calculo:

$$\% \text{ Remoción} = 100\% \times [Carga\ Efluente - Carga\ Vertimiento] \div Carga\ Efluente$$

Tabla 12. Parámetros del Tratamiento de Efluentes en Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches

Parámetro	Unidades	Palmas Oleaginosas Bucarelia			Promoc. Agropec. Monterrey			Palmas Oleag. Las Brisas			Palmeras de Puerto Wilches		
		Entrada	Salida	Captación	Entrada	Salida	Captación	Entrada	Salida	Captación	Entrada	Salida	Captación
DBO <sub>5</sub>	mg / l O <sub>2</sub>	17.967,05	379	1,26	15.865,5	143,3	1,14	9.953,4	74,86	4,78	15.509,16	337,44	1,23
DQO	mg / l O <sub>2</sub>	81.000	4.000	6	51.500	2.400	5	45.500	2.000	ND	53.500	4.200	ND
SST	mg / l	28.450	4.200	3,33	31.600	1533,33	3,33	17.700	270	2,22	27.900	1.933,33	4,44
SSTV	mg / l	24.300	2.700	3,33	25.900	866,66	0	15.300	130	2,22	23.600	1.333,33	1,11
ST	mg / l	55.925	9.603	108	47.827	8.570	142	30.484	2.866	39	40.625	6.830	136
STV	mg / l	45.916	3.795	28	38.356	2.214	56	25.222	694	7	32.712	2.775	36
S. Sedimentables	mg / l	1.000	0,5	0	1.000	0,8	0	900	0,1	0	1.000	0,3	0
S. Disueltos	mg / l	27.475	5.403	104,67	16.227	7036,67	138,67	12.784	2.596	36,78	12.725	4.896,67	131,56
Nitratos	mg / l	ND	ND	0,4515	ND	ND	0,4680	ND	ND	0,3975	ND	ND	0,7675
Nitritos	mg / l	ND	ND	0,0004	ND	ND	ND	ND	ND	0,0004	ND	ND	0,0005
Fosfatos	mg / l	953,73	213,07	0,811	913,15	142,04	0,811	527,60	71,02	0,406	608,77	162,34	3,653
Sulfatos	mg / l	191,48	10,64	1,81	255,31	34,04	5,42	127,66	38,30	0,745	191,47	38,29	1,489
Grasas y aceites	mg / l	5.204,62	2,75	---	1218,36	0,55	---	1232,25	2,66	---	1914,80	2,07	---
pH		4,56	7,71	6,85	4,21	8,41	6,9	4,21	8,00	5,83	4,6	8,00	6,53
Temperatura	° C	39,4	32,2	27,4	39,3	31,3	26,9	39,5	30,15	31,4	48,5	28	27,7
Caudal	l / seg	11,78	3,604	8,33	4,47	2,9	10	5,195	1,334	5,73	7,33	0,2	10
Conductividad	μ S / cm	8.510	1.110	132,3	890	755	41,8	578	445	27,5	764	755	98,6
Turbidez	NTU	6.000	3.600	15	8.600	2.500	69	12.400	400	16	6.600	2.700	37
Color	Pt Co	130.000	19.700	71	129.000	14.100	258	70.400	2.900	90	115.000	14.200	105

Tabla 13. Remoción de Contaminantes en Vertimientos de Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches

Parámetro	Palmas Oleaginosas Bucarelia			Promoc. Agropec. Monterrey			Palmas Oleag. Las Brisas			Palmeras de Puerto Wilches		
	Carga [Kg / Día]		Remoción [%]	Carga [Kg / Día]		Remoción [%]	Carga [Kg / Día]		Remoción [%]	Carga [Kg / Día]		Remoción [%]
	Efluente	Vertimiento		Efluente	Vertimiento		Efluente	Vertimiento		Efluente	Vertimiento	
DBO <sub>5</sub>	12.191,15	78,68	99,35%	4.084,92	23,94	99,41%	2.978,38	5,75	99,81%	6.548,09	3,89	99,94%
DQO	54.960,77	830,36	98,49%	13.259,81	400,90	96,98%	13.615,06	153,68	98,87%	22.588,13	48,38	99,79%
SST	19.304,12	871,88	95,48%	8.136,12	256,13	96,85%	5.296,41	20,75	99,61%	11.779,60	22,27	99,81%
Grasas y aceites	3.531,48	0,57	99,98%	313,69	0,09	99,97%	368,73	0,20	99,94%	808,44	0,02	100,00%

**Tabla 14. Normatividad Nacional para Vertimientos – Decreto 1594/84 Art. 72**

Parámetro	Unidades	Rango
pH	–	5 – 9
Temperatura	°C	≤ 40
Material Flotante	–	Ausente
DBO <sub>5</sub>	% Remoción en carga UE	≥ 20
	% Remoción en carga UN	≥ 80
Sólidos Suspendedos Totales	% Remoción en carga UE	≥ 50
	% Remoción en carga UN	≥ 80
Grasas y Aceites	% Remoción en carga	≥ 80

UE: Usuarios Existentes o Anteriores a la Norma – UN: Usuarios Nuevos

Los sistemas de tratamiento usados en las extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches permiten cumplir con la reglamentación nacional vigente para vertimientos en cuerpos de agua (Tabla 14), ya que las remociones de contaminantes del afluente en cada planta (Tabla 13) se ajustan holgadamente para todos los parámetros exigidos por la norma.

### 5.3 PRODUCCIÓN ESTIMADA DE BIOGÁS

**Tabla 15. Indicadores Energéticos y de Producción de Biogás para la Agroindustria de Palma <sup>(1)</sup>**

Indicador	Unidades	Valor
Producción Biogás	m <sup>3</sup> / [ T de RFF ]	18,2
Producción Biogás (Lagunas)	m <sup>3</sup> / [ Kg de DQO removido ]	0,19 – 0,25
Poder de Generación de Energía Eléctrica (EE)	Kwh / m <sup>3</sup>	1,8
Demanda de EE de una Extractora de Aceite de Palma	Kwh / [ T de RFF ]	16 – 20
EE producida por Biogás Generado	Kwh / [ T de RFF ]	32,76

Utilizando la cantidad de MO digerida anaeróticamente en cada sistema de tratamiento (aproximadamente 65%) medida como kilogramos de DQO removida por día y el factor de de Biogás producido por biomasa removida medida como metros cúbicos de Biogás generado por kilogramo de DQO removido (Tabla 15) se estima la cantidad total de Biogás que puede captarse en cada planta (Tabla 16), mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Biogás Producido} = \text{Carga DQO Efluente} \times 65\% \times \text{Factor Producción de Biogás}$$

A partir de esta cantidad de Biogás estimada se calculó la EE que podría obtenerse utilizando el poder de generación de EE (1,8 Kwh / m<sup>3</sup>) medido en kilovatios hora generador por metro cúbicos de Biogás (Tabla 6), mediante la operación:

$$EE \text{ Generada} = \text{Biogás Producido} \div 16 \text{ Horas Operadas por Día} \times \text{Poder de Generación de EE}$$

Las extractoras de aceite Palmas Oleaginosas Las Brisas y Promociones Agropecuarias Monterrey pueden producir cerca de 2.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios con los cuales pueden generarse 200 Kwh aproximadamente; en Palmas Oleaginosas Bucarelia pueden obtenerse cerca de 8.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios con los cuales se puede generar más de 800 Kwh, mientras que en Palmeras de Puerto Wilches se producen 3.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios que sirven para generar cerca de 350 Kwh (Tabla 16). Por lo tanto, en las plantas extractoras de Puerto Wilches, existe una fuente de energía desperdiciada, que está contaminando el ambiente, la cual puede ser aprovechada en la generación de EE para usarla en la operación de cada planta.

**Tabla 16. Producción de Biogás, Consumo y Generación de EE en Plantas de Puerto Wilches**

Planta	Capacidad [T de RFF/h]	Biogás [ m <sup>3</sup> / Día ]	Generación EE [ Kwh ]	EE Requerida [ Kwh ]
Palmas Oleaginosas Bucarelia	34	6.788 – 8.931	764 – 1.005	550 – 680
Promociones Agropecuarias Monterrey	22	1.638 – 2.155	184 – 242	350 – 440
Palmas Oleaginosas Las Brisas	15	1.681 – 2.212	189 – 249	240 – 300
Palmeras de Puerto Wilches	23	2.790 – 3.671	314 – 413	370 – 460

#### 5.4 REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A partir de las capacidades de extracción de cada una de las plantas (Numeral 5.1) y el indicador de demanda de EE para extractoras de aceite de palma (Tabla 15) se estimaron los requerimientos totales de EE (Tabla 16), mediante la operación:

$$EE \text{ Requerida} = \text{Indicador de Demandada de EE} \times \text{Capacidad de Extracción Promedio por Hora}$$

En general, puede esperarse que la cantidad potencial de EE que puede generarse del Biogás obtenido en cada una de las plantas de Puerto Wilches superen los requerimientos totales estimados de EE en cada caso (Tabla 16) por lo tanto, existe la disponibilidad de un recurso para ser explotado por las plantas e incluso habrán unos excedentes que pueden disponerse mediante una Tea o aprovecharse en otras aplicaciones (doméstica, iluminación, calefacción, transporte, trabajo mecánico, etc.) para zonas vecinas a la planta.

## 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL

### 6.1 ELIMINACIÓN DE VERTIMIENTO

El efluente tratado mediante digestión anaerobia en las plantas extractoras de aceite de palma contiene un rango de nutrientes, que permite su aprovechamiento como fertilizante dentro del plan de manejo de nutrientes de las plantaciones; con esta práctica se reducen los requerimientos de fertilizantes sintéticos y otros reacondicionadores de suelos fabricados con métodos menos sostenibles.

**Tabla 17. Cantidad de Efluente Vertido por Extractoras de Aceite de Palma de Puerto Wilches**

Planta	Vertimiento [ m <sup>3</sup> / Día ]
Palmas Oleaginosas Bucarelia	311
Promociones Agropecuarias Monterrey	251
Palmas Oleaginosas Las Brisas	0
Palmeras de Puerto Wilches	17

Actualmente, las plantas extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches descargan en promedio cerca de 600 m<sup>3</sup> diarios de efluentes de sus sistemas de tratamiento a las cuencas de los ríos Sogamoso y Magdalena (Tabla 17) con excepción de la planta de Palmas Oleaginosas Las Brisas que vienen aprovechado este efluente tratado para la fertilización de sus plantaciones (Numeral 5.1.3). La descarga estos residuos líquidos a cuerpos de agua causa un tributo ambiental denominado Tasa Retributiva por Vertimiento (Decreto 901 del 1º de Abril de 1997) el cual representa un costo adicional a la operación de la planta de extracción. El aprovechamiento del efluente tratado en extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches como fertilizante aplicándolo en sus propios cultivos de palma mediante un sistema de microaspersión o comercializándolo a terceros, permitiría:

- Eliminar los vertimientos a cuerpos de agua generados por su actividad industrial
- Reducir considerablemente el pago de tasa retributiva que representa un costo ambiental importante dentro del balance económico del negocio
- Valorizar el efluente tratado en la fertilización de cultivos y / o comercialización como biofertilizante.

## 6.2 PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO

El lodo obtenido de las lagunas de oxidación se trata en lechos de secado para retirarle humedad y obtener un sólido manejable, que luego se empaqueta en sacos. Este producto puede usarse para compostaje, recuperación de suelos, estimulación de crecimiento de algas en estanques de piscicultura y suplemento para animales; para lograr un adecuado aprovechamiento las aplicaciones deben evaluarse según cada caso. Este bioabono puede ser aplicado en los cultivos o plantaciones de las extractoras de aceite o comercializado con terceros.

## 6.3 REDUCCIÓN DE EMISIONES

La valorización del Biogás producido en los sistemas de tratamiento de efluentes en extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches, mediante su aprovechamiento en la generación de EE, causa impactos de orden tecnológico, ambiental y económico dentro de su actividad industrial. El impacto tecnológico hace referencia a que el Biogás puede reemplazar total o parcialmente el combustible en motores de combustión interna Diesel o a gasolina sin afectar su operación y rendimiento; ambiental y económicamente plantea una alternativa para aprovechar y valorizar un subproducto que actualmente se emite contaminando la atmósfera, por lo tanto, sería posible reducir considerablemente el impacto causado por la emisión atmosférica de gases como el metano que causa efecto invernadero, al tiempo que se agrega valor al biocombustible obtenido del tratamiento anaerobio de sus efluentes.

Es importante anotar que el consumo de Biogás requerido para generar EE en las plantas de Puerto Wilches, es menor a la cantidad producida en cada planta, por lo tanto, permanece un excedente que debe disponerse o aprovecharse para otros usos, ya sea quemarlo en una Tea, utilizarlo en otras aplicaciones de la planta y / o comercializarlo (como Biogás o EE) en viviendas, industrias o haciendas vecinas.

La disposición total o parcial del Biogás de las plantas de Puerto Wilches mediante su combustión (con o sin aprovechamiento energético) permite reducir hasta 80% el impacto ambiental causado por emisión de gases de efecto invernadero (Tabla 25), ya que por medio de la combustión, el metano contenido en el Biogás se transforma fundamentalmente en una emisión de dióxido de carbono, la cual posee un potencial de calentamiento global (GWP) mucho menor (Tabla 24). Este impacto ambiental positivo es un elemento importante del presente análisis para las plantas de Puerto Wilches, ya que es una característica requerida

para su estudio como proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (Proyecto MDL) contemplados dentro del Protocolo de Kyoto que busca disminuir el calentamiento global (Capítulo 7).

#### 6.4 INFRAESTRUCTURA REQUERIDA

Entre las características básicas que debe cumplir la infraestructura necesaria para el aprovechamiento del Biogás obtenido en extractoras de aceite de palma, se tienen:

- Diseño simple para construcción, operación y mantenimiento
- Materiales disponibles en la región, resistentes a la corrosión con propiedades de aislamiento efectivas
- Implementar dispositivos de seguridad
- Las líneas de conducción del Biogás deben ir enterradas o recubiertas para evitar el deterioro de la luz solar; de lo contrario se colocará elevada para evitar accidentes con operadores
- Usar la menor cantidad de equipo mecánico y eléctrico
- Bajo costo por unidad de Biogás obtenido.

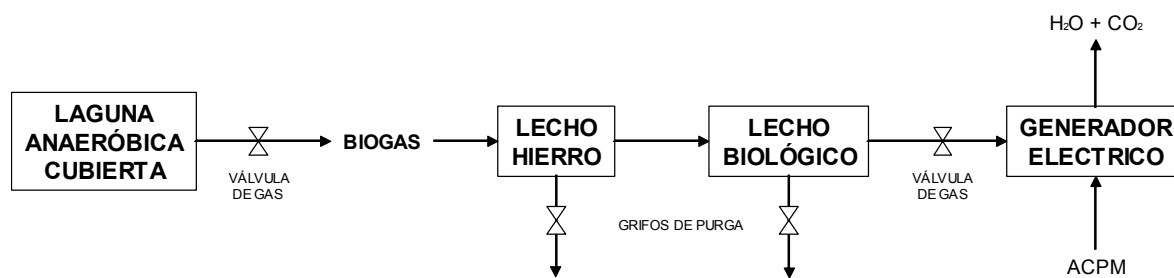
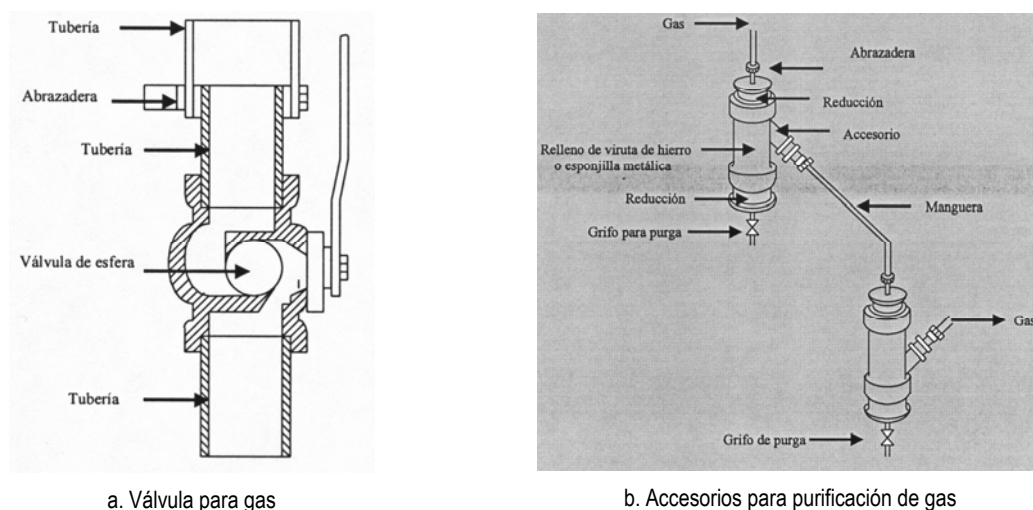


Figura 6. Diagrama de una Línea de Conducción de Biogás

Tomando como Base en el ciclo del Biogás en una planta extractora de aceite (Numeral 3.5 y Figura 5) la infraestructura requerida por cada operación es:

- **Captación y Almacenamiento:** las lagunas anaeróbicas deben cubrirse totalmente y sellarse herméticamente con geotextiles en PVC para captar y almacenar allí mismo el Biogás
- **Conducción:** incluye manguera o tubería de polietileno o PVC, válvulas en acero inoxidable, polietileno o PVC (mínimo 2, una junto a la laguna y otra junto al generador eléctrico), tea, trampas de vapor para conducir el Biogás al sistema de limpieza y luego al generador eléctrico
- **Limpieza:** lecho poroso (recipiente relleno con material ferroso como esponjillas de cocina) sellado herméticamente para que el sulfuro de hidrógeno se deposite sobre la superficie del relleno; puede

usarse más de un filtro con diversos lechos (biológicos, de cal, chorros de agua)



a. Válvula para gas

b. Accesorios para purificación de gas

**Figura 7. Accesorios para Conducción y Limpieza de Biogás<sup>(12)</sup>**

## 6.5 ANÁLISIS ECONÓMICO

**Tabla 18. Consideraciones Técnicas y Económicas para Análisis Económico**

Indicador	Unidades	Valor
Sustitución de ACPM por Biogás	%	50
Consumo de ACPM por Kwh	l / Kwh	0,16
Consumo de Biogás por Kwh	l / Kwh	560
Horas de Operación Diarias	h / Día	16
Valor ACPM	\$ / Gal	3.988,61
Costo de Cubierta para Lagunas Anaeróbicas	\$ / T de RFF	7.000.000
Mantenimiento Anual de Lagunas Anaeróbicas	\$ / T de RFF	1.000.000
Tasa de Oportunidad	%	12

En el presente análisis económico se tomó como base la experiencia de las extractoras de aceite de palma en Tumaco para sustituir ACPM con Biogás en la generación de energía eléctrica con motores Diesel (Numeral 3.7), a partir de la cual se tuvieron en cuenta algunos aspectos relacionados con la sustitución de ACPM por Biogás en generadores eléctricos Diesel (Tabla 18) y se estimaron las inversiones y costos de infraestructura requerida (Tablas 19 y 20), los ingresos anuales y excedentes del biocombustible por sustitución de ACPM

con Biogás (Tabla 21) y los indicadores económicos (Tabla 22).

**Tabla 19. Inversión Fija para Conducción del Biogás**

Indicador	Valor
Limpieza Biogás (Filtro H <sub>2</sub> S)	\$ 1.000.000
Dispositivos Secado	\$ 1.500.000
Medidor de Gas	\$ 300.000
Dispositivo Mezclador	\$ 1.500.000
Tubería y Accesorios	\$ 3.000.000
<b>Total</b>	<b>\$ 7.300.000</b>

**Tabla 20. Inversión y Costos Anuales para Captación, Almacenamiento y Conducción de Biogás**

Planta	Inversión Inicial	Costo de Mantenimiento
Palmas Oleaginosas Bucarelia	\$ 245.300.000	\$ 34.000.000
Promociones Agropecuarias Monterrey	\$ 161.300.000	\$ 22.000.000
Palmas Oleaginosas Las Brisas	\$ 112.300.000	\$ 15.000.000
Palmeras de Puerto Wilches	\$ 168.300.000	\$ 23.000.000

**Tabla 21. Ingresos Anuales y Excedentes Diarios de Biogás por Sustitución de ACPM**

Planta	Consumo Total ACPM	Ingresos por Sustitución	Excedente Biogás [m <sup>3</sup> /Día]
Palmas Oleaginosas Bucarelia	\$ 495.246.358	\$ 247.623.179	5.118
Promociones Agropecuarias Monterrey	\$ 320.453.526	\$ 160.226.763	122
Palmas Oleaginosas Las Brisas	\$ 218.491.040	\$ 109.245.520	737
Palmeras de Puerto Wilches	\$ 335.019.595	\$ 167.509.798	1.375

Bajo las condiciones de sustitución de ACPM contempladas (Tabla 18), se generan unos excedentes de Biogás que superan las 7 toneladas diarias (Tabla 21), las cuales deben disponerse adecuadamente para evitar su emisión a la atmósfera (Numeral 6.3). En Bucarelia sobra aproximadamente el 60% del Biogás producido, mientras en Monterrey el aprovechamiento supera el 90%; las otras dos plantas tienen un excedente del 40%. Hay que tener en cuenta que la sustitución de ACPM propuesta es del 50% pero existen evidencias que con una instalación, control y manejo apropiados, es posible reemplazar hasta el 80% del combustible, con lo cual los excedentes de Biogás se reducirían a menos de 4 toneladas diarias.

**Tabla 22. Indicadores del Análisis Económico**

<b>Planta</b>	<b>VPN</b>	<b>TIR</b>	<b>Relación Costo – Beneficio</b>	<b>Periodo de Recuperación</b>
Palmas Oleaginosas Bucarelia	\$ 115.734.072	46%	0,80	2
Promociones Agropecuarias Monterrey	\$ 72.310.282	45%	0,79	2
Palmas Oleaginosas Las Brisas	\$ 46.979.738	43%	0,78	2
Palmeras de Puerto Wilches	\$ 75.928.931	45%	0,79	2

Los indicadores económicos obtenidos del flujo financiero neto para dos años en cada una de las extractoras de aceite (Tabla 22) reflejan que el aprovechamiento de Biogás en las plantas de Puerto Wilches es viable, ya que los resultados son positivos en cada uno de los indicadores y adicionalmente la inversión se recupera en un periodo de tiempo conveniente.

Respecto a la sensibilidad económica, el proyecto se vería muy afectado negativamente por una caída considerable en el costo del ACPM, no obstante, bajo las actuales condiciones del precio internacional del petróleo, a partir del cual se fija el precio interno de los combustibles, el costo del ACPM viene presentando un aumento constante, lo cual hace más positivos los indicadores económicos del proyecto. En caso de presentarse una caída considerable en los precios de los combustibles, la viabilidad del proyecto podría compensarse con una mayor sustitución de ACPM con Biogás.

## 7. VALORIZACIÓN DE BIOGÁS COMO PROYECTO MDL <sup>(13)</sup>

### 7.1 DESARROLLO, MEDIO AMBIENTE Y COMPROMISOS INTERNACIONALES

El aumento notorio del efecto invernadero sobre la tierra que está asociado al cambio climático global, es producto de las modificaciones causadas al medio ambiente global por la actividad humana, ha motivado la acción de los países para enfrentar esta problemática mundial. El aumento en la concentración de gases que elevan el efecto invernadero hasta niveles perjudiciales para el medio ambiente, se debe a la creciente emisión de tales gases generados por las actividades industriales, agrícolas, forestales, de transporte y combustión de hidrocarburos, carbón y biomasa, combinado con la reducción global de zonas boscosas encargadas de fijar carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis, es decir, transforman gases de invernadero (GEI) en biomasa.

El interés mundial por el presente problema produjo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, cuyo texto fue aprobado el 9 de Mayo de 1992. La Convención entró en vigencia el 21 de Marzo de 1994 y fue aprobada en Colombia mediante la Ley 164 de 1994 y es miembro Parte de la Convención desde el 20 de Junio de 1995. Las Partes de la Convención se reúnen anualmente; las últimas reuniones se llevaron a cabo en Marrakesh (Marruecos) en el 2001, Nueva Delhi (India) en el 2002, Milán (Italia) en el 2003.

Así mismo, en el año de 1997 se redactó el Protocolo de Kyoto (PK) para establecer cuantitativamente las acciones y compromisos con miras a reducir los GEI para los países industrializados. Los compromisos de reducción establecidos suponen una disminución del 5,2% respecto a las emisiones de 1990, efectiva en el periodo 2008 – 2012.

Para que el Protocolo entre en vigor debe ser ratificado por al menos 55 Partes, incluidas aquellos países industrializados que contribuyen con al menos el 55% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en 1990. Hasta el momento 117 Partes han ratificado el Protocolo, incluyendo 32 países industrializados que contribuyen con un 44,29% de las emisiones, pero se ha generado una gran demora por la negativa de USA (el mayor productor de CO<sub>2</sub>) de participar y ahora el interés es que Rusia (con el 17% de la producción de CO<sub>2</sub>) apruebe el Protocolo para

que entre en vigencia. El PK fue aprobado por el Congreso de la República de Colombia por la Ley 629 de Diciembre de 2001.

Los gases controlados por el PK son el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Metano (CH<sub>4</sub>), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>). El Metano que constituye el mayor componente del Biogás y es uno de los objetos de reducción de GEI, por lo tanto, los proyectos desarrollados para su control y / o aprovechamiento tienen el apoyo de la Convención y el PK.

El PK reconoce los altos costos económicos y sociales que implica el cumplimiento de las metas de reducción aceptadas por los países industrializados y establece tres mecanismos de flexibilidad complementarios a las reducciones que los países hagan en su territorio, los cuales les permitirá a estos alcanzar sus objetivos más eficientemente; tales mecanismos son:

- **Comercio de Emisiones:** bajo este esquema los países con compromisos de reducción podrán intercambiar entre sí sus cuotas de emisión asignadas
- **Implementación Conjunta:** este mecanismo permite la participación de varios países industrializados en proyectos de reducción de emisiones; las reducciones alcanzadas mediante los proyectos en cuestión pueden distribuirse entre los países que participantes
- **Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL):** permite la ejecución de proyectos de reducción de emisiones en el territorio de países que no tienen compromisos de reducción de emisiones; las reducciones resultantes del proyecto pueden ser adquiridas por un país o una empresa con compromisos de reducción de emisiones; bajo este esquema definido en el Artículo 12 del PK, las Partes no incluidas en el Anexo I, es decir, los países no industrializados, podrán alojar proyectos de reducción o captura de GEI que generen reducción de emisiones certificadas, las cuales pueden ser adquiridas por aquellas Partes que cuentan con el compromiso de reducción de emisiones y ser contabilizados con el fin de contribuir al logro de sus metas.

El PK establece que los objetivos del MDL son:

- Ayudar a las Partes no incluidas en el Anexo I a lograr un desarrollo sostenible
- Contribuir al objetivo último de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- Ayudar a las Partes Anexo I, a lograr sus compromisos de reducción de emisiones.

Para que un país no industrializado participe en el MDL debe ser Parte del PK y haber designado una autoridad nacional para el mecanismo; en Colombia se designó al Ministerio de Ambiente, Vivienda y

Desarrollo Territorial como autoridad nacional para el MDL.

## 7.2 CICLO DEL PROYECTO MDL

Un proyecto MDL debe seguir una serie de pasos para obtener los Certificados de Reducción de Emisiones (CRE), como son:

- **Formulación y Diseño del Proyecto:** a cargo del responsable o promotor del proyecto
- **Aprobación por la Autoridad Nacional Designada:** el proyecto es aprobado en función de su aporte al desarrollo sostenible del país
- **Validación por una Entidad Operacional:** consiste en una evaluación del proyecto por una entidad independiente
- **Registro ante la Junta Ejecutiva del MDL:** el registro es solicitado por la Entidad Operacional ante la Junta Ejecutiva
- **Monitoreo:** consiste en el seguimiento y registro de determinada información que debe conformar el responsable del proyecto
- **Verificación y Certificación por una Entidad Operacional:** es la revisión independiente de los resultados del Monitoreo; esta certificación es la constancia de la Entidad Operacional de las reducciones que ha dado a lugar el proyecto
- **Expedición de los CRE por la Junta Ejecutiva:** finalmente, luego de entregada la certificación por parte de la Entidad Operacional, la Junta Ejecutiva expide los CRE.

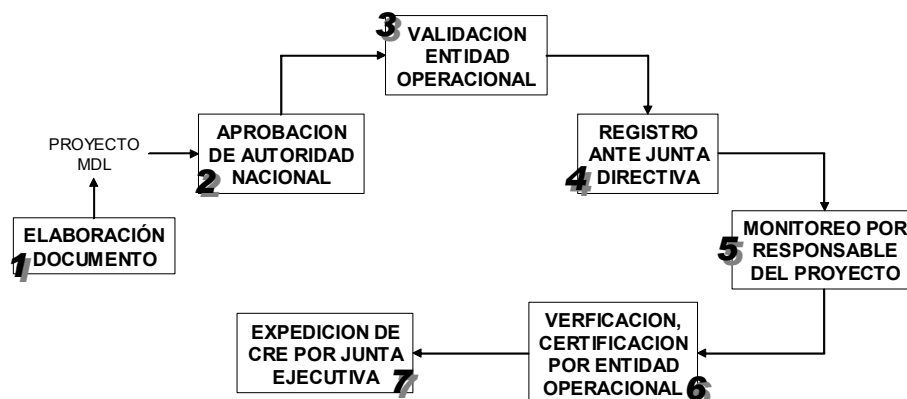


Figura 8. Ciclo de un Proyecto MDL

La Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático (OCMCC) apoya las actividades de la

Autoridad Nacional Designada y desarrolla líneas de acción que promueven la ejecución de actividades de mitigación, mediante proyectos de reducción y captura de gases de efecto invernadero de alta calidad que consolide al país en el mercado mundial del carbono.

### 7.3 PROYECTOS COLOMBIANOS DE REDUCCION DE GEI

A continuación se presenta El portafolio Colombiano de proyectos de reducción de emisiones del MDL (Tabla 23)

**Tabla 23. Proyectos Colombianos para Reducción de GEI <sup>(13)</sup>**

<b>Título</b>	<b>Categoría</b>
Jepirachi Carbon Off-set Project	Energía Renovable
Amoyá River Envioment Services Project	Energía Renovable
Oportunidad de Reducción de GEI mediante el Cambio de la Cadena Productiva del Sector Panelero y su Conversión a Tecnologías Limpias y Eficientes en la Región del Gualivá, Proyecto Piloto Municipio de Útica – Procesadora de Miel Futarena	Eficiencia Energética
Transporte Masivo para Bogotá – Transmilenio	Transporte
Agua Fresca Project and Enviromental Services	Energía Renovable
Triple A de Barranquilla S. A. E. S. P., Aprovechamiento del Gas del Relleno Sanitario El Henequen	Residuos
Valorización del Biogás y Control de Emisiones Atmosféricas Asociadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Río Frío	Sustitución de Combustibles
Sistema Integrado de Transporte Masivo de Pasajeros para Santiago de Cali	Transporte
Proyecto Sombrilla de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero mediante Generación Hidroeléctrica sobre el Río Bogotá	Energía Renovable

### 7.4 CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EN EXTRACTORAS DE ACEITE DE PALMA DE PUERTO WILCHES

El metano y dióxido de carbono, principales componentes del Biogás, son compuestos que forman parte del inventario mundial de GEI, los cuales contribuyen con el calentamiento global de la tierra. De acuerdo con lo anterior, la reducción de la amenaza contaminante del efluente mediante el tratamiento anaeróbico en plantas extractoras de aceite de palma, genera un producto que contribuye con la retención de calor y luz del sol en la superficie de la tierra (efecto invernadero).

**Tabla 24. Potencial de Calentamiento Global de los GEI** <sup>(13, 18)</sup>

Gas	GWP*
Dióxido de Carbono – CO <sub>2</sub>	1
Metano – CH <sub>4</sub>	21
Oxido Nitroso – N <sub>2</sub> O	310
Hexafluoroetano	2.500
Tetrafluorometano	6.300

GWP: Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential)

La legislación nacional ambiental vigente no exige la recuperación o disposición del Biogás, por lo que viene siendo emitido a la atmósfera sin tratamiento alguno. Cada tonelada de metano emitida a la atmósfera tiene el mismo efecto que una emisión de 21 toneladas de dióxido de carbono (Tabla 24); en vista que el metano tiene un poder de retención de calor y luz solar muy superior a la del dióxido de carbono, es preferible que el metano sea convertido a dióxido de carbono mediante la combustión. Por lo tanto, un proyecto como el del aprovechamiento del Biogás en extractoras de aceite de Palma de Puerto Wilches, que implica una reducción de emisiones atmosféricas de metano en un país no industrializado (captura de CO<sub>2</sub>), tiene el perfil requerido para obtener los CRE exigidos para un proyecto MDL.

La implementación de un sistema para captar el Biogás generado en el tratamiento de efluentes en extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches y su posterior aprovechamiento en la generación eléctrica, permitiría eliminar una emisión atmosférica de metano cercana a las 7 toneladas promedio diarias (estimado a partir de datos del capítulo 5 – Tabla 16) lo cual representa aproximadamente 2.000 toneladas año; cada planta emite a la atmósfera entre 900 y 3.500 kilogramos promedio diarias de metano (Tabla 25).

**Tabla 25. Emisión Equivalente de CO<sub>2</sub> en Extractoras de Aceite de Puerto Wilches**

Planta	Metano [Kg/Día]	CO <sub>2</sub> Equivalente [Kg/Día]		
		En Biogás	Combustión	Capturado
Palmas Oleaginosas Bucarelia	3.601	79.578	13.863	65.715
Promociones Agropecuarias Monterrey	869	19.199	3.345	15.854
Palmas Oleaginosas Las Brisas	892	19.713	3.434	16.279
Palmeras de Puerto Wilches	1.480	32.705	5.698	27.008

El impacto causado por efecto invernadero debido a la emisión del metano contenido en el Biogás de las plantas de Puerto Wilches, medido en cantidades equivalentes de dióxido de carbono (GWP) asciende a 150 toneladas diarias; cada planta emite entre 20 y 80 toneladas diarias (Tabla 20). Esta emisión puede reducirse

80% aproximadamente mediante la combustión o aprovechamiento del Biogás, es decir, se pasaría a una emisión inferior a las 30 toneladas diarias, capturando más de 120 toneladas diarias equivalentes de dióxido de carbono.

Es importante anotar que la emisión de dióxido de carbono generado por la combustión de biomasa (fibra, racimos) sumada a la que se generaría por el aprovechamiento del Biogás, no contribuye al aumento neto del dióxido de carbono en la atmósfera, ya que éste es asimilado por los cultivos de palma mediante la fotosíntesis.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La tecnología de extracción del aceite incluye únicamente procedimientos mecánicos y térmicos, lo que permite obtener un producto completamente natural; de esta extracción se obtienen como productos el aceite de palma y el aceite de palmiste, generándose adicionalmente grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos que ascienden al 80% de las materias primas (RFF y agua), de los cuales el 50% son efluentes, mientras el 30% restante son residuos sólidos; para extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante los RFF son tratados en una planta de beneficio o extractora de aceite mediante las operaciones de: recepción de RFF, esterilización, desfrutamiento, digestión, prensado, clarificación, secado y palmistería.
- Los efluentes provenientes de extractoras de aceite de palma se caracterizan por su alto contenido de carga orgánica (hasta 20.000 mg / l de DBO) removida actualmente en la mayoría de las plantas Colombianas, mediante lagunas de estabilización, que combinan fenómenos de digestión anaerobia, aerobio y facultativos, aplicando el principio de degradación de la MO, usada como alimento por microorganismos presentes en los efluentes; estos sistemas de tratamiento son muy flexibles, con mayor capacidad y no presentan problemas de acidificación.
- El ciclo para aprovechamiento del Biogás involucra una serie de fenómenos entrelazados así: el cultivo de palma asimila el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del ambiente durante la fotosíntesis para producir biomasa, la cual es usada como combustible junto con el biogás obtenido posteriormente, sin que se genere un incremento neto de dióxido de carbono en la atmósfera; para utilizar el Biogás obtenido dentro de este ciclo se requieren las operaciones de: captación, limpieza, almacenamiento y aprovechamiento.
- El Biogás puede usarse como combustible en motores de combustión interna a gasolina o Diesel para transporte, transmisión mecánica o generación eléctrica; en motores a gasolina es posible reemplazar la totalidad del combustible por Biogás, mientras en motores Diesel puede reemplazarse hasta 80% del ACPM, siempre y cuando el contenido de metano en el Biogás no sea inferior al 50%; cualquier cantidad de Biogás inyectada al motor permite sustituir parte del combustible líquido, quemar la mezcla con mayor

facilidad, reducir emisiones de azufre e hidrocarburos volátiles y mejorar la eficiencia térmica.

- Dos extractoras de aceite de palma (Palmar de Santa Helena y Palmeiras) ubicadas en Tumaco (Nariño) vienen aprovechando el Biogás obtenido de sus sistemas de tratamiento para generar EE con resultados óptimos; el Palmar de Santa Helena cuenta con dos biodigestores para tratar sus efluentes, ha sustituido hasta el 50% del ACPM y aplicado el efluente tratado y los lodos obtenidos en la biofertilización de sus plantaciones, mientras que Palmeiras mediante el sellamiento de una laguna anaeróbica con láminas en PVC, capta el Biogás y reemplaza hasta 40% del ACPM en un generador eléctrico.
- Los efluentes de la industria palmera se caracterizan por sus altos valores en DBO y DQO (hasta 50.000 y 80.000 respectivamente), altas temperaturas (60 °C), bajo pH (hasta 4) y baja biodegradabilidad por presencia de aceite; la legislación ambiental vigente exige para vertimientos una remoción de contaminantes del 80% mediante tratamiento, no obstante, el efluente tratado en plantas extractoras de aceite de palma es un recurso valioso, ya que contiene un rango de nutrientes, que permite su inclusión dentro del plan de manejo de nutrientes de las plantaciones, práctica que permite reducir requerimientos de fertilizantes sintéticos y otros reacondicionadores de suelos fabricados con métodos menos sostenibles.
- Las plantas extractoras de aceite de palma ubicadas en la zona de Puerto Wilches son Palmas Oleaginosas Bucarelia, Promociones Agropecuarias Monterrey, Palmas Oleaginosas Las Brisas y Palmeras de Puerto Wilches, sus capacidades diarias de procesamiento son respectivamente 34, 22, 15 y 23 toneladas de RFF, operan en promedio 16 horas diarias y sus sistemas de tratamiento de efluentes están compuestos por lagunas de estabilización y oxidación (anaeróbicas y facultivas) y vierten sus aguas residuales tratadas en las cuencas de los ríos Sogamoso y Magdalena (excepto Las Brisas que las usa para biofertilización).
- Los caudales de agua captada o requerida para el proceso en las planta de Puerto Wilches están entre 5 y 10 l / s. El caudal y contenido de contaminantes en los efluentes aumentan a medida que la capacidad de extracción es mayor, mientras que en los vertimientos las concentraciones contaminantes se reducen a valores semejantes entre las plantas, debido a la similitud en las características de diseño y variables operativas de sus sistemas de tratamiento; el tratamiento de efluentes en las extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches permiten cumplir con la reglamentación nacional vigente para vertimientos en cuerpos de agua, ya que la remoción de contaminantes se ajustan holgadamente para todos los

parámetros exigidos por la norma.

- En Las Brisas y Monterrey podrían captarse cerca de 2.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios en cada planta, que pueden producir 200 Kwh aproximadamente, en Bucarelia cerca de 8.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios para generar más de 800 Kwh, mientras en Palmeras de Puerto Wilches son 3.000 m<sup>3</sup> de Biogás diarios para generar cerca de 350 Kwh; por lo tanto, las extractoras de aceite de Puerto Wilches cuentan con una fuente de energía aprovechable en la cogeneración de EE y que actualmente se desperdicia, contaminando el ambiente. La EE que podría generarse en las plantas de Puerto Wilches con estas cantidades de Biogás superaría sus requerimientos energéticos en cada caso, por lo tanto, existe la disponibilidad del recurso para ser explotado por las plantas, incluso habrán unos excedentes que deben disponerse adecuadamente o destinarse a otras aplicaciones.
- Las plantas extractoras de aceite de palma de Puerto Wilches vienen descargando en promedio cerca de 600 m<sup>3</sup> diarios de efluentes tratados a las cuencas de los ríos Sogamoso y Magdalena, con excepción de la planta Las Brisas que vienen aprovechado este efluente para fertilizar sus plantaciones; tales vertimientos causan un tributo ambiental denominado Tasa Retributiva por Vertimiento (Decreto 901 del 1º de Abril de 1997) que representa un costo adicional a la extracción del aceite.
- La práctica de fertilización de cultivos (propios mediante microaspersión o comercializado a terceros) con efluente tratado en extractoras de aceite de palma en las plantas de Puerto Wilches permitiría valorizar un subproducto que actualmente se desecha, eliminar los vertimientos y reducir el costo ambiental asociado (tasa retributiva).
- La valorización del Biogás en las plantas de Puerto Wilches, como combustible para generación eléctrica, causa un impacto tecnológico ya que es posible reemplazar total o parcialmente el combustible en motores de combustión interna sin afectar su operación y rendimiento, y un impacto económico – ambiental porque permite el aprovechamiento y valorización de un subproducto que se desecha causando contaminación de la atmósfera; por lo tanto, podría reducirse considerablemente el impacto por contaminación atmosférica con gases como metano y a la vez se agrega valor al biocombustible obtenido del tratamiento anaerobio de sus efluentes.
- Sustituyendo el 50% de ACPM con Biogás para cogeneración en las plantas de Puerto Wilches, se generan unos excedentes que superan las 7 toneladas diarias; en Bucarelia sobra cerca del 60% del

Biogás producido, en Monterrey el aprovechamiento supera el 90%, mientras las otras dos plantas tienen excedentes del 40% cada una; No obstante, hay evidencias que con una instalación, control y manejo apropiados, es posible reemplazar hasta el 80% del combustible, con lo cual los excedentes de Biogás se reducirían a menos de 4 toneladas diarias.

- Los excedentes de Biogás que se generaría en las plantas de Puerto Wilches después de su aprovechamiento en producción de EE deben disponerse (quemándolo en una Tea), destinarse a otras aplicaciones de la planta y / o comercializarlo (como Biogás o EE) en viviendas, industrias o haciendas vecinas.
- La disposición total o parcial del Biogás en las plantas de Puerto Wilches mediante su combustión (con o sin aprovechamiento energético) permite reducir hasta 80% el impacto ambiental causado por emisión de GEI, gracias a que los gases de combustión poseen en promedio un potencial de calentamiento global (GWP) mucho menor; este impacto ambiental positivo es una característica requerida para considerar el presente estudio como Proyecto MDL contemplados dentro del Protocolo de Kyoto para reducción del calentamiento global.
- La infraestructura requerida para captar, limpiar y conducir el Biogás obtenido en extractoras de aceite de palma debe: ser de bajo costo por unidad de Biogás, fundamentarse en un diseño simple pero seguro, construirse con materiales disponibles en la región e incluir la menor cantidad de equipo mecánico y eléctrico.
- Los indicadores económicos del proyecto en cada una de las extractoras de aceite reflejan que el aprovechamiento de Biogás en las plantas de Puerto Wilches es viable, ya estos valores han resultado positivos en cada indicador y adicionalmente la inversión se recupera en un periodo de tiempo conveniente (2 años).
- El proyecto presenta una sensibilidad negativa ante una drástica caída en el costo del ACPM, no obstante, bajo las actuales condiciones del precio internacional del petróleo, a partir del cual se fija el precio interno de los combustibles, el costo del ACPM viene presentando un aumento constante, lo cual hace más positivos los indicadores económicos del proyecto. En caso de presentarse una caída considerable en los precios de los combustibles, la viabilidad del proyecto podría compensarse con una mayor sustitución de ACPM con Biogás.

- Los principales componentes del Biogás ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) son GEI por lo tanto, la reducción contaminante del efluente mediante tratamiento anaeróbico en extractoras de aceite de palma, genera un producto que contribuye con el efecto invernadero; pero como el metano tiene un poder de calentamiento global (GWP = 21) muy superior al del dióxido de carbono (GWP = 1), es mejor transformar el Biogás mediante la combustión para reducir su impacto ambiental (efecto invernadero).
- El aprovechamiento del Biogás en extractoras de aceite de Palma de Puerto Wilches, implica una reducción de emisiones atmosféricas de metano en un país no industrializado (captura de  $\text{CO}_2$ ), por lo cual se ajusta al perfil requerido para obtener los CRE exigidos para un proyecto MDL; la implementación de este proyecto permitiría eliminar una emisión atmosférica de metano cercana a las 7 toneladas promedio diarias (2.000 T / año).
- La emisión actual del metano contenido en el Biogás producido en las plantas de Puerto Wilches equivale aproximadamente a 150 toneladas diarias de dióxido de carbono y podría reducirse por encima del 80% mediante combustión hasta alcanzar una emisión inferior a las 30 toneladas diarias, capturando más de 120 toneladas diarias equivalentes de dióxido de carbono.
- La emisión de dióxido de carbono generado por la combustión de biomasa (fibra, racimos) sumada a la que se generaría por el aprovechamiento del Biogás, no contribuye al aumento neto del dióxido de carbono en la atmósfera, ya que éste es asimilado por los cultivos de palma mediante la fotosíntesis.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. A. N., Ma. The energy – environment interface in the Malaysian Oil Palm Industry. Artículo Traducido por FEDEPALMA. Revista Palmas, Volumen 18, Número 4. Santa Fe de Bogotá, 1997.
2. BURGUES N., Carlos; GARCÍA N, Jesús A.; DUEÑAS, Javier; ZAPATA, Gildardo y GUEVARA, Martha L. Evaluación Económica de Sistemas de Tratamiento de Efluentes para una Planta de Beneficio de Aceite de Palma. Tesis de Grado. Universidad de la Sabana: Bogotá D. C. 2000.
3. CHAO, R.; SOSA, R.; DEL RIO, J. y PEREZ, A. Impacto Social por la Utilización del Biogás en un Semi – Internado de Primaria. Instituto de Investigaciones Porcinas: La Habana (Cuba), 2000.
4. CHAO, R.; SOSA, R. y DEL RIO, J. Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos del Tratamiento de Residuales Agrícolas con Producción de Biogás. Instituto de Investigaciones Porcinas: La Habana (Cuba), 2000.
5. CONIL, Philippe. La Valorización de los Subproductos de la Planta de Tratamiento de los Efluentes de la Extractora de Aceite de Palma “Palmar Santa Helena” en Tumaco, Colombia. BIOTEC COLOMBIA S. A. Cali, 1997.
6. FEDERACION NACIONAL DE CULTIVADORES DE PALMA DE ACEITE, FEDEPALMA y FONDO DE FOMENTO PALMERO. Anuario 2005. Editorial Apice: Bogotá D. C. Junio de 2005.
7. GARCÉS, Isabel C. Productos Derivados de la Industria de la Palma de Aceite. Usos. Revista Palmas. Santa Fe de Bogotá, 2000.
8. GARCIA M., Jesús A. Estado Actual del Manejo de Efluentes en Colombia. Revista Palmas, Volumen 14, Número Especial. Santa Fe de Bogotá, 1993.
9. GARCIA N., Jesús A. Influencia de la Prácticas Agronómicas en el Procesamiento de los Racimos de Fruta Fresca en las Plantas Extractoras. Revista Palmas. Santa Fe de Bogotá, 2000.

10. GARCIA N., Jesús A y GARRIDO A., Jorge. Evaluación de Lagunas de Estabilización – Planta Extractora Monterrey. Revista Palmas, Volumen 15, Número 2. Santa Fe de Bogotá, 1994.
11. GARCIA N., Jesús A y URIBE M., León D. Manejo de Efluentes de Plantas Extractoras – 2. Diseño de Lagunas de Estabilización. Boletín Técnico No. 11. Cenipalma: Santa Fe de Bogotá, 1997.
12. ICONTEC y AENE CONSULTORIA S. A. Formulación de un Programa Básico de Normalización para Aplicaciones de Energías Alternativas – Guía para la Implementación de Sistemas de Producción de Biogás. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME: Santa Fe de Bogotá, Marzo de 2003.
13. OFICINA PARA LA MITGACIÓN DEL CAMBO CLIMÁTICO, OCMCC. Disponible en [http://www.cecodes.org.co/cambio\\_climatico/ocmcc.htm#2](http://www.cecodes.org.co/cambio_climatico/ocmcc.htm#2)
14. OIL WORLD ANNUAL 2004 disponible en <http://www.oilworld.biz>.
15. PIEDRAHITA, Emilio y CONIL, Philippe. Experiencia de 5 Años en la Biodigestión y Utilización de los Efluentes de una Extractora de Aceite de Palma en la Región de Tumaco, Colombia. BIOTEC COLOMBIA S. A. Cali, 1996.
16. RUBIANO R., Carolina. Máximo Aprovechamiento del Biogás como Combustible y Caracterización de los Efluentes de las Plantas Extractoras de Aceite. Tesis de Grado. Universidad de América: Santa Fe de Bogotá, 2000
17. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, UIS e INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Sistema de Información Ambiental para Sectores Productivos: Producción de Aceites Vegetales sin Refinar. La Universidad: Bucaramanga, 1999.
18. VALDERRAMA S., Andrea C. y CASTILLO V., Diyanira. Estudio de Pre-factibilidad Técnica y Económica de la Utilización de Biogás en Plantas Diesel para Generación Eléctrica. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, 2004

**ANEXO A**  
**MEMORIA DE CÁLCULO**

#	PLANTA	A	B	C	D	E			F
		Capacidad de Extracción [T de RFF / día]	Carga DQO en Efluente [ Kg / día ]	Producción Biogás [ m <sup>3</sup> / día ]			Poder Generación EE [ Kwh ]		
				Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
				B x 65% x 0,19	B x 65% x 0,25		C x 1,8 ÷ 16	D x 1,8 ÷ 16	
I	Palmas Oleaginosas Bucarelia	34	54.960,8	6.788	8.931	7.859	764	1.005	884
II	Promociones Agropecuarias Monterrey	22	13.259,8	1.638	2.155	1.896	184	242	213
III	Palmas Oleaginosas Las Brisas	15	13.615,1	1.681	2.212	1.947	189	249	219
IV	Palmeras de Puerto Wilches	23	22.588,1	2.790	3.671	3.230	314	413	363

#	G		H	I		J	K	L		M
	EE Requerida [ Kwh ]			Caudal Vertimientos		Inversión	Mantenimiento	Consumo Total ACPM		Ingresos por
	Mínimo	Máximo	Promedio	[ l / s ]	[ m <sup>3</sup> / día ]	Inicial	A x 10 <sup>6</sup>	I / Día	\$ / Año	Sustitución
	A x 16	A x 20			H x 3,6 x 24	(A x 7 + 7,3) x 10 <sup>6</sup>		Gx0,16x16	K x 300 x 1.053,68	L x 50%
I	544	680	612	3,6	311,4	\$ 245.300.000	\$ 34.000.000	1.567	\$ 495.246.358	\$ 247.623.179
II	352	440	396	31,3	250,6	\$ 161.300.000	\$ 22.000.000	1.014	\$ 320.453.526	\$ 160.226.763
III	240	300	270	0,0	0,0	\$ 112.300.000	\$ 15.000.000	691	\$ 218.491.040	\$ 109.245.520
IV	368	460	414	0,2	17,3	\$ 168.300.000	\$ 23.000.000	1.060	\$ 335.019.595	\$ 167.509.798

**ANEXO B**  
**METODOLOGÍA Y TÉCNICAS PARA ANÁLISIS DE EFLUENTES EN PLANTAS DE PUERTO WILCHES**

**PARÁMETROS ANALIZADOS Y TÉCNICA EMPLEADA**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Técnica</b>
<b>In Situ</b>		
pH	---	Potenciométrico
Temperatura	° C	Potenciométrico
Conductividad	μS/cm	Conductométrico
Caudal	l/s	Volumétrico
<b>En el laboratorio</b>		
DBO <sub>5</sub>	mg/L de O <sub>2</sub>	Incubación a 20° C - 5 días
DQO	mg/L de O <sub>2</sub>	Colorimétrico-Reflujo Cerrado
SST	mg/L	Gravimétrico
SSTV	mg/L	Gravimétrico
ST	mg/L	Gravimétrico
STV	mg/L	Gravimétrico
S.Sedimentables	ml/L	Cono Inhoff
S. Disueltos	mg/L	Gravimétrico
Nitratos	mg/L	Colorimétrico
Nitritos	mg/L	Colorimétrico
Fosfatos	mg/L	Colorimétrico
Sulfatos	mg/L	Turbidimétrico
Grasas y Aceites	mg/L	Extracción Soxhlet
Turbidez	FTU	Espectrofotométrico
Color	Pt Co	Espectrofotométrico
Tensoactivos	mg/L	Colorimétrico
Fenoles	mg/L	Colorimétrico

Fuente: Standard Methods Edición 20

## TOMA DE MUESTRA

La toma de muestra se realizó en las cuatro Palmeras muestras compuestas. Inmediatamente que se tomó la muestra y si se realizó la compuesta, se procedió a la toma de los parámetros in situ, teniendo en cuenta la calibración previa de dichos equipos. Estos parámetros fueron: Temperatura, pH, Conductividad, además de su caudal, es cual es necesario para realizar la compuesta.

### FECHAS DE LOS MONITOREOS DE LAS INDUSTRIAS

Fechas de Monitoreo	Industria
Marzo 20 /2002	Palmas Oleaginosas Bucarelia
Marzo 20/2002	Promociones Agropecuarias Monterrey
Marzo 21/2002	Palmas Oleaginosas Las Brisas
Marzo 21/2002	Palmeras de Puerto Wilches

## PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA

Después de culminada la lectura de los parámetros de campo, se procedió a dividir la muestra en los recipientes, los cuales se encontraban rotulados teniendo en cuenta los diferentes tipos de parámetros; y posteriormente se realizó la respectiva preservación.

## TRANSPORTE DE LA MUESTRA

Inmediatamente después de su preservación, las muestras fueron transportadas acompañadas de su respectiva cadena de custodia hasta el laboratorio del CEIAM ubicado en la sede de Guatiguará Municipio de Piedecuesta, donde realice sus correspondientes análisis. Tanto en la toma como en la preservación, transporte y análisis de las muestras, se emplearon condiciones técnicas definidas según el Standard Methods for the Examination of Water and Waste de la APHA-AWWA-WPCF última edición

## PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE PARÁMETROS EN CAMPO

- **Medida de pH:** La medida del pH se realizó por el método electrométrico, usando un pH-metro marca

Mettler Toledo MP120, previamente calibrado con soluciones de pH 4 y pH 7. Éste método está basado en las normas STANDARD METHODS 4500-H<sup>+</sup>/95.

- **Medida de la Temperatura:** para la determinación de la temperatura se utilizó el mismo pH-metro Mettler Toledo. Éste método está basado en las normas STANDARD METHODS 2550 -B/2.
- **Medida de la Conductividad:** para esta medición se utilizó un conductímetro marca Mettler Toledo previamente calibrado. Éste método está basado en las normas STANDARD METHODS 2510-B/4.
- **Medida del Caudal:** para esta medición se realizó en forma manual utilizando un cronómetro y un recipiente aforado.

## PROCEDIMIENTO PARA DESARROLLO DE ANÁLISIS EN EL LABORATORIO

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno:** la determinación de éste parámetro se realizó por el método del DBO<sub>5</sub> según las normas STANDARD METHODS 5210 B/95.
- **Demanda Química de Oxígeno:** el método que se utilizó para este análisis es el de reflujo cerrado, método colorimétrico, basado en las normas STANDARD METHODS 5220 D/95.
- **Sólidos Suspendedos Totales:** el contenido de sólidos suspendedos totales en las muestras, se realizó por el método Gravimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 2540 D/95.
- **Sólidos Suspendedos Totales Volátiles:** el contenido de sólidos suspendedos totales volátiles en las muestras, se realizó por el método Gravimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 2540 E/95.
- **Sólidos Totales:** el contenido de sólidos totales en las muestras, se realizó por el método Gravimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 2540 B/95.
- **Sólidos Totales Volátiles:** el contenido de sólidos totales volátiles en las muestras, se realizó por el método Gravimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 2540 E/95.
- **Sólidos Disueltos:** el contenido de sólidos disueltos en las muestras, se realizó por el método Gravimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 2540 C/95.
- **Sólidos Sedimentables:** las muestras se analizaron basándose en el método volumétrico descrito en el STANDARD METHODS 2540 F/95.
- **Nitratos:** este parámetro se analizó por el método del salicilato sódico, según j. Rodier.
- **Nitritos:** se analizaron con base en el método colorimétrico basado en el STANDARD METHODS 4500 B/95.
- **Fosfatos:** el método utilizado es Digestión con Reflujo Cerrado Ácido Nítrico-Ácido Sulfúrico-

Colorimetría Ácido ascórbico STANDARD Methods 4500 P A, B,E.

- **Sulfatos:** se hallaron por el método turbidimétrico, teniendo en cuenta las normas STANDARD METHODS 4500 SO<sub>4</sub>= E/95.
- **Grasas y Aceites:** la determinación de la cantidad de grasas y aceites en esta agua, se realizó por el método de extracción Soxhlet, según las normas STANDARD METHODS 5520- D/95.
- **Turbidez:** la determinación de la turbidez, se realizó por el método espectrofotométrico, según las normas STANDARD METHODS 2130- B/95.
- **Color:** la determinación del color, se realizó por el método espectrofotométrico, según las normas STANDRD METHODS 2120- C/95.
- **Tensoactivos:** este parámetro se analizó por el método de sustancias activas al azul de metileno, según las normas STANDARD METHODS 5540 C. /95.
- **Fenoles:** la determinación de fenoles posterior a su destilación se hizo por el método fotométrico directo de la 4-aminoantipirina, teniendo en cuanta el STANDARD METHODS 5530-95.