

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA
INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN
BIODIGESTOR ANAEROBIO VERTICAL SEMICONTINUO
PILOTO, PARA LA OBTENCIÓN DE GAS METANO Y BIOL A
PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA EN LA EMPRESA
ECOPACIFIC, AMAGUAÑA, PROVINCIA DE PICHINCHA,
ECUADOR.**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA

ELABORADO POR:
MARÍA DEL ROSARIO SILVA ALCÍVAR

Sangolquí, 28 de Enero del 2013

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR

María del Rosario Silva Alcívar

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

Ing. Tatiana Páez

SECRETARIO ACADÉMICO

Abg. Carlos Orozco Bravo, MSc.

Sangolquí, 28 de Enero del 2013

CERTIFICACIÓN

Ing. Lucía Jiménez Tacuri

Ing. Verónica Marcillo Parra

Certifican

Que el trabajo titulado **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO VERTICAL SEMICONTINUO PILOTO, PARA LA OBTENCIÓN DE GAS METANO Y BIOL A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA EN LA EMPRESA ECOPACIFIC, AMAGUAÑA, PROVINCIA DE PICHINCHA, ECUADOR.** Realizado por **MARIA DEL ROSARIO SILVA ALCIVAR** ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Sangolquí, 28 de Enero del 2013

Ing. Lucía Jiménez Tacuri
Directora

Ing. Verónica Marcillo Parra
Codirectora

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, María del Rosario Silva Alcívar

Declaro que

El proyecto de grado denominado **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO VERTICAL SEMICONTINUO PILOTO, PARA LA OBTENCIÓN DE GAS METANO Y BIOL A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA EN LA EMPRESA ECOPACIFIC, AMAGUAÑA, PROVINCIA DE PICHINCHA, ECUADOR**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

María del Rosario Silva Alcívar

AUTORIZACIÓN

Yo, María del Rosario Silva Alcívar

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el trabajo: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLANTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO VERTICAL SEMICONTINUO PILOTO, PARA LA OBTENCIÓN DE GAS METANO Y BIOL A PARTIR DE CÁSCARA DE NARANJA EN LA EMPRESA ECOPACIFIC, AMAGUAÑA, PROVINCIA DE PICHINCHA, ECUADOR**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 28 de Enero del 2013

María del Rosario Silva

DEDICATORIA

A Dios,
A mis padres y
A mi hermano.

María del Rosario Silva Alcívar

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitir que cumpla una etapa más de mi vida profesional, por ser mi fortaleza y guía todos los días.

A mis padres por ser ejemplo de perseverancia, paciencia y sobre todo por darme su amor sin límites y apoyo incondicional.

A mi hermano por ser el mejor regalo que me dio la vida, por ser siempre mi apoyo y mi gran amigo; y por toda la asesoría brindada durante la ejecución del proyecto.

A mis amigos del colegio y universidad, por haberme dado tantos momentos memorables, divertidos y agradables; y por haber compartido conmigo cada etapa de mi vida.

A la Ingeniera Lucía Jiménez e Ingeniera Verónica Marcillo, por la buena predisposición, apoyo y guía a lo largo de este proyecto para poder obtener el mejor resultado del mismo.

A la empresa ECOPACIFIC, en especial al Ingeniero José Barcia, por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

Al personal que formó parte del equipo de trabajo para la realización de este proyecto.

A todas las personas extraordinarias que he conocido a lo largo de esta etapa y me han acompañado de distintas maneras en mi vida.

María del Rosario Silva Alcívar

ÍNDICE

Hoja de legalización de firmas	i
Certificación	ii
Declaración de responsabilidad	iii
Autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
Abreviaciones	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos de la investigación	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Residuos sólidos	3
1.4.1.1 Residuos especiales y peligrosos	4
1.4.1.2 Residuos radiactivos	4
1.4.1.3 Residuos sólidos urbanos	5
1.4.1.3.1 Residuos de origen animal	6
1.4.1.3.2 Residuos de origen vegetal	7
1.4.2 La naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	9
1.4.2.1 Generalidades	9
1.4.2.2 Propiedades	10
1.4.2.3 Cáscara de la naranja	10
1.4.3 Los biodigestores	11
1.4.3.1 Tipos de biodigestores	12
1.4.4 La biodigestión	15

1.4.4.1	Biodigestión aeróbica	15
1.4.4.2	Biodigestión anaeróbica	16
1.4.4.3	Productos de la digestión anaerobia	22
1.4.4.4	Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica	26
1.4.4.5	Parámetros operacionales del biodigestor anaerobio	27
1.5	Análisis estadístico	30
1.5.1	Intervalos de confianza	30
1.5.2	Prueba de hipótesis	31
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS		
2.1	Localización geográfica	33
2.2	Tiempo de investigación	33
2.3	Análisis descriptivo de los datos	34
2.4	Materiales y métodos	34
2.5	Evaluación de la cáscara de naranja	35
2.5.1	Recolección y análisis de la cáscara de naranja	35
2.5.2	Recolección y análisis de las heces porcinas	35
2.5.3	Diseño del sistema de digestión para el tratamiento de cáscara de naranja.	36
2.5.3.1	Tipo de proceso	36
2.5.3.2	Parámetros operacionales	36
2.5.3.3	Cálculo del volumen de residuos sólidos	37
2.5.3.4	Cálculo de la producción teórica de biogás	42
2.5.4	Construcción del biodigestor anaerobio piloto vertical semicontinuo	42
2.5.4.1	Digestor	42
2.5.4.2	Accesorios	43
2.5.5	Implantación y control de parámetros operacionales	45
2.5.5.1	Prueba de fugas	45
2.5.5.2	Monitoreo de la carga inicial	45
2.5.5.3	Monitoreo de pH, temperatura, flujo y presión	45
2.5.6	Operación del biodigestor	46
2.5.6.1	Monitoreo de cargas	46
2.5.6.2	Monitoreo de pH del efluente	46

2.5.6.3	Monitoreo de presión y flujo de biogás	46
2.5.6.4	Monitoreo de temperatura	46
2.6	Análisis de las muestras	46
2.6.1	Análisis del efluente	47
2.6.2	Análisis de biogás	47
2.6.3	Cálculo de la eficiencia del biodigestor	47
2.6.4	Análisis estadístico	47
2.6.5	Dimensionamiento industrial	48
	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1	Selección de la materia prima	49
3.2	Caracterización de la materia prima	50
3.3	Dimensionamiento y construcción del biodigestor	52
3.4	Balance de masas	55
3.5	Funcionamiento del biodigestor	56
3.6	Pruebas de concentración	58
3.6.1	Carga inicial	58
3.6.2	Carga semicontinua	61
3.6.3	Alternativa para la carga semicontinua y sistema de recirculación	62
3.7	Análisis del biogas y efluente	64
3.7.1	Biogás	64
3.7.2	Efluente	67
3.8	Análisis estadístico	70
3.9	Dimensionamiento industrial.	72
	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.1	Conclusiones	73
4.2	Recomendaciones	75
	CAPÍTULO V: CITAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	CAPÍTULO VI: ANEXOS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema de reactores de mezcla completa	12
Figura 1.2	Esquema de reactores con retención de biomasa	13
Figura 1.3	Esquema digestor en dos etapas	14
Figura 1.4	Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos	17
Figura 2.1	Localización geográfica de la empresa ECOPACIFIC	33
Figura 2.2	Diagrama de flujo del procedimiento	34
Figura 2.3	Diagrama del balance de masa para la carga inicial al digestor considerando un volumen funcional de 600L	39
Figura 2.4	Diagrama del balance de masa para la carga inicial al digestor considerando un volumen de 20L	41
Figura 2.5	Inicio de construcción y adaptación del biodigestor (vista frontal)	43
Figura 2.6	Vista lateral derecha del inicio y construcción del biodigestor	43
Figura 2.7	Vista lateral izquierda del inicio y construcción del biodigestor	44
Figura 2.8	Ubicación de la termocupla en la construcción de biodigestor	45
Figura 3.1	Cáscara de naranja	49
Figura 3.2	Recolección de heces porcinas	50
Figura 3.3	Rangos de pH durante 88 días de operación del biodigestor	56
Figura 3.4	Rangos de temperatura durante 88 días de operación del biodigestor	56
Figura 3.5	Rangos de presión durante 88 días de operación del biodigestor	57
Figura 3.6	Rangos de flujo durante 88 días de operación del biodigestor	57
Figura 3.7	Tratamiento de la cáscara de naranja con carbonato de calcio antes de ingresar al digestor	58
Figura 3.8	Datos obtenidos del funcionamiento del biodigestor con carga diaria por 10 días	59
Figura 3.9	Valores obtenidos de presión y flujo durante la producción de biogas	60
Figura 3.10	Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) de la concentración 1 de régimen semicontinuo	61
Figura 3.11	Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) de la concentración 2 de régimen semicontinuo	62

	Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P(psi) con una carga	
Figura 3.12	diaria de: 2kg naranja, 10kg de agua y 1kg de recirculación, en un régimen continuo	63
	Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) con una carga	
Figura 3.13	diaria de: 3kg naranja, 15kg de agua y 1,5 kg de recirculación, en un régimen semicontinuo	63
Figura 3.14	Encendido del biogas.	65
Figura 3.15	Análisis de biogas in situ, con el equipo TESTO 350xl	66
Figura 3.16	Combustión de biogas y formación de llama azul	67
Figura 3.17	Biol obtenido del biodigestor anaerobio	68
Figura 3.18	Reducción de sustancias provocadoras de mal olor durante la digestión anaerobia	68
Figura 3.19	Límites inferior y superior de los intervalos de confianza de las concentraciones analizadas de acuerdo al flujo de producción de biogas	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Naturaleza de los residuos sólidos urbanos en el Ecuador	5
Tabla 1.2	Vectores más comunes en residuos sólidos, forma de transmisión y enfermedades causadas	6
Tabla 1.3	Producción de biogás por tipo de residuo animal.	7
Tabla 1.4	Producción de biogás a partir de residuos vegetales	9
Tabla 1.5	Variedades de Naranja	9
Tabla 1.6	Composición de la cáscara de naranja	11
Tabla 1.7	Componentes del biogas en función del sustrato utilizado	22
Tabla 1.8	Características generales del biogas	23
Tabla 1.9	Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a las condiciones medioambientales.	32
Tabla 1.10	Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a la temperatura para la producción de biogas	32
Tabla 1.11	Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a la temperatura para producción de un fertilizante de buena calidad	32
Tabla 2.1	Métodos utilizados en los diferentes análisis realizados por el CICAM para la muestra de cáscara de naranja	35
Tabla 2.2	Métodos utilizados en los diferentes análisis realizados por el CICAM para la muestra de heces porcinas	36
Tabla 2.3	Parámetros considerados para el dimensionamiento del digestor	37
Tabla 2.4	Datos considerados para el sistema de ecuaciones para la carga inicial	40
Tabla 2.5	Datos considerados para el sistema de ecuaciones para la carga diaria.	41
Tabla 3.1	Valores obtenidos de los diferentes análisis realizados a las muestras de cáscara de naranja y heces porcinas en el CICAM	51
Tabla 3.2	Valores obtenidos de los cálculos realizados para el dimensionamiento del biodigestor	52
Tabla 3.3	Valores obtenido en peso (kg) de las materias primas para la carga inicial al digestor	52
Tabla 3.4	Valores obtenidos en peso (kg) de las materias primas para la carga	53

	diaria al digestor	
Tabla 3.5	Resumen de datos analizados para el dimensionamiento del digestor	54
Tabla 3.6	Datos calculados en kg para el ingreso de cargas al digestor	55
Tabla 3.7	Parámetros de operación del digestor y producción de biogás	57
Tabla 3.8	Reacción de formación de biogás dependiendo de la materia prima inicial después de la biodigestión anaerobia	64
Tabla 3.9	Resumen de análisis del biogás obtenido in situ por el equipo TESTO 350xl	66
Tabla 3.10	Concentraciones óptimas de los diferentes componentes del biol y resultados obtenidos del análisis del efluente del biodigestor anaerobio	69
Tabla 3.11	Porcentaje de eficiencia y resultados obtenidos de los análisis realizados de los afluentes y efluente del biodigestor anaerobio	70
Tabla 3.12	Intervalos de confianza del flujo de producción de biogás	71

ABREVIACIONES

AGV	Ácidos grasos volátiles
C/N	Relación carbono/nitrógeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno en 5 d
DQO	Demanda química de oxígeno
F	Flujo
IDC	Intervalo de confianza
Kg	Kilogramos
L	Litros
m ³	Metro cúbico
mg	Miligramos
MS	Materia seca
°C	Grados centígrados
P	Presión
P _{CH₄}	Productividad teórica de gas metano
pH	Potencial de Hidrógeno
Qd	Carga diaria
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
T	Temperatura
t θ	Tiempo de retención
V	Volumen
Vcd	Volumen de la carga diaria
VCO	Velocidad de carga orgánica
Vd	Volumen del digestor
Vf	Volumen funcional
Vi	Volumen inicial

RESUMEN

ECOPACIFIC es una empresa productora de jugos a gran escala, actualmente produce 8 a 12 toneladas semanales de residuos de cáscara de naranja que son enviados al relleno sanitario sin ningún tratamiento previo. Una de las alternativas para gestionar los residuos orgánicos, es el uso de un biodigestor anaeróbico, que contribuya con la digestión bacteriana en ausencia de oxígeno; con el fin de obtener productos biodegradables y no contaminantes como lo son el gas metano y el biol.

Durante este proyecto se utilizó como sustrato cáscara de naranja y como inóculo bacteriano heces de porcino, para la obtención de gas metano y biol mediante digestión anaerobia. Se tomó en cuenta, las características físicas, químicas y biológicas del sustrato e inóculo. Durante la operación se consideró dos tipos de descarga, una de régimen continuo y otra de régimen semicontinuo de acuerdo a la época de producción de la planta. Se obtuvo biogás a los siete días de digestión, posteriormente se realizaron pruebas de concentración, con las cuales se determinó un factor de 1,5 de la carga diaria para una descarga semicontinua eficiente.

Después de 88 días de funcionamiento del biodigestor se obtuvo biogás con una concentración de 64 % de gas metano y 35 % de dióxido de carbono; mientras que el biol tuvo una concentración de 11,4 % de fósforo y 1,9 % de nitrógeno, además de un 73 % de eficiencia en la disminución de DBO5 y un 99 % de eficiencia en la reducción de coliformes y malos olores. xvii

ABSTRACT

ECOPACIFIC is a juice industry that nowadays produces 8 to 12 tons per week of orange peel. This waste is usually send to a landfill, without any waste treatment. One alternative to manage this organic waste is to use an anaerobic digester, in which the bacterial digestion in oxygen absence helps to obtain non-polluting and biodegradable products such as methane gas and a natural fertilizer.

During this project orange peel was used as a substrate and pig feces as a bacterial inoculum to obtain methane gas and a natural fertilizer resulting from anaerobic digestion. Before the operation of the digester, some physical, chemical and biological analyses from the substrate and the inoculum were considered. During the bio-digestion process, two discharge types were noted, one continuous and the other semi-continuous, depending on the stage of production of the procedure. Biogas was obtained after seven days of bio-digestion. Concentration tests which were performed later, determined a multiplication factor of 1.5 from the daily load to make an efficient comparison with the semi continuous discharge.

After 88 days of digester operation biogas was obtained with concentrations of 64 % methane gas and 35 % carbon dioxide. The natural fertilizer had a concentration of 11.4% phosphorus and 1.9 % nitrogen, and 73 % efficiency in BOD5 reduction and 99% efficiency in reducing coliforms and odors.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

ECOPACIFIC es una empresa productora de jugos a gran escala, actualmente produce de 8 a 12 toneladas semanales de residuos de cáscara de naranja que son enviados al relleno sanitario ubicado en el sector el Inga en la provincia de Pichincha. Debido a que la empresa no cuenta con alternativas para el uso de este residuo, éstos son enviados sin ningún tratamiento previo al relleno sanitario.

Sin embargo es posible gestionar los residuos orgánicos mediante la utilización de un biodigestor anaerobio piloto vertical semi-continuo, que contribuirá de manera directa a la obtención de productos biodegradables que tengan un valor agregado a su uso en la misma empresa, como es el gas metano ideal para el calentamiento del agua y el biol para ser utilizado como un fertilizante natural en las mismas fincas productoras.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La situación actual en lo que se refiere al cambio climático y la contaminación por residuos sólidos orgánicos en el Ecuador, nos obliga a buscar alternativas para la optimización de los residuos, de tal manera que se evite la producción de gases contaminantes que aumente el efecto invernadero, se reduzca el volumen de basura en los rellenos sanitarios y se disminuya la contaminación de aguas.

Una de las alternativas para tratar los residuos orgánicos, es el uso de un biorreactor anaeróbico, que contribuye con la digestión bacteriana en ausencia de oxígeno con el fin de obtener productos biodegradables y no contaminantes como lo son el gas metano y el biol dándole un valor agregado a los residuos de cáscara de naranja que tienen como fin el relleno sanitario (Monroy y Viniegra, 1981).

La composición física de los residuos sólidos orgánicos en nuestro país es aproximadamente el 70 % en las zonas urbanas, mientras que un 80 % en las zonas

rurales (Yáñez et al, 2011); es por esto que existe la necesidad de aprovechar los mismos, con el fin de disminuir en gran medida la contaminación sobre el medio ambiente; asimismo es posible la reincorporación de nutrientes al ciclo de fertilización del suelo, frenando el uso de fertilizantes químicos.

Además de obtener energías renovables es importante tomar en cuenta el aspecto sanitario ya que la utilización de un biodigestor aporta indudables beneficios en cuanto a la descontaminación. El tratamiento de los desechos por vía anaeróbica elimina la acumulación de estos a la intemperie evitando la proliferación de moscas, mosquitos, otros insectos y roedores portadores de peligrosas enfermedades, la ausencia de ellos es una condición en la industria alimentaria. (Rivas, 2009)

El proceso en si mismo produce una reducción del 90 % al 99 % de los principales patógenos animales (estafilococos, salmonella, pseudomonas) así como la disminución de malos olores. Esta reducción es muy importante desde el punto de vista del saneamiento ya que está regulado por la temperatura de fermentación y la cantidad de días que permanece la biomasa dentro del digestor (tiempo de retención) (Hilbert,2003).

Por lo tanto, la idea de construir un biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto es de gran importancia para la empresa, con el fin de gestionar los residuos, obtener energía renovable, no contaminante como son el biogas y el biol, además de cumplir con las normas medioambientales vigentes para el Ecuador.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, construir e implantar un biodigestor anaeróbico vertical semicontinuo piloto para obtener biogas y biol, a partir de cáscara de naranja en la empresa ECOPACIFIC ubicada en Amaguaña, Provincia de Pichincha, Ecuador.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la cáscara de naranja y el inoculo inicial por medio de los siguientes análisis: pH, DBO₅, DQO, carbono total, nitrógeno orgánico, fosfatos, humedad, ceniza, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos totales, coliformes totales, coliformes fecales.
- Emplear los parámetros de diseño establecidos para diseñar el biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto.
- Calcular la cantidad de biogas estimado que podría generar el biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto.
- Construir y operar el biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto, para la obtención de biogas y biol.
- Controlar los parámetros operacionales dentro de los rangos establecidos para un adecuado funcionamiento del biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto.
- Calcular la eficiencia del biodigestor anaerobio vertical semicontinuo piloto, a partir de análisis fisicoquímicos y microbiológicos del biol obtenido.
- Validar el volumen de biogas obtenido sobre una base de análisis estadísticos.
- Dimensionar el biodigestor a escala industrial para la producción de biogas y biol a partir del residuo de cáscara de naranja de la empresa ECOPACIFIC.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Residuos sólidos

El término residuo se aplica a todo aquel material generado por las actividades de producción y consumo, el cual no alcanza ningún valor económico en las condiciones particulares de tiempo y de lugar en que se ha producido, y que es preciso recoger y tratar por razones de salud y de contaminación ambiental, para evitar ocupaciones innecesarias de espacio, o simplemente, por motivaciones estéticas, (Abad y Puchades, 2002; Climent et al., 1996).

La Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS) reporta que en la región de América Latina habitan en los centros urbanos alrededor de 350 millones de habitantes, quienes generan unas 275000 toneladas de basura diarias, de las cuales solo se recolecta un promedio de 70 % y únicamente el 35 % se dispone en rellenos sanitarios. Por lo tanto, en el Ecuador aproximadamente los 14 millones de habitantes producen 11000 toneladas diariamente de residuos. Los residuos se pueden clasificar en residuos especiales y peligrosos, residuos radiactivos y residuos sólidos urbanos.

1.4.1.1 Residuos especiales y peligrosos

Los residuos especiales y peligrosos incluyen en poca proporción la basura doméstica como pilas, medicinas, tubos de rayos catódicos, acumuladores de vehículos e hidrocarburos. Residuos industriales como solventes, pinturas, adhesivos, corrosivos, residuos oleosos. Residuos hospitalarios y de centros de investigación, como materiales que han estado en contacto con heridas y restos de origen animal y humano. (Yáñez et al, 2011)

Los residuos peligrosos son una categoría especial de residuos los cuales debido a su toxicidad, persistencia, movilidad, inflamabilidad, etc., requieren de una regulación y controles más exigentes. Los tratamientos más utilizados son la neutralización de materiales alcalinos o ácidos, la solidificación o encapsulamiento para inmovilizar contaminantes, la utilización de polímeros que descomponen las sustancias tóxicas orgánicas o la incineración a temperaturas muy elevadas. (Márquez, 2008)

1.4.1.2 Residuos radiactivos

Se considera residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso y que contiene o está contaminado con radio nucleídos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos. Dado que no todos los países emplean la misma clasificación, la Comisión Europea ha recomendado unificar criterios, para lo cual propone la siguiente clasificación (Foro de la Industria Nuclear Española, 2004)

- *Residuos radiactivos de transición*: principalmente de origen médico, que se desintegran durante el período de almacenamiento temporal, pudiendo a

continuación gestionarse como residuos no radiactivos, siempre que se respeten unos valores de desclasificación.

- *Residuos de baja y media actividad:* su concentración en radio nucleídos es tal que la generación de energía térmica durante su evacuación es suficientemente baja. A su vez se clasifican en residuos de *vida corta:* que contienen nucleídos cuya vida media es inferior o igual a 30 años, con una concentración limitada de radio nucleídos alfa; y residuos de *vida larga:* con radio nucleídos y emisores alfa de vida larga cuya concentración es superior a los límites aplicables a los residuos de vida corta.
- *Residuos de alta actividad:* son residuos con una concentración de radio nucleídos tal que debe tenerse en cuenta la generación térmica durante su almacenamiento y evacuación. Este tipo de residuos se obtiene principalmente del tratamiento y acondicionamiento del combustible gastado.

1.4.1.3 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos están divididos en dos clases fundamentales: una fracción húmeda compuesta por restos vegetales, animales y residuos de cocina y otra fracción seca, como papel, metales, vidrio, plástico (Yáñez et al, 2011). En la actualidad los residuos sólidos orgánicos (fracción húmeda) de la industria no tienen un objetivo específico para su uso, la mayoría de ellos son enviados al basurero. En la Tabla 1.1 se muestran los porcentajes de los residuos sólidos en las zonas urbanas del Ecuador.

Tabla 1.1 Naturaleza de los residuos sólidos urbanos en Ecuador

Naturaleza	Porcentaje (%)	Producción (ton/día)
Materia orgánica	71,4	5298
Papel y cartón	9,6	709
Plástico	4,5	336
Vidrio	3,7	274
Metales	0,7	53
TOTAL	100	6669

Fuente: Análisis sectorial de residuos sólidos urbanos en Ecuador en el año 2002

(Yáñez et al, 2011)

La acumulación de estos residuos y un inadecuado manejo, causa la proliferación de vectores y enfermedades gastrointestinales y respiratorias (Tabla 1.2), contaminación de agua, atmósfera y suelos así como también problemas de conservación de flora y fauna.

Tabla 1.2 Vectores más comunes en residuos sólidos, forma de transmisión y enfermedades causadas

Vector	Forma De Transmisión	Enfermedad
Ratas	Mordedura, orina, heces, pulgas que habitan en el cuerpo de la rata.	Peste bubónica Tifus murino Leptospirosis
Moscas	A través del cuerpo, alas y patas, además de las heces y saliva.	Fiebre tifoidea Salmonelosis Cólera Amebiasis Giardiasis
Mosquitos	A través de la picazón del mosquito hembra.	Malaria Fiebre Amarilla Dengue Leishmaniasis
Cucarachas	Por medio de alas, patas cuerpo y heces fecales.	Fiebre tifoidea Cólera Giardiasis
Cerdos	Ingestión de carne contaminada	Toxoplasmosis Triquinosis Teniasis
Aves	A través de las heces	Toxoplasmosis

Fuente: Departamento de ingeniería sanitaria y ambiental, FEMA/MG, 1995.

Debido a que el crecimiento de la población implica también un aumento de volumen en los residuos orgánicos es urgente y necesario buscar alternativas que faciliten el manejo de éstos con el fin de obtener subproductos aprovechables y no contaminantes hacia el medio ambiente.

1.4.1.3.1 Residuos de origen animal

Los desechos de origen animal de las granjas provienen del ganado vacuno, las aves y la producción lechera. También pueden ser el estiércol de los animales o los subproductos de la elaboración de la carne y de los desechos de los criaderos de peces y la acuicultura

en terrenos cerrados. Estos desechos pueden contener materia orgánica y microorganismos patógenos así como desprender malos olores. También pueden ser fuente de bacterias y nitratos, que son contaminantes del agua potable y causantes de enfermedades al ser humano (Navarro et al, 1995).

Los agricultores usan a menudo los desechos de origen animal como fertilizante y los aplican al suelo. Si se aplican en demasiada cantidad o en forma incorrecta, pueden contaminar los lagos, arroyos y fuentes de agua subterránea y perjudicar la salud humana. (Rivas, 2009)

Se considera que las heces provenientes de animales como bovinos, porcinos, caprinos, equinos son sustratos indicados para la producción de biol y de biogas, sin embargo el más recomendado por una serie de factores, es el estiércol de cerdos debido a que no flota en la superficie del agua y se desintegra con más facilidad en un medio acuoso, permitiendo así ser descompuesto de manera más fácil por las bacterias además que comúnmente los cerdos son alimentados con concentrados ricos en materia orgánica excelentes para la producción y desarrollo de bacterias (Navarro et al, 1995).

En la Tabla 1.3 se muestra la producción de biogas a partir del tipo de residuo animal utilizado.

Tabla 1.3 Producción de biogas por tipo de residuo animal.

Tipo de estiércol	Disponibilidad (kg/día)	Volumen de biogas (m³/día/año)
Bovino (500kg)	10,00	0,400
Porcino (50kg)	2,25	0,135
Aves (2kg)	0,18	0,014
Ovinos (32kg)	1,50	0,075
Caprino (50kg)	2,00	0,100
Equino (450kg)	10,00	0,400

Fuente: FAO (2011)

1.4.1.3.2 Residuos de origen vegetal

Debido al tipo de actividad en la que esté involucrada la materia orgánica se pueden considerar cuatro puntos de generación de los restos vegetales: residuos forestales, residuos agropecuarios, residuos industriales y residuos urbanos. Generalmente los

residuos vegetales están formados por restos de plantaciones (ramas, corteza, raíces), restos de cosechas (tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura), restos industriales (pulpa y cáscara de frutas y vegetales así como también grasas y aceites vegetales) y residuos urbanos (desechos domésticos orgánicos), (Yáñez et al, 2011).

Los restos vegetales han pasado a constituirse en el principal residuo procedente de la actividad agraria e industrial (alimentaria) suponiendo un peligro para la propia actividad que los genera tanto en su fase productiva como de transformación. Constituyen uno de los principales vectores de transmisión de plagas y enfermedades a la vez que son una fuente importante de materia orgánica. (Yáñez et al, 2011).

Los principales problemas que plantea la mala gestión de los residuos son:

- Al acumularse, debido a la humedad y a las altas temperaturas se transforman en un foco de plagas que pueden propagarse por los cultivos de alrededor o por las poblaciones cercanas. A esto contribuye el alto contenido en azúcares de algunos de los productos.
- La incineración incontrolada constituye un foco de contaminación y molestias para las zonas cercanas. Cuando estos residuos se encuentran contaminados por restos de tratamientos fitosanitarios, su incineración puede verter a la atmósfera compuestos peligrosos. También es frecuente que se utilicen estos residuos para alimentar al ganado con el consiguiente peligro para el ganado y los consumidores.
- La contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas constituye uno de los principales problemas que generan estos residuos. Cantidades importantes de fertilizantes y fitosanitarios y de los lixiviados generados por la descomposición de materia orgánica, acaban en las corrientes de agua en cantidades excesivamente altas dando a la contaminación de las aguas por nitratos.

Los residuos vegetales son una fuente adecuada para la producción de biogas en un medio anaerobio como se puede observar en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Producción de biogas a partir de residuos vegetales

Residuo	Cantidad de residuo (ton/ha)	Volumen de biogas (m³/ton)
Cereales (paja)	3,3	367
Tubérculos (hojas)	10,0	606
Leguminosos (paja)	3,2	518
Hortalizas (hojas)	5,5	603
Frutas (cáscaras)	6,4	514

Fuente: FAO, 2011

1.4.2 La naranja (*Citrus sinensis*)

La naranja es la fruta que más se produce en el mundo y la de mayor consumo per cápita (FIRA, 2003). Proviene del sureste de Asia y pertenece al género de Citrus de la familia de las Rutáceas (*Rutaceace*). Entre los diferentes tipos de naranja, las variedad de naranja dulce (*Citrus sinensis*) es la más importante a nivel comercial. Según datos de la FAO (2004), el Ecuador ocupa el puesto 24 en el ranking mundial de productividad de naranja con 23820 Ha de superficie de cosecha (Heredia, 2010).

1.4.2.1 Generalidades

La naranja tiene una forma esférica de un diámetro que oscila entre 6 a 10 cm, es más pequeña y dulce que el pomelo o toronja y más grande, aunque menos perfumada, que la mandarina. Existen numerosas variedades de naranjas en la que su color y sabor difiere de acuerdo a la variedad (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Variedades de Naranja

Variedad de Naranja	Características
Navel	Son de gran tamaño, con tonos entre naranja pálido hasta naranja intenso, no tienen semilla, se prefiere el consumo en fresco de la fruta y no el zumo o jugo de ella.
Blancas	Su tamaño es mediano y grande, tiene una coloración amarilla, posee un zumo de excelente calidad, pero un alto contenido de semillas en su interior.
Sanguínea	Se la cultiva únicamente en el Mediterráneo, son de características similares a las “blancas”, pero se diferencian en el color de la pulpa, que es roja en su interior y son muy dulces.

Fuente: Heredia, 2010

1.4.2.2 Propiedades

Es un cítrico con propiedades refrescantes y un importante valor nutricional, contiene fibra y minerales necesarios para una dieta balanceada como son potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), además de un alto contenido de vitamina C y ácido fólico.

Igualmente contiene cantidades apreciables de flavonoides (sustancias biológicas naturales con potencial para reducir el riesgo de cáncer y enfermedades cardiovasculares) y β -caroteno, el cual le da su color anaranjado y posee propiedades antioxidantes, que se transforma en vitamina A conforme el cuerpo lo necesita, y es esencial para la visión, el buen estado de piel, cabello, huesos, mucosas y el buen funcionamiento del sistema inmune (Asociación Nacional del Café, 2004).

1.4.2.3 Cáscara de la naranja

Generalmente la cáscara de naranja es utilizada como alimento para aves y ganado, siendo una fuente potencialmente significativa en el contenido de proteína de origen unicelular, puede ser sometida a un proceso fermentativo, debido a que la cáscara de naranja contiene una cantidad de carbohidratos que la hace atractiva como sustrato (Cornejo, 1984).

Se conoce de algunos constituyentes de la cáscara de naranja como pigmentos carotenos, vitaminas y aceites esenciales, así como también celulosa, carbohidratos solubles, pectina, aminoácidos, azúcares y minerales como se muestra en la Tabla 1.6, cada uno de estos componentes se encuentra en diferente proporción dependiendo de la capa del tejido de la cáscara (Cornejo, 1984).

Tabla1.6 Composición de la cáscara de naranja

Componente	%
Humedad	20,98
Azúcar	15,00
Pectina	20,93
Celulosa	10,59
Almidón	< 1,00
Proteína	6,53
Ceniza	3,78
Sólidos volátiles	96,22
PH	4,30
Magnesio	9,32
Fósforo	9,13
Azufre	3,86
Cloro	0,30
Potasio	17,97
Calcio	58,37
Hierro	0,79
Zinc	0,36

Fuente: Mahmood, 1998

1.4.3 Los Biodigestores

Un biodigestor es un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. En algunos casos, es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos (González, 1999).

Un biodigestor anaerobio es una cámara cerrada que impide el ingreso de oxígeno en su interior, en el que se digiere materia orgánica por microorganismos anaerobios, como resultado de este proceso se obtiene biogás utilizable como combustible, generación de electricidad y calefacción; además se produce un efluente rico en nutrientes, el biol, que es ideal como abono orgánico en plantaciones (Chugandro y Manitio, 2010).

Según la historia, en los años 1900 en la India se habría construido la primera instalación o generador de biogás, en la actualidad existen alrededor de unas doscientos mil unidades. En Inglaterra antes de los años 1895 ya se había experimentado esta tecnología, inclusive habrían utilizado la misma para el alumbrado público de calles.

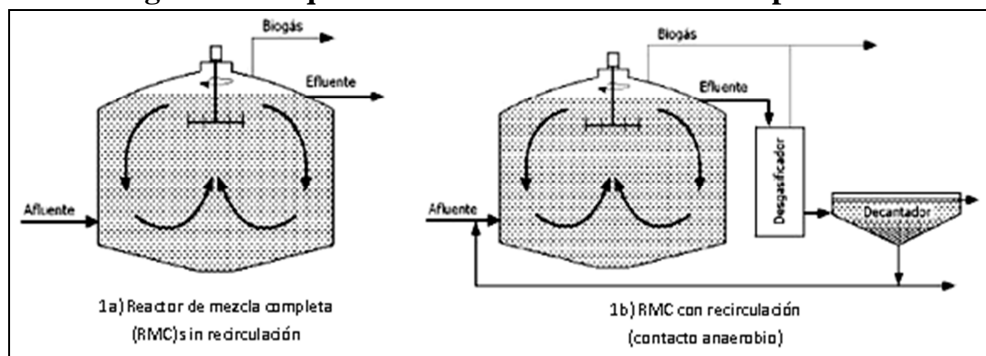
(Turzo, en Robalino, 1998). Por otra parte, en Europa en el año 1911 se utilizó esta tecnología por primera vez con pozos sépticos, que posteriormente serviría como base tecnológica de la digestión anaeróbica capaz de producir electricidad, pero sobre todo capacidad de acumular y procesar las aguas servidas de una gran ciudad. (González, 1999).

Hoy en día se han desarrollado varios tipos de biodigestores los cuales de acuerdo a los arreglos tecnológicos o mejoramiento respecto a la eficiencia, se les han designado diferentes nombres. Los digestores convencionales tienen su inicio en la década de los 50, basada en la tecnología aplicada por los franceses y alemanes quienes utilizaron digestores para obtener combustible para los tractores y calefacción para sus viviendas. (IDAE, 2007). Actualmente existen plantas o sistemas de biodigestión de última tecnología o combinaciones de algunos tipos de biodigestores basados principalmente en los más comunes como son el hindú y chino, algunos autores también señalan la importancia del tipo de biodigestor de acuerdo a los procesos de fermentación. (Rivas et al, 2010).

1.4.3.1 Tipo de Biodigestores

- *Digestor de mezcla completa sin recirculación* (Figura 1.1a), es un reactor donde se conserva una distribución uniforme de concentraciones de sustrato y microorganismos, y contiene un sistema de agitación (mecánica, neumática o manual). Este sistema es el más usado para tratamiento de residuos. El tiempo de retención es alto porque se mantiene el reactor en régimen estacionario (IDAE, 2007).

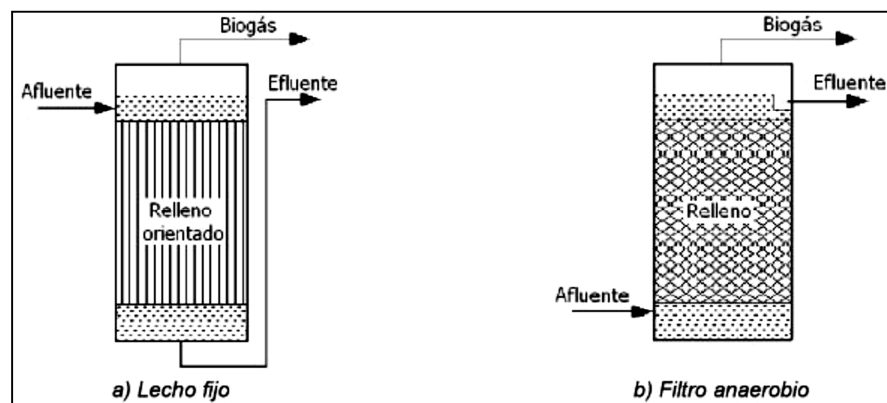
Figura 1.1 Esquema de reactores de mezcla completa.



Fuente: IDAE, 2007

- *Digestor de mezcla completa con recirculación* (Figura 1.1b), éste consiste en un reactor anaerobio de contacto y es equivalente al sistema de fangos activados aerobios para el tratamiento de aguas residuales, se caracteriza por tener un tiempo de retención menor que los sistemas sin recirculación, este sistema sólo se aplica a tratamiento de aguas residuales con alto contenido orgánico, como son las aguas de industria cervecera y azucarera. (IDAE, 2007).
- *Digestor con retención de biomasa, sin recirculación* (Figura 1.2a y 1.2b), en este tipo de tratamiento es necesario considerar dos variables importantes, la primera es la inmovilización sobre un soporte por medio de filtros anaerobios y lechos fluidizados, y la segunda es la agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad como ocurre en reactores de lecho de lodos. Tienen un tiempo de retención más bajo que los digestores de mezcla completa ya que retiene los microorganismos en el interior (IDAE, 2007).
- *Digestor discontinuo*, en este sistema la producción de Biogás tiene la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Este tipo de tratamiento se aplica principalmente a residuos con una alta concentración de sólidos que dificultan la adopción de sistemas de bombeo, como son los residuos de ganado con lecho de paja (IDAE, 2007).

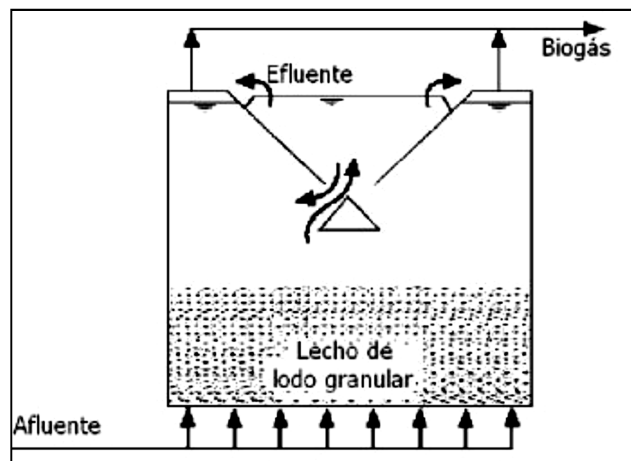
Figura 1.2 Esquema de reactores con retención de biomasa.



Fuente: IDAE, 2007

- *Digestor en dos etapas* (Figura 1.3), este sistema consiste en dos reactores, el primer reactor tiene un elevado tiempo de retención donde ocurre la hidrólisis, el efluente del primer digestor se convierte en el afluente del segundo digestor que se caracteriza por tener bajo tiempo de retención, aquí se digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa (IDEA, 2007).

Figura 1.3 Esquema digestor en dos etapas.



Fuente: IDAE, 2007

También es posible clasificar a los biodigestores de acuerdo al proceso biológico que ocurra en el interior. Los sistemas biológicos pueden o no interactuar con el ambiente para poder crecer y desarrollarse; es por eso que los biodigestores se clasifican biológicamente de acuerdo al metabolismo del sistema de cultivo: anaerobio o aerobio.

La biodigestión está basada en el metabolismo celular del cultivo. El metabolismo define los parámetros y características operativas-biológicas de diseño y de operación del biodigestor. Éstas características son las que intervienen en la parte biológica del sistema y tienen que ver con el crecimiento, productividad, rendimiento y eficiencia del cultivo. Se hablará de cada uno de éstos procesos más adelante en la biodigestión.

1.4.4 La Biodigestión

Según la FAO (2011), el correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de la materia orgánica ha recibido un fuerte impulso debido al alto costo de los fertilizantes químicos, con la

búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y degradación de residuos.

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos. (Rivas et al, 2009)

1.4.4.1 Biodigestión aeróbica

La digestión aeróbica consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular. Así por ejemplo, cuando los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la auto-oxidación de la materia celular. (FAO, 2011)

En las primeras fases del proceso de digestión aeróbica, cuando una población de microorganismos se pone en contacto con una fuente ilimitada de sustrato, los microorganismos se reproducen con una tasa de crecimiento poblacional logarítmico que sólo está limitada por su propia habilidad de reproducirse. (Rivas, 2009)

La tasa de consumo de oxígeno aumenta rápidamente debido a la absorción y asimilación de materia orgánica para la síntesis de nueva masa protoplasmática (Campos, 2001).

A medida que progresa la oxidación de la materia orgánica disponible, la tasa de crecimiento bacteriano empieza a disminuir. Las fuentes de carbono orgánico disponibles se hacen limitantes, y por consiguiente, también se presenta una disminución en la tasa de consumo de oxígeno (Hilbert, 2003).

La FAO (2011) afirma que la digestión aeróbica presenta diversas ventajas dentro de las cuales destacan la facilidad de operación del sistema, bajo capital de inversión comparada con la digestión anaeróbica, no genera olores molestos, reduce la cantidad

de coliformes fecales y por lo tanto, de organismos patógenos, produce un sobrenadante clarificado con una baja DBO₅, con pocos sólidos y poco fósforo.

El proceso presenta también sus desventajas, entre las que se suele mencionar los altos costos de operación causados por los altos consumos de energía, la falta de parámetros y criterios claros para el diseño y la dificultad que presentan los lodos digeridos aeróbicamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío (FAO, 2011).

1.4.4.2 Biodigestión anaeróbica.

La digestión anaerobia puede aplicarse, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. (Rivas, 2009).

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia en ausencia de oxígeno, y mediante la acción bacteriana específica, se descompone en productos gaseosos o “biogas” (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.), y en un efluente, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación. (IDAE, 2007)

a) Bioquímica y Microbiología de la digestión anaerobia.

La bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios es mucho más complicada que en los procesos aerobios, debido al gran número de rutas que puede utilizar una comunidad anaerobia para la bioconversión de las sustancias orgánicas. Estas rutas no se conocen al detalle pero, en los últimos años, se ha avanzado mucho en las líneas de investigación de este proceso (IDAE, 2007).

b) Fases de la digestión anaerobia

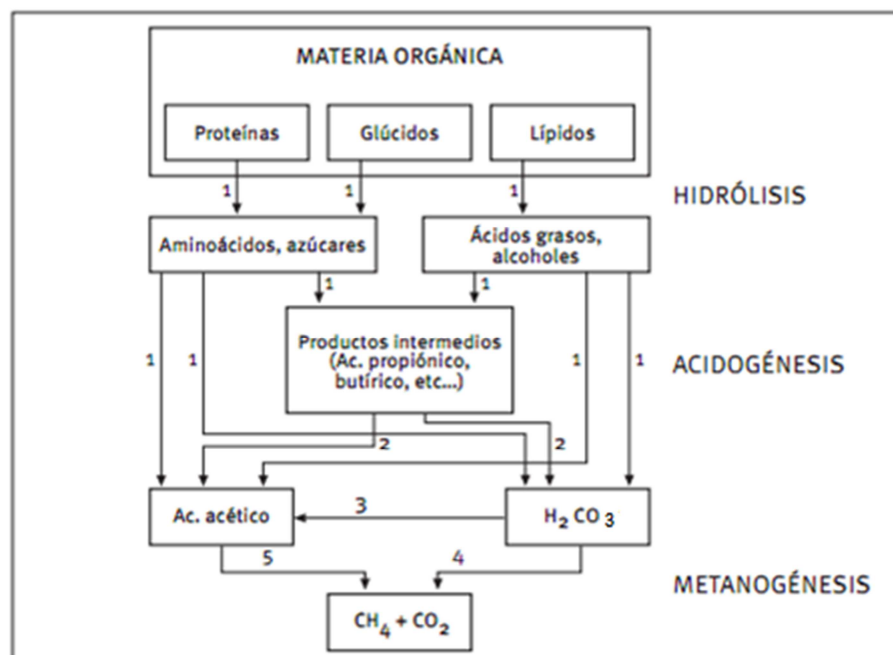
La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de varias fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato, interviniendo cinco grandes poblaciones de microorganismos (Figura. 1.4). Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente

sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor (por ejemplo: H_2 , ácido acético o amoníaco producido de la acidogénesis de aminoácidos). (Hilbert, 2003)

Esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o que afecten la temperatura y pH (IDAE, 2007).

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. (Navarro et al, 1995)

Figura 1.4 Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos
 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.



Fuente: IDAE, 2007

Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (Martí, 2006).

- *Hidrólisis.* Según la FAO (2011), la materia orgánica polimérica no puede ser directamente degradada por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos.

Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos (Martí, 2006).

Según Hilbert (2003), la etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

- *Fase acidogénica.* Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso (Buenrostro, 2000)

La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, si no

que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos (Domínguez et al, 2000)

- *Fase acetogénica.* Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (hidrógeno y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato CH_3COO^- e hidrógeno H_2 , a través de las bacterias acetogénicas. (Ramos et al, 2007)

Ramos et al (2007), mencionan que existe un tipo especial de microorganismos acetogénicos, que son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos mono carbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato.

Al contrario que las bacterias acetogénicas, estas bacterias homoacetogénicas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas, (IDAE, 2007).

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células, (FAO, 2011). Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Martí, 2006)

- *Fase metanogénica.* En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores (Ramos et al, 2007).

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas (Gómez et al, 2007)

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas (Martí, 2006).

Se ha demostrado que un 70 % del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato (FAO, 2011), El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior (Hilbert, 2003).

c) *Microorganismos involucrados en cada fase de la digestión anaeróbica.*

Las especies de microorganismos involucrados en el proceso varían dependiendo de los materiales que serán degradados. Los alcoholes, ácidos grasos, y los enlaces aromáticos pueden ser degradados por la respiración anaeróbica de los microorganismos, como se observa en la Figura 1.4.

Según Martí (2006), East Harbour Management Services (2004) y la FAO (2011), los microorganismos más comunes de la biodigestión anaeróbica son:

- Las bacterias que participan de la hidrólisis. Los microorganismos de muchos géneros son los responsables de la hidrólisis, entre estos se destacan: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *SpHingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*

- Bacterias que participan de la acidogénesis. La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrólisis. El género *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica. El grupo CytopHaga *Flavobacterium* *Bacteroides* representa el segundo grupo más grande de microorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición. Sin embargo, en la fase metanogénica representan menos del 5 % del total de microorganismos. Esto indica que estos grupos de microorganismo son los principales responsables de la degradación de compuestos monoméricos.
- Bacterias que participan de la acetogénesis: Estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno, es decir son bacterias obligadas productoras de hidrógeno, dentro de este género se encuentran: *Syntrophomonas sapovorans*, *Syntrophobacter wolinii*, *Syntromonas wolfei*, *Syntrophospora bryantii*, *Syntrophus buswellii*. Todos los microorganismos acetogénicos tienen un período de regeneración de hasta 84 horas. Dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como “bacterias homoacetogénicas” las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO₂, como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Aunque este grupo no es un grupo taxonómico definido, en el se incluyen una variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas como: *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*
- Bacterias que participan de la metanogénesis. La última fase de la descomposición anaeróbica se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las Arqueas metanogénicas. Estas se caracterizan a través del co-factor F420, el cual actúa en presencia de hidrogenasas como transportador de H₂. Este puede detectarse por su autofluorescencia en un microscopio óptico. Las metanogénicas activas aparecen en la segunda fase de la fermentación (acidogénica). Sin embargo, obviamente el número de Arqueas metanogénicas aumentan en la fase metanogénica. Las principales especies están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii* y *Methanosarcina*.

- Especies metanotróficas. Las especies metanotróficas (especies que consumen metano) se encuentran presentes en todas partes, pero no son deseables en una planta de producción de biogas. La mayoría de estos son aeróbicos. Estos microorganismos utilizan el oxígeno para degradar el metano y obtener su energía. Los productos metabólicos son el agua y el dióxido de carbono.

1.4.4.3 Productos de la digestión anaerobia

a) **Biogas.** Es una mezcla gaseosa formada, principalmente por metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases como H₂S, H₂, NH₃. La composición o riqueza del biogas depende del material digerido y del funcionamiento del proceso (Alonso et al, 2006).

Características. El biogas es el producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente: del 50-80 % de metano (CH₄), del 30-40 % de anhídrido carbónico (CO₂) y menor o igual al 5 % de hidrógeno (H₂), ácido sulfhídrico (H₂S), y otros gases como se muestra en la Tabla. 1.7. (IDAE, 2007 & East Harbour Management Services, 2004).

Tabla.1.7 Componentes del biogas en función del sustrato utilizado

Componente (Biogas)	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos Industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80 %	50-80 %	50-70 %	45-65 %
Dióxido de carbono	30-50 %	20-50 %	30-50 %	34-55 %
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2 %	0-5 %	0-2 %	0-1 %
Sulfuro de Hidrógeno	100-700 ppm	0-1 %	0-8 %	0,5-100 ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de Carbono	0-1 %	0-1 %	0-1 %	Trazas
Nitrógeno	0-1 %	0-3 %	0-1 %	0-20 %
Oxígeno	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-5 %
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Fuente: IDAE, 2007

Tabla. 1.8 Características generales del biogas

Composición	55 - 70 % metano (CH ₄) 30 - 45 % dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 - 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente Combustible	0.60 - 0.65 L petróleo/ m ³ biogas
Límite de explosión	6 - 12 % de biogas en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 - 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1,2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor de biogas desulfurado es imperceptible)
Masa Molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: FAO, 2011

Como se puede observar en la Tabla 1.8, un biogas con un contenido en metano del 60 % tiene un contenido energético de 6,0 a 6,5 kWh/m³ (Tabla 1.8), es decir, salvo por el contenido en H₂S, es un combustible ideal (FAO, 2011; IDAE 2007).

Usos. El biogas producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos, principalmente se ha destinado a la generación de calor o electricidad en una caldera, también en motores o turbinas para generar electricidad (East Harbour Management Services, 2004).

Adicionalmente, posterior a un proceso de purificación del gas se lo puede utilizar como combustible, como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado. (IDAE, 2007)

El biogas, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final (Alonso et al, 2006).

Según East Harbour Management Services (2004), existen algunos biodigestores a nivel industrial con gran capacidad de producción de biogas a partir de residuos de frutas y vegetales, por ejemplo:

- Earthpower Technologies opera un biodigestor anaerobio en Camellia al oeste de Sydney (Australia). El cual fue diseñado bajo tecnología alemana para el tratamiento de desperdicios orgánicos, que son recolectados de algunos supermercados de la zona con un total de 76000 toneladas por año. Éste biodigestor produce 1,4 GJ (110-130 Nm³)¹⁰ de energía del biogas, además 180 kg de fertilizante orgánico y 0,7 m³ de agua tratada por tonelada de desperdicio orgánico. Sin embargo este proyecto fue diseñado para generar hasta 3 MW de biogas exportable (65 % metano y 35 % dióxido de carbono).
- En 1993, el instituto Koreano de Investigación de Energía en conjunto con el Ministerio de Industria y Energía iniciaron estudios para el procesamiento de desperdicios de alimentos para la producción de gas metano utilizando biodigestión anaeróbica. Actualmente el proyecto emplea la digestión anaeróbica en dos fases y es capaz de procesar 5 toneladas por día de estos desperdicios. En promedio se procesan 3 toneladas diarias con las cuales se obtiene 230 m³ de biogas (70 % metano) y 2 toneladas de agua tratada, con estos resultados se estima que alrededor del 73 % de desechos alimenticios degradables son convertidos en biogas.

Campos (2001), en su proyecto optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria, afirma que la digestión anaerobia de purines de cerdo puede ser una buena opción para la revalorización económica de estos residuos. Con el objetivo de mejorar la producción de metano, se realizaron ensayos de viabilidad en discontinuo de mezclas de purín con residuos de la industria agroalimentaria, como residuos de la elaboración de zumos de frutas (pulpa de pera) y del refinado de aceite de oliva (tierras decolorantes). Se llevaron a cabo una serie de experimentos en discontinuo, con el objetivo de determinar el máximo potencial de metano y la biodegradabilidad

de estos residuos. El experimento fue desarrollado en los rangos termofílico y mesofílico (35 °C y 55 °C). En ambos rangos de temperatura la producción de metano mejoró por la adición de residuo de pera como co-sustrato. La máxima producción de metano se obtuvo con la co-digestión de purín con tierras decolorantes de aceite de oliva, en el rango mesofílico (proporción 95 % y 5 % de purín y tierras, respectivamente). La producción de metano fue 340 mL CH₄/g SV_i, que es 2,3 veces la producción de metano respecto a sólidos volátiles para el purín sólo (150 mL CH₄/g SV_i).

- b) **Biol.** Otro producto resultante de la degradación anaerobia, en menor proporción al biogas es la mezcla del efluente estabilizado y la biomasa producida conocido como biol, la calidad de este producto depende de los parámetros operacionales utilizados. Sin embargo su contenido tiene índices de nitrógeno (N) y fósforo (P), que se los puede utilizar como fertilizante natural (Aparcana et al, 2008).

Rivera (2010), menciona que durante un proceso de biodigestión se logró disminuir la carga de coliformes fecales a valores muy inferiores a los normados en donde se exige un mínimo de 1000 NMP, obteniendo en esta experiencia un densidad final del orden de 80-90 NMP de coliformes. Además los efluentes, posterior al tratamiento anaeróbico no presentaron características indeseables para la aplicación como abono orgánico tomando en cuenta la normativa vigente, presentando un pH neutro, la concentración mineral fue baja alcanzando valores de 0,06; 0,0043 y 0,0049 para nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente. Sin embargo la evaluación de la capacidad mejoradora de suelos de los efluentes arrojó, en un suelo arcilloso un cambio en la retención de humedad desde un 48,5 a 56,0 % y en una textura arenosa de 39,25 a 41 %, siendo estadísticamente significativo para la primera textura.

Sin embargo para Potschka et al (2012), en Argentina en la provincia de Misiones, utilizando biodigestores de flujo continuo, el biodigestor utilizado fue de 7 metros de largo alimentado con 240 litros de mezcla (relación 5:1) estiércol – agua y produjo (una vez estabilizado) diariamente 3,5 m³ de gas y un volumen de biol similar al del ingreso de mezcla (220 a 240 litros de biol), el cual saldrá del biodigestor y podrá ser utilizado de diferentes maneras. Las características del fertilizante orgánico

producido por un biodigestor alimentado con estiércol de vaca o cerdo contiene, sobre base seca, un 2 a 3 % de nitrógeno, 10 a 12 % de fósforo, 1 % de potasio y alrededor de 85 % de materia orgánica.

1.4.4.4 Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica

Existen diversos beneficios derivados del proceso de conversión de residuos orgánicos en biogas. La presión económica sobre los productos agrícolas convencionales se encuentra en continuo aumento. Muchos agricultores se ven obligados a renunciar a su producción, principalmente debido a que sus tierras no presentan rendimientos rentables (Ramos et al, 2007)

Sin embargo según la FAO (2011), en muchos países la producción de biogas se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos, proporcionando a los agricultores un ingreso adicional. Por lo tanto, en el sector agrícola, la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica puede permitir obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos.

Por otra parte, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, captura de ellos y uso de biogas. Mientras que los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan compuestos de bajo poder energético como CO₂ y H₂O. Gran parte de la energía se pierde y se libera a la atmósfera (IDAE, 2007)

En el caso de la degradación anaeróbica, se generan productos del metabolismo con alto poder energético (por ejemplo: alcoholes, ácidos orgánicos y metano), los cuales sirven como nutrientes de otros organismos (alcoholes, ácidos orgánicos), o bien son utilizados con fines energéticos por la sociedad (biogas) (East Harbour Management Services, 2004).

Otro beneficio ambiental importante de las plantas de biogas es la significativa reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios. De esta forma se reducen significativamente los costos de la disposición de residuos orgánicos e incluso se obtienen sub-productos con valor agregado como el biol (Gómez et al, 2007).

Además, el tratamiento anaeróbico de los residuos orgánicos contribuye a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos. Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar (Hilbert, 2003).

1.4.4.5 Parámetros operacionales del biodigestor anaerobio

Campos (2001), menciona que los parámetros operacionales que hay que controlar hacen referencia a condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo correcto del proceso. Estos parámetros son:

a) **pH y alcalinidad:** El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica.

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo está entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos. Por lo que el pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, siendo el pH neutro el ideal (Rivas, 2009).

Para que el proceso se desarrolle de manera satisfactoria, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogas sino también su composición, así por ejemplo una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6,0 es que el biogas generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. (FAO, 2011)

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH (Hilbert, 2003)

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono (Campos, 2001)

- b) **Relación C/N.** Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogas al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogas producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes (Martí, 2006).

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (FAO, 2011).

- c) **Tóxicos e inhibidores.** El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos (Rivas, 2009)

Rivas (2009), menciona que sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado.

- d) **Temperatura.** Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogas (Gómez et al, 2007; Martí, 2006)

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de operación, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden desestabilizar el proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura (Rivas, 2009).

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura de operación. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo permisible para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (FAO, 2011).

- e) ***Tiempo de retención y velocidad de la carga orgánica.*** Con la velocidad de carga orgánica se designa el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención (Ramos et al, 2007).

El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño ya que definen el volumen del digestor (Acosta, 2011).

La materia orgánica o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 550 °C. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10 % de la mezcla agua estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10 % de la mezcla agua estiércol en la mayoría de los casos (FAO, 2011).

La fermentación anaerobia para la obtención de biogas requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1 % al 30 %. La concentración óptima depende de la temperatura. Las bacterias requieren de un cierto

tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogas (Hilbert, 2003).

En los sistemas de mezcla completa, el tiempo de retención hidráulico coincide con el celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar el tiempo de retención aumenta el grado de materia orgánica degradada así como la producción de metano, aunque este último valor comenzará a disminuir una vez alcanzado el óptimo (Alonso et al, 2006; Campos 2001).

La velocidad de carga orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogas aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor (Martí, 2006).

De acuerdo a los parámetros considerados y la producción de cáscara de naranja (continua y semicontinua) de la empresa, se consideró realizar un biodigestor anaerobio vertical semicontinuo, para la obtención de gas metano y biol.

1.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utiliza la estadística descriptiva para recolectar, ordenar y analizar los datos de un conjunto o población determinada; con estos valores es posible obtener una tendencia frente al comportamiento de las variables y de ésta forma sugerir si los datos obtenidos durante todo el proceso son independientes o no entre sí. En este proyecto, las variables estudiadas son: temperatura, pH, flujo y presión.

Debido a que los fenómenos biológicos no suelen ser constantes, es recomendable utilizar un rango de datos que indique el valor alrededor del cual trabajan eficientemente las variables y asociarlas con la finalidad de hacer referencia a la inestabilidad del

sistema en caso que exista y poder tomar medidas necesarias para que los datos se mantengan dentro del rango establecido (Ortega, 2008).

1.5.1 Intervalos de confianza

Los intervalos de confianza son rangos de datos en el cual se encuentra el verdadero valor de un parámetro, con una probabilidad determinada. Éstos ayudan a estimar parámetros de funcionamiento y caracterizar una variable dentro de un sistema.

A la probabilidad determinada se la conoce como nivel de confianza, para ensayos de campo, se recomienda utilizar un nivel de confianza del 95 %, es decir, que dentro del rango obtenido de una variable, se encuentra el valor real del parámetro con el 95 % de certeza.

Para el cálculo de los intervalos de una muestra se utiliza la siguiente fórmula:

$$IDC_u(1-\alpha) = \bar{y} \pm T_{1-\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Ec. 1.1 (García, 2003)

Donde:

$(1-\alpha)$: Nivel de confianza

\bar{y} : Tamaño de muestra

$T_{1-\alpha/2, n-1}$: Cuantil de orden $1-\alpha/2$ de la distribución t de student con $n-1$ grados de libertad.

S: Desviación estándar de muestra

n: Tamaño de la muestra

Mediante esta fórmula es posible determinar los rangos de operación de un sistema con un nivel de confianza determinado.

1.5.2 Prueba de hipótesis

Una hipótesis es un supuesto hecho sobre la naturaleza y comportamiento de una población. El proceso que corrobora si la información de una muestra sostiene o refuta a la hipótesis se llama prueba de hipótesis.

La idea principal de la prueba de hipótesis es contrastar dos teorías estadísticas. Tal contraste involucra la toma de decisión acerca de las hipótesis. La decisión consiste en

rechazar o no una hipótesis en favor de la otra. Una hipótesis estadística se denota por “H” y son dos: la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1) (Ortega, 2008).

De acuerdo a la FAO (2011), las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica y la velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogas y biol como lo indican las Tablas 1.9, 1.10 y 1.11.

Tabla 1.9 Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a las condiciones medioambientales.

Tiempo de retención hidráulico	Características
30 – 40 días	Clima Tropical con regiones planas
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos

Fuente: FAO, 2011

Tabla 1.10 Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a la temperatura para la producción de biogas.

Tiempo de retención hidráulico	Temperatura del medio ambiente	Característica de la región
30 – 40 días	30 °C	Trópico
40 – 60 días	20 °C	Valle
60 – 90 días	10 °C	Altiplano

Fuente: Martí, 2008

Tabla 1.11 Tiempo de retención del biodigestor de acuerdo a la temperatura para producción de un fertilizante de buena calidad.

Tiempo de retención hidráulico	Temperatura del medio ambiente	Características de la región
20 – 30 días	30 °C	Trópico
30 – 40 días	20 °C	Valle
40 – 75 días	10 °C	Altiplano

Fuente: Martí, 2008

CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El proyecto de grado se llevó a cabo en la empresa ECOPACIFIC, sus instalaciones se encuentran ubicadas en la parroquia Amaguaña, cantón Quito, provincia Pichincha, Ecuador, con una latitud de $0^{\circ}20'56.98''$ S y longitud de $78^{\circ}27'54.84''$ O a una altura de 2530 msnm (Figura 2.1).

Figura 2.1. Localización geográfica de la empresa ECOPACIFIC



Fuente: Google Earth (2013)

Las condiciones meteorológicas oscilan entre una temperatura mínima de 10°C y una máxima de 25°C , dependiendo de la estación, se pueden presentar precipitaciones y fuertes vientos (INAMHI, 2012).

2.2 TIEMPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación inició en enero 2012 y culminó en octubre del 2012

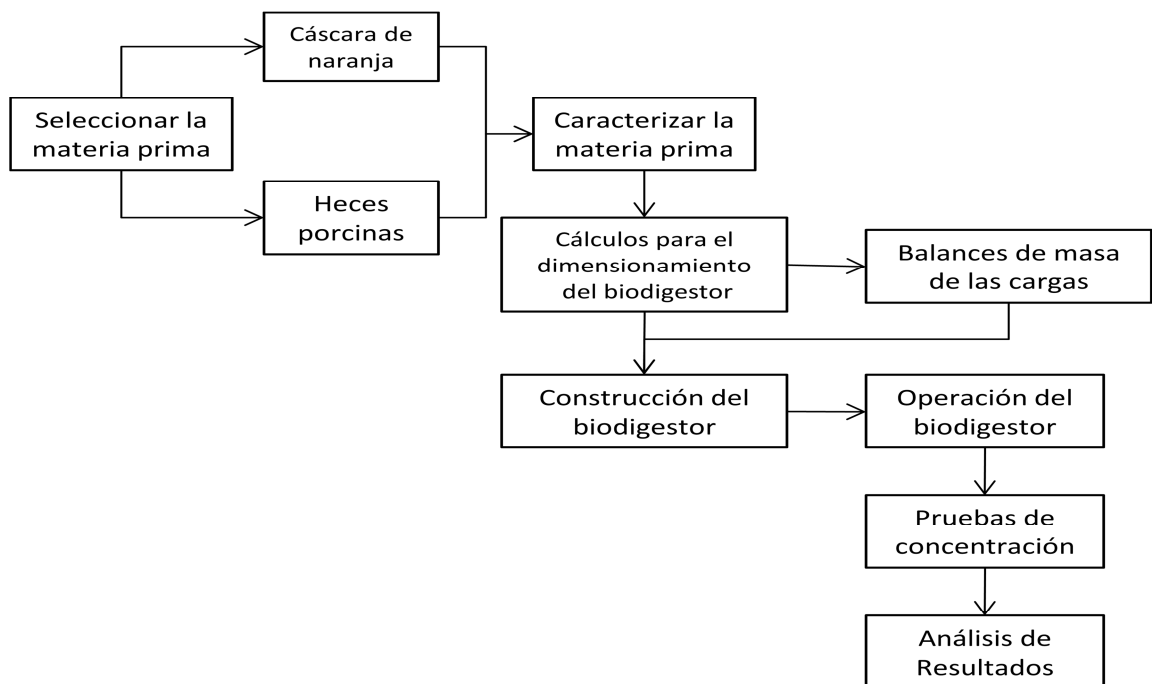
2.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS

El presente proyecto tuvo como tipo de investigación el método experimental, en el cual se determinaron datos de volumen de biogas que permitieron realizar una estadística comparativa de los niveles de producción de biogas en función de las variables de control (temperatura, pH, y $t\theta$). La toma de datos se la realizó de manera continua por 88 días. Se tomó en cuenta como hipótesis nula (H_0): el uso de cáscara de naranja como sustrato en un biodigestor anaerobio vertical semicontinuo, el cual después de 30 días de operación, produce gas metano y biol, y como hipótesis alternativa (H_1): el uso de cáscara naranja como sustrato en un biodigestor anaerobio semicontinuo, después de 30 días de operación, no produce gas metano y biol.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente proyecto se lo realizó en varias etapas (Figura 2.2), tomando en cuenta ciertas consideraciones como las condiciones ambientales, las alternativas de tratamiento del sustrato, así como criterios técnicos y económicos como lo menciona López (2009).

Figura 2.2 Diagrama de flujo del procedimiento



Autor: Silva, 2013

2.5 EVALUACIÓN DE LA CÁSCARA DE NARANJA.

2.5.1 Recolección y análisis de la cáscara de naranja

La cáscara de naranja, sale como residuo del proceso industrial de extracción de jugo en pequeños fragmentos de 1 a 2 cm, se muestreó 1 kilogramo de esta muestra en una funda “ziploc” de 27 cm x 28 cm, se etiquetó y llevó al Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional, para el análisis de carbono orgánico total, cenizas, DBO₅, DQO, fosfatos, humedad, nitrógeno total, pH, en la Tabla 2.1 se muestran los análisis realizados y el método utilizado.

Tabla 2.1 Métodos utilizados en los diferentes análisis realizados por el CICAM para la muestra de cáscara de naranja.

Parámetro	Método
Carbono orgánico total	APHA 5310 B
Cenizas	APHA 2540 E
DBO ₅	APHA 5210 B (PE/CICAM/06)
DQO	APHA 5220 D (PE/CICAM/01)
Fosfatos	APHA 4500 – PC, Colorimétrico
Humedad	Gravimétrico
Nitrógeno total	Procedimiento interno
pH	APA 4500 – H+ B Electrometric method (PE/CICAM/02)

Autor: Silva, 2013

2.5.2 Recolección y análisis de las heces porcinas

La heces porcinas fueron recolectadas en la Hacienda el Prado, Ingeniería Agropecuaria de la Escuela Politécnica de Ejército, directamente del canal donde los cerdos la depositan, para el análisis se tomo una funda “ziploc” de 27 cm x 28 cm, fue etiquetada y se llevó al Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional, y se realizó el análisis de carbono orgánico total, coliformes fecales, coliformes totales, DBO₅, DQO, fosfatos, humedad, nitrógeno total, pH, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, sólidos totales, como muestra la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Métodos utilizados en los diferentes análisis realizados por el CICAM para la muestra de heces porcinas.

Parámetro	Método
Carbono orgánico total	APHA 5310 B
Coliformes fecales	APHA 9222 D
Coliformes totales	APHA 9222 C
DBO ₅	APHA 5210 B (PE/CICAM/06)
DQO	APHA 5220 D (PE/CICAM/01)
Fosfatos	APHA 4500 – P C, Colorimétrico
Humedad	Gravimétrico
Nitrógeno total	Procedimiento interno
pH	APA 4500 – H+ B Electrometric method (PE/CICAM/02)
Sólidos suspendidos	APHA 2540 E
Sólidos suspendidos volátiles	APHA 2540 E
Sólidos Totales	APHA 2540 B

Autor: Silva, 2013

2.5.3 Diseño del sistema de digestión para el tratamiento de cáscara de naranja.

2.5.3.1 Tipo de proceso

El proceso de digestión de la cáscara de naranja es anaerobio semicontinuo, se consideró el proceso semicontinuo debido a que la producción de cáscara de naranja en algunos meses del año ocurre al pasar un día, y otros meses del año ocurre de manera continua.

2.5.3.2 Parámetros operacionales

Se tomó en cuenta para el correcto funcionamiento del digestor piloto anaerobio los siguientes parámetros operacionales:

El tiempo de retención y temperatura, se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía, el volumen total del digestor se determinó debido a la disponibilidad de un tanque que poseía la empresa, a partir de estos datos se consideró también el volumen de sólidos a procesar. La Tabla 2.3 muestra los parámetros considerados para el dimensionamiento del digestor.

Tabla 2.3 Parámetros considerados para el dimensionamiento del digester.

Parámetro	Datos
Régimen	Continuo y Semicontinuo
Tiempo retención	30 días
Temperatura	18 – 35°C
% Sólidos	8%
Volumen total	1000 L
Volumen funcional	75%
% Inoculo	15%

Fuente: Acosta, 2011

2.5.3.3 Cálculo del volumen de residuos sólidos

- *Volumen funcional del biodigestor.* De acuerdo al volumen total del digester se calculó el volumen funcional del digester piloto anaerobio a partir de la siguiente fórmula:

$$V_f = V_t \times 0,75$$

Ec. 2.1 (Acosta, 2011)

Donde:

V_f : Volumen funcional

V_t : Volumen total

Así

$$V_f = 1000 \text{ L} \times 0,75$$

$$V_f = 750 \text{ L}$$

- *Cálculo del volumen inicial.* El volumen inicial del biodigestor corresponde al 15 % del volumen funcional así:

$$V_i = V_f \times 0.15$$

Ec. 2.2 (Acosta, 2011)

Donde:

V_i : Volumen inicial

V_f : Volumen final

Así

$$Vi = 1000 \times 0,15$$

$$Vi = 150 L$$

- *Cálculo de la carga inicial del sustrato e inóculo.* Se utilizó como sustrato cáscara de naranja e inóculo heces porcinas, en los cuales se determinó la relación C/N mediante los análisis químicos de las muestras.

Relación C/N

Para obtener la relación C/N se utilizó la disponibilidad de cáscara de naranja de 100 kg y de heces porcinas de 81 kg.

Para el cálculo de la relación carbono nitrógeno se utilizó la siguiente fórmula

$$C/N = \frac{CnQn + ChQh}{NnQn + NhQh}$$

Ec. 2.3 (FAO, 2011)

Donde:

C/N: Relación carbono nitrógeno

Cn: Cantidad de carbono de la cáscara de naranja en Kg

Nn: Cantidad de nitrógeno de la cáscara de naranja en Kg

Ch: Cantidad de carbono de las heces porcinas en Kg

Nh: Cantidad de nitrógeno de las heces porcinas en Kg

Qn: Peso de la cáscara de naranja en Kg

Qh: Peso de las heces porcinas en Kg

Por lo tanto:

$$C/N = \frac{(22,8kg \times 100kg) + (19,35kg \times 81kg)}{(0,2665kg \times 100) + (1,285kg \times 81kg)}$$

$$C/N = 29,4286$$

Carga Inicial

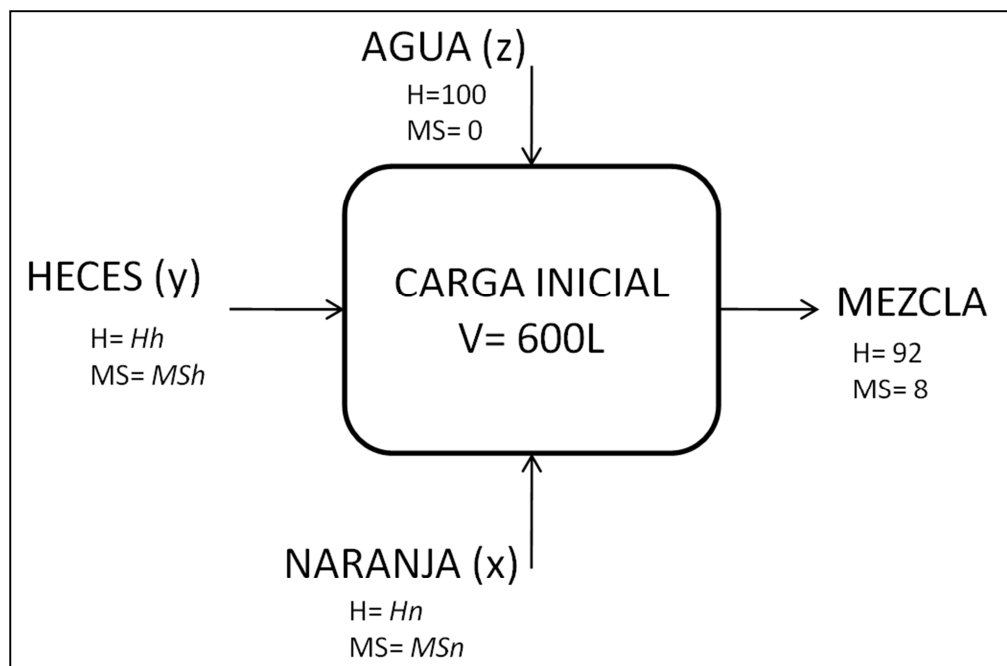
La ración de heces (Rh) generadas diariamente es de 81 kg y la ración de cáscara de naranja (Rn) es de 100 kg (Tabla 2.4), por lo tanto la relación es:

— —

Ec. 2.4 (Acosta, 2011)

Para el cálculo de la carga inicial se consideró un balance de masa de acuerdo a la diagrama de la Figura 2.3

Figura 2.3 Diagrama del balance de masa para la carga inicial al digestor considerando un volumen funcional de 600 L.



Autor: Silva, 2013

En la Tabla 2.4 se muestran las variables que se consideran para el balance de masas en la carga inicial.

Tabla 2.4 Datos considerados para el sistema de ecuaciones para la carga inicial.

	Unidad	Naranja	Heces	Agua	Mezcla
Humedad	%	<i>Hn</i>	<i>Hh</i>	100	92
Materia Seca	%	<i>MSn</i>	<i>MSh</i>	0	8
Cantidad	Kg	X	Y	Z	600

Autor: Silva, 2013

Con los datos de la Tabla 2.4 se obtuvo un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

a. $Hnx + Hhy + z = 552$

b. $MSnx + MShy = 48$

c. $\frac{x}{y} = 1.222$

Cálculo de la carga diaria

$$Qd = \frac{Vf}{t\theta}$$

Ec. 2.5 (Acosta, 2011)

Donde:

Qd: Carga diaria

Vf: Volumen funcional

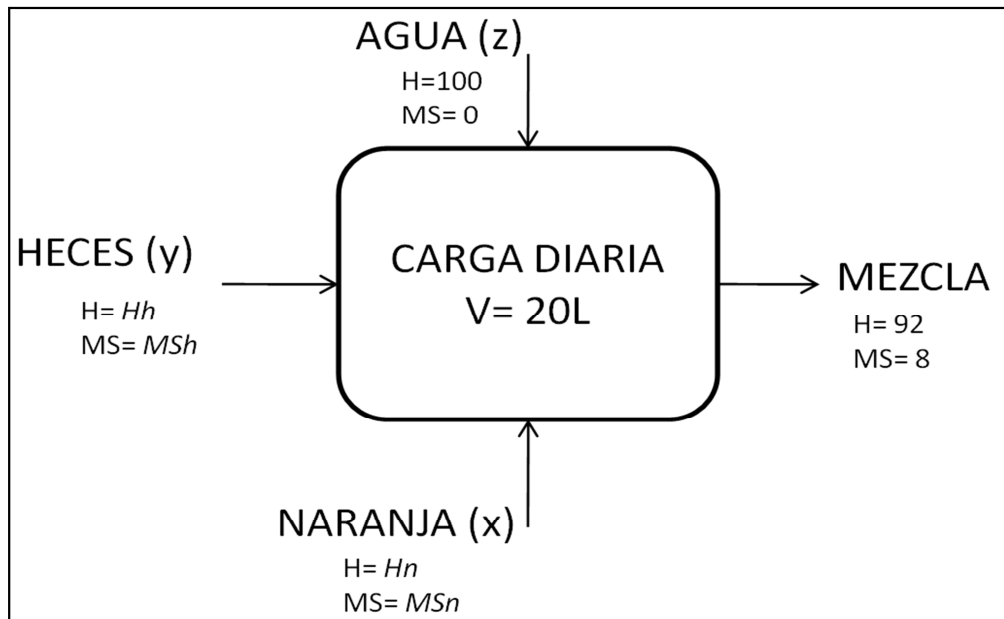
tθ: Tiempo de retención

Así:

$$Qd = \frac{600L}{30d} = 20 \text{ L/d}$$

Una vez obtenido el volumen de carga diaria de 20 litros por día se consideró un balance de masa de acuerdo al diagrama a continuación (Figura 2.4).

Figura 2.4 Diagrama del balance de masa para la carga inicial al digestor considerando un volumen de 20 L.



Autor: Silva, 2013

Tabla 2.5 Datos considerados para el sistema de ecuaciones para la carga diaria.

	Unidad	Naranja	Heces	Agua	Mezcla
Humedad	%	Hn	Hh	100	92
Materia Seca	%	MSn	MSh	0	8
Cantidad	Kg	X	Y	Z	20

Autor: Silva, 2013

Acorde a la Tabla 2.5 se resolvió un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

- a.
- b.
- c. -

2.5.3.4 Cálculo de la producción teórica de biogas

Se puede calcular la producción teórica de metano (P_{CH_4}), utilizando la alimentación diaria del digestor y la DQO consumida en la digestión.

$$P_{CH_4} = V \times DQO$$

Ec. 2.6 (López, 2009)

Donde:

V : Volumen (L/d)

DQO : (Kg de DQO/L)

Considerando que la alimentación diaria del digestor es de 20 L/día, y el DQO es de 1960 mg/L.

$$P_{CH_4} = 20 \frac{L}{d} \times 0,00196 \frac{Kg DQO}{L}$$
$$P_{CH_4} = 0,0392 Kg DQO$$

2.5.4 Construcción del biodigestor anaerobio piloto vertical semicontinuo.

La construcción y adaptación de accesorios en el biodigestor se la realizó en la empresa ECOPACIFIC, y se la describe a continuación.

2.5.4.1 Digestor

Se adaptó un tanque de 1000 L de plástico que generalmente se lo utilizaba para el almacenamiento de líquidos. El tanque disponía de una entrada y una válvula de salida. En la entrada ubicada en la parte superior se colocó una tubería PVC de 4" y 60 cm de largo, para facilitar el ingreso del sustrato hacia el fondo del tanque. La válvula de salida existente estaba en la parte inferior del tanque que permite la salida del lodo. Adicionalmente, se realizaron tres orificios más, el primero en la parte lateral del tanque para la salida del efluente (biol) el segundo en la parte superior del tanque para la salida del biogas y control de flujo y presión, finalmente el tercero para la instalación de la termocupla (Figura 2.5).

Figura 2.5 Inicio de construcción y adaptación del biodigestor (vista frontal).



Autor: Silva, 2013

2.5.4.2 Accesorios

- *Salida de biol.* Para la salida del biol se colocó en la parte lateral derecha en la mitad del tanque una universal de $\frac{3}{4}$ a la que se le acoplo una llave de agua del mismo diámetro, para que facilite la salida del efluente, como muestra la Figura 2.6.

Figura 2.6 Vista lateral derecha del inicio y construcción del biodigestor.



Autor: Silva, 2013

- *Salida de biogas.* En la parte superior del tanque se colocó una tubería de color rojo de $\frac{1}{2}$ para la salida del biogas, en la misma tubería se colocó un flujómetro marca IOXYGEN como punto de control para la presión y flujo del gas. Al final de la conexión con la tubería se colocó una válvula check para impedir el regreso del gas y la llama al momento del encendido (Figura 2.7).

Figura 2.7 Vista lateral izquierda del inicio y construcción del biodigestor.



Autor: Silva, 2013

- *Medidor de temperatura.* Para el control de la temperatura se colocó una termocupla de marca FULL GAUGE. Ubicada en la parte superior izquierda del tanque (Figura 2.8).

Figura 2.8 Ubicación de la termocupla en la construcción de biodigestor.



Autor: Silva, 2013

2.5.5 Implantación y control de parámetros operacionales

2.5.5.1 Prueba de fugas

Para comprobar que no exista fuga de líquidos, se llenó el digestor de agua de tal manera que se pueda evitar el escape de la mezcla (Acosta, 2011). Para determinar que el tanque se encontraba totalmente hermético se introdujo aire a presión con ayuda de un compresor marca TRUPER de 50 litros y 116 psi, en los orificios que se pudo comprobar la salida de aire se realizó los arreglos necesarios y se selló con silicona.

2.5.5.2 Monitoreo de la carga inicial

Se utilizó carbonato de calcio para que el pH de la mezcla siempre se encuentre entre 7 y 8. A la mezcla se la mantuvo 5 días al aire libre para la que las condiciones aerobias faciliten la estabilización de bacterias acidogénicas (Guevara, en Acosta, 2011).

2.5.5.3 Monitoreo de pH, temperatura, flujo y presión

El control de la temperatura se la realizó con la termocupla, la presión y flujo de salida del gas se controlada mediante el flujómetro y el pH de la mezcla, todos estos controles se los realizaba tres veces al día.

2.5.6 Operación del biodigestor

2.5.6.1 Monitoreo de cargas

Una vez estabilizado el sistema se procedió a cargar el digestor diariamente. Pero debido a que no existe una producción constante de naranja se realizaron dos pruebas de concentración con un factor de 2 y 1,5 de la carga diaria por 15 días, para determinar la concentración óptima de ingreso al digestor de manera semicontinua cuando se requiera. Todas las cargas que ingresaban al digestor poseían un pH entre 7 y 8 y cada vez que se realizaba la carga se retiraba del digestor la misma cantidad.

En caso que para la empresa sea difícil la obtención de heces porcinas para el sistema de digestión anaerobia, se planteó una alternativa de tratamiento de la cáscara de la naranja, con un sistema de recirculación, en esta etapa también se consideró el ingreso al digestor de manera continua y semicontinua. La materia orgánica que se retiraba en esta alternativa se almacenó en un tanque separado, en condiciones anaerobias para utilizarlo en la recirculación y en el tanque se controlaba pH.

2.5.6.2 Monitoreo de pH del efluente

El monitoreo de pH del efluente se lo realizaba tres veces al día, se recolectaba el biol en un vaso de precipitación de 50ml y se media el pH.

2.5.6.3 Monitoreo de presión y flujo de biogas

El monitoreo de la presión y flujo se lo realizó en el flujómetro tres veces al día. Todos los datos obtenidos fueron tabulados por el personal de planta.

2.5.6.4 Monitoreo de temperatura

Para el monitoreo de la temperatura en °C se tomó en cuenta la medida de la termocupla por tres veces al día, al mismo momento de la toma de los otros datos.

2.6 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Una vez obtenido los productos de la biodigestión se realizó, el análisis del efluente y del biogas.

2.6.1 Análisis del efluente

El efluente fue recolectado en un frasco de vidrio de un litro de capacidad, la muestra se la llevó al Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional, para realizar los siguientes análisis: carbono total, coliformes fecales, coliformes totales, fósforo total, nitrógeno total, pH, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, sólidos totales.

2.6.2 Análisis de biogas

El análisis de biogas fue realizado *in situ* por el personal del Centro de Investigaciones y Control Ambiental (CICAM) de la Escuela Politécnica Nacional, mediante el equipo TESTO 350XL, que analiza la concentración de CO₂, CO, NO₂, SO₂ y CH en puntos fijos.

2.6.3 Cálculo de la eficiencia del biodigestor

El porcentaje de eficiencia del biodigestor de las diferentes concentraciones analizadas se lo puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ec. 2.7 (Acosta, 2011)

Donde:

C_i : Concentración inicial

C_f : Concentración final

2.6.4 Análisis estadístico

De acuerdo a las concentraciones estudiadas durante el proceso de digestión, se analizó los intervalos de confianza del flujo de cada tratamiento, por medio de la siguiente fórmula, (García, 2003).

$$IDC_u(1-\alpha) = \bar{y} \pm T_{1-\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Ec. 2.8 (García, 2003)

2.6.5 Dimensionamiento industrial

Para el dimensionamiento industrial se consideró el promedio de producción diaria de cáscara de naranja de la empresa y en función de éste se determina el volumen del equipo industrial.

$$V_D = V_{cd} \times t\theta$$

Ec. 2.9 (Razo, 2007)

Donde:

V_D : Volumen del digestor

V_{cd} : Volumen de carga diaria

$t\theta$: Tiempo de retención

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Después de la extracción del jugo de naranja, queda como residuo la cáscara en pequeños pedazos de 1 a 2 cm (Figura 3.1); el volumen de generación de este residuo depende de la producción diaria o semicontinua de la empresa, que a su vez depende de la época productiva en la que se encuentra el Ecuador. En promedio la empresa genera aproximadamente 500 toneladas de cáscara de naranja anualmente. Durante seis meses se tiene una producción diaria de cáscara de naranja y un volumen aproximado de 8 a 12 toneladas semanales, y durante los otros seis meses del año, se tiene residuos de manera semicontinua (pasando un día o dos) y con un mismo volumen de generación del residuo. Lo que da lugar a que el aprovechamiento de la cáscara de naranja en un biodigestor anaerobio tenga dos regímenes uno de manera continua y otro semicontinua.

Figura 3.1 Cáscara de naranja



Autor: Silva, 2013

Las heces de porcino utilizadas, se las obtiene diariamente del canal del criadero de cerdos, según López (2009), un cerdo de aproximadamente 50 kg excreta entre 4,5 y 6 kg diariamente, sin embargo según la FAO (2011), el estiércol de un cerdo de 50 kg disponible para la recolección es de 2,25 kg/día.

La hacienda el Prado, cuenta con 90 cerdos en su criadero de diferentes pesos y edades, en el área de engorde, considerando algunas variables en el manejo de los animales como es la alimentación, venta o muerte, se tomo en cuenta para el cálculo la excreta 2,25 kg/día únicamente de 36 cerdos, de peso entre 45 y 60 kg.

Figura 3.2 Recolección de heces porcinas



Autor: Silva 2012

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Una vez seleccionada la materia prima, es necesario conocer las concentraciones de carbono, DBO₅, DQO, fosfatos, nitrógeno, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, así como el conteo bacteriano para coliformes fecales y coliformes totales de cada una de las materias primas como lo muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores obtenidos de los diferentes análisis realizados a las muestras de cáscara de naranja y heces porcinas en el CICAM.

Parámetro	Método	Muestra	
		Cáscara de Naranja	Heces porcinas
Carbono total	APHA 5310 B	22,08 %	19,35 %
Coliformes fecales	APHA 9222 D	-	15x10 ⁷ NMP/100 mL
Coliformes totales	APHA 9222 C	-	20x10 ⁸ NMP/100 mL
DBO ₅	APHA 5210 B (PE/CICAM/06)	8,4 mg/L	3702 mg/L
DQO	APHA 5220 (PE/CICAM/01)	163,764 mg/L	19600 mg/L
Fosfatos	APHA 4500 – P C, Colorimétrico	55,92 %	50,6 %
Humedad	Gravimétrico	76,12 %	9,98 %
Nitrógeno total	Procedimiento interno	0,266 %	0,128 %
pH	APHA 4500 – H+ B Electrometric method (PE/CICAM/02)	4,28	6,68
Sólidos suspendidos	APHA 2540 E	-	8250 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	APHA 2540 E	-	6270 mg/L
Sólidos totales	APHA 2540 B	-	14572 mg/L

Autor: Silva, 2013

Según los análisis obtenidos, el purín de cerdo cuenta con niveles de DBO de 3702 mg/L y DQO de 19600 mg/L, dentro de los límites permitidos por la normativa municipal se encuentra que para la DBO el alcantarillado admite un máximo de 120 mg/L y el cauce de agua de 70 mg/L, en el caso de la DQO, es permitido un máximo de 240 mg/L para el alcantarillado y 123 mg/L para el cauce de agua; lo que apunta a un tratamiento previo de las muestras de heces antes de su descarga a cualquiera de las fuentes, sin embargo para los fines de estudio, se sugiere que la codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como en el mesofílico (Brinkman, en Campos, 2001). A pesar que las demás concentraciones de las muestras, están con valores recomendables para el uso como sustrato en el biodigestor, es importante tomar en cuenta el pH de la muestra de la cáscara de naranja, ya que para una óptima digestión anaerobia el rango de pH debe mantenerse entre el 6,5 y 8,0, esto se debe a que el pH es

una variable que influye directamente con el crecimiento de microorganismos anaerobios, ya que ellos necesitan un pH lo más cercano a la neutralidad para un correcto crecimiento y desarrollo (Campos, 2001).

3.3 DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR

Para el dimensionamiento del biodigestor piloto, se contaba en la empresa con un tanque de 1000 L de capacidad en el que generalmente se transporta o almacena líquidos. En función de éste volumen se realizaron los cálculos necesarios, y se obtuvieron los siguientes resultados Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores obtenidos de los cálculos realizados para el dimensionamiento del biodigestor

Parámetro	Resultado obtenido
Volumen funcional (V_f)	750 L
Volumen inicial (V_i)	150 L
Volumen de la carga diaria (Q_d)	20 L/d
Relación C/N	29,4286
Relación cáscara de naranja / heces	1,222

Autor: Silva, 2013

- Carga inicial

Se resolvió un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas, considerando que el total de la mezcla corresponde a 600 L debido a que el volumen inicial es de 750 L y el del inóculo de 150 L.

a. $0,24x + 0,90y = 48$

b. $0,76x + 0,10y + z = 552$

c. $\frac{x}{y} = 1,222$

Por lo tanto se requiere para la carga inicial (Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Valores obtenido en peso (kg) de las materias primas para la carga inicial al digestor.

Naranja	49,094 kg
Heces	40,241 kg
Agua	510,66 kg

Autor: Silva, 2013

- Carga diaria

Una vez obtenido el volumen de carga diaria se realizó un sistema de ecuaciones, en función de dicho volumen:

- $0,24x + 0,90y = 2$
- $0,76x + 0,10y + z = 18$
- $\frac{x}{y} = 1.222$

Por lo tanto para la carga diaria se requiere (Tabla 3.4):

Tabla 3.4 Valores obtenidos en peso (kg) de las materias primas para la carga diaria al digestor.

Naranja	2,045 kg
Heces	1,677 kg
Agua	16,22 kg

Autor: Silva, 2013

- Producción teórica de biogas

Considerando que la alimentación diaria del digestor es de 20 L/día, y la DQO es de 1960 mg/L.

$$P_{CH_4} = 20 \frac{L}{d} \times 0,00196 \frac{Kg DQO}{L}$$

$$P_{CH_4} = 0,0392 Kg DQO$$

López (2009), afirma que teóricamente 1 kg de DQO = 350 L de CH₄, por lo tanto:

$$P_{CH_4} = 0,0392 kg DQO \times \frac{350 L CH_4}{1 kg DQO}$$

$$P_{CH_4} = 13,72 \frac{L CH_4}{día}$$

$$P_{CH_4} = 0,01372 \frac{m^3 CH_4}{día}$$

Una vez realizados todos los cálculos se procedió a la carga de digestor, bajo las siguientes condiciones (Tabla 3.5)

Tabla 3.5 Resumen de datos analizados para el dimensionamiento del digestor

Parámetro	Datos
Régimen	Continuo y Semicontinuo
Tiempo retención	30 días
Temperatura	18 – 35 °C
% Sólidos	8 %
Volumen total	1000 L
Volumen funcional	750 L
% Inoculo	150 L
C/N	29,4286

Autor: Silva, 2013

Según la FAO (2011), experimentalmente se ha demostrado que una carga en un digestor semicontinuo no debe tener más de un 8 % a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico del digestor.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células (Martí, 2006).

Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1. La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, y el período de producción de biogas es más prolongado.

En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso (FAO, 2011 & East Harbour Management Services, 2004).

Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas (Rivas, 2009; Hilbert, 2003 & Alonso et al 2006).

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogas, según la temperatura de la zona de ejecución del proyecto se consideró un tiempo de retención de 30 días. (FAO; 2011)

Con estos resultados se procedió a realizar las adecuaciones necesarias en cuanto a la construcción y puntos de control que faciliten un correcto funcionamiento del biodigestor, además se colocaron dos puntos de control, para la toma de datos como son un flujómetro que permite determinar el flujo y presión de la salida del gas, así como una termocupla que facilita el control de la temperatura todo el tiempo.

3.4 BALANCE DE MASAS

Como se muestra en la Tabla 3.6, y de acuerdo a los análisis obtenidos y los cálculos explicados en la metodología se obtuvo para el ingreso de las cargas los siguientes valores:

Tabla 3.6 Datos calculados en kg para el ingreso de cargas al digestor

Material	Carga inicial (kg)	Carga diaria (kg)
Naranja	49	2
Heces	40	1,7
Agua	510	16

Autor: Silva, 2013

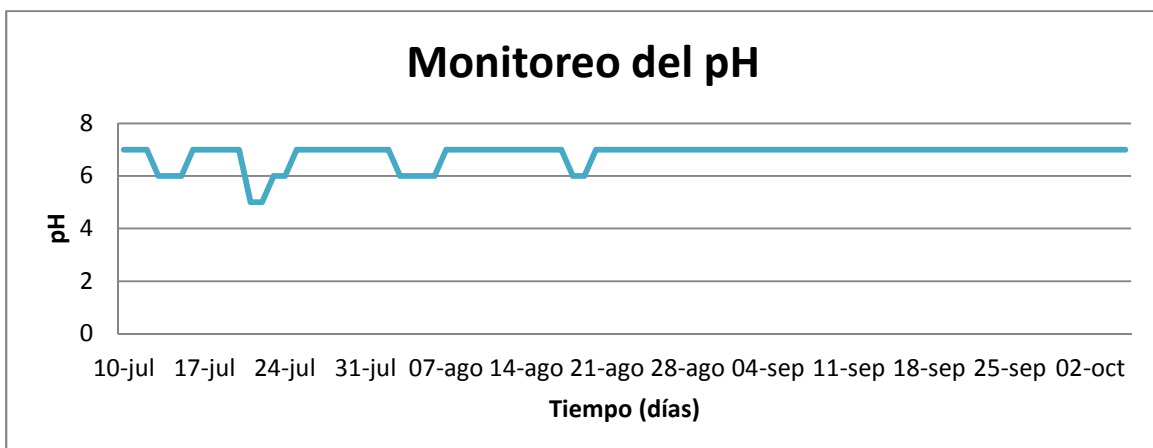
Estos datos sugieren que la necesidad de heces porcinas y materia orgánica degradable en la codigestión anaerobia, es casi similar en peso (kg), lo que quiere decir que juntas llegan a cubrir el requerimiento adecuado para que los microorganismos inicien su digestión de una mejor manera. Según la FAO (2011), la digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas que contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La codigestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

La primera carga introducida al digester anaerobio debe tener un tiempo necesario sin adición de otra mezcla hasta la producción de biogas, una vez obtenidos los primeros resultados de biogas es factible realizar la carga diaria, de esta forma se logra que los microorganismos estén adaptados al medio y sean más eficientes en cada ingreso (Guevara et al, 1996).

3.5 FUNCIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

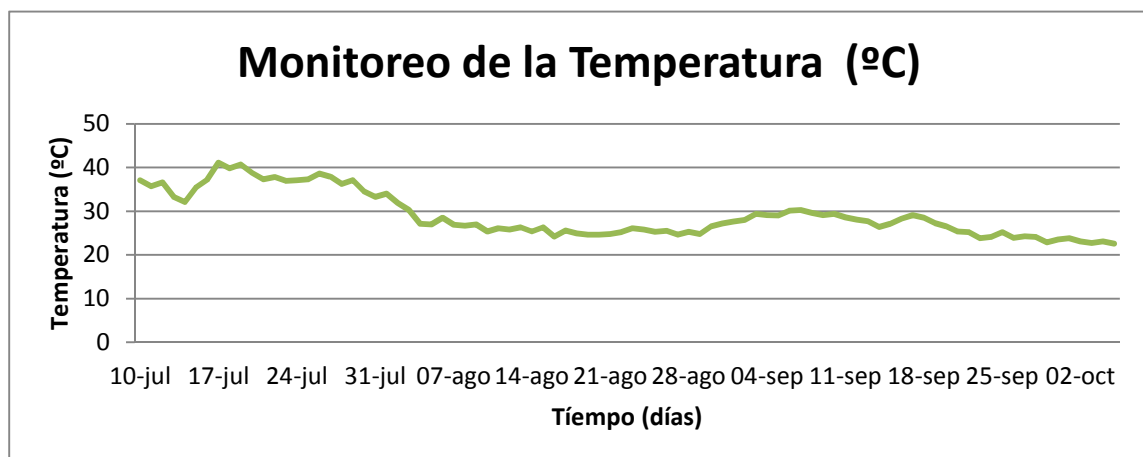
Una vez realizada la primera carga de la mezcla, se mantuvo en el digester un ambiente hermético y anaerobio; a los siete días se obtuvo el primer resultado de producción de biogas, y se controlaron las variables de pH, temperatura, flujo y presión (Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6).

Figura 3.3 Rangos de pH durante 88 días de operación del biodigestor



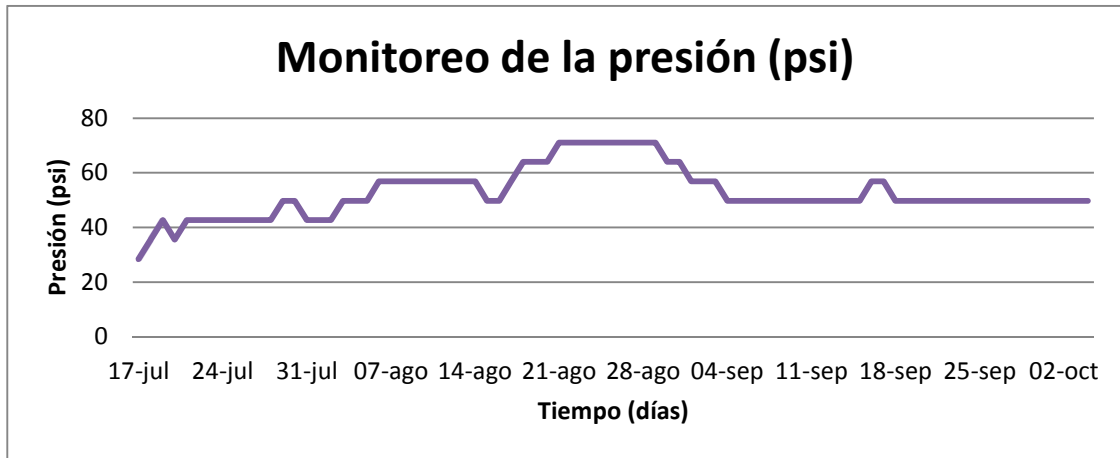
Autor: Silva, 2013

Figura 3.4 Rangos de temperatura durante 88 días de operación del biodigestor



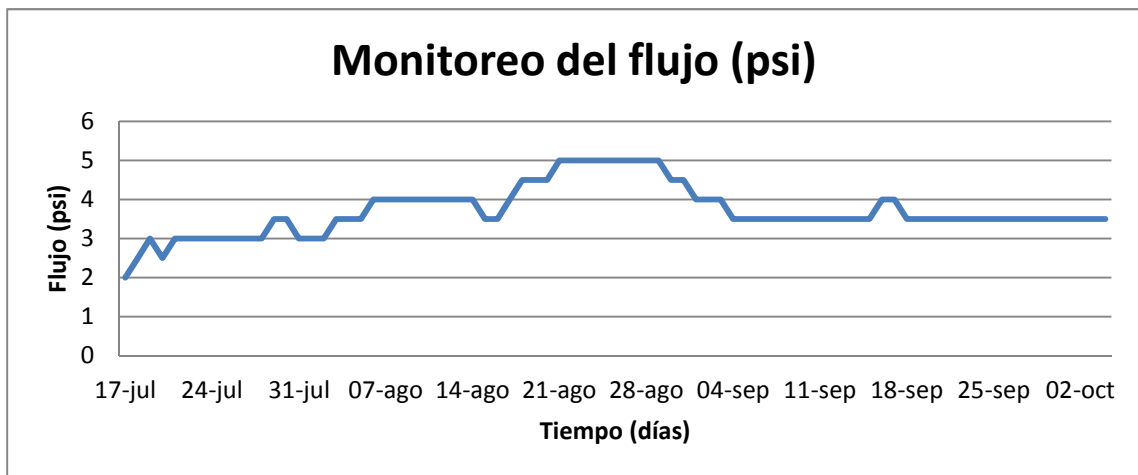
Autor: Silva, 2013

Figura 3.5 Rangos de presión durante 88 días de operación del biodigestor



Autor: Silva, 2013

Figura 3.6 Rangos de flujo durante 88 días de operación del biodigestor



Autor: Silva 2013

Como se puede observar en la Tabla 3.7 se muestran los rangos mínimos y máximos de pH, temperatura (°C), presión (psi), flujo (L/min).

Tabla 3.7 Parámetros de operación del digestor y producción de biogas

Parámetro	pH	T (°C)	F (L/min)	P (psi)
Min	5	22,6	2	28,44
Max	7	41,1	5,0	71,10

Autor: Silva, 2013

Según Gómez et al (2007), la temperatura para un buen desarrollo de los microorganismos no puede ser menor a 10°C, como medida preventiva a las bajas temperaturas de la noche en la época seca en el Ecuador se ubicó el digestor dentro de un invernadero.

El pH es un factor determinante en la producción de biogas, el control de ésta variable depende de los primeros resultados en su obtención, a pesar que algunos autores como Rivas (2010), Cardona (2004) y Ramos et al (2007), citan que el purín de cerdo requiere de 3 a 5 días en condiciones anaerobias para la producción del biogas, se sabe que cuando se trabaja en codigestión con otra materia orgánica, el tiempo de producción de biogas será de 5 a 15 días (Campos 2001) en este proyecto la producción de biogas se dio a los 7 días de iniciado el sistema.

3.6 PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN

3.6.1 Carga inicial

Una vez estabilizado el biodigestor y haber obtenido biogas después de 7 días de iniciado el sistema, se procedió a la carga diaria del digestor con 2 kg de naranja, 1,7 kg de heces y 16 kg de agua, por 10 días, en este caso se tomaron medidas de presión, flujo, temperatura y pH. Existió un disminución de pH de 7 a 5, lo que obligó a tomar medidas en el pre tratamiento de la naranja (Figura 3.7), para las siguientes pruebas de concentración, sin embargo dentro del sistema de digestión anaerobia se controló el pH con una solución alcalina (carbonato de calcio) de pH 8 (Acosta, 2011).

Figura 3.7 Tratamiento de la cáscara de naranja con carbonato de calcio antes de ingresar al digestor.

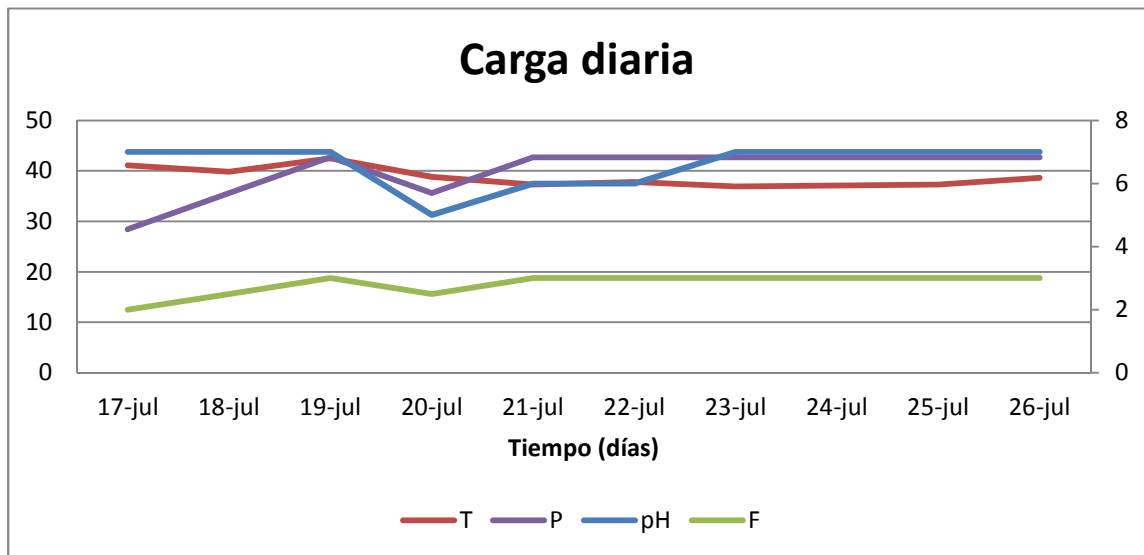


Autor: Silva, 2013

Según la FAO (2011), Acosta (2011) y Hilbert (2003), en muchos casos, para mantener el pH óptimo en el reactor, es necesaria la suplementación de productos alcalinos utilizando químicos tales como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoniaco, carbonato de calcio, hidróxido de sodio y potasio entre otros.

Como se puede observar en la Figura 3.8 y de acuerdo a los datos obtenidos, se puede notar un comportamiento similar entre el flujo de producción de biogas y el pH, lo que indica una relación directa entre ellos, ya que durante los días de disminución de pH, también existió una disminución del flujo gaseoso y por lo tanto de la presión de salida del gas, esto se debe al estrés que sufren las bacterias y la muerte de algunas de ellas principalmente las metanogénicas que requieren de un pH entre 7 y 8 para su desarrollo (López 2009, Gómez et al 2007), sin embargo es importante tomar en cuenta que a pesar de la disminución en la producción de gas nunca se llegó al nivel inicial, lo que indica que el sistema estaba totalmente estabilizado y funcionaba de manera eficiente (Ramos et al, 2007).

Figura 3.8 Datos obtenidos del funcionamiento del biodigestor con carga diaria por 10 días



Autor: Silva, 2013

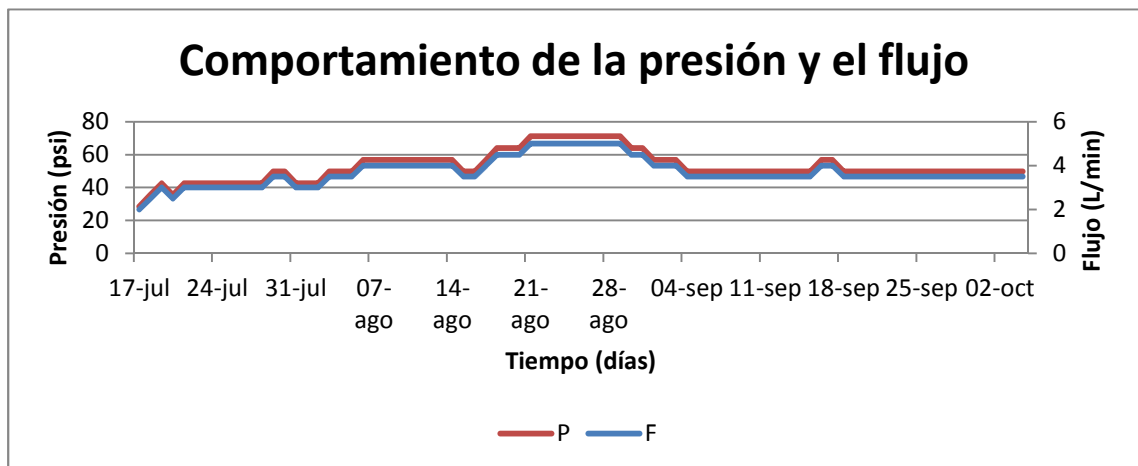
Posiblemente una sobrecarga de materia orgánica ácida (cáscara de naranja), hizo que el pH de la mezcla dentro del reactor disminuya significativamente, es posible controlar el pH de la mezcla antes de ingresar el digestor, no obstante también se le atribuye a la fase acidogénica de la degradación anaerobia la variación de pH durante este periodo de

tiempo (Hilbert, 2003). La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden causar la desestabilización del proceso como lo mencionan Campos (2001), Rivera (2010) y East Harbour Management Services (2004).

Según Rivas (2009) y Martí (2006), existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C). En cuanto a la relación existente entre la temperatura y el flujo se puede determinar que debido a que la temperatura se encontró todo el tiempo dentro del rango establecido para el buen comportamiento bacteriano, no se la considera una causa como al pH en el momento de la disminución del flujo de biogas.

A pesar de que las variables de temperatura y pH son los puntos críticos en el trabajo eficiente de un digestor anaerobio y dentro de los parámetros establecidos ambas deben cumplir rangos de funcionamiento, tienen un comportamiento independiente, lo que permite concluir que en este caso, la variación del flujo en la producción del biogas se debe únicamente al cambio de pH de neutro a ácido, más no a la variación de la temperatura durante el día. De acuerdo con la Figura 3.9 es posible notar la relación de manera directa entre el flujo (psi) y presión (L/min) de producción de biogas.

Figura 3.9 Datos obtenidos de presión y flujo durante la producción de biogas.



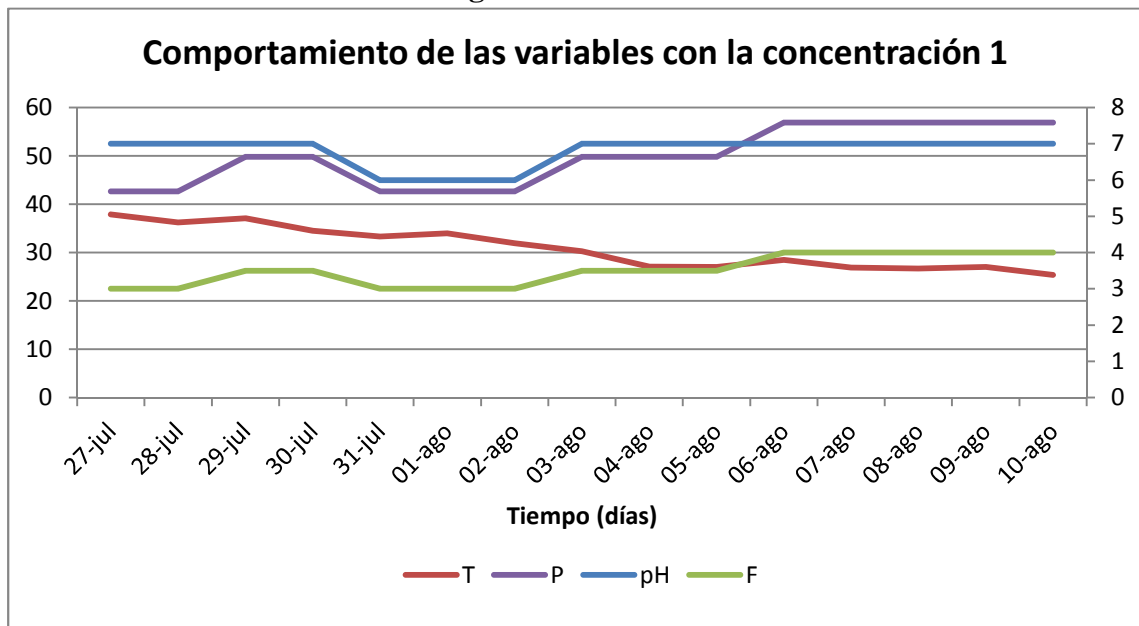
Autor: Silva, 2013

3.6.2 Carga semicontinua

A causa de que la empresa durante seis meses tiene una producción semicontinua de cáscara de naranja se procedió a realizar la carga de la materia orgánica al pasar un día para simular el proceso de producción durante ese tiempo. Con el fin de mantener la relación C/N de la carga diaria obtenida en la metodología, se probaron dos concentraciones de descarga semicontinua al digestor. Cada una de estas concentraciones se las analizó por 15 días de manera separada, el comportamiento de estas concentraciones se puede observar en la Figuras 3.10 y 3.11.

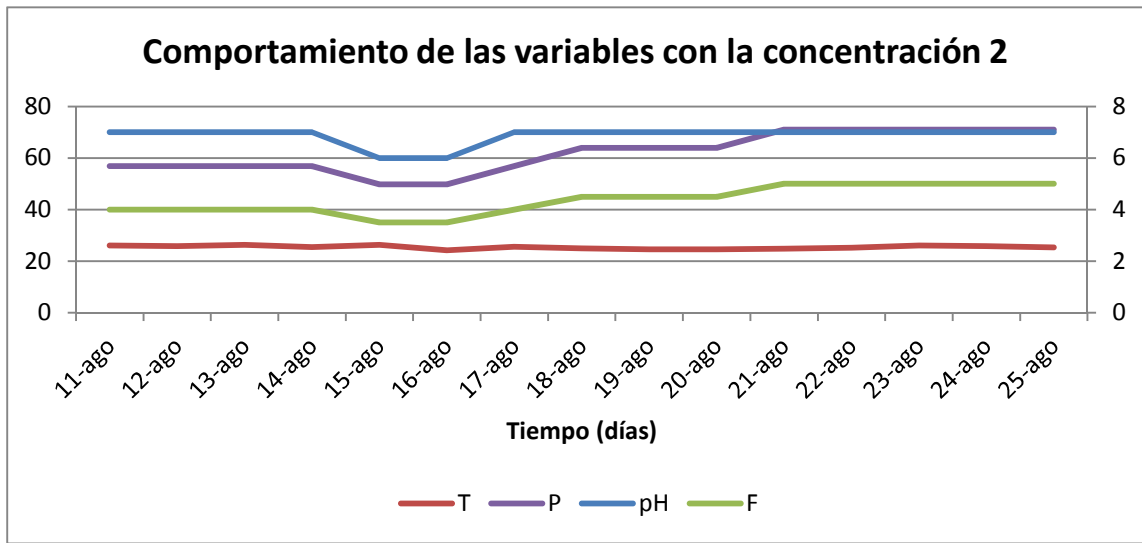
Según los datos obtenidos y como se puede observar en la Figura 3.10 a una concentración del doble de la carga diaria, el sistema se estabilizó con una presión de 56,88 psi y un flujo de 4 L/min. Sin embargo en la Figura 3.11, donde se utilizó como factor 1,5 de la concentración de las cargas obtenidas en el balance de masa para la carga diaria, el valor del flujo fue de 5 L/min y una presión de 71,100 psi. Bajo estas condiciones se pudo determinar que la concentración adecuada para una carga semicontinua es la de la segunda concentración con un factor de 1,5 de la carga diaria obtenida.

Figura 3.10 Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) de la concentración 1 de régimen semicontinuo.



Autor: Silva, 2013

Figura 3.11 Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) de la concentración 2 de régimen semicontinuo.



Autor: Silva, 2013

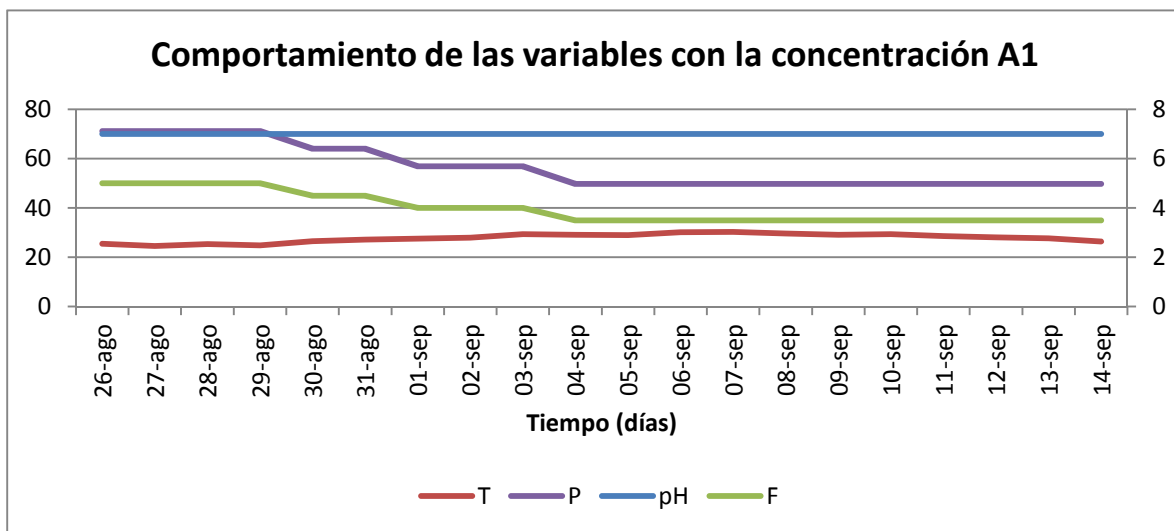
Los valores de pH siguen siendo un punto crítico en el funcionamiento del biodigestor, ésta es una variable involucrada directamente al comportamiento de la producción de gas y presión de salida. Es por ello que es importante controlar el pH del sistema y llevar un seguimiento continuo de dichos valores, para así actuar y contrarrestar el efecto de la acidez de una manera rápida y oportuna antes de que el proceso de acidificación afecte totalmente a mezcla y se convierta en un sistema irreversible (Hilbert, 2003; Rivas, 2009; FAO, 2011).

3.6.3 Alternativa para la carga semicontinua y sistema de recirculación

Según los datos anteriormente obtenidos, el biodigestor tiene un correcto funcionamiento con el régimen continuo que se utilizará los meses de producción diaria de cáscara de naranja y con el factor de 1,5 de la carga diaria pasando un día el régimen semicontinuo. Sin embargo debido a que es una empresa de alimentos y las normativas de buenas prácticas no admiten tener cerca del lugar de producción bacterias contaminantes que puedan tener un efecto adverso en la salud, se consideró una alternativa de producción en la que se analizó la actividad del digestor con una sola carga masiva de heces por 10 días hasta que la producción de gas disminuya.

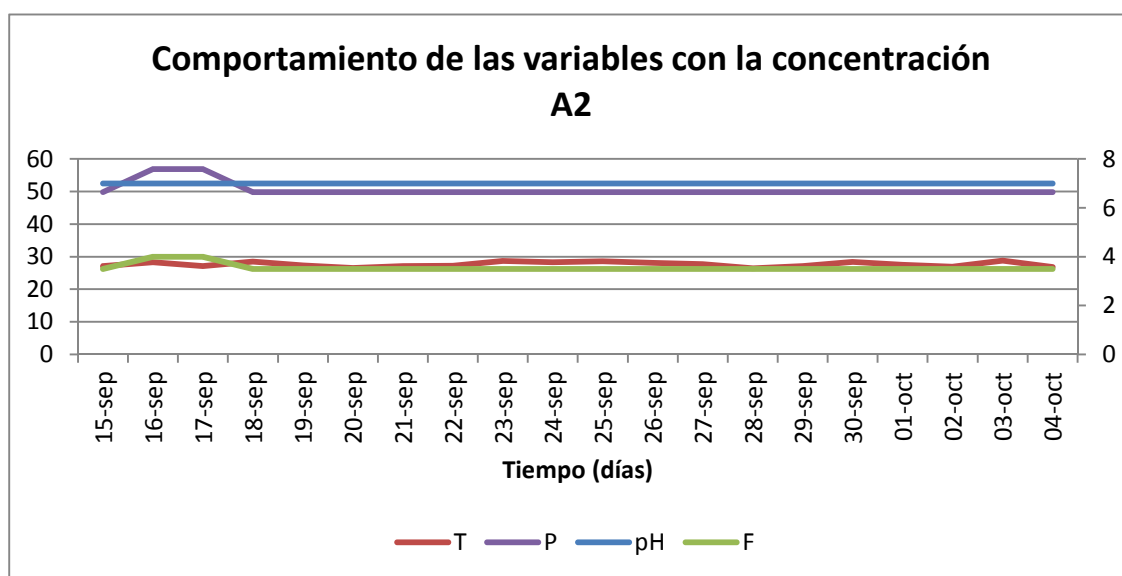
No obstante debido a que el ingreso de la cáscara de naranja no cumplía con la relación de C/N necesaria, se procedió a tomar una porción de la mezcla de salida para la recirculación en el sistema. De esta forma se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 3.12 y 3.13).

Figura 3.12 Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P(psi) con una carga diaria de: 6 kg naranja, 12 kg de agua y 2 kg de recirculación, en un régimen continuo



Autor: Silva, 2013

Figura 3.13 Datos obtenidos de pH, T (°C), F (L/min), P (psi) con una carga diaria de: 9 kg naranja, 18 kg de agua y 3 kg de recirculación, en un régimen semicontinuo.



Autor: Silva, 2013

Como ya se ha mencionado anteriormente, la relación de producción de gas está condicionada por el pH de la mezcla, en estas dos concentraciones analizadas Figura 3.12 y Figura 3.13, se monitoreó que el pH se mantenga todo el tiempo en 7, lo que demostró una producción constante de gas. Las temperaturas de funcionamiento del digester son inferiores a las del inicio del sistema, de todas formas, se mantuvieron dentro del rango permitido para que las reacciones anaeróbicas se den correctamente.

Con la concentración A_1 se obtuvo un flujo de 4 L/min y una presión entre 56,88 psi, mientras que con la concentración A_2 el flujo constante fue de 3,5 L/min y una presión de 49,77 psi, estos valores sugieren un funcionamiento satisfactorio del sistema de digestión anaerobia, sin embargo es posible notar que en el régimen continuo existe mayor producción de biogas que en el régimen semicontinuo en la parte inicial. Esto se debe a la cantidad de materia orgánica degradable que poseen las bacterias, sin alterar la relación C/N a mayor concentración de materia orgánica degradable, mayor producción de biogas (López, 2009)

Una vez que los resultados obtenidos en este sistema han sido satisfactorios se puede determinar que la mezcla de heces porcinas y cáscara de naranja tanto el régimen continuo y semicontinuo en un proceso de digestión anaeróbica producen biogas.

3.7 ANÁLISIS DEL BIOGAS Y EFLUENTE

3.7.1 Biogas

La producción de biogas está condicionada por cada una de las fases del proceso de digestión anaerobia, para Acosta (2011), es necesario considerar la formación de azufre y la utilización de agua para la degradación de la materia orgánica en fase anaerobia. De acuerdo a la materia prima inicial se pueden obtener los siguientes productos después de la biodigestión anaerobia como se observa en la Tabla 3.8. (Pérez, 2010).

Tabla 3.8 Reacción de formación de biogas dependiendo de la materia prima inicial después de la biodigestión anaerobia.

Materia prima	Reacción
Carbohidratos	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
Grasas	$C_{12}H_{24}O_6 + 3H_2O \rightarrow 4,5CO_2 + 7,5CH_4$
Proteínas	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6.5CO_2 + 6.5CH_4 + 3NH_3 + H_2S$

Fuente: Pérez, 2010

Gracias a los microorganismos, especialmente los metanogénicos, se puede obtener gas metano en un sistema de digestión anaerobia, sin embargo, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. (López, 2009)

Algunos investigadores como Campos (2001) y López (2009), evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso; debido a esto, las condiciones anaeróbicas requieren de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas, nutrientes, pH (generalmente cercano a la neutralidad). La producción de biogas obtenida durante el proceso de biodigestión anaerobia se vio afectada por la variación de pH, sin embargo una vez estabilizado el sistema, fue factible encender el biogas, como lo muestra la Figura 3.14.

Figura 3.14 Encendido del Biogas.



Autor: Silva, 2013

López (2009), afirma que los principales componentes del biogas son metano (CH_4) con 55 – 70 % de concentración y dióxido de carbono (CO_2) con 35 – 40 % de concentración, la concentración del biogas obtenido fue medido *in situ* por el CICAM, como se muestra en la Figura 3.15.

Figura 3.15 Análisis de Biogas *in situ*, con el equipo TESTO 350xl



Autor: Silva, 2013

Los datos obtenidos del resultado de biogas analizados se resumen en la Tabla 3.9

Tabla 3.9 Resumen de análisis del biogas obtenido *in situ* por el equipo TESTO 350 xl

Compuesto	Unidad	Concentración
O ₂	%	0,34
CO ₂	%	35,34
C _x H _y	%	> 45
NO _x	mg/m ³	36,61
SO ₂	mg/m ³	30,18

Autor: Silva, 2013

Hilbert (2003) y Gómez et al (2007) afirman que el biogas es una mezcla constituida por algunos elementos como metano con una concentración que oscila entre 55 y 70 %, dióxido de carbono entre 27 y 44 %, lo que está acorde con los datos obtenidos (Tabla 3.9).

Como se puede observar el metano es el principal componente del biogas, y es éste gas el que le confiere las características combustibles al mismo, como una combustión limpia que no genera humo y casi no contamina.

Dentro de las características físicas del biogas se encuentran la capacidad de quemarse sin olores y con llama azul (Figura 3.16), (López, 2009).

Figura 3.16 Combustión de Biogas y formación de llama azul.



Autor: Silva, 2013

Ruiz (2005), afirma que a pequeña y mediana escala, el biogas ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinas en combustión directa con estufas simples. Además puede ser utilizado para la iluminación, la calefacción y como reemplazo de la gasolina o el combustible en motores de combustión interna, esto implica que de acuerdo al resultado obtenido en el proyecto, el biogas puede direccionarse a diferentes consumos de acuerdo a las necesidades de la empresa.

3.7.2 Efluente

La utilización de biodigestores, además de permitir la producción de biogas ofrece enormes ventajas en la transformación de desechos.

Dentro de las características físicas apreciables Figura 3.17 en el biol, se puede determinar que la viscosidad del efluente se ve reducida drásticamente debido a la transformación de los sólidos volátiles (un 50% de los mismos son reducidos en un digestor en régimen) (Hilbert, 2003).

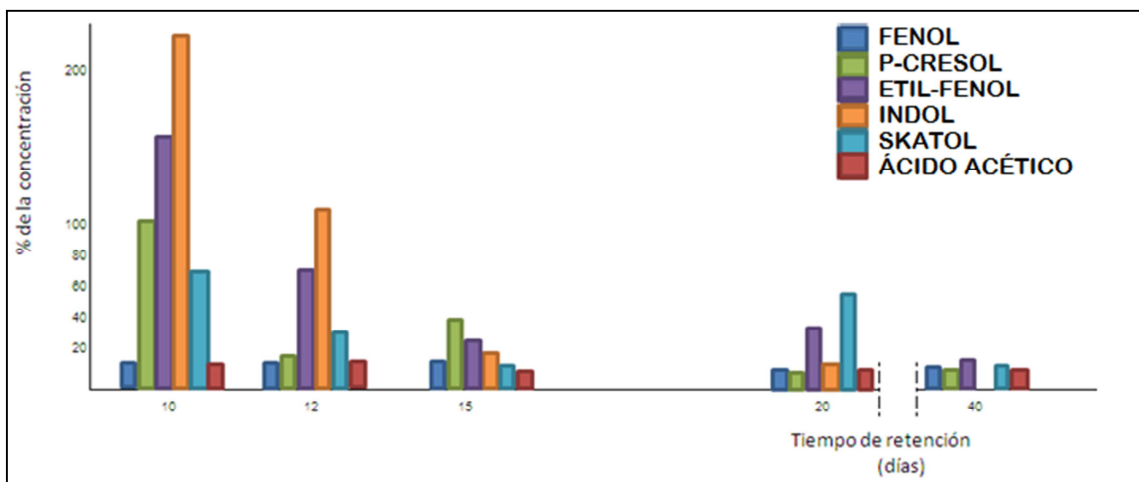
Figura 3.17 Biol obtenido del biodigestor anaerobio.



Autor: Silva, 2013

Además, como menciona Hilbert (2003), el efluente carece de olor debido a que las sustancias provocadoras del mal olor son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención (Figura. 3.18).

Figura 3.18 Reducción de sustancias provocadoras de mal olor durante la digestión anaerobia.



Fuente: Hilbert, 2003

El biol, contiene un alto aporte de minerales, especialmente de nitrógeno y fósforo, compuestos utilizados para mejorar la calidad del suelo. Según la FAO (2011) y Martí (2006) en la Tabla 3.10 se presentan las concentraciones adecuadas de un bioabono que podría ser directamente suministrado a las plantas y al suelo con actividad fertilizante. Comparativamente se puede determinar en términos generales que los resultados obtenidos en la concentración del biol con los datos de la concentración óptima (FAO, 2011), son un poco más altos, no obstante son bastante similares en relación de un compuesto con otro (Tabla 3.10).

Tabla 3.10 Concentraciones óptimas de los diferentes componentes del biol y resultados obtenidos del análisis del efluente del biodigestor anaerobio.

Componente	Concentraciones óptimas (FAO, 2011)	Resultados (CICAM)
Nitrógeno (%)	1,8	1,9
Carbono (%)	45	46,87
Fósforo (%)	8,4	11,4
Relación C/N	25	24,66
PH	7,9	7,04
Coliformes totales (NMP/100ml)	0	430

Autor: Silva, 2013

Es importante aclarar que el sistema de biodigestión anaerobia, contiene un concentración C/N de 24,66 inferior a la concentración inicial de la descarga que fue de 29,42; lo que permite comprobar que las condiciones internas del digestor se encuentran adecuadas y se ha reducido la cantidad de materia orgánica durante el proceso.

A pesar de trabajar con una muestra inicial bastante ácida (cáscara de naranja), el tratamiento previo con carbonato de calcio ha permitido mantener un pH del rango óptimo de funcionamiento del proceso; que ha facilitado la actividad bacteriana y consecuentemente la formación de biogas y biol.

Las concentraciones de nitrógeno son de 1,9 % y de fósforo de 11,4 % estos valores pueden ser suministrados como fertilizantes, según la FAO (2011); además es importante tomar en cuenta que al ser un abono orgánico no contamina el suelo, agua, aire, ni los productos obtenidos de las plantas.

Sin embargo cabe recalcar la presencia de coliformes totales en la muestra analizada, ya que algunos autores como FAO (2011), Campos (2001) y Hilbert (2003), hacen hincapié en que un biol de excelente calidad no contiene microorganismos.

A pesar de que el valor obtenido en el análisis determina una reducción significativa de la presencia de coliformes, esta pequeña porción obtenida puede deberse a la contaminación al momento de la toma de la muestra.

Con estos resultados obtenidos es posible determinar el porcentaje de eficiencia del biodigestor. La Tabla 3.11 muestra que en términos generales el proceso de digestión anaerobia, es eficiente, ya que redujo un 99,99 %, la concentración de coliformes tanto fecales como totales, un 73,45 % y 77,21 % la concentración de DBO₅ y DQO, respectivamente, del mismo modo hay una eficiencia en la reducción de un 80,12 % de sólidos suspendidos, un 82,77 % de sólidos suspendidos volátiles y un 85,27 % de sólidos totales.

Tabla 3.11 Porcentaje de eficiencia y resultados obtenidos de los análisis realizados de los afluentes y efluente del biodigestor anaerobio.

Parámetro	Unidad	Afluente		Efluente	% Eficiencia
		Heces	Naranja	Biol	
Carbono total	%	19,35	22,8	46,87	-
Coliformes fecales	NMP/100ml	15x10 ⁷	-	240	99,99
Coliformes totales	NMP/100ml	20x10 ⁸	-	430	99,99
DBO ₅	mg/L	3702	8,4	985,3	73,45
DQO	mg/L	19600	163,7	4503,4	77,21
Fósforo Total	%	506	55,92	11,4	-
Nitrógeno Total	%	0,128	0,266	1,9	-
pH		6,68	4,28	7,04	-
Sólidos suspendidos	mg/L	8250	-	1640	80,12
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	6270	-	1080	82,77
Sólidos totales	mg/L	14572	-	3146	85,27

Autor: Silva, 2013

3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la toma de datos, se realizó un análisis estadístico de las concentraciones adecuadas, conforme con los intervalos de confianza

en función del flujo para un proceso óptimo de biodigestión a partir de la cáscara de naranja.

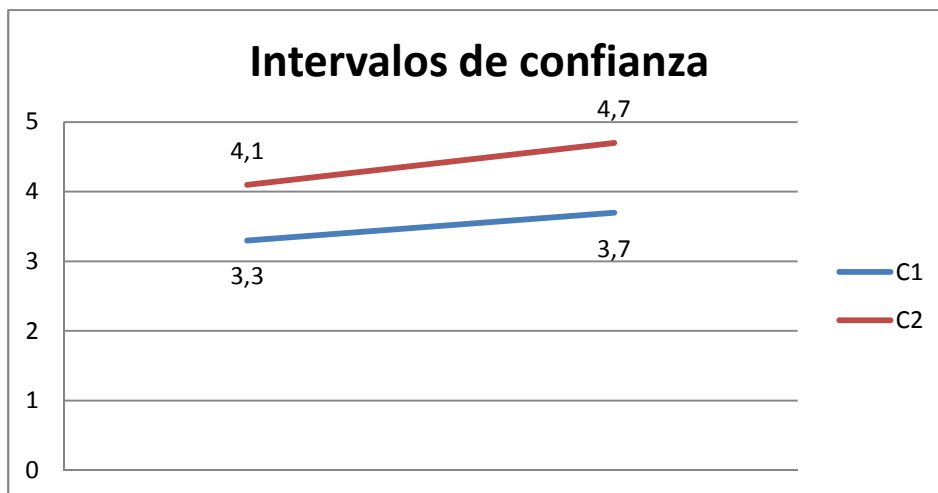
La Tabla 3.12 muestra los intervalos de confianza al 95 %, obtenidos de acuerdo al flujo de biogas producido con las dos concentraciones analizadas.

Tabla 3.12 Intervalos de confianza del flujo de producción de biogas.

	Concentración 1	Concentración 2
Límite inferior de confianza	3,3	4,1
Límite superior de confianza	3,7	4,7

Autor: Silva, 2013

Figura 3.19 Límites inferior y superior de los intervalos de confianza de las concentraciones analizadas de acuerdo al flujo de producción de biogas.



Autor: Silva, 2013

Con estos resultados se puede observar que luego de estabilizar el biodigestor los intervalos de confianza de la concentración 2 no se traslapan con los datos de la concentración 1 (Figura. 3.19) por lo que existe diferencia significativa entre los tratamientos y por lo tanto se considera la concentración 2 la adecuada para la descarga semicontinua.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el tiempo de generación de biogas se aceptó la hipótesis nula y se rechazó la hipótesis alternativa.

3.9 DIMENSIONAMIENTO INDUSTRIAL.

Haciendo relación al volumen diario de carga del biodigestor, según los datos de la empresa existe una producción promedio de 2 toneladas de cáscara de naranja diarias, realizando los cálculos respectivo se obtiene entonces que el volumen de carga diaria de digestor a escala industrial sería de 20000 L/día, Reemplazando los datos se calcula que:

$$V_D = V_{cd} \times t\theta$$
$$V_D = 20000 \frac{L}{día} \times 30 \text{ días}$$
$$V_D = 600000 L$$
$$V_D = 600m^3$$

El mismo que contará con un volumen funcional de 450 m³ que representa el 75 % del volumen total.

CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo a la producción de cáscara de naranja que tiene la empresa se diseñó el sistema de biodigestión anaerobia de manera continua y semicontinua, en función de un tanque de 1000 L, con un volumen funcional de 750 L.
- Según los análisis obtenidos, los niveles de DBO₅ y DQO las heces porcinas deben cumplir un tratamiento para poder ser descargadas al cauce, por lo que el destino para la degradación anaerobia en codigestión con cáscara de naranja es una opción, para evitar la contaminación del agua.
- De acuerdo con los datos obtenidos durante el proceso de biodigestión anaerobia el parámetro más crítico a considerar durante la operación es el pH. Éste fue el indicador determinante en la cantidad de flujo de biogas obtenido.
- Debido a algunas variaciones bruscas de pH, se trato a la mezcla con una solución de carbonato de calcio de pH 8, para actué como solución tampón y regule el pH.
- Además de controlar parámetros de pH y temperatura, es necesario cumplir con la relación C/N de la mezcla dentro del rango de 20 a 30, ya que las bacterias anaeróbicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno.
- De acuerdo a los valores de generación de cáscara de naranja y heces porcinas, existe una relación de 1,22 entre ellos.
- La carga inicial utilizada estaba conformada por 49 kg de cáscara de naranja, 40 kg de heces porcinas y 510 kg de agua, se la mantuvo en condiciones anaerobias, hasta que al día 7 hubo un inicio de producción de biogas con un flujo de 2 L/min y una presión de 28,44 psi.

- Se calculó un volumen de carga de diaria, 20 L/día, la mezcla contenía 2 kg de cáscara de naranja, 1,7 kg de heces, 16 kg de agua, bajo estas condiciones se obtuvo una producción de biogas estable de 3 L/min y una presión de 42,66 psi.
- Debido a que la producción de cáscara de naranja en ciertas épocas del año es de manera semicontinua sin variar el volumen final de producción semanal, fue necesario realizar dos tratamientos para determinar la concentración más adecuada para la digestión, con la concentración 1 se obtuvo un flujo estable de 4 L/min y presión de 56,88 psi, sin embargo para la concentración 2 se obtuvo un flujo estable de 5 L/min y presión de 71,10 psi.
- Como medida preventiva frente a la posible carencia de heces porcinas, se consideró una de carga al digestor con resultados similares, para la carga diaria se obtuvo 4 L/min de flujo y 56,88 psi, y para la carga semicontinua se obtuvo un flujo de 3,5 L/min y 49,77 psi.
- El proceso de digestión anaerobia a escala piloto, constó de fases de pesado y homogenización de residuos, digestión, y combustión de biogas.
- De acuerdo a los datos obtenido el digestor mantuvo las condiciones óptimas de funcionamiento, lo que también facilitó la obtención de biogas inflamable, es decir con mayor concentración de metano a los 31 días de inicio de la operación. Y la calidad de biogas obtenida consta de un 65 % de gas metano y un 35 % de CO₂.
- El biol contiene concentraciones adecuadas de nitrógeno, carbono y fósforo, característico de un buen abono, además de ser biodegradable.
- En los análisis obtenidos se determino porcentajes de eficiencia mayores al 75 % en cuanto a la disminución de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, sólidos totales, además de una reducción notorias entre el

olor entre de las heces porcinas y el biol, sin embargo existió la presencia de microorganismos en poca cantidades, ya que la eficiencia está dada por un 99 %.

- Según los análisis estadísticos, la concentración óptima para la producción de biogas es la concentración 2 ya que con un 95 % de confianza, tiene mayor flujo de producción de biogas con un mínimo de 4,1 y un máximo de 4,7 L/min.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es importante realizar un estudio de la mezcla, con el fin de diseñar un sistema de agitación y mejorar la producción de biogas.
- Es importante realizar un estudio de la variación de temperatura en la noche para obtener así un rango de operación más específico.
- Debido al pH de la cáscara de naranja es indispensable realizar un tratamiento previo para controlar el pH de la muestra.
- De acuerdo a las variaciones de pH y su relación directa con la producción de flujo se recomienda utilizar un sistema automatizado para el control de pH.
- De la alternativa analizada en el caso de la poca disponibilidad de heces, se recomienda hacer algunas pruebas de concentración, variando pesos, para determinar las concentraciones óptimas de producción de biogas, en esas circunstancias.
- Para la época fría de la zona en la que se encuentra la empresa se recomienda colocar un aislante térmico.
- Debido a la gran cantidad de cáscara de naranja que tiene la empresa, es posible utilizar un sistema de digestión en serie o en paralelo.

CAPITULO V: CITAS BIBLIOGRÁFICAS

5.1 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, N. (2011). Diseño, construcción y operación de un digestor anaerobio piloto para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos del zoológico de Quito. Quito.
- Aparcana, S. y Jansen, A. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso “fermentación anaeróbica” para producción de biogas. Alemania.
- Bailey, N. (1985). *Statistical methods in biology*. United Kingdom.
- Buenrostro, O., Silke, C., Bernache, G., Bocco, G. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. México.
- Campos, A. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. España.
- Cardona, A., Sánchez, O., Ramirez, J. y Alzate, L. (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. Colombia.
- Castañeda, S. (2007). Efecto de control de pH, temperatura y adición de nitrógeno sobre la digestión anaerobia de residuos hortícolas. México.
- Cegarra, J., Sánchez, M., Roig, A. y Bernal, M. (1994). Sequential extraction of heavy metals from composting organic wastes .En: Etchevers, J.D. (Ed.). pp. 158-159. Transactions of the 15th international congress of soil science, Vol. 3b. International Society of Soil Science, México.
- Chamy, R. y Vivanco, E. (2007). Potencial de Biogas. Chile.
- Chinappi, I. y Jerez, A. (2009). Biodigestión anaeróbica de la pulpa de café. Propuesta de saneamiento ambiental y ahorro energético. Venezuela.
- Chugandro, R. y Manitio, G. (2010). Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
- Domínguez, P. y Ly, J. (2000). Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados. Cuba.
- East Harbour Management Services (2004). Bioenergy Assessment – Fruit and vegetable residue to energy. Nueva Zelanda.
- Esquer, R. (2009). Reciclaje y tratamiento de residuos sólidos urbanos. México.

- FAO. (1986). Estudio potencial bioenergético de desechos agroindustriales y agrícolas. Seminario Taller sobre Biogas y otras fuentes alternas de energía en el medio rural. Colombia.
- García, J. (2005). Análisis de datos en los estudios epidemiológicos IV, estadística inferencial.
- García, M. (2003). Estimación por intervalos de confianza. España.
- Gaspar, L. y Matos, A. (2007). Producción de Biogas por digestión anaeróbica de residuos vegetales. Perú.
- Gómez, X., Cuetos, M., García, A. y Morán A. (2007). Digestión anaerobia en dos fases. España.
- González, M., (1999). Seminario de caracterización de microorganismos. México.
- Gropelli, E., Muesati, J., Pampinella, B. & Giampaoli, O. (2001). Biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos en pequeñas comunidades. Argentina.
- Guevara, A. (1996). Fundamentos Básicos para el Diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de Gas y Saneamiento de efluentes. Lima.
- Heredia, A. (2010). Naranja, un estudio agroindustrial: competitividad de la cadena de valor y perspectivas del mercado. Ecuador.
- Hilbert, J. (2003). Manual para la Producción de Biogas, Instituto de Ingeniería Rural, Argentina.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: Digestores Anaerobios. Madrid.
- Jaramillo, G. y Zapata L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Colombia.
- López, C. y López O. (2009). Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Veracruzana. México.
- López, G. y Beltrán, R. (2005). Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos (RSU). Estimación del tiempo de retención dependiendo de la concentración de sólidos y de la presencia o no de inóculo. Colombia.

- Mahmood, A., Greenman, J. y Scragg A. (1998). Orange and potato peel extracts: Analysis and use as Bacillus substrates for the production of extracellular enzymes in continuous culture. United Kingdom.
- Martí, N. (2006). PHospHrous precipitation in anaerobic digestion process. Estados Unidos.
- Martín, M., Siles, J., El Bari, H. & Chica, A. (2001). Orange peel: organic waste or energetic resource?. España.
- Márquez, F. (2008). Manejo seguro de residuos peligrosos. Chile
- Monroy, O. & Viniegra, G. (1981). Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos. México.
- Navarro, P., Moral, H., Gómez, L. y Mataix, B. (1995). Residuos orgánicos y agricultura. España
- Organización panamericana de la salud (OPS). (2002). Análisis sectorial de residuos sólidos del Ecuador. Ecuador.
- Pérez, J. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros. Chile
- Potschka, J. & Acosta G. (2012). Energía limpia y fertilizante. Argentina.
- Ramírez, D. (2007). Control y eliminación de compuestos volátiles provenientes de un digestor anaerobio mediante biofiltración. México.
- Ramos, J. y Hernández, J. (2007). Implementación de un biodigestor anaerobio para la generación de energía eléctrica a partir de lodos activados, producto del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Abasolo. México.
- Razo, E. y Villafuerte, M. (2007). Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos. Ecuador.
- Rivas, O.; Faith, M. y Guillén R. (2009). Biodigestores, factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Ecuador.
- Rivera, M. (2010). Producción de abono orgánico y biogas mediante biodigestión anaeróbica de lodos activos. Chile.
- Ruiz, J. (2005). Estudio técnico y económico de un proceso industrial para la obtención de gas metano a partir de desechos orgánicos. México.

- Sánchez, M. y Pazmiño, G. (2007). Diseño y construcción de un biodigestor plástico de flujo continuo, a partir de desechos orgánicos para la Hacienda San Antonio del IASA II, perteneciente a la ESPE. Ecuador.
- Sigcha, R. (2010). Diseño de un sistema para la obtención de biol mediante residuos sólidos orgánicos generados en el cantón Joya de los Sachas. Ecuador.
- Tipán, R. y Yáñez, J. (2011). Modelo de gestión de residuos sólidos en áreas rurales. Ecuador.
- Vargas, G. (2005). Estudio de la generación de biogas, a partir de la sinergia en mezclas de algas marinas biodegradadas en un sistema de bioconversión anaerobia de dos etapas. Tesis de pregrado. Universidad Católica de Temuco. Temuco, Chile
- Vereda, A., Gómez, C. y García, F. (2006). Producción de biogas a partir de residuos vegetales (I y II). España.
- Vizquez, J. (2009). Biogas: energía recuperable, análisis energético y económico de su potencial en finca lecheras.

5.2 WEBGRAFÍA

- Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). (2004). Cultivo de naranja. [En línea] http://webmail.radiomaranon.org.pe/redmaranon/archivos/naranja_cultivo.pdf (12 julio del 2012)
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), (2003). Diagnóstico del sistema producto cítricos. [En línea] <http://www.fira.gob.mx/Nd/index.jsp> (28 agosto del 2012)
- Figueras, S., Gargallo, P., (2003) Análisis exploratorio de datos. [En línea] <http://ciberconta.unizar.es/Leccion/aed/ead.pdf> (6 febrero del 2012)
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMIH). (2012). [En línea] <http://www.inamhi.gob.ec/> (23 junio del 2012)

- Martí, J. (2008). Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. Bolivia. [En línea] <http://es.scribd.com/doc/52894858/6/Temperatura-y-Tiempo-de-Retencion>
(23 junio del 2012)
- Sosa, R., Chao, R. y Del Río, J. (1999). Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogas. Cuba [En línea] <http://www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpn/rev62/R CPP62art1.htm>
(18 septiembre del 2012)