

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Estudio de la Digestión Anaeróbica de Desechos de Fruta en la Planta
Piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas**

Pedro David Puente Alarcón

Tesis de grado presentada como requisito para
la obtención del título de Ingeniero Químico

Quito

Diciembre 2012

Universidad San Francisco de Quito

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACION DE TESIS

Estudio de la Digestión Anaeróbica de Desechos de Fruta en la Planta Piloto
del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas

Pedro David Puente

Dr. Ing. Daniela Almeida

Director de Tesis y

Miembro del Comité

Ing. Gustavo Muñoz, PhD

Miembro del Comité

Ing. César León

Miembro del Comité

Santiago Gangotena, PhD

Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, Diciembre 2012

© Derechos de Autor
Pedro David Puente Alarcón

Agradecimientos

Especialmente agradezco a aquellos que me enseñaron a dar mis primeros pasos hasta completar las grandes zancadas como la que el presente documento simboliza. Mis padres, por supuesto. Para Geovanny y Paulina que han sido guías, apoyo y soporte. Gracias por aguantar mi mal genio. Para mis hermanas Geovanna y Estefanía; les menciono porque sé que no podré encontrar mejores personas para compartir mi tiempo. A mis tíos Gustavo y Anne, Miguel Ángel y Carito, Luis, Mercedes por ser ejemplos a seguir, que se han llenado de las experiencias de mi padre así como de mi abuela Cecilia. Todos ellos y ellas han contribuido a mostrarme que con trabajo duro, los objetivos se consiguen.

A Daniela Almeida por ser una asesora de tesis memorable. Porque cuando dejé de lado el esfuerzo supo presionarme en tanto pude conseguir lo que yo podía lograr.

Por enseñarme que los límites que me he puesto son solo el inicio del camino. A Carlos Fabara por llevar adelante al Departamento de Química e Ingeniería Química del cual me siento feliz de ser parte. A todos los profesores que me han permitido aprender y en especial a Marcelo Albuja, por su gran carácter.

A los cuatro de siempre, Germán, Carlos y Jaime, que siempre han sido amigos a pesar de los años y que hemos estado para los buenos ratos y en especial para los momentos duros.

A mis amigos y compañeros de la San Francisco. Especialmente a Víctor Posligua y Anita Estrella, por haberme demostrado la generosidad y verdadera amistad. Asimismo a mis compañeros de Ingeniería Química, Roxana, Gaby, Esteban, Deisy, Carlita.

A Javier Serrano y a La Jugosa por todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Resumen

Para el presente proyecto se realiza el estudio de la digestión anaerobia de residuos de fruta producto de la extracción de su pulpa, junto con estiércol bovino en un reactor a escala piloto. Como objetivo se plantea la obtención de biogás de calidad y fertilizante conocido como biol. Se trabaja en rango mesofílico, controlando parámetros como el pH, la recirculación, la carga orgánica diaria alimentada y la cantidad de sólidos totales. Para dicho fin se realizan experimentos donde se varía la carga orgánica diaria alimentada medida en función de la materia orgánica disponible y también se cambia el tiempo de retención hidráulica. Para tener un control más profundo del estado del biodigestor se llevan a cabo mediciones de propiedades como demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (TS), sólidos orgánicos (OTS), alcalinidad y ácidos grasos volátiles (AGV). Adicionalmente, se realizan análisis microbianos y ensayos de efectividad del biol como fertilizante.

Los resultados obtenidos muestran que la carga máxima soportada por el digestor es de 2 kg DQO / m³ día con una producción de biogás de alrededor de 1000 litros por día, pero cuyo contenido de metano fue inferior al 40%. Como resultado concreto, la mejor producción cualitativa y cuantitativa de biogás se dio con carga orgánica de 1.5 kg DQO / m³ día y tiempo de retención hidráulico de 12.5 días. Se produjeron alrededor de 720 litros de biogás por día con 63% de metano. Este biogás es apto para la generación de energía eléctrica o térmica.

Abstract

The purpose of this project is the study of anaerobic digestion of fruit waste obtained from pulp extraction along with cattle manure in a pilot scale digester. The main objective is to obtain a good quality biogas and an organic fertilizer which improves the soil quality. The experiments were carried out under mesophilic conditions with constant control of properties such as pH, agitation, daily organic load fed to the digester and total dry matter contents. Consequently, the experiments consisted in the variation of daily organic charge measured as a function of organic matter available and the hydraulic retention time was varied too. Furthermore, to have a deeper control of the digester operation, the following parameters are analyzed: chemical oxygen demand (COD), total solids (TS), organic total solids (OTS), alkalinity and volatile fatty acids (VFA). In addition, microbial account was done for the organic fertilizer as well as experiments to verify its effectiveness as soil improver.

As a result, the maximum organic charge tolerated by the digester is $2 \text{ kg COD} / \text{m}^3 \text{ day}$ with an average biogas production of 1000 liters per day is obtained but under these conditions the methane content was below 40%. As a matter of fact, the best biogas production was obtained with an organic charge of $1.5 \text{ kg COD} / \text{m}^3 \text{ day}$ and a hydraulic retention time of 12.5 days. Around 720 liters per day of biogas are produced with a methane content of 63%. This value is adequate for thermal or electrical energy generation.

Tabla de Contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación del proyecto.....	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo general.....	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
2	Marco Teórico	4
2.1	Pulpa de fruta	4
2.2	Digestión anaerobia.....	4
2.2.1	Proceso de digestión anaerobia.....	4
2.2.2	Biogás	7
2.2.3	Bio-abono.....	11
2.2.4	Diseño de biodigestores anaerobios.....	14
2.2.5	Parámetros de operación de digestores anaerobios.....	20
2.3	Sustratos	25
2.3.1	Materia orgánica animal	27
2.3.2	Materia orgánica vegetal.....	27
3	Método Experimental	29
3.1	Biodigestor a escala piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas LaDEA.....	29
3.1.1	Materia prima.....	32
3.1.2	Proceso de operación del biodigestor del LaDEA	37
3.1.3	Control del proceso de operación	41
3.1.4	Tratamiento del biogás generado	44
3.1.5	Tratamiento del biol.....	47
3.2	Caracterización de la materia prima, mezcla reactiva y productos	49
3.2.1	pH.....	50
3.2.2	Producción de biogás	50

3.2.3	Demanda Química de Oxígeno	51
3.2.4	Sólidos Totales (TS)	51
3.2.5	Sólidos Orgánicos Totales (OTS)	52
3.2.6	Sólidos Totales Suspendidos (TSS) y Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS)	52
3.2.7	Alcalinidad	53
3.2.8	Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	54
3.2.9	Nitrógeno total y bioestimuladores	54
3.2.10	Análisis microbiológico	56
3.2.11	Aplicación del biol	56
3.3	Diseño de experimentos	57
4	Resultados y Discusiones	59
4.1	Caracterización de la materia prima	59
4.1.1	Desechos de fruta	59
4.1.2	Estiércol bovino	64
4.2	Operación del biodigestor del LaDEA	66
4.3	Caracterización de la Mezcla de Alimentación	70
4.4	Resultados obtenidos	74
4.4.1	Resultados de los parámetros operacionales	74
4.4.2	Resultados de los análisis de la mezcla reactiva	77
4.4.3	Caracterización del biogás	83
4.4.4	Caracterización del biol	85
4.4.5	Biosol	102
4.5	Interpretación y Evaluación de Resultados	104
4.6	Balance de masa	110
5	Conclusiones y Recomendaciones	113
6	Referencias Bibliográficas	116
7	Anexos	119
7.1	Análisis de Biol llevado a cabo en el Iniap	119
7.2	Procedimientos de análisis	119

7.2.1	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	119
7.2.2	Sólidos Totales (TS)	119
7.2.3	Sólidos Totales Orgánicos (OTS).....	119
7.2.4	Sólidos Totales Suspendidos (TSS).....	119
7.2.5	Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS).....	119
7.2.6	Alcalinidad.....	119
7.2.7	Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	119
7.2.8	Nitrógeno Total.....	119
7.2.9	Fósforo Total.....	119
7.2.10	Espectroscopia de Absorción Atómica (AA).....	119
7.3	Hojas de análisis de biol hechos en el LaDEA.....	119
7.4	Hojas de análisis de desechos de fruta hechos en el LaDEA	119

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Etapas microbiológicas de la digestión anaerobia.....	6
Tabla 2.2. Aplicaciones del biogás en energía eléctrica.....	10
Tabla 2.3. Propiedades del biol.....	12
Tabla 2.4. Composición bioquímica del biol.....	13
Tabla 2.5. Criterios para la clasificación de los reactores para digestión anaerobia.....	15
Tabla 2.6. Potenciales sustratos para digestión anaerobia y obtención de biogás.....	26
Tabla 2.7. Propiedades de los desechos de fruta.....	28
Tabla 3.1. Diseño de experimentos para la operación del digestor.....	57
Tabla 4.1. Caracterización de desechos de fruta.....	61
Tabla 4.2. Resultados de análisis de estiércol bovino.....	65
Tabla 4.3. Carga Diaria de alimentación.....	68
Tabla 4.4. Alcalinidad y AGV para experimentos realizados en el biodigestor.....	82
Tabla 4.5. Macronutrientes en el biol.....	86
Tabla 4.6. Micro y macro elementos en el biol.....	87
Tabla 4.7. Micro y macro elementos en el biol hechos en el Iniap.....	87
Tabla 4.8. Análisis de sólidos realizado al Biosol.....	102
Tabla 4.9. Composición de sedimentos en base a macro y micro elementos.....	104
Tabla 4.10. Balance de masa.....	111

Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema de un digester de modelo chino.....	16
Figura 2.2. Esquema de un digester de modelo hindú.....	17
Figura 2.3. Aporte energético del biogás por años en Europa.....	18
Figura 2.4. Diagrama de proceso de flujo para una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás.....	19
Figura 2.5. Planta de co-generación a partir de biogás.....	20
Figura 3.1. Biodigester a escala piloto del LaDEA.....	30
Figura 3.2. Reactor para digestión anaerobia del LaDEA.....	32
Figura 3.3. Desechos de tomate de árbol y pepas de maracuyá.....	33
Figura 3.4. Picadora para trituración y filtración de desechos de fruta marca Cremasco.....	34
Figura 3.5. Cribas para trituración y filtración de materia prima.....	35
Figura 3.6. Desechos de tomate de árbol triturados y filtrados.....	36
Figura 3.7. Estiércol bovino filtrado.....	37
Figura 3.8. Tanque de alimentación.....	39
Figura 3.9. Bomba centrífuga.....	40
Figura 3.10. Intercambiador de calor con serpentín y resistencia.....	42
Figura 3.11. Controlador automático de temperatura y nivel.....	43
Figura 3.12. Salida del biogás generado por el biodigester.....	45
Figura 3.13. Contador de gas marca Keuk Dong.....	46
Figura 3.14. Almacenamiento del biol para venta al por menor.....	48
Figura 3.15. Almacenamiento del biol para venta para plantaciones.....	48
Figura 3.16. Almacenamiento del biol previo al envase en el LaDEA.....	49
Figura 4.1. Valores de pH para desechos de fruta.....	62

Figura 4.2. Análisis de sólidos totales y sólidos totales orgánicos (OTS) para desechos de fruta.....	63
Figura 4.3. Demanda Química de Oxígeno para desechos de fruta.....	64
Figura 4.4. Volumen alimentado al biodigestor del LaDEA durante los experimentos.....	69
Figura 4.5. DQO de la mezcla de alimentación del biodigestor del LaDEA.....	70
Figura 4.6. Sólidos totales y sólidos totales orgánicos de mezcla de alimentación del biodigestor del LaDEA.....	72
Figura 4.7. pH de la mezcla de alimentación durante los experimentos en el biodigestor del LaDEA.....	73
Figura 4.8. Temperatura durante la operación del biodigestor del LaDEA.....	75
Figura 4.9. pH en el digestor durante los experimentos en el digestor del LaDEA.....	76
Figura 4.10. Producción de biogás en el digestor del LaDEA.....	77
Figura 4.11. Demanda Química de Oxígeno para la mezcla reactiva.....	78
Figura 4.12. Sólidos totales en la mezcla reactiva extraída del digestor del LaDEA.....	79
Figura 4.13. Biosol obtenido luego de filtrar el biol extraído del biodigestor del LaDEA.....	80
Figura 4.14. Sólidos Orgánicos Totales en la mezcla reactiva extraída del biodigestor del LaDEA.....	81
Figura 4.15. Análisis cualitativo de biogás.....	83
Figura 4.16. Porcentaje de metano en el biogás producido	85
Figura 4.17. Primer análisis microbiológico de coliformes totales y E. Coli en biol almacenado (izquierda) y biol fresco (derecha).....	89
Figura 4.18. Segundo análisis microbiológico de coliformes totales y E. Coli en biol almacenado (izquierda) y biol fresco (derecha).....	90

Figura 4.19. Semillas de tomate.....	92
Figura 4.20. Esquema de diseño de experimento para aplicación de biol. (CB con biol, SB sin biol).....	93
Figura 4.21. Primera repetición del experimento de aplicación de biol. Día 1.....	94
Figura 4.22. Segunda repetición del experimento de aplicación de biol. Día 1.....	94
Figura 4.23. Tercer tipo de tierra. Primera y segunda repetición. Día 1.....	95
Figura 4.24. Experimento de aplicación de biol. Día 8.....	96
Figura 4.25. Repetición de experimento de aplicación de biol. Día 8.....	96
Figura 4.26. Tercer tipo de tierra. Experimento de aplicación de biol. Día 9.....	97
Figura 4.27. Primer tipo de tierra. Experimento y duplicado. Día 20.....	98
Figura 4.28. Segundo tipo de tierra. Experimento y duplicado. Día 20.....	99
Figura 4.29. Tercer tipo de tierra. Experimento y duplicado. Día 14.....	100
Figura 4.30. Plantas en segundo tipo de tierra después de la prueba de resistencia (1) y después del proceso de recuperación (2)	101
Figura 4.31. Biodigestor con medidor de nivel antes y después de cambio de manguera.....	103
Figura 4.32. Relación de OTS ingresado versus OTS salida.....	106
Figura 4.33. Relación de producción de metano normalizada y porcentaje de degradación de OTS con respecto al tiempo de residencia.....	107
Figura 4.34. Relación de producción de biogás normalizada y pH con respecto al tiempo de residencia.....	108
Figura 4.35. Relación de producción diaria de gas por volumen de reactor y producción diaria de gas por kg DQO alimentado diario con respecto al tiempo de residencia.....	109

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La necesidad de energía a nivel mundial ha llevado a la explotación excesiva de recursos naturales tales como árboles para madera, minas de carbón y yacimientos petroleros. Estos últimos han sido la fuente de energía y de riqueza para países como el Ecuador. Como consecuencia, la economía de dichos países se ve amenazada en momentos cuando el precio de los combustibles fósiles se vea afectado. Gracias a la dependencia que se ha generado a nivel internacional, actualmente se ha visto que su alcance incluso ha llegado a iniciar conflictos armados y que las empresas especializadas en combustibles fósiles tengan gran influencia en temas políticos y económicos (1).

Durante los últimos cuarenta años, el uso de fuentes de energía fósil a nivel mundial ha tenido una tendencia creciente. Para Junio del 2012, el precio del barril del petróleo se encontraba a \$81.80 (2). El gas natural también usado como fuente de energía es una mezcla de metano con otros gases que se encuentra en fuentes subterráneas. Su precio para Junio del 2012 se encontraba en 2.517\$ por millón de BTU generado (MMBTU) (2).

Debido a que las reservas de petróleo son limitadas, se han llevado a cabo investigaciones de diversos tipos de energías alternativas que presenten soluciones eficaces. Consecuentemente, se ha desarrollado la energía solar, eólica, geotérmica y últimamente la proveniente de biomasa (3).

El Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito (LaDEA USFQ) ha buscado desde el año 2008 desarrollar y profundizar el estudio de distintos tipos de energías alternativas. En el campo de la energía a partir de biomasa se han llevado adelante estudios de digestión anaerobia. Específicamente en el año 2008 se construyó el biodigestor anaerobio a escala piloto del LaDEA. En el mismo se han realizado estudios de digestión de residuos de brócoli con estiércol de ganado bovino. Asimismo, se han hecho estudios de digestión anaerobia con desechos de fruta a nivel de laboratorio para poder comprobar la producción de biogás y el contenido de metano. Los experimentos a nivel de laboratorio han demostrado que la utilización de desechos de

fruta como materia prima para digestores es viable para la obtención de biogás y presenta una buena opción de reducción de desechos sólidos (4).

1.2 Justificación del proyecto

La necesidad de encontrar fuentes alternas cuyo costo sea reducido y que sean ambientalmente viables, han llevado a la investigación de energía a partir de biomasa. La tendencia mundial en el desarrollo de biocombustibles, como bioetanol o biodiesel, proporcionan una respuesta a esta búsqueda. Pero dado que las materias primas son las mismas que las necesarias para la alimentación de la población mundial, su utilización ha sido cuestionada. La digestión anaerobia presenta la alternativa perfecta al ser baja en costos y amigable ambientalmente.

Adicionalmente, se tiene que los desechos de fruta generados en plantas de procesamiento industrial, permiten la aplicación de esta tecnología por lo cual es indispensable llevar adelante el estudio de la digestión anaerobia de desechos de fruta con estiércol de ganado bovino en el digestor a escala piloto del LaDEA para poder implementar los resultados a nivel industrial. Asimismo, se busca encontrar los parámetros que pudiesen ser cuellos de botella durante la obtención de biogás.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general consiste en encontrar los parámetros de operación óptima del biodigestor a escala piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energía Alternativas (LaDEA) con desechos de fruta provenientes de la extracción de pulpa de fruta y con desecho orgánico animal proveniente de estiércol de ganado vacuno. Una vez logrado esto, se busca maximizar la producción y la cantidad de metano en el biogás, además que el biol producido sea estable y tenga propiedades fertilizantes.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Incrementar sistemáticamente la carga orgánica diaria en el biodigestor.
- b) Llevar un monitoreo de los parámetros que influyen en la producción de biogás de calidad como son la temperatura, el pH y el caudal de recirculación.
- c) Analizar propiedades importantes dentro de la mezcla de alimentación y del biol producido con el fin de comprender el funcionamiento del biodigestor.
- d) Controlar los parámetros para obtener una producción alta de biogás al mismo tiempo que éste sea de buena calidad.
- e) Realizar un análisis del biol obtenido en plantas y comprobar su efectividad como fertilizante.

2 Marco Teórico

2.1 Pulpa de fruta

La extracción de las pulpas de fruta es una tecnología que consiste en la selección de las frutas para obtener la parte comestible, la cual es la parte comercial, con el fin de procesarla y congelarla para usarla sin necesidad de generar desechos por parte del consumidor. Presenta una gran ventaja ya que al congelar la pulpa, el jugo se puede preparar fácilmente mediante el descongelamiento de la misma. La ventaja de este proceso es que se mantiene el sabor de la fruta, el color y el olor.

Durante el proceso de obtención de la pulpa de fruta se producen residuos que consisten en las cáscaras y semillas de las mismas, las cuales no tienen utilidad comercial.

Ecuador es un productor de frutas exóticas cuya utilización puede ser para exportación a lugares donde estas frutas no son cultivadas como Estados Unidos, Europa y Japón (5). Las frutas de las cuales se puede obtener la pulpa son, entre otras, la mora, el tomate de árbol, la frutilla, la maracuyá, el mango, la guayaba y la guanábana. Siendo el país

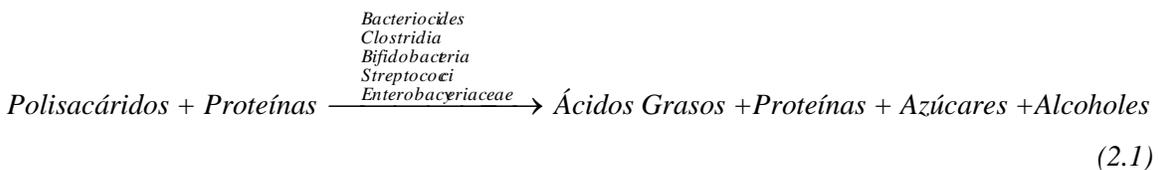
2.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual grupos de microorganismos degradan materia orgánica en ausencia de oxígeno con la obtención de biogás como producto, así como de un efluente líquido conocido como biol que tiene aplicaciones en el suelo. La ventaja de este proceso es que el biogás producido posee entre 50-70% de metano, con lo que puede ser usado como fuente de energía dentro de procesos de calefacción de edificios, generación de energía eléctrica o calentamiento de agua y como alternativa a la quema de combustibles de origen fósil (6).

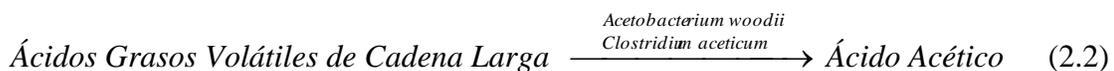
2.2.1 Proceso de digestión anaerobia

El proceso bioquímico de transformación de materia orgánica animal y vegetal en biogás y biol se puede dividir en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El primer paso conocido como hidrólisis consiste en la partición de las

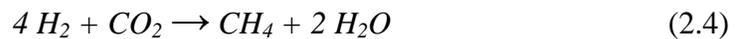
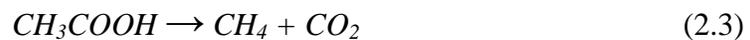
cadenas largas o polímeros de carbono, hidrógeno y nitrógeno en unidades procesables o monómeros por parte de enzimas hidrolíticas producidas por bacterias celulosíticas; las enzimas producidas por estas bacterias son celulasas, celobiasa, xilanasas, amilasa, lipasa y proteasa (7). El segundo paso consiste en la transformación de lípidos y proteínas en ácidos grasos, aminoácidos, azúcares y alcoholes. Este proceso es llevado a cabo por bacterias fermentativas (1). Algunos autores, entre ellos Fragela y Hilbert, consideran a la hidrólisis y acidogénesis como un solo paso dentro de la obtención de biogás debido a que el objetivo de ambos procesos es reducir de tamaño las moléculas grandes y hacerlas asimilables por los microorganismos encargados de la acetogénesis y metanogénesis (1) (8). Dentro de estos procesos de ruptura de cadenas largas, intervienen bacterias estrictamente anaeróbicas como *Bacteriocides*, *Clostridia* y *Bifidobacteria*. Incluso algunas bacterias anaeróbicas facultativas, es decir que pueden llevar a cabo su metabolismo en ambiente tanto anaerobio como aerobio, toman parte en este proceso tales como *Streptococci* y *Enterobacteriaceae* (7). En la ecuación 2.1 se presentan, en forma de reacción, los procesos que ocurren durante los primeros pasos de hidrólisis y acidogénesis.



La acetogénesis consiste en la transformación de los productos de la acidogénesis en ácidos grasos de cadenas cortas, principalmente ácido acético, teniendo como intermediarios a moléculas como propionato, butirato y valerato que provienen de los ácidos grasos largos. Las bacterias homoacetogénicas involucradas son *Acetobacterium woodii* y *Clostridium aceticum* (7). En la ecuación 2.2 se presenta la reacción principal y más importante del proceso de acetogénesis que consiste en la obtención del ácido acético.



La metanogénesis es el último paso de la degradación anaerobia y consiste en la conversión de los ácidos grasos en metano y dióxido de carbono por medio de las bacterias metanogénicas, siendo el principal reactivo el ácido acético. Existe también la formación del hidrocarburo a partir de hidrógeno y dióxido de carbono pero su aporte a la producción total de biogás es muy baja (1). Las bacterias que participan en estas reacciones son estrictamente anaerobias y son *Methanosarcina barkeri*, *Metanomonococcus mazei* y *Methanotrix soehngenii* (7). En las ecuaciones 2.3 y 2.4 se presentan las reacciones para el proceso de obtención de metano que es el componente más importante del biogás.



Todos estos procesos de metabolismo celular requerido para la digestión anaerobia, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Etapas microbiológicas de la digestión anaerobia

Proceso	Bacterias	Objetivo	Productos
Hidrólisis	Celulosíticas	Romper polímeros a unidades útiles (monómeros)	Lípidos Proteínas
Acidogénesis	Fermentativas	Transformar lípidos y proteínas en cadenas más cortas.	Ácidos grasos Aminoácidos Alcoholes Azúcares
Acetogénesis	Acetogénicas	Transformar ácidos grasos y aminoácidos en ácido acético y amoníaco.	Ácido Acético Amonio/Amoníaco Dióxido de Carbono Hidrógeno
Metanogénesis	Metanogénicas	Transformar el ácido acético en metano.	Metano Dióxido de Carbono Hidrógeno Ácido Sulfhídrico

Como resultado se obtiene biogás el cual consiste en una mezcla de metano (CH₄), y dióxido de carbono (CO₂). Pequeñas fracciones de amoníaco (NH₃) y ácido sulfhídrico

(H₂S) también están presentes así como humedad. Este biogás es de utilidad energética pues su ocupación actual es para calefacción de casa, graneros y establos y se puede aplicar a la generación de energía eléctrica utilizando un motor generador de gas.

El subproducto del proceso es un líquido conocido como bio-abono. La propiedad de este es que puede ser usado como fertilizante debido a su contenido de macro y micronutrientes los cuales contribuyen al crecimiento de plantas y enriquecimiento del suelo. Su utilización es más beneficiosa que el uso del estiércol como tal ya que no acidifica los suelos y además conserva todos los nutrientes inorgánicos presentes en los desechos vegetales y animales. Además reduce la cantidad de gases de efecto invernadero en las producciones ganaderas (GEI).

La presencia o ausencia de amoníaco en el gas depende del pH que se tenga en el interior del biodigestor. A pH alto va a predominar la presencia de amoníaco (gas) y a pH bajo, el amonio estará principalmente en solución en el biol. Lo que se busca es que exista mayor presencia de amonio en el biol ya que es más útil para las plantas que el amoníaco como parte del biogás (9).

2.2.2 Biogás

2.2.2.1 Propiedades del biogás

El producto más valioso de la digestión anaerobia es el biogás. Está compuesto principalmente por metano en un rango de 50% a 70% en volumen, entre un 20% a 40% de dióxido de carbono y el resto con otros gases como el ácido sulfhídrico, amoníaco y agua (7).

El metano es el compuesto a ser utilizado energéticamente. El calor de combustión del metano es de 55.5401 kJ/g (10). La reacción de combustión para el metano es la siguiente:



Al ser una molécula corta, presenta la ventaja de combustionarse de forma completa. Esto lo vuelve una mejor opción que los hidrocarburos de origen fósil cuya combustión incompleta genera monóxido de carbono (CO), el cual puede ser tóxico y produce mayor cantidad de GEI (1).

El otro componente mayoritario del biogás es el dióxido de carbono el cual no presenta ninguna cualidad como fuente de energía. Sin embargo, su presencia dentro del biodigestor es importante pues contribuye con la capacidad buffer del mismo para amortiguar los cambios de pH.

La presencia de amoníaco dentro del gas es importante pues es un parámetro indirecto para medir el funcionamiento de un biodigestor. Se busca que la mayor parte del nitrógeno presente en el biodigestor, se encuentre disuelto como amonio dentro del biodigestor. Esto se consigue con pH menores a 9 (11). Durante la operación del biodigestor es poco probable encontrar valores de pH mayores a 9. Pero de darse el caso, se debe regular que el pH regrese al rango de operación. Cuando el valor de este parámetro es elevado, el nitrógeno se encontrará en forma de amoníaco, el cual es un inhibidor en el metabolismo de las bacterias y reduce la producción de biogás. La ecuación de equilibrio para el amoníaco es la siguiente (3):



El pKa para esta reacción es de 9.25. Por ello, a pH elevado, la presencia de amoníaco se incrementa (3). Por lo tanto, la cantidad de amoníaco en el biogás debe ser reducida, con lo cual se asegura que el nitrógeno esté presente en el biol y disponible como nutriente para las plantas. A mayor temperatura, la presencia de amoníaco libre se incrementa. Por ello, es importante controlar el pH y temperatura en el digestor. La concentración de amoníaco en el interior del digestor debe ser mantenida menor a 80 mg/L para que no haya inhibición de las bacterias metanogénicas (9). Otro autor ha sugerido que la concentración de amoníaco en el interior del digestor debe ser de 200 mg/L como máximo y se han hecho estudios en donde se ha concluido que la producción de metano se redujo a la mitad con concentraciones totales de amoníaco entre 1.7 – 14 g/L (12).

Otro componente del biogás es el ácido sulfhídrico (H_2S). Esta molécula no tiene aportación a la generación de energía. Su presencia en el biogás depende del tipo de sustrato que se haya utilizado en la biodigestión. El recorrido del mismo por tuberías y equipos de combustión puede ser perjudicial por ser corrosivo. Para la producción de biogás a partir de residuos de cosecha o cultivos energéticos conjuntamente con estiércol vacuno, se puede encontrar valores entre 100 y 3000 ppm de H_2S en el biogás. Para la operación de sistemas generadores combinando calor y electricidad, se debe reducir este valor a no más de 250 ppm para evitar la corrosión de los mismos (7).

Los mecanismos para la remoción de este componente del biogás son diversos; por ejemplo, se puede oxidar el ácido sulfhídrico mediante acción bacteriana ya sea en el biogás recién salido del digestor o dentro de la cámara de gas del digestor mismo. Las bacterias útiles para dicho proceso pueden ser fototróficas o también llamadas *green sulfur bacteria* (GSB) como *Cholorobium limícola* que transforma el ácido sulfhídrico en azufre elemental. Para ello requiere únicamente luz, dióxido de carbono y microelementos. Son bacterias estrictamente anaerobias (13). Otro método es mediante una columna de lavado donde se manda el biogás hacia arriba y en contracorriente una solución para lavar el ácido sulfhídrico y proveer nutrientes a los microorganismos que crecen en las paredes de la columna (7). Finalmente, se puede utilizar una solución de hierro para atrapar el ácido sulfhídrico. Esta solución contiene hidróxido de hierro el cual atrapa al ácido sulfhídrico y reaccionan para poder formar sulfuro de hierro. El hidróxido puede ser recuperado si se expone al sulfuro al aire ya que es una reacción reversible (8).

2.2.2.2 Generación de energía a partir del biogás

La energía se produce mediante generadores que pueden ser exclusivos para biogás o mediante generadores que funcionan con biogás y combustible. Los primeros resultan muy costosos debido a adaptaciones que deben ser realizadas. Otros métodos que pueden utilizarse para la generación de energía pueden ser mediante turbinas de microgás o celdas de combustible. Estos métodos presentan la desventaja de bajas eficiencias para el primero y requerimiento de un gas muy limpio para el segundo. Por ello, ambas

tecnologías son más costosas que los sistemas generadores de calor y electricidad. (7) Estos sistemas son conocidos con el nombre de *combined heat power station* (CHP). Generan electricidad, pero a raíz de la necesidad de mantener una temperatura constante, se deben utilizar intercambiadores de calor que sirven para incrementar la temperatura del agua (14).

En países de Europa se ha incorporado el biogás purificado al gas natural para aplicaciones domésticas y en el transporte. El uso del biogás requiere un estándar de 95% de metano para lo cual se debe retirar el dióxido de carbono. Métodos de remoción consisten en el uso de solventes orgánicos así como de filtros con carbón activado, tamices moleculares y destilación criogénica (7).

El uso de biogás como fuente de energía puede llevarse a cabo en aparatos de uso diario. La siguiente tabla muestra las aplicaciones más comunes:

Tabla 2.2. Aplicaciones del biogás en energía eléctrica (8)

Artefacto	Consumo	Rendimiento (%)
Quemador de Cocina	300 – 600 L/h	50 – 60
Lámpara (60W)	120 – 170 L/h	30 – 50
Heladera 100 L	30 – 75 L/h	20 – 30
Motor a gas	0.5 m ³ /kWh	25 – 30
Infrarrojo 200 kW	30 L/h	95 – 99
Co-generador 1kW : 2 kW Elect : Calor	0.5 m ³ /kWh	>90

El mayor provecho del biogás se saca a partir de aplicaciones que impliquen el uso directo de la energía liberada por la combustión del metano; la cantidad de energía aprovechable es bastante alta, por lo que el biogás constituye una alternativa muy viable.

Los co-generadores por su parte implican la modificación de motores de combustión de hidrocarburos como los de Ciclo Otto o de Ciclo de Diesel en donde se debe agregar una fracción de gasolina, kerosene o diesel y luego se la puede ir reduciendo paulatinamente para incrementar la combustión de biogás (8).

2.2.3 Bio-abono

2.2.3.1 Propiedades del bio-abono

A partir de la digestión anaerobia de materia orgánica e inorgánica se obtiene el biogás que es el producto más valioso. El subproducto es un efluente líquido que puede presentar característica de sólido o lodo de acuerdo al sustrato y el proceso utilizado. Este efluente es conocido como bio-fertilizante. Este está constituido los residuos de la degradación de la materia orgánica a biogás (1).

Las ventajas en la utilización de este bio-abono son que mejora la absorción de nutrientes por parte de las plantas, de ahí que mejore el crecimiento de las mismas reflejado en tallo, frutos y raíces. Se puede realizar la separación entre las partes sólida y líquida de este bio-abono, las cuales se conocen con el nombre de “Biosol” y “Biol”, respectivamente. Se conoce que entre el 85 y 90% de la materia que ingresa en el biodigestor sale en forma de lodo, del cual el 90% corresponde a la fase líquida o Biol y el 10% restante corresponde a la fracción sólida o Biosol. Esta composición varía de acuerdo al tipo de sustrato utilizado, así como de las condiciones de operación del digestor (15).

La Tabla 2.3 presenta la composición de cuatro diferentes tipos de biol. Las características de cada uno de ellos dependen del tipo de sustrato utilizado para la digestión.

Tabla 2.3. Propiedades del biol (15)

Parámetro	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4
Sustrato	Estiércol de ganado vacuno	Estiércol con restos de comida	Hojas, frutos, tallos de banano	Estiércol de ganado vacuno
pH	7.96	8.1	-	6.7 – 7.9
Materia Seca [%]	4.18	4.2	-	1.4
Nitrógeno Total [g/kg]	2.63	2.4	0.2	0.9
NH ₄ [g/kg]	1.27	1.08	-	-
Fósforo [g/kg]	0.43	1.01	0.076	4.8
Potasio [g/kg]	2.66	2.94	4.2	2.9
Calcio [g/kg]	1.05	0.5	0.056	2.1
Magnesio [g/kg]	0.38	-	0.131	0.135
Sodio [g/kg]	0.404	-	2.1	-
Azufre [mg/kg]	-	-	6.4	0.33
Carbono [g/kg]	-	-	1.1	2.3 – 3
Aluminio [mg/kg]	-	-	0.04	-
Boro [mg/kg]	-	-	0.56	-
Zinc [mg/L]	-	-	-	0.05

El aporte extra del biol como fertilizante proviene de la presencia de hormonas vegetales de crecimiento las cuales son subproductos del metabolismo de las bacterias requeridas para la digestión anaerobia. De acuerdo con Aparcana y Jansen (15) el biol contiene las siguientes sustancias químicas no presentes en el compost:

Tabla 2.4. Composición bioquímica del biol (15)

Componente	Cantidad (ng/g)
Ácido Indol Acético	9.0
Giberelina	8.4
Purinas	9.3
Tiamina (Vitamina B1)	259.0
Riboflavina (Vitamina B2)	56.4
Ácido Fólico	26.7
Ácido Pantoténico	142.0
Triptófano	26.0
Cianocobalamina (Vitamina B12)	4.4
Piridoxina (Vitamina B6)	8.6

Dentro de estos compuestos químicos, existen fitohormonas que permiten el desarrollo saludable de las plantas. Como muestra de ello se ha comprobado que las raíces de las plantas que han sido abonadas con biol, se muestran más grandes y en mayor cantidad.

Por otra parte, la parte sólida del bio-abono o Biosol, es una fracción reducida al ser comparada con el volumen de biol que se obtiene durante la operación de un biodigestor. Su uso difiere del biol ya que debe ser mezclado con compost para que su acción sobre el suelo y para las plantas sea efectiva (15).

2.2.3.2 Ventajas en el uso del bio-abono

Tanto el biol como el biosol presentan una serie de ventajas y beneficios agrícolas y ambientales, las cuales se presentan a continuación (15).

El biol presenta las siguientes ventajas:

- Ayuda al intercambio catiónico en el suelo con lo que los nutrientes están más disponibles para las plantas.
- Mantiene la humedad del suelo creando un ambiente adecuado para el crecimiento de las plantas, además de incrementar la porosidad del suelo.
- Puede ser rociado al ser líquido. Incluso puede mezclarse con agua para ser utilizado en sistemas de riego.
- Al poseer las hormonas vegetales de crecimiento o fitohormonas, promueve el crecimiento óptimo de las raíces de las plantas, lo cual culmina con un mejoramiento de la base foliar (hojas), mejoramiento de la floración y vigorización de la semilla.
- El nitrógeno que ingresa en el biodigestor lo hace de forma orgánica, transformándose en nitrógeno amoniacal, el cual es más aprovechable para las plantas.

La parte sólida del bio-abono posee las siguientes ventajas (15):

- Los suelos arenosos se cohesionan de mejor manera, con lo cual se retienen los nutrientes en el suelo.
- Al mejorar la porosidad del suelo, permite una mejor ventilación del mismo.
- En comparación con el estiércol y con el compost, la cantidad requerida del mismo por hectárea de suelo cultivable es mucho menor.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que pueden afectar al desarrollo apropiado de las plantas.
- El bio-abono sólido posee mejor disponibilidad de los nutrientes que el estiércol al ser producto de la degradación del mismo.

2.2.4 Diseño de biodigestores anaerobios

Los reactores necesarios para que la digestión anaerobia se lleve a cabo, son llamados biodigestores. Estos recipientes tienen la capacidad de almacenar la materia orgánica

conjuntamente con las bacterias para que la misma sea degradada a biogás y bio-abono. La característica más importante de este tipo de reactores radica en la necesidad de mantener un ambiente sin oxígeno para no inhibir el crecimiento y la acción de las bacterias anaeróbicas.

Se puede clasificar a los biodigestores acuerdo a distintos parámetros los cuales deben ajustarse a distintos factores como la disponibilidad de materia orgánica, el tipo de la misma, condiciones climáticas entre otros. Entre los principales se tiene:

Tabla 2.5. Criterios para la clasificación de los reactores para digestión anaerobia (8)

Parámetro	Tipos
Carga	<ul style="list-style-type: none"> - Batch - Continuo o semicontinuo
Intensidad de mezcla	<ul style="list-style-type: none"> - Mezcla Completa - Mezcla Parcial - Sin mezcla
Manejo de Sustrato	<ul style="list-style-type: none"> - Contacto Anaeróbico - Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) - Lecho Fluidizado - Filtro Anaeróbico
Manejo Bioquímico	<ul style="list-style-type: none"> - Una etapa - Multietapa
Dirección del flujo	<ul style="list-style-type: none"> - Flujo ascendente - Flujo descendente

El diseño de un biodigestor se hace en función del tipo de sustrato con el que se esté trabajando, así como la energía disponible para su operación. Existen dos tendencias marcadas para el diseño de digestores: modelos rurales y tecnologías industriales.

Dentro de los modelos rurales de digestores anaerobios se encuentra el modelo chino y el modelo hindú.

El modelo chino tiene un diseño de esfera o semiesfera donde el gas queda atrapado bajo presión. Esta se aumenta o disminuye mediante la manipulación del nivel de líquido en la hidrocámara. El modo de operación consiste en añadir el material orgánico vegetal con desecho orgánico animal hasta un 70% de la capacidad del biodigestor. Se lo alimenta de forma continua durante 120 días luego de los cuales se realiza la descarga total para reiniciar el proceso (8).

En la figura 2.1 se presenta el esquema de un digestor chino en donde se tiene al digestor con la hidrocámara que empuja el gas hacia arriba dependiendo de la materia que se adicione en el canal de ingreso y la que se retire por el tanque de rebalse.

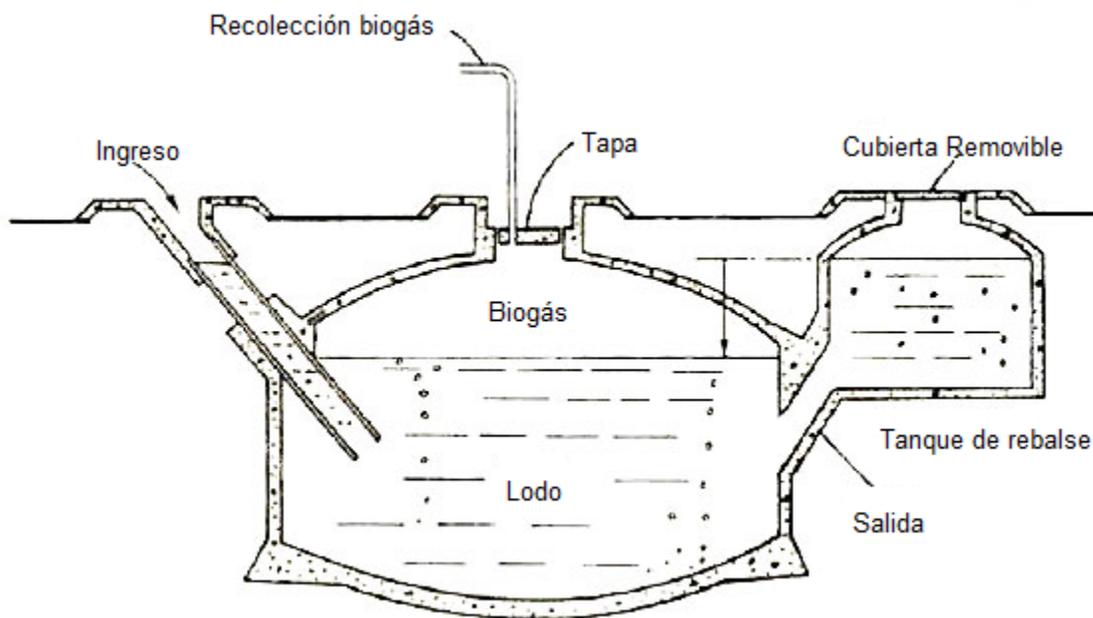


Figura 2.1. Esquema de un digestor de modelo chino (16)

En el modelo hindú se tiene un recipiente cilíndrico sobre el cual flota un gasómetro donde se recoge el gas a presión constante, pero volumen variable. El bio-abono es retirado mediante rebalse. Su alimentación es continua y el vaciado total del biodigestor debe darse únicamente cuando existan problemas de obstrucción o sea necesaria la limpieza del mismo. Existen muchas variaciones de este modelo y el costo del mismo es

más elevado que el chino debido al gasómetro flotante (8). En la figura 2.2 se presenta un esquema del funcionamiento del digester en donde se alimenta por el pozo de mezclado, existe el rebalse de la pared de división y se recoge el bioabono por el pozo de salida.

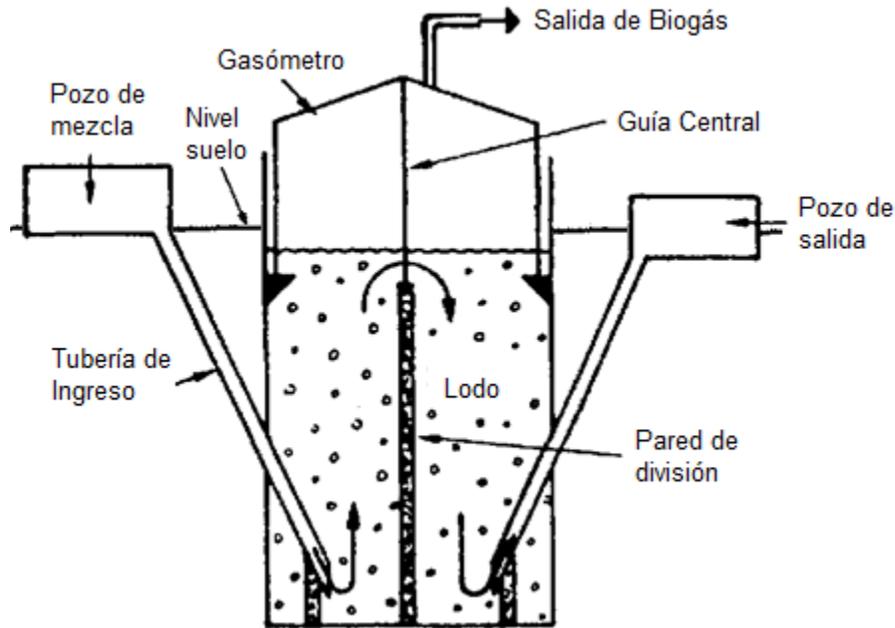


Figura 2.2. Esquema de un digester de modelo hindú (17)

Las tecnologías actuales de digestores anaerobios se han ido desarrollando hasta contar con sistemas muy sofisticados.

La efectiva producción de biogás y la presencia de desechos orgánicos, ha hecho que la digestión anaerobia se vuelva una forma alterna de producir energía y no eliminar los desechos de forma directa, sino aprovechándolos lo más posible. Actualmente, esta tecnología de digestión anaeróbica se aplica en universidades y puede ser utilizada como alternativa energética por las autoridades locales, siendo beneficiados países como Alemania, España, Italia, Suecia, Finlandia, Nueva Zelanda entre otros (18). En Europa, por ejemplo, la producción de biogás se ha visto incrementada con el pasar de los años. La Asociación Europea de Industrias de Biomasa (EUBIA), presenta el reporte de que el aporte energético del biogás tiene una tendencia creciente como muestra la Figura 2.3.

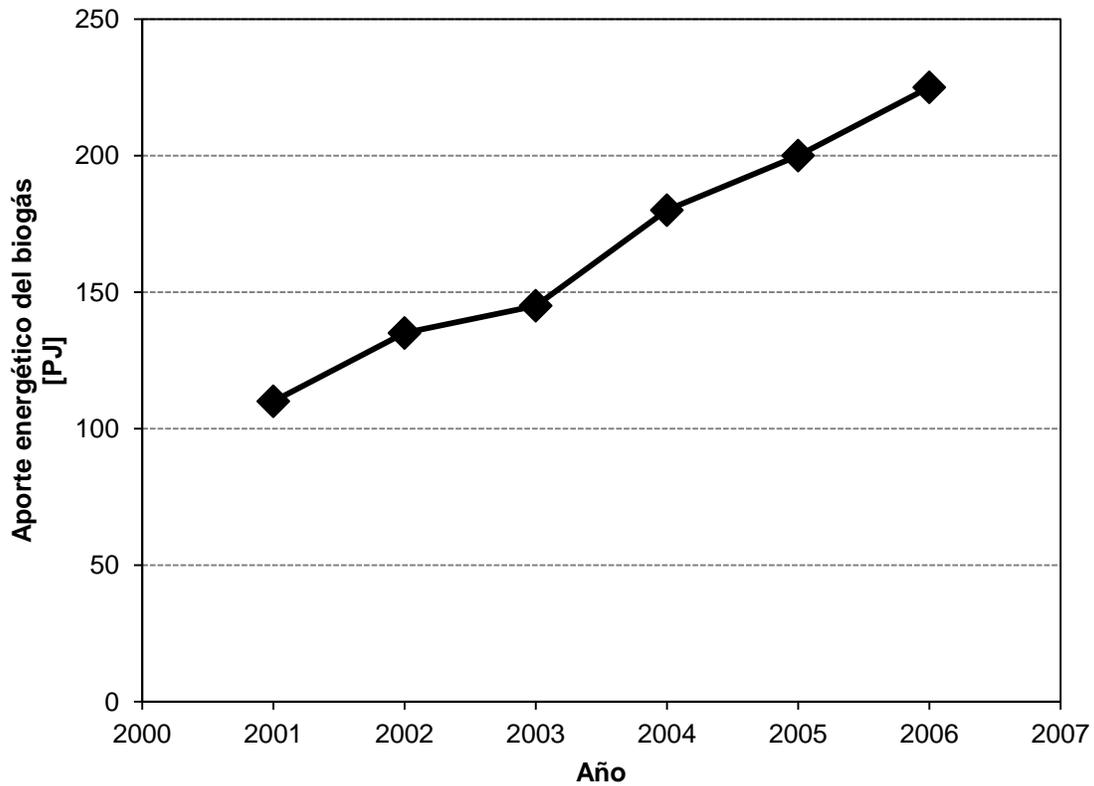


Figura 2.3. Aporte energético del biogás por años en Europa (18)

La cantidad de energía que se cuenta por aporte del biogás está expresada en unidades de Petajoules el cual es 10^{15} Joules.

La construcción de plantas de digestión anaerobia se basa en el diseño de los sistemas para el manejo y preparación de materia prima, el biodigestor en sí y una última etapa de combustión y generación eléctrica a partir del biogás, como muestra la figura 2.4 (19).

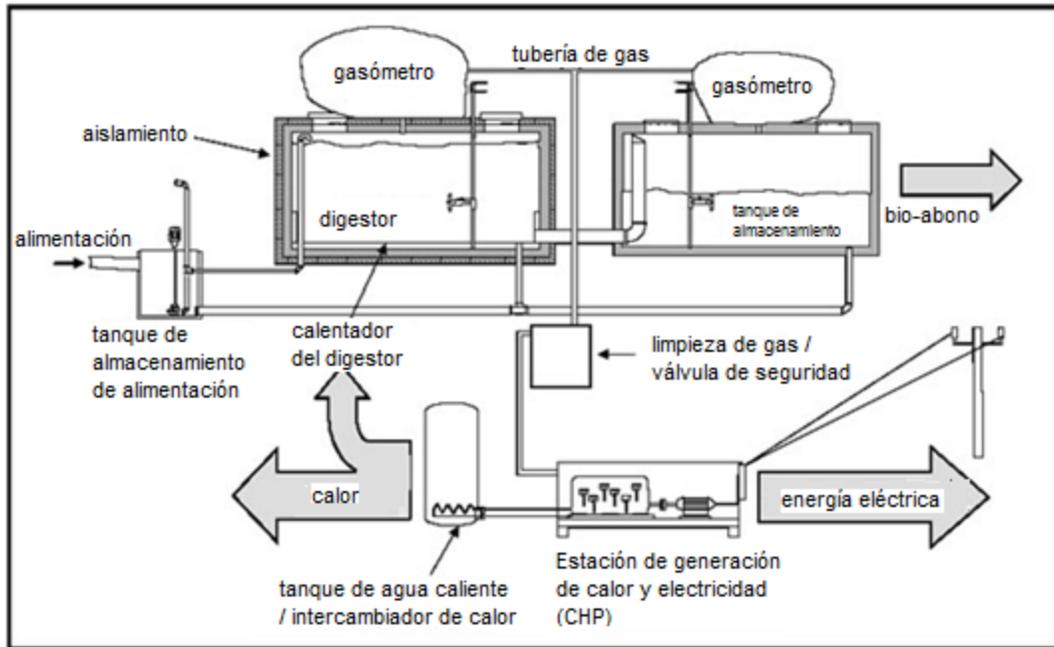


Figura 2.4. Diagrama de proceso de flujo para una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás (19)

El diseño de los biodigestores tecnificados no se asemejan a los digestores chino e hindú que son construidos bajo tierra y tienen aplicaciones básicas. El gas, por ejemplo, según se observa en la figura 2.4, ya no se almacena directamente en el digestor sino que continuamente es transportado al sistema de limpieza para que su combustión sea ininterrumpida y se genere la electricidad deseada. En la figura 2.5 se muestra la planta construida sobre el nivel del suelo, donde se observan digestores a escala industrial. Esta planta se encuentra en Dinamarca.



Figura 2.5. Planta de co-generación a partir de biogás (9)

2.2.5 Parámetros de operación de digestores anaerobios

La operación de los biodigestores debe contemplar el monitoreo y control de varios parámetros. Los más importantes comprenden el crecimiento y mantenimiento de la población bacteriana con el fin de llevar a cabo la biodigestión anaerobia de mejor manera con mayor producción de biogás y de mejor calidad. Existen otros parámetros que deben ser medidos, pero como indicadores del funcionamiento del biodigestor. Entre los más importantes se encuentran:

2.2.5.1 Valor de pH

El valor de pH es un indicador del estado de funcionamiento del biodigestor. El valor del mismo debe estar en el rango entre 6.5 hasta 7.5. Esto quiere decir que la operación del biodigestor debe ser a pH neutro para tener actividad bacteriológica óptima y que la producción de biogás sea la máxima posible. De ordinario, el pH de la alimentación es menor a 7 con lo cual se debería tener una operación ácida dentro del biodigestor. El pH neutro se logra mediante el efecto buffer que tiene el biol en el interior del reactor; gracias a ello se puede manejar el pH deseado. Sin embargo, existen caídas en el pH del

sistema que deben ser reguladas mediante la adición de sustancias que eleven el valor de este parámetro. Los motivos por los cuales el pH en el interior de un biodigestor puede bajar son:

- Exceso de alimentación o sobrecarga de materia orgánica alimentada.
- Cambios bruscos de temperatura.

La regulación de pH en el interior del biodigestor cuando éste ha descendido, se lo hace mediante la adición de una solución básica a la mezcla de alimentación. Otra forma es mediante la adición de carbonato de calcio o hidróxido de calcio (cal apagada) en la misma mezcla. Las cantidades que se deben agregar dependen del descenso y del volumen a alimentar al biodigestor.

Los casos donde el pH toma valores mayores a 7.5 son muy raros. Esto debido a que la alimentación generalmente tiene pH ácido, con lo cual no tendría justificación el alza en el interior del reactor. El ascenso del valor de pH no afecta en la población bacteriana, pero con valores mayores a 7.5, el nitrógeno deja de estar como amonio en solución y se transforma en amoníaco gaseoso que puede ser un inhibidor de las bacterias que se involucran en la transformación de la materia orgánica. Como resultado, se puede tener buena producción de biogás pero la calidad del mismo bajará inevitablemente (8).

2.2.5.2 Temperatura

La temperatura es un parámetro muy importante para el funcionamiento óptimo del biodigestor. La actividad bacteriana en el interior del digestor depende de este parámetro. Existen tres rangos de temperatura dentro de los cuales las bacterias actúan óptimamente. El primer rango es cuando la temperatura de operación es menor a los 20°C; este rango es llamado psicofílico. El segundo rango es conocido como mesofílico y las temperaturas van desde los 21°C hasta los 45°C. El último rango de operación es cuando la temperatura está entre 46°C y 70°C y se conoce como termofílico (8).

Los mejores resultados de operación se obtienen cuando la temperatura está en el rango termofílico. Sin embargo, la operación para los biodigestores debe mantenerse en el

rango mesofílico. Esto es debido a que el digestor por si solo puede alcanzar 45°C sin intervención de factores externos. Elevar la temperatura más allá de esta barrera requeriría el uso de energía lo cual sería más costoso. Por lo tanto, es más factible mantener la temperatura en el rango mesofílico donde también se obtienen buenos resultados de producción de biogás (20).

Además de decidir el rango al cual operar el digestor, se debe tratar de mantener la temperatura lo más estable posible. Esto permite que la población bacteriana se mantenga activa y produciendo biogás. Los cambios bruscos de temperatura afectan a las bacterias metanogénicas, de hecho una variación de 5°C en la temperatura afectaría la producción de metano en un 34%. Por ello, el mantenimiento de temperatura constante es vital para un digestor (20).

2.2.5.3 Carga orgánica

La carga orgánica es también conocida como velocidad de carga volumétrica. Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica que debe agregarse al digestor diariamente. Este valor viene dado en kg de material / día; kg de materia seca / día; kg de sólidos volátiles / día; kg de DQO / día; todos estos valores expresados por cada metro cúbico del reactor (8).

Este valor se determina de acuerdo a la cantidad de materia orgánica contenida en cada sustrato que se agrega al digestor. Por ejemplo, el estiércol tiene distinta cantidad de materia orgánica que la fruta (materia orgánica vegetal) y esta a su vez puede tener distinta cantidad que el brócoli o el tomate.

Se debe realizar un análisis previo a la materia prima para determinar la dilución que se debe emplear cuando se alimente el biodigestor. Esta dilución se conoce por medio de experimentos realizados previamente para conocer cuál es la mezcla que funciona mejor en la producción de biogás.

Al ingresar una nueva carga de materia orgánica en un digestor se debe tener en cuenta que la mayoría de dicha materia debe ser transformada en metano y dióxido de carbono.

Por ello si se ingresa una carga orgánica baja, las bacterias no tendrán el sustrato suficiente para poder realizar la digestión anaerobia de forma correcta y los volúmenes de biogás producido se verían afectados. De la misma manera, si la carga orgánica alimentada en un digestor es excesiva, las bacterias se encontrarán en una situación de sobrecarga alimenticia con lo cual no toda la materia orgánica es transformada y el equilibrio de operación del reactor se puede ver seriamente afectado. Como efectos se puede dar una disminución en la calidad del biogás, descensos de pH y obtención de un biol ácido que no ha alcanzado la estabilización del material orgánico.

2.2.5.4 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención se calcula a partir del volumen de reacción y de la carga orgánica alimentada diariamente (4):

$$\tau = \frac{V}{V_o} \quad (2.7)$$

en donde:

τ	= tiempo de retención	[días];
V	= volumen del líquido en el digestor	[litros];
V_o	= caudal de alimentación de materia orgánica	[litros/día];

Es necesario calcular este valor ya que corresponde al tiempo que pasará la materia orgánica dentro del digestor.

Este parámetro permite controlar de cierta forma, el crecimiento de las bacterias y el tiempo que pueden tener las mismas para degradar la materia orgánica. Mayores tiempos de retención implicarán mayor transformación de la mezcla reactiva en biogás y bio-abono. Sin embargo, se debe tener en cuenta que mayores tiempos de residencia podrían hacer que la población bacteriana disminuya debido a que la cantidad de sustrato disponible, es cada vez menor (21).

Adicionalmente, el tiempo de residencia hidráulico puede depender de otros parámetros como la temperatura y la cantidad de sólidos existentes dentro del sustrato. A mayor temperatura habrá mayor degradación bacteriana con lo cual se reduce el tiempo de retención. De otra parte, con mayor cantidad de sólidos presentes en el sustrato, el movimiento de las bacterias en el interior del biodigestor puede verse aletargado con lo cual la velocidad de degradación disminuye. Se suele calcular también un valor conocido como el tiempo de retención de sólidos (TRS) para conocer cómo diferiría en la retención de los líquidos (8). Los tiempos de retención dentro de los digestores rurales dependen del volumen de sustrato que se maneje. Para este tipo de digestores los tiempos de retención oscilan entre los 45 y 60 días. A escala industrial, los tiempos de retención varían dado que el proceso es continuo y la utilización del biogás es constante (8).

2.2.5.5 Agitación y recirculación

Se puede encontrar agitadores en el interior del biodigestor, como las hélices. También se puede agitar mediante la entrada y salida de material al biodigestor. Cualquiera que sea el método, el objetivo de mezclar el contenido del reactor es que haya una solución homogénea donde todas las bacterias estén presentes y exista el mayor contacto posible entre el sustrato a degradar y las distintas bacterias encargadas del proceso de digestión anaerobia. Además, se trata de evitar la presencia de costra o de zonas muertas. Este parámetro es importante considerarlo puesto que sin agitación, el volumen de biogás obtenido es bajo; de otra parte, un exceso de agitación puede hacer que los nutrientes no lleguen a las bacterias de la etapa adecuada dentro del proceso de digestión anaerobia (9).

2.2.5.6 Producción de biogás

Este parámetro sirve para comprobar el estado de funcionamiento de un biodigestor. Gracias a la ayuda de un contador de gas, se puede monitorear cuál es la producción de gas dentro de cierto período de tiempo. La obtención de biogás debe mantenerse alta como señal de que las bacterias están actuando eficientemente. Un decaimiento en la

producción puede ser un indicador de que algún parámetro está fallando en el interior del biodigestor, siendo principalmente un descenso de pH la causa más frecuente. Adicionalmente, la generación de un biogás de calidad debe ser monitoreada. Se debe procurar tener una presencia de metano entre el 50% al 70% para que dicho producto sea consumido durante la generación de energía. (21) Con una proporción baja de metano, se puede concluir que la operación del biodigestor está presentando problemas.

2.3 Sustratos

En el mundo existe gran variedad de biodigestores que trabajan en base a los sustratos disponibles en el área donde y para los cuales fueron construidos. Durante los últimos años se han reportado distintos diseños en los cuales varía el tipo de sustrato. Los reactivos necesarios para que el biodigestor funcione deben ser materia orgánica animal o vegetal.

La tabla 2.6 resume las propiedades de diferentes tipos de sustratos que se obtienen como resultado del procesamiento de carne, lácteos, productos alimenticios y fuentes de carbono como aguas de tratamiento y aguas de drenaje. Cada una de estas materias primas posee ventajas y desventajas como se observan a continuación:

Tabla 2.6. Potenciales sustratos para digestión anaerobia y obtención de biogás (9)

Tipo de materia prima	Contenido orgánico	Relación C:N	Materia Seca [%]	Sólidos Volátiles en la Materia Seca [%]	Rendimiento de biogás [m ³ / kg SV]	Impurezas no deseadas	Otras impurezas
Estiércol porcino	Carbohidratos, lípidos y proteínas	3 - 10	3 - 8	70 - 80	0.25 - 0.50	Restos de madera, cuerda, arena	Antibióticos, desinfectantes
Estiércol bovino	Carbohidratos, lípidos y proteínas	6 - 20	5 - 12	80	0.20 - 0.30	Restos de madera, cuerda, arena	Antibióticos, desinfectantes, amonio
Estiércol avícola	Carbohidratos, lípidos y proteínas	3 - 10	10 - 30	80	0.35 - 0.60	Arena, plumas	Antibióticos, desinfectantes, amonio
Contenido estomacal e intestinal	Carbohidratos, lípidos y proteínas	3 - 5	15	80	0.46 - 0.68	Tejidos animales	Antibióticos, desinfectantes
Suero de leche	75 - 80 % lactosa 20 - 25 % proteína	-	8 - 12	90	0.35 - 0.80	Impurezas del transporte	
Suero de leche concentrado	75 - 80 % lactosa 20 - 25 % proteína	-	20 - 25	90	0.80 - 0.95	Impurezas del transporte	
Lodos flotantes	65 - 70 % proteína 30 - 35 % lípidos	-	-	-	-	Tejidos animales	Metales pesados, desinfectantes
Heces fecales	Carbohidratos	4 - 10	1 - 5	80 - 95	0.35 - 0.78	Restos de fruta no degradables	
Paja	Carbohidratos y proteínas	80 - 100	70 - 90	80 - 90	0.15 - 0.35	Arena, npio	

2.3.1 Materia orgánica animal

Este sustrato hace referencia al uso de estiércol de distintos orígenes siendo los más comunes los de ganado bovino, porcino, ovino y aviar. Esta materia orgánica animal tiene la propiedad de acondicionar el suelo para que exista mayor disponibilidad de nutrientes. La principal característica a tomarse en cuenta es la relación Carbono:Nitrógeno. Cuando este valor es pequeño, se puede asegurar que el tiempo de nitrificación por parte de las bacterias del suelo será menor (9).

El uso de materia orgánica animal directamente en el suelo presenta ciertas desventajas. La principal es la pérdida de ciertos nutrientes que se encuentran en forma orgánica la cual no es la forma adecuada para que las bacterias los procesen. Otra desventaja es la pérdida de ciertos compuestos como el metano que además se considera un gas de efecto invernadero cuyo efecto es 21 veces mayor que el dióxido de carbono (1).

La utilización de un tipo de sustrato depende de su disponibilidad, así como de las necesidades que requiera el suelo donde se lo vaya a utilizar. Además, se debe tomar en consideración que hay materia orgánica animal que funciona mejor que otra con el fin de ser transformada en biogás. La tabla 2.5 muestra una diferencia entre la relación C:N para los varios tipos de desechos animales.

2.3.2 Materia orgánica vegetal

La materia orgánica vegetal puede provenir de distintas fuentes. Se han realizado experimentos y diseños con digestores para desechos a partir de remolacha, de brócoli y el tema principal de la tesis: desechos de fruta. Rajesh Banu et. al en 2007 (22) publicaron un artículo acerca del uso de desechos de fruta y de la caracterización de los mismos con el fin de obtener datos relevantes. Se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 2.7. Propiedades de los desechos de fruta (22)

Fruta	Peso (g)	Humedad (g)	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Sólidos Ceniza (%)
Manzana	700	82.0	18.0	99.8	0.2
Naranja	700	85.2	14.8	99.7	0.3
Piña	700	80.1	19.9	99.8	0.2
Uva	700	92.1	7.9	98.2	1.8
Mango	700	74.2	25.8	99.7	0.3
Banano	700	68.5	31.5	99.9	0.1

Como se puede observar, la cantidad de sólidos totales es elevada. Por ello, para trabajar con desechos de fruta, se debe realizar un proceso de reducción de tamaño así como diluir el material orgánico vegetal. De esta forma se ve reducida la cantidad de sólidos presentes y se obtiene un sustrato más asimilable por las bacterias mediante el incremento del área de contacto.

3 Método Experimental

Con el fin de conocer cómo funciona la digestión anaerobia es necesario realizar experimentos donde se varíen parámetros para observar el comportamiento bacteriano ante dichas condiciones. Se deben realizar experimentos a nivel de laboratorio para seguir con plantas piloto y finalizar con la construcción de biodigestores de escala industrial. Los parámetros más variados dentro de los estudios de biodigestión son la temperatura, la carga orgánica, el tiempo de residencia hidráulico y los sólidos totales.

Para el presente estudio de la digestión anaerobia de desechos de fruta, se busca variar la carga orgánica diaria alimentada y el tiempo de retención hidráulico. Con el objeto de obtener resultados confiables, se trabaja con el biodigestor de escala piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas.

Además de llevar a cabo los experimentos, es necesario realizar análisis para determinar el estado del biodigestor, conocer la capacidad de asimilación bacteriana mediante pruebas que se detallan a continuación y caracterizar el biol obtenido, procesar el biogás para las aplicaciones energética que se llevan a cabo en el mismo LaDEA.

3.1 Biodigestor a escala piloto del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas LaDEA

Para los experimentos llevados a cabo para el presente documento, se utilizó el biodigestor existente en el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA). Este biodigestor debe cumplir con las condiciones de diseño de un biodigestor que implican que debe ser hermético para evitar el ingreso de oxígeno, producir biogás y bioabono los cuales son recolectados y usados para posteriores aplicaciones. El biodigestor existente en el LaDEA fue puesto en marcha en el año 2008. A este se le han ido incrementando partes y aditamentos que lo hacen mucho más adecuado para estudios como el que se presenta en este documento. Entre ellos se cuenta con un intercambiador

de calor, un controlador de temperatura y nivel y un sistema de compresión y combustión del biogás.



Figura 3.1. Biodigestor a escala piloto del LaDEA

El biodigestor ubicado en el LaDEA trabaja con el sistema de carga continua, ya que se carga y se descarga diariamente el mismo volumen con el fin de mantener el nivel dentro del tanque lo más constante posible. Además, se busca obtener la mejor mezcla dentro del biodigestor con el fin de que el sustrato llegue a la mayor cantidad de bacterias posible. Para ello se cuenta con la bomba de alimentación que recircula el material constantemente. Cabe recalcar que el diseño del biodigestor del LaDEA hace que la mezcla del biodigestor recircule de forma ascendente. Con ello se tiene mejor mezcla de los sólidos y se busca evitar que exista sedimentación lo cual puede obstruir las vías de desfogues del digestor.

El manejo del sustrato se da mediante un filtro anaerobio. Este diseño de biodigestor consta con una estructura fija en el interior del reactor donde se encuentra un relleno que puede ser de distintos tipos como plástico, PVC, piedra pómez, ripio o pedazos de porcelana. El fin de este filtro es el de incrementar el área de contacto y brindar un soporte para las bacterias. Mediante este relleno, se busca crear el mayor contacto posible entre las bacterias y el sustrato que recircula constantemente. El biodigestor del LaDEA cuenta con rellenos de plástico.

Finalmente, el biodigestor consta de una sola etapa de tratamiento. El tener varias etapas en la asimilación de la materia orgánica puede permitir alcanzar mayores conversiones. Por lo general existen biodigestores de dos etapas donde en la primera se da la hidrólisis, y acidogénesis. En la segunda etapa se da la obtención del biogás en los pasos de acetogénesis y metanogénesis (23). Sin embargo, el mantenimiento y la inversión requerida para tener dos etapas son mucho mayores. El biodigestor del LaDEA al ser un proyecto a escala piloto permite estudiar el comportamiento de la digestión anaerobia con desechos de fruta de forma óptima.

El volumen total del biodigestor es de 600 litros. Se debe tomar en cuenta para los cálculos que el volumen de mezcla en el interior del biodigestor es de 440 litros. Se debe dejar un espacio adicional para que el biogás pueda ser producido y retenido en caso de ser necesario. La salida del biogás se encuentra por la parte superior del biodigestor donde pasa por dos filtros y una trampa de humedad. Posteriormente pasa al contador y puede ser utilizado en el sistema de generación de energía o liberado al ambiente. A parte existe una conexión en la parte inferior del reactor para la salida de biol con lo cual se pueden extraer de mejor manera los sólidos que hayan sedimentado a pesar de la agitación. El biodigestor posee además un medidor de nivel externo para controlar que el mismo sea el requerido para que pueda haber recirculación. El reactor está recubierto por una capa aislante que consiste en lana de vidrio y papel aluminio para conservar el calor en el interior y permitir el crecimiento y metabolismo bacteriano. En la figura 3.2 se muestra al digestor únicamente con su medidor de nivel y tuberías de salida.



Figura 3.2. Reactor para digestión anaerobia del LaDEA

3.1.1 Materia prima

Para dar inicio a la operación del biodigestor del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas, se debe definir cuál es la materia prima a utilizar. Para ello primero se debe realizar una caracterización del sustrato. Para el presente documento se definió a la materia prima como los desechos del proceso de extracción de pulpa de fruta. Los desechos de fruta comprenden las semillas y cáscaras que no presentan beneficio económico y deben ser desechadas. Además se debe definir el tipo de materia orgánica animal a utilizar. Debido a investigaciones realizadas anteriormente en el mismo LaDEA y en vista de la disponibilidad, se establece el uso de estiércol de ganado vacuno. La

recepción de los desechos de fruta se da tal como quedan después del proceso de extracción de la pulpa, no fueron sometidos a ningún tratamiento y se mantuvieron almacenados en un lugar fresco y seco. Durante el tiempo de experimentación se contó con pepas y cáscaras de maracuyá, fibra de piña y cáscaras de naranjilla, mora, piña, tomate de árbol, mango, frutilla y limón.



Figura 3.3. Desechos de tomate de árbol y pepas de maracuyá

Es preciso procesar los desechos de fruta para poder trabajar con ellos en el interior del biodigestor; reducir el tamaño es el principal tratamiento que se les da. El tamaño de partícula debe disminuir en primer lugar para evitar el taponamiento del sistema de tuberías y la bomba centrífuga. Además esta reducción de tamaño permite incrementar el área de contacto de la fruta con lo cual más sustrato estará disponible para los

microorganismos y de esa forma la producción de biogás se ve incrementada. Adicionalmente, la cantidad de sólidos totales se ve afectada con lo cual la movilidad de las bacterias será mejorada en la mezcla reactiva. Para reducir el tamaño de partícula se utiliza una picadora de marca Cremasco modelo DPF-Mini. Cuenta con un motor que hace girar dos cuchillas a 3500 rpm. En la figura 3.4 se muestra el equipo utilizado para trituración y filtración, se observan los dos canales de entrada (superior y lateral) y dos canales de salida (frontal e inferior).



Figura 3.4. Picadora para trituración y filtración de desechos de fruta marca Cremasco

La picadora posee un canal de entrada y dos de salida. En la primera reducción de tamaño se debe triturar los desechos de fruta que pueden contener pequeñas partículas como en el caso de la mora y la frutilla donde esta etapa no es crítica o puede ser vital

como en el caso del mango o la piña que requieren una reducción de tamaño considerable. Esto se hace con la criba ciega y el producto se recoge por la salida superior. La fruta que ha sido triturada debe diluirse en partes iguales con agua. Se toma una cantidad de fruta y se agrega la misma cantidad de agua en base al peso; se utilizó una balanza romana. El segundo paso de la reducción de tamaño consiste en la filtración de la fruta con lo cual se obtienen partículas de 1 mm de diámetro. La picadora incluye cribas con distintos tamaños, utilizándose la número 1 para triturar la fruta en primera instancia y la número 3 para filtrar.



Figura 3.5. Cribas para trituración y filtración de materia prima.

Dependiendo del tipo de fruta, va a existir una parte que se debe desechar ya que no atraviesa la criba respectiva.

En la figura 3.6 se presenta el desecho de fruta triturado y filtrado en la picadora.



Figura 3.6. Desechos de tomate de árbol triturados y filtrados

El estiércol usado para la alimentación de la planta piloto debe ser lo más fresco posible, de esta forma se asegura que los nutrientes no se han perdido mediante evaporación o lixiviación. Adicionalmente, el ganado del cual se tome la materia orgánica animal debe estar sin uso de antibióticos puesto que estas sustancias pueden afectar el crecimiento bacteriano (21). El tratamiento para el estiércol es similar al de la fruta. La diferencia es que solo se da la filtración con la finalidad de obtener una mezcla homogénea. La dilución usada es de una parte de agua por cada parte de estiércol, por peso. En la siguiente figura, 3.7, se presenta el estiércol luego del proceso de filtrado en la picadora.



Figura 3.7. Estiércol bovino filtrado

Gracias a revisión en bibliografía y experimentación previa en el biodigestor a escala piloto del LaDEA, se determina la cantidad de materia orgánica vegetal y materia orgánica animal que se debe mezclar para alimentar al reactor en base a una relación; se concluye que se mezclarían 4 partes de fruta con 1 parte de estiércol. Esta mezcla se la hizo en relación volumétrica y se la debió agitar para tener un compuesto homogéneo. Finalmente, para alimentar se debe procurar tener una fracción de agua total menor a 0.5.

3.1.2 Proceso de operación del biodigestor del LaDEA

Para cada experimento se debe definir la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico. Estos parámetros conjuntamente con la demanda química de oxígeno determinada experimentalmente en la mezcla, permiten calcular el volumen requerido de materia orgánica alimentada diariamente y el volumen adicional de agua. Se usaron las siguientes ecuaciones para encontrar estos valores (4):

$$\dot{V}_{total} = \frac{V_{reactor}}{\tau} \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_{DQO} = CO * V_{reactor} \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_{MO} = \frac{\dot{m}_{DQO}}{C_{DQO,MO}} \quad (3.3)$$

$$\dot{V}_{agua} = \dot{V}_{total} - \dot{V}_{MO} \quad (3.4)$$

en donde:

\dot{V}_{total}	: Caudal total de alimentación	[m ³ /día]
$V_{reactor}$: Volumen del reactor	[m ³]
τ	: Tiempo de retención hidráulico	[días]
\dot{m}_{DQO}	: Flujo másico de DQO	[kg DQO/día]
CO	: Carga orgánica definida	[kg DQO/m ³ día]
\dot{V}_{MO}	: Caudal de alimentación de la materia orgánica	[m ³ /día]
$C_{DQO,MO}$: DQO de la materia orgánica	[kg DQO/m ³]
\dot{V}_{agua}	: Caudal adicional de agua	[m ³ /día]

Una vez determinados los volúmenes de materia orgánica y de agua diarios que se deben alimentar, se procede a mezclarlos en el tanque de alimentación. Este tanque es de polipropileno y tiene una capacidad de 130 litros.



Figura 3.8. Tanque de alimentación

De acuerdo al volumen total que va a ingresar al biodigestor, se debe extraer el mismo volumen de mezcla reactiva del sistema para mantener el nivel en el interior. Con ello se podrá recircular sin problemas. Es vital tomar medidas del pH tanto de la mezcla de alimentación como del líquido extraído del digestor para agregar o no aditivos con el fin de mantener este parámetro en el rango apropiado.

Una vez medido el pH y puestos los aditivos necesarios en la mezcla de alimentación, se procede a introducir el volumen total al digestor con el uso de una bomba centrífuga marca WEG, modelo Caracol Super 1 ½" NPT. Su rendimiento es del 65% (21).



Figura 3.9. Bomba centrífuga

Cuando se ha introducido toda la mezcla reactiva, se debe verificar que exista recirculación mediante la misma bomba que envía el flujo de forma ascendente. Existe un rotámetro para fijar la velocidad de recirculación de acuerdo al caudal. La marca del mismo es Blue – White de $\frac{3}{4}$ ” modelo F45750LHN-12. Su capacidad de medición de caudal varía entre 0.4 y 40 litros por minuto (LPM) (21). Se debe procurar trabajar con un caudal de recirculación de 12 LPM.

Una vez concluido este proceso de alimentación, se debe tomar lectura de los valores que aparecen en el contador de gas para poder controlar el volumen del mismo que se produce en el intervalo de tiempo, que de acuerdo a los cálculos se ha fijado en un día. Además se debe tomar nota del valor de la temperatura para llevar seguimiento a cambios de temperatura que pueden influir en la producción de un buen biogás.

3.1.3 Control del proceso de operación

Durante el funcionamiento del biodigestor pueden variar distintos parámetros que deben ser controlados para mantener el proceso lo más estable posible. Dichos parámetros son la temperatura y el pH. Gracias a la actividad bacteriana, la temperatura en el interior del reactor incrementa. Las altas temperaturas benefician la acción bacteriana sobre las materias orgánicas animal y vegetal, pero mantener dichas temperaturas constantes genera un costo energético considerable. Por ello dentro de los rangos de operación, se escoge el mesofílico por dar buenos resultados en la producción de biogás y es simple mantener la temperatura dentro de estos límites (21°C - 45°C). Durante la operación se debe mantener un valor de temperatura lo más regular posible, una variación dentro de este parámetro causará que las bacterias no asimilen apropiadamente la materia orgánica y consecuentemente no produzcan el biogás deseado.

Para el control de la temperatura se tiene instalado un intercambiador de calor. Este intercambiador posee un serpentín en el interior de un cilindro que se debe llenar con agua. El contenido del biodigestor atraviesa por el serpentín produciéndose un intercambio de energía entre el agua y el fluido del reactor. En la figura 3.10 se presenta una foto del intercambiador de calor que se instaló con la finalidad de controlar la temperatura en el interior del reactor.



Figura 3.10. Intercambiador de calor con serpentín y resistencia

Adicionalmente, se encuentra instalado un controlador automático para regular los cambios de temperatura en el interior del digestor. Este controlador está conectado a termocuplas que se encuentran en el interior del recipiente con lo cual la temperatura puede ser registrada. Con dicho valor, el controlador está programado para calentar el agua en el interior del serpentín cuando la temperatura sea menor a 37°C y dejar que el sistema trabaje por si solo cuando está a más de 38°C . Con este sistema se logra mantener una temperatura de 38°C - 39°C .



Figura 3.11. Controlador automático de temperatura y nivel

De la misma manera, el proceso posee instalado un controlador de nivel del tipo ON-OFF. Existen sensores de nivel instalados en el interior del biodigestor cuya señal es registrada por el controlador. Si el nivel de reactivo en el interior del digestor no es lo suficiente para poder recircular, la bomba deberá apagarse automáticamente para evitar su desgaste y operación sin fluido. Asimismo, cuando el nivel de líquido en el digestor anaerobio sea muy elevado, existe la posibilidad de que el fluido salga por la vía destinada a la salida del biogás; si el fluido pasa por dicha vía, los filtros y el contador de gas se verían afectados. De tener un nivel alto, la bomba igualmente se apagaría para evitar la salida de fluidos por la ruta del biogás.

Con el pH suele suceder algo similar. La materia orgánica presenta un pH ácido (4.5 – 5.5), con lo cual se esperarían que el pH dentro del digestor descendiera. La acción

bacteriana hace que este valor se mantenga dentro de los límites de pH neutro y es la presencia de dióxido de carbono la que actúa como amortiguador dentro del digestor. Gracias a ello, el reactor por sí solo es capaz de soportar ciertos cambios de pH. Sin embargo, al existir sobre alimentación (para cargas orgánicas elevadas), la actividad bacteriana y la capacidad tamponante del digestor no son suficientes para mantener el pH en los rangos deseados (6.5 – 7.5). Como consecuencia, se deben tomar acciones para evitar el descenso del pH hasta valores menores.

Durante la operación el parámetro que presenta mayor variación y es el que requiere más control, es el pH. Este valor debe mantenerse en un rango apropiado de operación (6.5 – 7.5), ya que es entre estos valores cuando las bacterias, que forman parte del proceso de digestión anaerobia, procesan de forma óptima las materias orgánicas vegetales y animales. Dado que el pH del estiércol y de los desechos de fruta es ácido (<7), se esperaría que el valor del mismo dentro del digestor descendiera. A pesar de existir una capacidad tamponante en el interior del reactor, los descensos de pH muchas veces no se pueden controlar por sí solos. Cuando esto sucede es necesario el uso de aditivos que compensen el pH ácido. A nivel de laboratorio se suele usar una solución básica de hidróxido de sodio con lo cual es suficiente dado los volúmenes pequeños. A escala piloto, como se trabaja durante el presente proyecto, se deben agregar otro tipo de aditivos; el carbonato de calcio o el hidróxido de calcio presentan la posibilidad de aumentar el pH y su manejo no requiere la preparación de una solución. Son sólidos blancos que gracias a la presencia del ión carbonato y el ión hidróxido, respectivamente, logran absorber los iones hidronio y elevar el pH. Su adición debe tener cierto límite ya que si son agregados en exceso, pueden incrementar el parámetro de Sólidos Totales, con lo cual la producción de gas se ve afectada.

3.1.4 Tratamiento del biogás generado

El biogás generado en la digestión anaerobia dentro del reactor a escala piloto debe ser utilizado con algún fin energético. Para ello debe ser de buena calidad con lo cual se debe llevar control del volumen y la cantidad de metano existente en el mismo.

Dentro del proceso de operación del biodigestor, el biogás producido sale por un canal ubicado en la parte superior del reactor. Existe una válvula que puede ser cerrada para la toma de muestras, acumulación del mismo con el fin de usarlo en el generador eléctrico o comprobar la presencia de biogás. Para este último objetivo, se cuenta con un manómetro instalado en la parte superior que tiene un rango de medición de 0-20 bares.



Figura 3.12. Salida del biogás generado por el biodigestor

El biogás que sale por la tubería instalada, debe pasar por tres tratamientos antes de llegar al contador de gas. El primer tratamiento es mediante el uso de limallas de hierro. El hierro es un material que tiene la propiedad de poder absorber el ácido sulfhídrico, el cual debe ser retirado porque durante el uso del biogás en el generador eléctrico puede corroer

los equipos y tuberías metálicas. De forma consecutiva se encuentra la trampa de humedad. Esta consiste en una botella plástica la cual debe estar conectada con un ángulo de pendiente para que el agua condense y sea atrapada en el recipiente. El segundo filtro se encarga de la remoción del ácido sulfhídrico que no logró ser atrapado en el primer filtro y además de la reducción de olores en el mismo. Para ello se cuenta con partículas de carbón activado granular.

El flujo del biogás dentro del primer filtro es descendente, pasa por la trampa de humedad y finalmente en flujo ascendente por el segundo filtro. Ambos filtros están hechos de PVC y tienen forma cilíndrica con una longitud de 41 cm y diámetro de 11 cm.

Finalmente, el biogás producido pasa a través del contador de gas de marca KEUK DONG modelo G1.6 de tipo Diafragma y se presenta en la figura 3.13. Gracias a este contador se puede tener una medida exacta del volumen producido por el biodigestor en un día. Para ello es vital tomar la medida antes de alimentar al reactor.



Figura 3.13. Contador de gas marca Keuk Dong

3.1.4.1 Utilización del biogás generado

Con la necesidad de dar un uso al biogás producido y comprobar su utilidad como fuente de energía, se construyó el sistema de compresión y combustión de biogás para generación eléctrica. Este sistema toma el biogás que se ha acumulado en el interior del digestor y lo almacena en un sistema de bolsas de gas sumergidas en tanques de agua. Gracias a la diferencia de nivel cuando el biogás ha llenado las bolsas, un sistema automático se enciende para comprimir el biogás. Dado que el metano no posee la cualidad de ser fácilmente licuable, la cantidad de gas comprimida es baja. Sin embargo, la cantidad que se logra comprimir puede ser utilizada para la generación de energía como se ha comprobado en el LaDEA. El biogás comprimido se dosifica a un generador que ha sido adaptado para funcionar con gasolina y biogás.

3.1.5 Tratamiento del biol

El biol que ha sido obtenido durante el proceso de biodigestión debe pasar por un tratamiento antes de ser aplicado en plantaciones. En el interior del biodigestor no hay presencia de *E. Coli* ni *Coliformes*, con lo cual la calidad del biol inmediatamente después de haber sido extraído es mejor. Sin embargo, deben existir formas de almacenar el biol en caso de que su aplicación no pueda ser inmediata. Para ello se puede dar el tratamiento con calentamiento moderado para eliminar la presencia de microorganismos no deseados. De esta forma se obtendrá un fertilizante apto para ser almacenado y posteriormente usado. De igual manera, la esterilización debe mantenerse y esto se logra mediante la limpieza de los recipientes y la exclusividad de los mismos para el manejo del biol. Contaminación cruzada puede darse y afectar al bio-abono el cual no podría ser utilizado.

En el marco teórico se habla de la presencia de abono sólido conocido como Biosol. Este producto pudo ser obtenido en el biodigestor del LaDEA pero su cantidad es pequeña, con lo cual se considera a todo el bio-abono obtenido como biol.

El almacenamiento del biol se lo hace en tres formas. La primera es mediante recipientes de 2 litros o de 1 galón, como se observa en la figura 3.14, con los cuales se busca comercializarlos para clientes que deseen utilizarlo en jardines pequeños.



Figura 3.14. Almacenamiento del biol para venta al por menor

La segunda forma de almacenamiento es en canecas de 20 litros (figura 3.15) también sirve para comercialización pero para productores que requieran volúmenes grandes y su aplicación es para plantaciones.



Figura 3.15. Almacenamiento del biol para venta para plantaciones

La última forma de almacenamiento se da para cuando los volúmenes de producción en el LaDEA exceden los de venta del biol. Para ello se tiene tanques de 125 y 250 litros donde se guarda el biol para ser almacenado en recipientes que luego salgan a la venta. Una foto de ambos tanques en la figura 3.16.



Figura 3.16. Almacenamiento del biol previo al envase en el LaDEA

3.2 Caracterización de la materia prima, mezcla reactiva y productos

Así como se lleva control de la operación del biodigestor del LaDEA, es necesario observar y comprobar si el proceso de digestión anaerobia en el interior del digestor se lleva a cabo de manera apropiada. Esto debido a que pueden existir factores que no

permitan que la degradación sea completa y como consecuencias puede haber baja producción de biogás o mala calidad del mismo.

3.2.1 pH

El valor del pH como se ha dicho previamente, es de vital importancia en el proceso. Se debe medirlo y controlarlo con el fin de saber si existe exceso en la alimentación ($\text{pH} < 7$). En ese caso, se tiene que se está produciendo mayor cantidad de ácidos durante la digestión anaerobia (acidogénesis y acetogénesis), con lo cual las bacterias metanogénicas no dan abasto para la conversión a metano y dióxido de carbono. Esto se puede deducir a partir de la medición del pH del biol extraído del digestor. El aparato utilizado es un medidor de pH de marca Hanna modelo HI 8424.

3.2.2 Producción de biogás

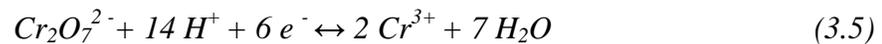
La producción diaria de biogás se mide mediante los valores que se toman del contador de gas. Para comprobar la calidad del mismo, se deben hacer dos análisis que permiten conocer la presencia o ausencia de metano y qué cantidad del mismo está presente en el biogás.

La primera prueba se conoce como la prueba de metano. Para ello se debe tomar una muestra de biogás con una jeringuilla. Posteriormente, se expulsa el contenido de la misma cerca de una llama de fuego. De haber metano en la muestra, una llama de color azul debe poder observarse.

La segunda prueba consiste en la medición de la cantidad de metano existente en una muestra de biogás. Para que este pueda ser quemado y ser usado como opción energética alternativa, el biogás debe contener un mínimo de 50% de metano. Para ello se debe preparar una solución de hidróxido de sodio al 4% en peso. Se debe proceder a hacer desplazamiento de líquido con el biogás contenido en una jeringuilla. El volumen de la muestra debe ser conocido para poder conocer el volumen de metano existente en la muestra ya que el dióxido de carbono se absorbe en la solución de NaOH para formar NaHCO_3 .

3.2.3 Demanda Química de Oxígeno

Mediante el procedimiento incluido en el manual del colorímetro Hach se puede medir la demanda química de oxígeno (DQO). El análisis consiste en oxidar toda la materia orgánica que puede ser degradada y durante el procedimiento medir el cambio de color en el agente oxidante para conocer qué cantidad de materia orgánica está presente en la muestra. La reacción que ocurre durante el procedimiento es la siguiente (21):



Se realizan medidas de la muestra reactiva (antes de alimentar) y del biol extraído del digestor (bio-abono) para poder conocer si ha existido degradación de la materia orgánica alimentada. Este parámetro indica si se está dando el proceso de degradación pero no tiene el alcance de indicar si toda la degradación ha servido para producir biogás.

Se deben hacer diluciones 1:10 o también 1:20 dado que los valores presentes en la muestra son elevados y en el colorímetro se pueden medir muestras de hasta 1500 mg/L DQO (24). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.4 Sólidos Totales (TS)

La medida de los sólidos totales permite conocer la cantidad de sólidos que posee una muestra. En el interior del biodigestor debe estar entre un 8% y 12% (8). El estiércol y los desechos de fruta poseen un porcentaje mucho mayor de sólidos. Por ello es necesario realizar las diluciones respectivas para que la materia prima pueda ser utilizada en el digestor. La medición de sólidos totales puede contribuir al mejoramiento de la producción de biogás de buena calidad. Mientras menor sea la cantidad de sólidos en una muestra, mayor superficie de contacto entre las bacterias y el sustrato existirá; como consecuencia mayor cantidad de materia orgánica será degradada. La importancia de los sólidos totales en un digestor radica en la capacidad del mismo para poder procesarlos y convertirlos en gas metano. Para la obtención de biogás a partir de desechos de fruta en estado sólido, se realizó un estudio de la variación de producción de biogás basado en el

porcentaje de sólidos en la muestra. Para ello se observó que en un reactor de 5 litros, con una alimentación con 3% de sólidos, se obtuvo una producción de 0.25 litros/día. Con el incremento de 1%, la producción subió a 1.1 litros por día. Finalmente con 5% de sólidos, la producción de gas llegó a 1.4 litros de gas por día (22).

Adicionalmente, si se tiene un alto porcentaje de sólidos en la muestra se corre el riesgo del taponamiento del sistema de tuberías que puede culminar en daño de equipos como bombas o sensores. A pesar de no ser tóxico, el incremento en el porcentaje de sólidos está asociado a un descenso en el desempeño del digestor (23).

El procedimiento para llevar a cabo la determinación de los sólidos totales en una muestra corresponde al 2540 B del Standard Methods. El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.5 Sólidos Orgánicos Totales (OTS)

La determinación de los Sólidos Orgánicos Totales (OTS por sus siglas en inglés) se da con el fin de conocer la cantidad de sólidos que pueden ser degradados durante el proceso de digestión anaerobia. Dado que no todos los sólidos pueden ser degradados, se debe conocer qué cantidad de sólidos son aptos para que las bacterias actúen sobre ellos y se pueda producir metano. Una muestra con alta cantidad de sólidos orgánicos totales traerá consigo una mayor cantidad de gas metano producido. El procedimiento para encontrar los OTS se encuentra en el Standard Methods bajo el procedimiento 2540 E (25). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.6 Sólidos Totales Suspendidos (TSS) y Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS)

Dado que se ha podido medir la cantidad de sólidos presentes en el biol y en la alimentación mediante los procedimientos antes descritos, se puede también realizar la medida de los sólidos totales suspendidos y de los sólidos suspendidos volátiles. Estos sólidos corresponden a la diferencia entre los sólidos totales de la muestra y los sólidos de la muestra filtrada o centrifugada. Los sólidos suspendidos poseen un tamaño mayor a

1.2 μm (26). Dentro de los parámetros de control se puede hablar del sustrato, de la biomasa y del producto obtenido. La medida de la biomasa en un biodigestor anaerobio incluye células viables, enzimas y otros agentes catalíticos que pueden estar disueltos. De forma práctica, la medida de biomasa se puede dar mediante la cuantificación de sólidos suspendidos totales (TSS) o de sólidos suspendidos volátiles (VSS). Es preferible trabajar con el segundo parámetro ya que su medida sólo incluirá las partículas orgánicas (26). Durante la realización de la tesis se determinó ambos parámetros mediante los procedimientos 2540 D y 2540 E, para TSS y VSS respectivamente, del Standard Methods (25). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.7 Alcalinidad

Uno de los parámetros fundamentales de operación de un biodigestor consiste en el monitoreo del pH. Sin embargo, esta medición no siempre es suficiente para conocer el estado del mismo. Dado que el potenciómetro únicamente mide la presencia de iones hidronio en solución, es necesario poder medir todas las especies que le dan acidez a una muestra. Para ello existe el método de la alcalinidad que se mide como la cantidad de carbonatos presentes en una muestra. En un digestor, la alcalinidad se relaciona estrechamente con la capacidad de amortiguar a los ácidos. Gracias a esta propiedad, se puede decir que el reactor de digestión anaerobia posee una capacidad buffer de regular el pH por sí mismo. Sin embargo, cuando las condiciones no son apropiadas y se evidencia un descenso en el pH, es necesario comprobar que la capacidad tamponante versus la cantidad de ácidos presentes sea correcta. La diferencia entre el pH y la alcalinidad radica en que la segunda incluye la medida de la capacidad buffer además de la acidez, en tanto que el pH únicamente mide la acidez (27). Cuando se da un descenso en el pH, por lo general un valor menor a 6.5, el equilibrio dentro del digestor ha sido alterado fuertemente con lo cual la capacidad tamponante ha sido perdida y la relación entre ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad ha cambiado. Para digestores municipales la alcalinidad oscila entre 1000 a 5000 mg/L; para digestores a escala piloto funcionando

con desecho orgánico animal de origen porcino, la alcalinidad llega hasta 14000 mg/L (28).

El procedimiento para determinar la alcalinidad se encuentra descrito en el Standard Methods bajo la guía 2320 B (25). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.8 Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

La medida de los ácidos grasos volátiles determina la acidez en el interior de un biodigestor. Los ácidos grasos volátiles (VFA por sus siglas en inglés) son el producto de la acidogénesis y de la acetogénesis en el interior del digestor. Los ácidos grasos volátiles comprenden los compuestos de cadena corta, teniéndose principalmente al butirato, propionato, lactato y acetato. (9) Este parámetro es importante medirlo pues se relaciona con la alcalinidad de un sistema para poder conocer el estado de funcionamiento de un digestor. Al ser intermediarios de reacción, sus valores no deben ser muy elevados, teniéndose entre 500 y 1000 mg/L para sistemas mesofílicos. Cuando la acidez de un digestor baja, se debe a la excesiva presencia de AGVs con lo cual se concluye que el proceso de metanogénesis está siendo inhibido. Además la capacidad buffer del digestor se pierde y el pH desciende bruscamente.

La relación entre alcalinidad y ácidos grasos volátiles debe encontrarse entre 1 y 2. Si existen valores mayores, indica el correcto funcionamiento del digestor, en tanto que si la relación es menor, el digestor no se encuentra operando correctamente (21).

El método utilizado para su determinación está en el Standard Methods, procedimiento 5560 C (25). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

3.2.9 Nitrógeno total y bioestimuladores

La presencia de otros nutrientes o bioestimuladores, a parte de las cadenas de carbono que se transformarán en metano, es importante para el correcto metabolismo de las bacterias que forman parte del proceso de digestión anaerobia (11). Un nutriente

importante es el nitrógeno. Antes de ingresar al digestor, la mayor parte del mismo está en forma de nitrógeno orgánico (proteínas) y es transformado en nitrógeno amoniacal el cual es asimilado de mejor manera por las plantas para su crecimiento (1). Otros nutrientes importantes son el fósforo, potasio y azufre, cuya cuantificación puede ser considerada para tomar en cuenta la calidad del biol producido. Al Seadi especifica que la relación entre los nutrientes debe ser 600:15:5:1 (C:N:P:S) para el crecimiento óptimo de los microorganismos que toman parte en la digestión anaeróbica (9).

El nitrógeno total medido en una muestra consiste de nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. Todas estas formas son interconvertibles bioquímicamente y forman parte del ciclo del nitrógeno. Si el proceso es aerobio, existe la transformación del nitrógeno orgánico a nitritos y nitratos. Caso contrario, solamente existe conteo de nitrógeno orgánico y amoniacal (26). Por lo general, se lo determina mediante el método de Kjeldahl. Para el presente documento, se utiliza el procedimiento descrito en el manual Hach (24). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

El fósforo al igual que el nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de bacterias. Se puede encontrar en forma de ortofosfatos (H_3PO_4 y sus formas ionizadas), polifosfatos y fosfatos orgánicos. Para todos ellos, se usa métodos colorimétricos para poder cuantificarlos (11). En el LaDEA se utiliza el método descrito en el manual Hach (24). El procedimiento se describe en el apartado “Procedimientos de Análisis” de los Anexos.

La presencia de otros nutrientes también es importante pero su valoración no es necesaria para regular el proceso de biodigestión en el interior del reactor. Entre ellos, los más importantes son el potasio y el azufre. El primero es necesario para intercambio iónico entre las bacterias; en tanto que la presencia de azufre determinará la cantidad de ácido sulfhídrico existente en el biogás producido. Además, existen otros elementos que pueden ser dañinos para el equilibrio del digestor como metales pesados o exceso de otros metales como el cobre. Este riesgo existe cuando la materia prima ha sido expuesta a dichos compuestos, pero los desechos de fruta utilizados, están libres de ellos. Con el

fin de caracterizar el biol obtenido en el digestor, se realizaron análisis de estos elementos menores mediante el uso del Espectrofotómetro de Absorción Atómica que se encuentra en los Laboratorios de Química de la Universidad San Francisco de Quito. Se debió realizar la digestión de las muestras calcinadas con ácido nítrico y ácido clorhídrico. Una vez finalizado este procedimiento, se realiza una dilución a 100 mL en un matraz aforado. De esta solución obtenida se realiza el análisis correspondiente a cada elemento. Se analizó para Cobre, Hierro, Magnesio, Manganeso, Calcio, Zinc y Potasio.

3.2.10 Análisis microbiológico

Con el fin de comprobar que el proceso en el interior del biodigestor se lleve a cabo de forma anaeróbica se mide la presencia de patógenos como Coliformes Totales y *Escherichia Coli* en el biol obtenido del reactor.

Las bacterias coliformes son bacilos Gram-negativos, aerobios y facultativos anaerobios. El método de conteo de los mismos radica en que son capaces de fermentar lactosa con producción de gas (26). El procedimiento empleado está descrito en la Guía de Interpretación para el Recuento de *E. Coli* de 3M (29). Se debe realizar una dilución del biol 1:100 con agua peptonada. Se toma una muestra de 0.5 mL y se coloca en la lámina 3M. Se debe cubrir la lámina con el plástico protector y esparcir el líquido por toda el área. Se deja en una incubadora a 37°C durante 24 horas. Pasado este tiempo se cuentan los puntos rojos con formación de gas (coliformes totales) y los puntos morados con formación de gas (*E. Coli*).

3.2.11 Aplicación del biol

Con la finalidad de comprobar la aplicabilidad del biol, así como de la dilución óptima para poder tener un suelo rico en nutrientes que sea apropiado para el crecimiento de plantas, se planteó un experimento para comprobar la efectividad del mismo.

En vasos de poliestireno, se coloca tierra que fue dividida en tres grupos: tierra común que fue tomada de los exteriores del LaDEA, tierra negra y compost comercial. Además se distinguieron dos grupos entre los ya existentes: tierra preparada con agua y tierra

preparada con biol. De la misma forma, se distinguió entre 5 tipos de vasos que obtendrían diferente tratamiento. Al primer grupo se le regaría una cierta cantidad de agua. Al segundo grupo se le regaría una determinada cantidad de solución de biol al 5% en agua. Para los tres grupos restantes, la solución de biol aumentaría gradualmente, teniéndose soluciones al 10%, 15% y 20%. Con ello se espera poder observar cual dilución es la mejor para obtener plantas más saludables y un mayor crecimiento. Se utilizaron semillas comerciales de tomate de árbol. Se realizaron análisis por duplicado.

3.3 Diseño de experimentos

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas de operación, se realiza un diseño de experimentos en el cual se propone la variación de la carga orgánica y del tiempo de residencia.

Después de la revisión de bibliografía así como de experimentos realizados previamente en el biodigestor, se define el siguiente diseño de experimentos:

Tabla 3.1. Diseño de experimentos para la operación del digestor

Experimento	Carga Orgánica [kg DQO / m ³ día]	Tiempo de retención hidráulico [días]
1	0.5	35
2	0.5	30
3	0.5	25
4	1.5	17.5
5	1.5	15
6	1.5	12.5
7	2	13
8	2	11
9	2	9

Se tuvo que tomar en cuenta la dilución de la fruta y el estiércol realizada. En base a ello se realizaron los cálculos para poder controlar también el tiempo de retención hidráulico. Se manejaron variables como la cantidad de fruta y estiércol filtrados así como el volumen de agua adicional para compensar el tiempo de retención hidráulico.

4 Resultados y Discusiones

El inicio de la operación del biodigestor anaerobio del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas se realizó en el mes de Julio del 2011. El primer período consistió en un tiempo de reactivación del mismo que estuvo parado por cerca de 6 meses. Durante este período se realizó la capacitación en el manejo de equipos y comprensión de los elementos de control, así como de los parámetros que se deben medir y los procedimientos para hacerlo. El segundo período consistió en la planificación y realización de los experimentos necesarios para poder encontrar la carga orgánica, así como el tiempo de residencia óptimos de la mezcla de desechos de fruta con estiércol de ganado bovino.

Para el segundo período se puso mayor énfasis en el estudio de los parámetros de control con el fin de maximizar la producción de biogás y su contenido de metano. Al realizar los experimentos se conocen las condiciones apropiadas para el manejo del digestor, los contratiempos que pueden suceder durante su operación, el manejo y procesamiento de la materia prima, así como las aplicaciones que pueden tener los productos de la digestión anaerobia.

4.1 Caracterización de la materia prima

Con el fin de conocer la cantidad de materia orgánica que se debe alimentar al digestor, así como otras propiedades de la misma que pueden influir en la producción de biogás, se realizan estudios de la materia orgánica vegetal y animal, la cual consiste en los desechos de fruta y en el estiércol de ganado bovino, respectivamente.

4.1.1 Desechos de fruta

Los desechos de fruta que se utilizaron para la digestión anaerobia procedieron del procesamiento de las frutas para la obtención de concentrados de fruta. Estos son muy heterogéneos con desechos grandes en el caso de cáscaras y con buena cantidad de

sólidos en el caso de las semillas. Por esta razón se deben realizar la trituración y filtración de la mezcla de fruta con agua. Para los análisis llevados a cabo, se toma la muestra posterior a la trituración. Con el fin de conocer la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada de cada desecho de fruta, se lleva a cabo la medición del pH, la Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales y Sólidos Totales Orgánicos.

Para este trabajo se utilizaron los siguientes desechos de fruta:

- a) Pepas de maracuyá
- b) Cáscaras de maracuyá
- c) Naranjilla
- d) Mora
- e) Cáscara de piña
- f) Fibras de piña
- g) Tomate de árbol
- h) Mango
- i) Frutilla
- j) Cáscara de Limón

Los análisis mencionados anteriormente son de vital importancia para calcular el volumen de alimentación, así como las propiedades de la mezcla de alimentación dado que la fruta filtrada que ocupa la mayor fracción de la misma.

Debido a que algunas de las frutas presentaron problemas al ser muy espesas, se debieron realizar diluciones con el fin de poder utilizar los materiales requeridos para los análisis. Los resultados presentados a continuación en la Tabla 4.1 ya consideran las diluciones. Se presentan los valores con las correcciones correspondientes.

Tabla 4.1. Caracterización de desechos de fruta

Fruta	pH	TS (%)	OTS (%)	DQO (mg/L)
Pepas Maracuyá	3.74	32.71	31.50	100347
Cáscara Maracuyá	4.02	13.29	11.95	41900
Naranja	3.44	14.49	13.53	106693
Mora	3.97	31.19	30.33	43960
Cáscara Piña	3.38	6.51	5.89	62987
Fibra Piña	3.24	6.77	6.18	127300
Tomate de Árbol	3.80	18.42	17.30	154400
Mango	3.32	13.54	12.87	253966
Frutilla	5.15	13.75	12.96	171320
Cáscara Limón	5.10	19.86	18.94	46600
Promedio	3.92	17.05	16.15	110947

Se realiza el análisis de cada fruta por triplicado con el fin de obtener resultados confiables. La desviación estándar para el pH fue de 0.69, para los sólidos totales y sólidos totales orgánicos fue de 8.8% y para el DQO fue de 68378 mg/L.

Con el fin de poder comparar los parámetros de las diferentes frutas, se presentan las siguientes figuras:

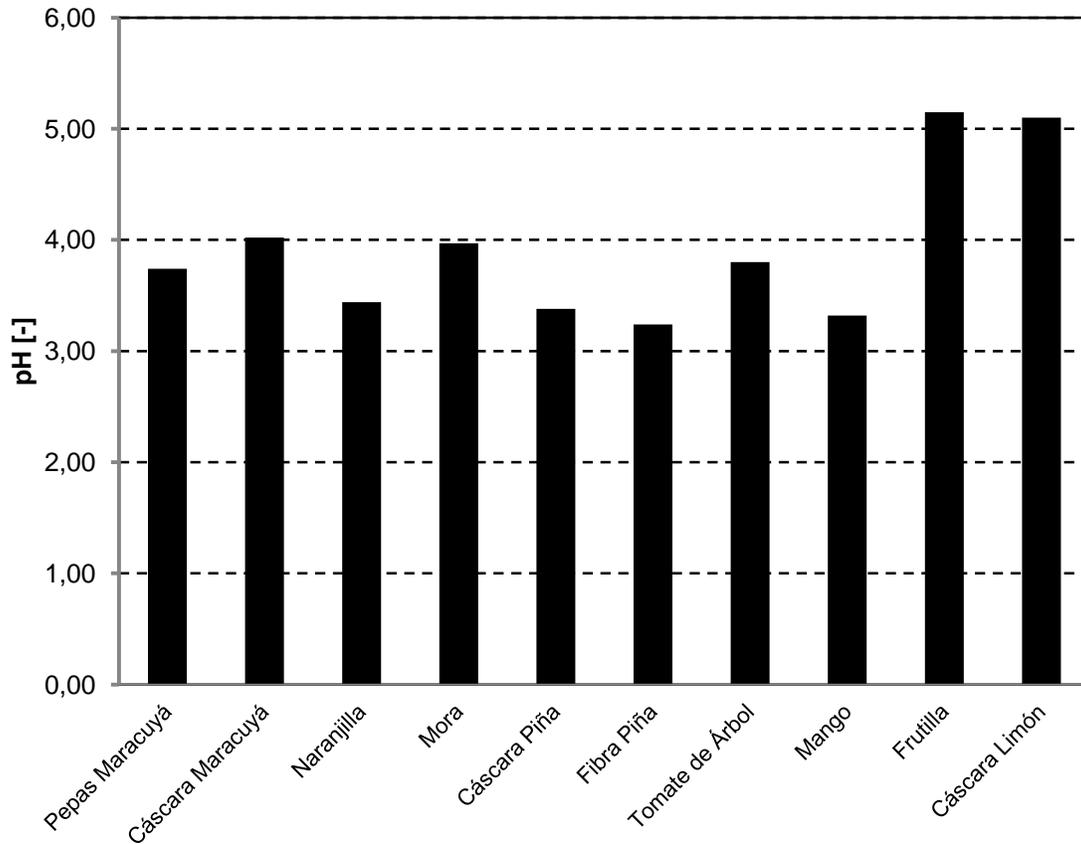


Figura 4.1. Valores de pH para desechos de fruta

Se puede observar que el valor promedio de pH para los desechos de fruta es de 3.92. Se observa que la fibra de piña posee el valor de pH más bajo con 3.24 y el valor más alto lo presenta la frutilla con 5.15. Con esta información, se puede confirmar que la mezcla de alimentación presenta valores de pH entre 3.5 y 5.5. El valor de pH se incrementa debido a la presencia del estiércol así como de agua.

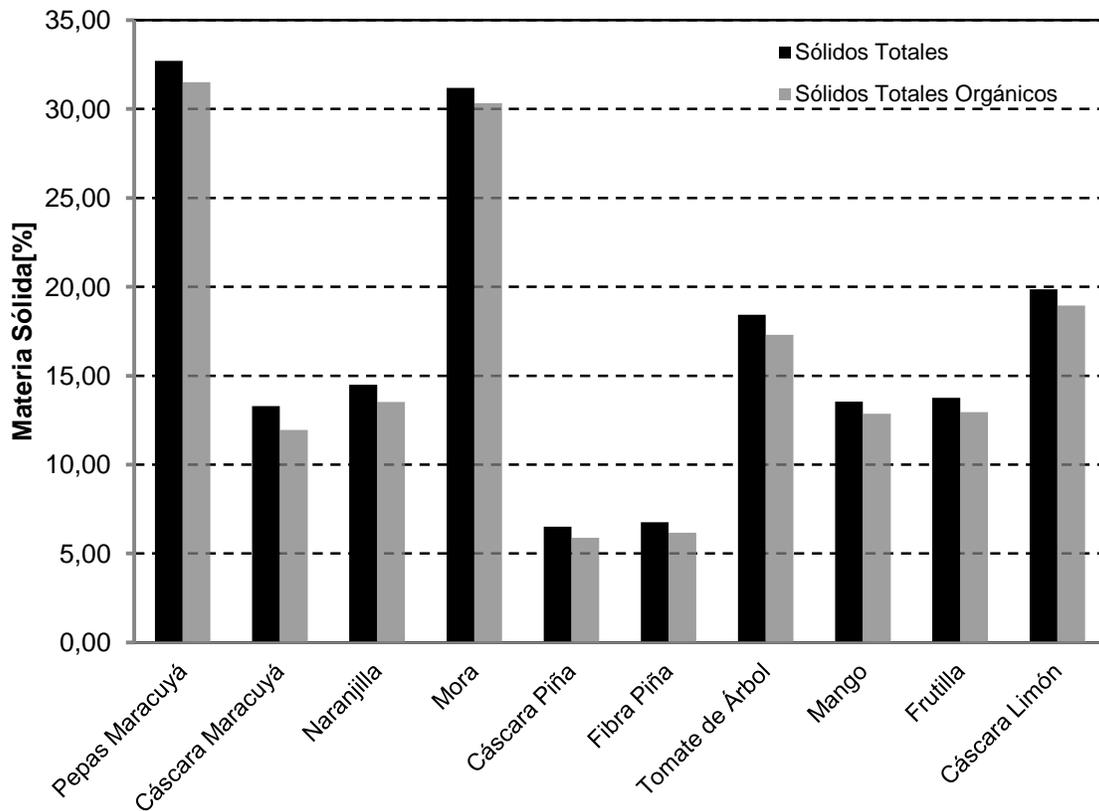


Figura 4.2. Análisis de sólidos totales y sólidos totales orgánicos (OTS) para desechos de fruta

Como se puede observar en la Figura 4.2, la cantidad de sólidos totales presente en las frutas varía entre el 13 y el 33%. Debido a esto, se deben realizar diluciones con la fruta triturada con el fin de poder trabajar con un material fluidizable y que pueda ser alimentado al digestor a través de la bomba. Se puede observar que las muestras que mayor cantidad de sólidos poseen son las pepas de maracuyá y la mora teniendo cerca de un 30% de sólidos totales. Además, se observa que los desechos de piña como fibras y cáscaras presentan la menor presencia de sólidos. Se puede también comprobar que la cantidad de sólidos totales orgánicos es muy cercana a los sólidos totales, de hecho se calcula que los OTS son aproximadamente el 96% de los TS.

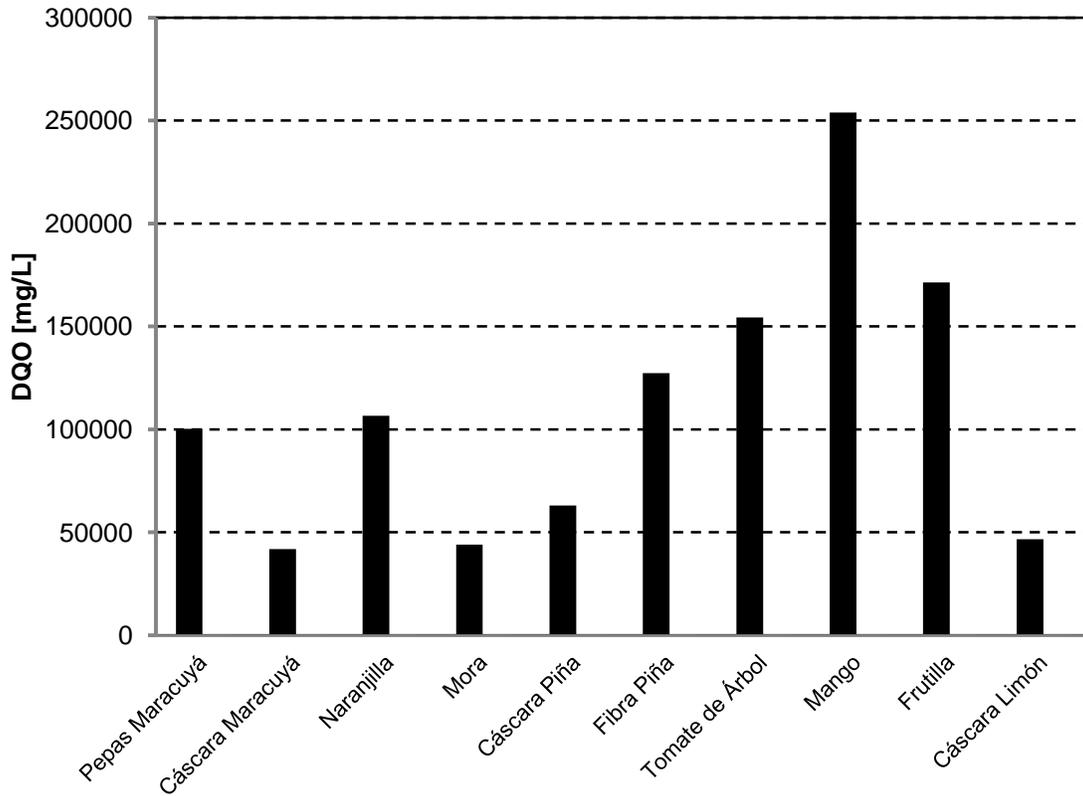


Figura 4.3. Demanda Química de Oxígeno para desechos de fruta

La demanda química de oxígeno es un parámetro que permite medir la cantidad de materia orgánica degradable que existe en una muestra líquida (21). Mediante la medición de este parámetro en la fruta, se puede determinar qué materia prima es la mejor para el proceso de la digestión anaerobia. El valor máximo de DQO se encuentra en el desecho de mango con 253 966 mg DQO / L. Asimismo, el valor más bajo se encuentra en la cáscara de maracuyá con 41 900 mg DQO / L.

4.1.2 Estiércol bovino

El estiércol bovino es la fuente de las bacterias requeridas para que el proceso de digestión anaerobia se lleve a cabo. Además contiene gran cantidad de nutrientes que son aprovechables por el suelo y posteriormente por las plantas. Para el proceso de digestión

anaerobia llevado a cabo en el LaDEA, la cantidad de materia orgánica animal requerida para alimentar al biodigestor es reducida en comparación con la cantidad de fruta necesaria. El estiércol utilizado durante la experimentación provino de tres fuentes diferentes.

- a) Zona de Pifo, Cumbayá, provincia Pichincha.
- b) Zona de Amaguaña, Rumiñahui, provincia Pichincha.
- c) Zona de Sardinas en el Chaco, provincia de Napo.

La elección del lugar de recolección de la materia orgánica animal no tuvo ninguna preferencia, únicamente de acuerdo a la disponibilidad y brevedad con que se pudo obtener. Se realizan las mediciones de pH, análisis de Sólidos Totales, Sólidos Totales Orgánicos y Demanda Química de Oxígeno a una muestra procedente de las zonas aledañas a Amaguaña puesto que fue la materia que más se utilizó para estos experimentos.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.2. Resultados de análisis de estiércol bovino

Parámetro	Valor
pH	7.87
TS (%)	13.53
OTS (%)	10.24
DQO (mg/L)	10433

Se puede observar que el valor del pH para el estiércol bovino es ligeramente básico. Esto contrasta con los valores ácidos observados para todos los desechos de fruta analizados. Entonces la adición de estiércol a la alimentación debe elevar el valor del

pH, acercándose a un pH neutro. Asimismo se observa que el estiércol posee una cantidad considerable de Sólidos Totales. Consecuentemente, se debe realizar la dilución del estiércol con agua para reducir los TS y, posteriormente, ser filtrado para eliminar impurezas como piedras, palos y hojas. Es importante hacer notar que la muestra de estiércol analizada fue fresca. Esto es determinante para cuantificar los TS puesto que esta materia prima pierde humedad con el paso del tiempo. Por ello es mejor trabajar con la muestra lo más fresca posible.

Finalmente, la cantidad de materia orgánica medida mediante DQO muestra un valor bajo de 10433 mg DQO/L. Este valor es mucho menor al de los desechos de fruta.

Con estos análisis se puede conocer de manera más detallada las propiedades que tiene cada desecho y la cantidad que se debería alimentar con el fin de poder mantener a un biodigestor funcionando. Obviamente, la cantidad alimentada de cada fruta y estiércol bovino tienen que variar de acuerdo a la carga orgánica requerida en el digestor, así como del tiempo de residencia hidráulico. Para la operación del reactor en el LaDEA se cuenta mayoritariamente con Mora como principal desechos de fruta, la cual estuvo siempre presente en las mezclas de alimentación de los distintos experimentos. A continuación, se explica de forma detallada cómo se desarrollaron los experimentos y qué influencia y cómo se controlaron los distintos parámetros.

4.2 Operación del biodigestor del LaDEA

Como se explicó previamente, el primer período de trabajo en el LaDEA consiste en un período de capacitación con los nuevos equipos y métodos de trabajo, así como con los procedimientos utilizados para analizar los parámetros necesarios para conocer el estado del proceso de digestión.

Durante el reinicio de la operación del biodigestor se realiza la alimentación de forma semanal. Para la elaboración de los experimentos definidos se controlaron diariamente parámetros como la temperatura de operación, el caudal de recirculación y el pH de la mezcla de alimentación y de la mezcla reactiva.

Para la trituración de la materia prima se utilizan los desechos de fruta sin ningún tratamiento puesto que el objetivo de este proceso es solo la reducción de tamaño. Para la filtración se toma en cuenta que se debe trabajar con un material fluidizable para que pueda ser alimentado a través de la bomba al digestor, se decidió utilizar dilución 1:1 de agua y fruta triturada y dilución 1:1 de agua y estiércol. Con esto se logró optimizar valores como fracción de agua y volumen de alimentación de fruta y estiércol.

Para definir la cantidad y composición de la mezcla de alimentación se debe conocer la composición de la materia orgánica triturada y filtrada, específicamente la DQO. Para calcular el volumen de alimentación diario para los diferentes experimentos se utiliza un programa en Microsoft Excel.

Se dividieron los valores de la calculadora en tres grupos: experimentales, fijos y calculados. Los primeros corresponden al valor de DQO de la mezcla de alimentación y el volumen del biodigestor que se calculan mediante análisis. Los valores fijos son la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico que son establecidos para cada experimento. Finalmente, los valores calculados se obtienen con las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4. Se obtiene el volumen requerido de la mezcla de fruta y estiércol diluidos, y del agua adicional requerida.

Todos estos volúmenes de reactivos debieron ser agregados al digestor de forma diaria hasta obtener una producción constante de biogás de por lo menos 3 días. En ese momento se considera terminado el experimento. Gracias a los cálculos realizados se obtienen los valores de la carga diaria de alimentación para cada experimento de la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Carga diaria de alimentación

Experimento	CO $\left[\frac{kg \ DQO}{m^3 \ día} \right]$	T [días]	Fruta $\left[\frac{kg}{día} \right]$	Estiércol $\left[\frac{kg}{día} \right]$	Agua $\left[\frac{kg}{día} \right]$	Volumen total $\left[\frac{kg}{día} \right]$
1	0.5	35	6.6	1.7	4.3	12.6
2	0.5	30	6.6	1.7	6.4	14.7
3	0.5	25	6.6	1.7	9.3	17.6
4	1.5	17.5	19.9	5	0.3	25.2
5	1.5	15	19.9	5	4.8	29.7
6	1.5	12.5	19.9	5	10.3	35.2
7	2	13	26.5	6.6	0.7	33.8
8	2	11	26.5	6.6	6.9	40
9	2	9	26.5	6.6	15.7	48.8

Como se explicó anteriormente, para experimentos con mayor carga orgánica el volumen requerido de fruta se incrementa y no se hubiese podido cubrir el volumen requerido diariamente. Para los experimentos 7, 8 y 9 se planificó inicialmente una carga orgánica de 2.5 kg DQO/m³ día, pero debido a problemas con la estabilidad del digestor, se decidió reducir la carga orgánica a 2 para conocer el límite de materia orgánica que puede transformar el digestor en biogás y biol.

El biodigestor se opera en base a los experimentos de la tabla 4.3 desde Enero del 2012 hasta Octubre del 2012. En este tiempo se obtuvieron los resultados presentados en la figura 4.4.

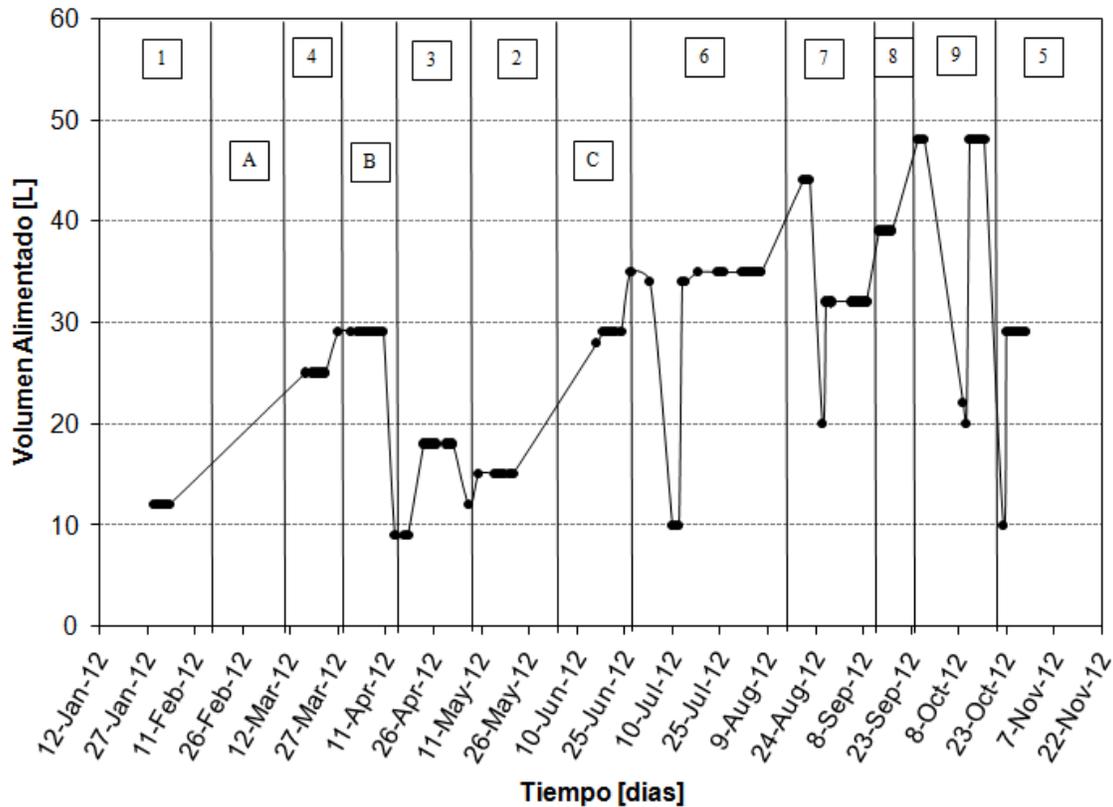


Figura 4.4. Volumen alimentado al biodigestor del LaDEA durante los experimentos

En la parte superior del gráfico se puede observar la alimentación que corresponde a cada experimento. El orden de los experimentos no es secuencial ya que se decide hacer los experimentos que requerían mayor cantidad de materia orgánica en primer lugar, como el caso de los experimentos 4, 3 y 2. Esta decisión fue tomada en base a la materia prima que se tuvo disponible. Existen períodos que no correspondieron a ningún experimento que están marcados con las letras A, B y C. Para estos períodos no se pudo contar con desecho o existió alguna variación en un parámetro que no permitió llevar cabo el experimento con éxito. En el caso A, no se pudo alimentar durante un período prolongado al biodigestor debido a que se tuvieron problemas con el intercambiador de calor. El caso B y C corresponden a etapas donde se realizaron experimentos, pero los resultados debieron ser desechados debido a problemas con descenso de pH en el caso B y una alta cantidad de ácidos grasos volátiles en el caso C.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes experimentos para su posterior interpretación.

4.3 Caracterización de la Mezcla de Alimentación

La caracterización de la mezcla de alimentación es fundamental para conocer el proceso de degradación dentro del biodigestor. Con este fin se hicieron análisis como TS, OTS y DQO. La mezcla de alimentación se prepara con una relación fruta : estiércol de 4 : 1 en volumen. Adicionalmente se agrega agua como se explica previamente para poder compensar menores tiempos de residencia. Gracias a los análisis realizados, se tuvieron los siguientes resultados de la mezcla de alimentación:

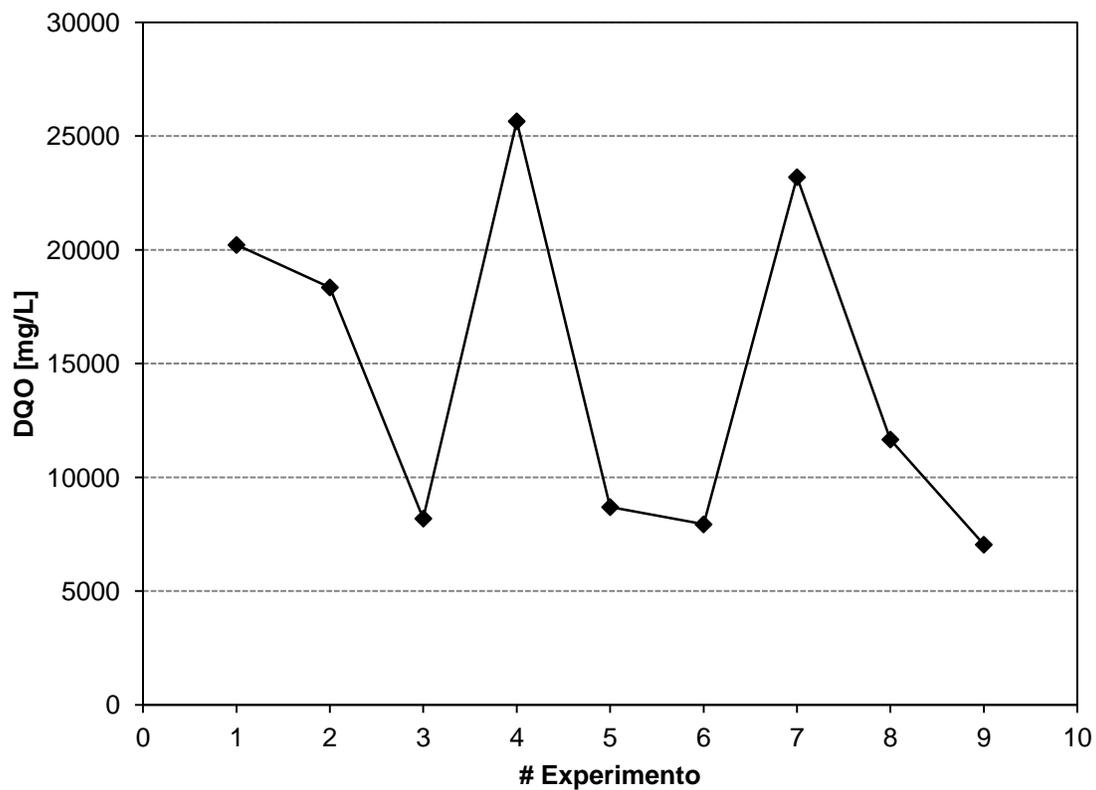


Figura 4.5. DQO de la mezcla de alimentación del biodigestor del LaDEA

Se realiza el análisis de DQO para cuantificar la materia orgánica que ingresa al digestor con el fin de poder ser degradada y transformada a biogás. Gracias a los análisis realizados por separado a la fruta y al estiércol ya filtrados, se utiliza un valor de 26548 mg DQO / L para realizar los cálculos del volumen de materia orgánica requerida ingresar al digestor así como del agua extra con el objetivo de variar el tiempo de retención hidráulico (TRH). Con los valores de DQO real para la mezcla de alimentación se calcula la carga orgánica real que se alimentó al reactor durante los experimentos. Para los experimentos de carga orgánica de 0.5 kg DQO / m³ día se encontró que el valor de carga orgánica real fue de 0.38 kg DQO / m³ día. Para la carga orgánica de 1.5 kg DQO / m³ día, el valor de la carga orgánica real fue de 1.44 DQO / m³ día. Finalmente, para los experimentos de carga orgánica 2 kg DQO / m³ día se encontró que el valor real fue de 1.75 kg DQO / m³ día.

La cantidad de sólidos presentes en la mezcla de alimentación ayuda a determinar si el factor de dilución es apropiado además de indicar el volumen máximo de aditivo que puede ser añadido en caso de ser necesario para controlar el pH. De la Figura 4.6, tomando los experimentos 1, 2 y 3 que correspondieron a carga orgánica de 0.5 kg DQO / m³, se observa que la cantidad de sólidos estuvo bajo el 7% en todos los casos. Además se observa un descenso en la cantidad de sólidos, debido a que a medida que se reduce el tiempo de retención, se debe agregar agua con lo que se reduce el porcentaje de materia sólida. Similares observaciones se pudieron registrar para los experimentos 4, 5 y 6. En los experimentos 7, 8 y 9 se observa claramente que la cantidad de sólidos totales presentes en la mezcla de alimentación son altos pues se encuentran cercanos al límite de 8% encontrado en la bibliografía para biodigestores (1) y es superior al 6% que era el valor máximo para el digestor del LaDEA según estudios previos (21). Adicionalmente, se evidencia que a medida que cambia el tiempo de retención y la cantidad adicionada de agua es mayor, la cantidad de sólidos totales ya no se ve afectada. Para estos últimos experimentos se tuvieron problemas de estabilidad del digestor, así como de taponamiento de tuberías y de la bomba centrífuga. Además se puede observar en las gráficas de pH y de producción de gas un comportamiento inestable lo cual no permite una producción de biogás con alto contenido de metano.

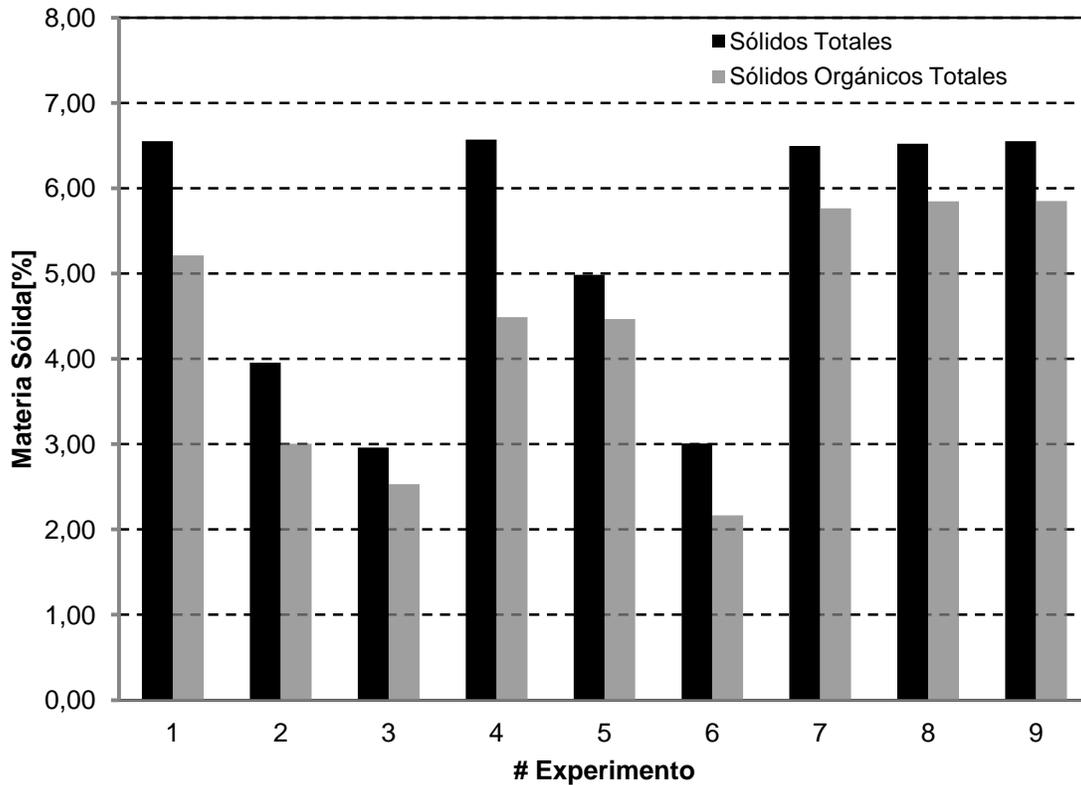


Figura 4.6. Sólidos totales y sólidos totales orgánicos de mezcla de alimentación del biodigestor del LaDEA

Dado que se determina la cantidad de sólidos totales existentes en la mezcla de alimentación, se puede igualmente determinar la cantidad de sólidos totales orgánicos que pudieron ser transformados posteriormente por acción bacteriana a biogás. Se encuentra que los sólidos totales orgánicos correspondieron al 90% de los sólidos totales aproximadamente en la mezcla de alimentación. Con ello se pudo concluir que la mayoría de materia sólida puede ser degradada por acción bacteriana. En cuanto a la Figura 4.6 se observa un patrón similar para los primeros 6 experimentos en donde la cantidad de sólidos totales orgánicos va disminuyendo a medida que se disminuye el tiempo de retención hidráulico. En relación a los experimentos 7, 8 y 9 se tiene que existe gran disponibilidad de OTS, pero este exceso puede acarrear inestabilidad en el proceso de digestión anaerobia como ocurrió durante la realización de los mismos.

Se puede observar que el valor de pH de la alimentación siempre se encuentra en un valor menor a 6, con lo cual se corre el riesgo de que el pH en el interior del digestor descienda, pero gracias a la capacidad buffer del mismo sistema además del reactivo añadido se tiene que este valor puede ser mantenido dentro de los límites. Durante la alimentación se puede añadir cierta cantidad de aditivo para mantener el pH. Pero la cantidad depende de la cantidad de sólidos en el interior del digestor. Se puede observar que el pH de la mezcla de alimentación no es tan bajo como el de las frutas solas dado que se añade estiércol el cual posee un pH ligeramente básico sobre 7.

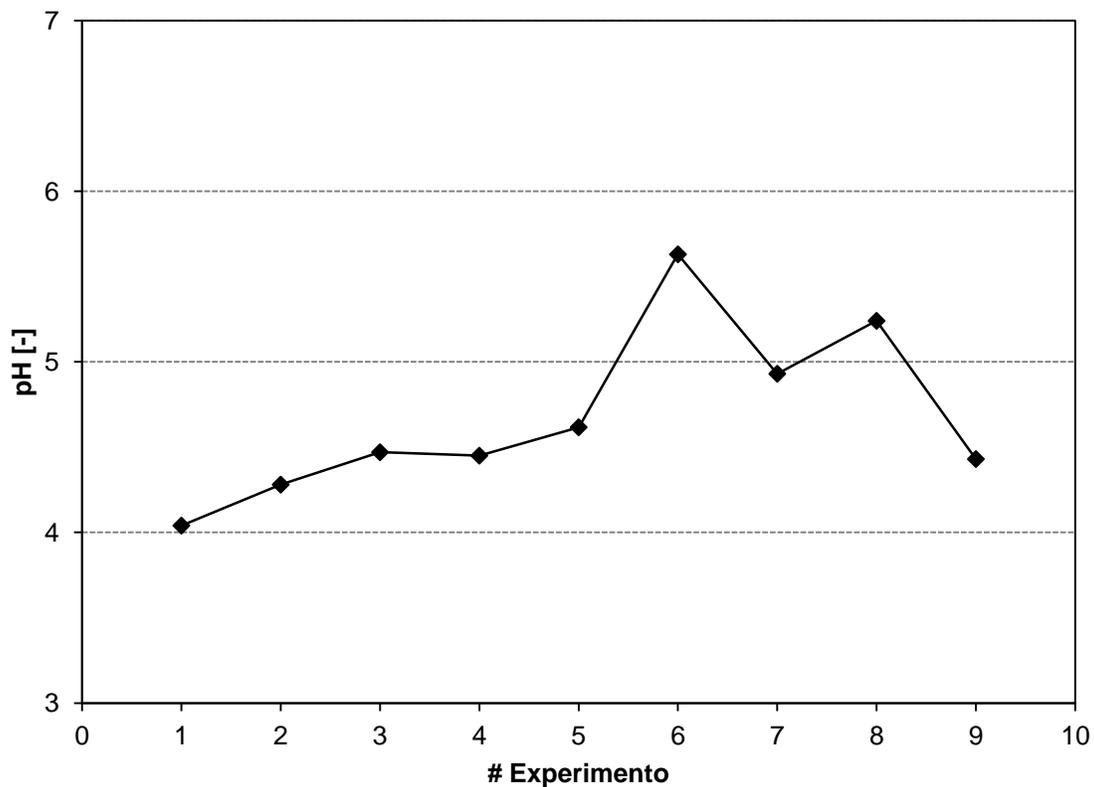


Figura 4.7. pH de la mezcla de alimentación durante los experimentos en el digestor del LaDEA

4.4 Resultados obtenidos

4.4.1 Resultados de los parámetros operacionales

Con la finalidad de mantener control sobre el sistema, se tuvieron en cuenta varios parámetros de operación entre los que se tiene a la temperatura, el pH y el volumen de gas producido.

La temperatura es uno de los valores más importantes a mantener constante. Sin embargo, durante la operación se tuvieron problemas para poder controlar la misma. Al inicio de la operación se encontraba operando el intercambiador de calor instalado previamente, pero el mismo se encontraba deteriorado y el controlador automático estaba desconectado. Con este intercambiador se fija la temperatura de operación a 39°C. De acuerdo a la Figura 4.8, para el experimento 1 se trabaja con una temperatura de operación de 36°C. Posteriormente, fue complicado mantener al digester a la temperatura preestablecida de 39°C debido a la ausencia del intercambiador de calor. Se alcanzaron temperaturas de hasta 45°C. Este problema se lo pudo controlar deteniendo la recirculación con el fin de no permitir que la temperatura continuara su ascenso. Dicho caso se presenta en los experimentos 2, 3 y 4. Para los experimentos 5 y 6 ya se tuvo instalado el nuevo intercambiador de calor pero el controlador no se lo tuvo conectado. Por este motivo, la temperatura de operación es de 36°C. Sin embargo, con la repetición del experimento 5 se puede observar que la temperatura de operación es la adecuada. Lo mismo sucedió para los experimentos 7, 8 y 9 donde el intercambiador de calor funciona de forma adecuada y la temperatura llega al valor deseado de 39°C.

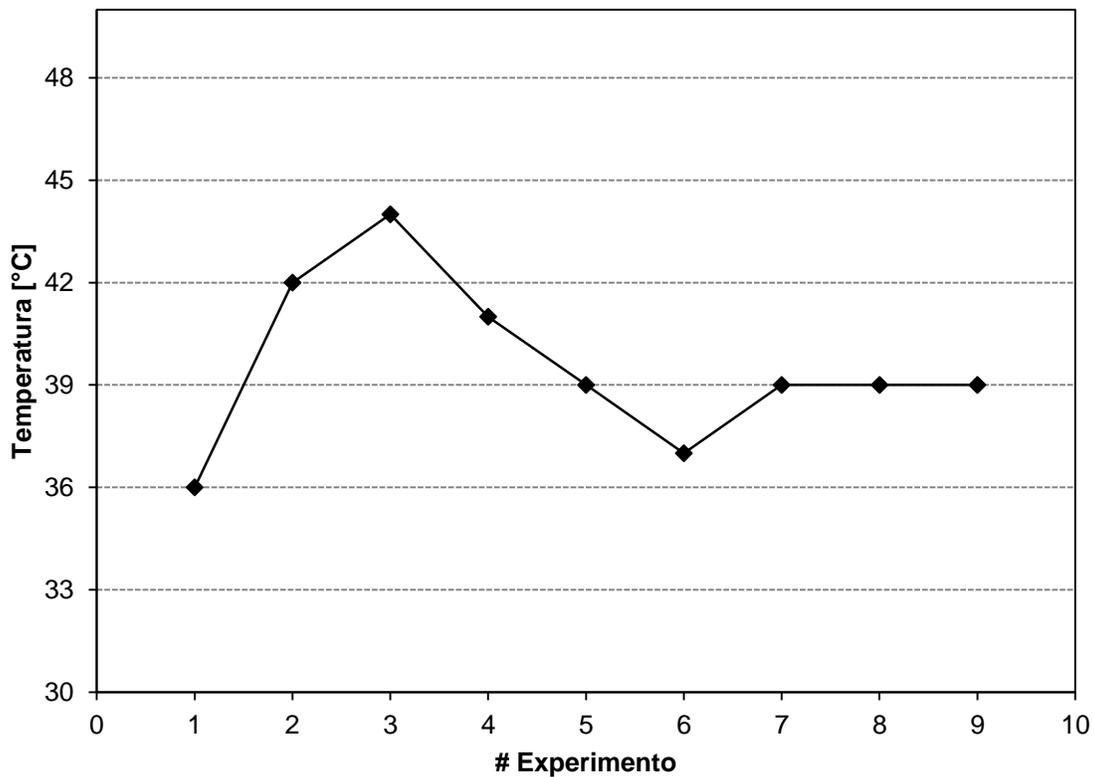


Figura 4.8. Temperatura durante la operación del biodigestor del LaDEA

La determinación del valor del pH para la mezcla reactiva y para el biol obtenido luego de la digestión permite conocer el estado del digestor. Para que exista un trabajo óptimo por parte de las bacterias, metanogénicas especialmente, el pH debe encontrarse en un valor entre 6.5 y 7.5. Para los experimentos llevados a cabo se observa en la Figura 4.9 que el valor de este parámetro se encuentra dentro de los valores deseados con lo cual se puede aseverar que el digestor trabajó con un ambiente propicio para el crecimiento y metabolismo adecuado de los microorganismos encargados de la digestión anaerobia. Se observa que para el experimento 4 se tiene un valor de pH ligeramente elevado.

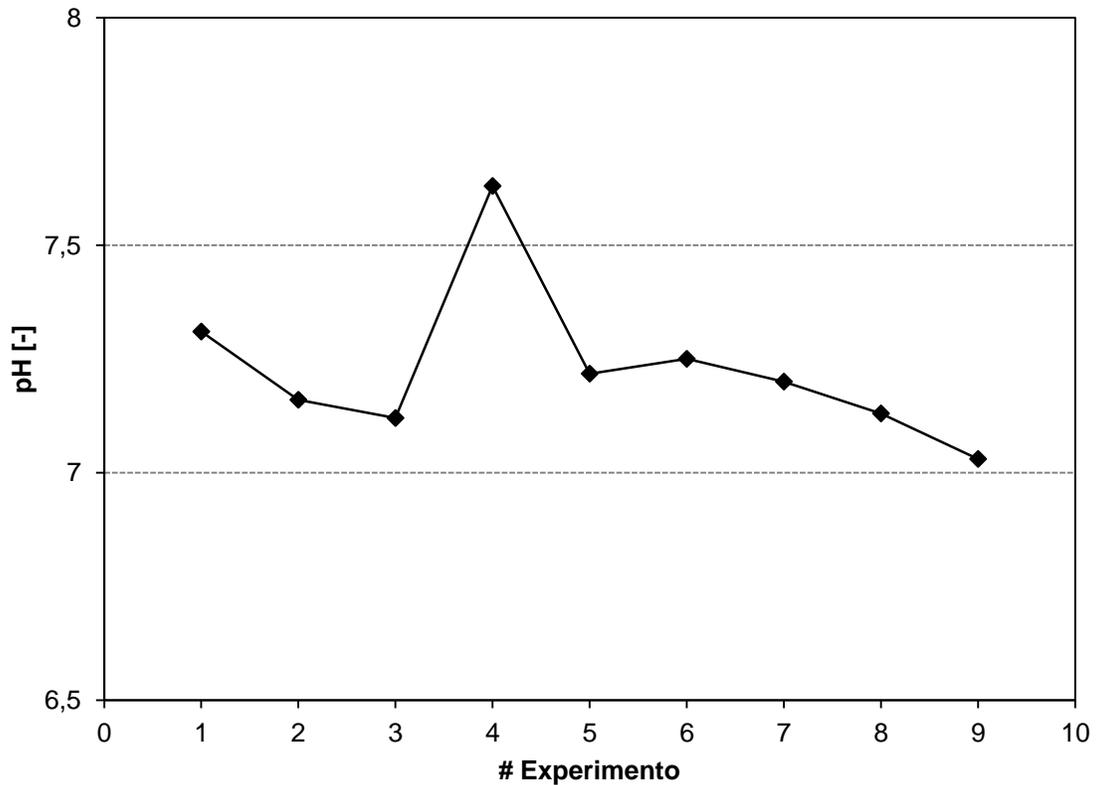


Figura 4.9. pH en el digester durante los experimentos en el biodigestor del LaDEA.

El objetivo de los experimentos consiste en obtener la mayor cantidad de biogás con el mayor contenido de metano. En la figura 4.10 se presenta el volumen diario promedio de biogás producido que es monitoreado con el contador de gas. Para los experimentos del 1 al 6 se tiene que la producción de gas en el digester sigue un patrón creciente. Para los experimentos finales de carga orgánica $2 \text{ kg DQO} / \text{m}^3 \text{ día}$, se tiene una producción elevada de biogás. Sin embargo, una producción alta no quiere decir que el biogás tenga buen contenido de metano que es el gas energéticamente importante.

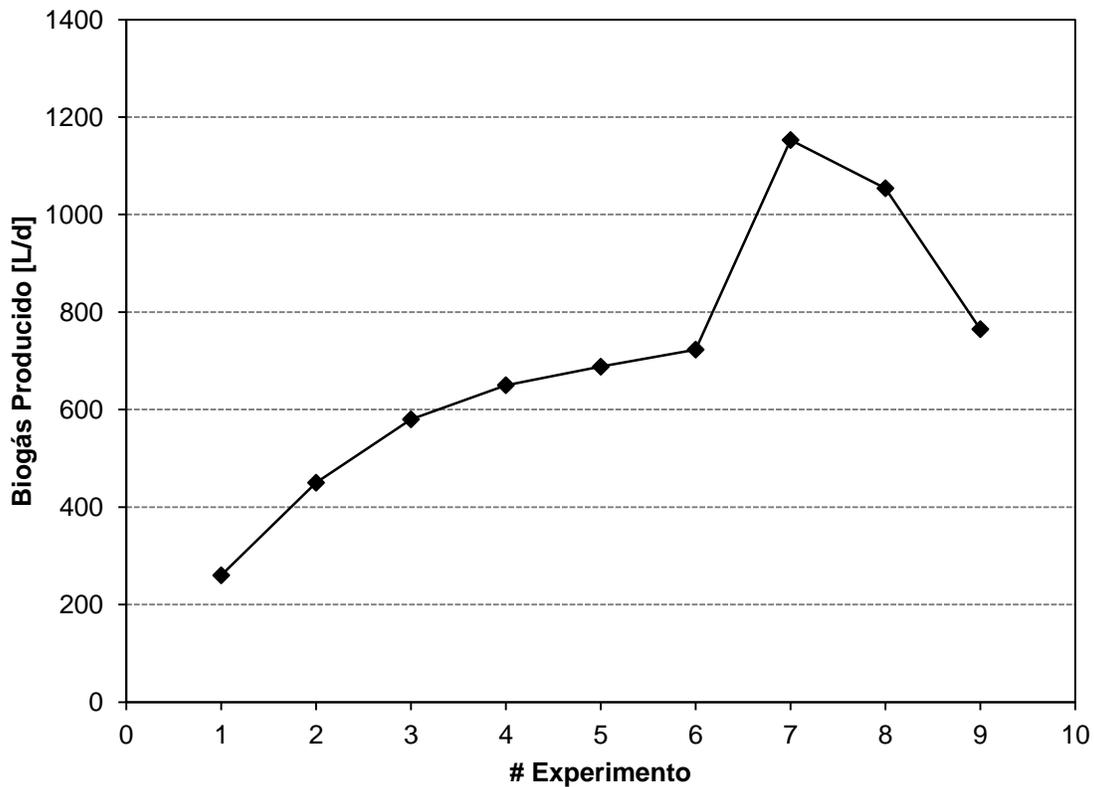


Figura 4.10. Producción de biogás en el digestor del LaDEA

4.4.2 Resultados de los análisis de la mezcla reactiva

Una vez controlados los parámetros diarios que pueden ser medidos directamente del sistema del digestor, se deben hacer análisis más detallados de la mezcla reactiva que se obtiene del reactor con el fin de poder comparar estos valores con los obtenidos en los análisis a la mezcla de alimentación. A la mezcla reactiva se hicieron análisis de DQO, Alcalinidad y AGV.

Se realizaron análisis de DQO para relacionar la materia orgánica que ingresa al digestor con la materia orgánica en la mezcla reactiva. Dado que la acción bacteriana transforma

toda la materia orgánica en metano y dióxido de carbono, el valor de DQO en la mezcla reactiva debe ser menor que el valor de la mezcla de alimentación. Esto se comprobó que mientras la muestra de alimentación tiene un DQO alrededor de 25000 mg/L, el valor de DQO para la mezcla reactiva extraída se encontró entre 1500 y 4500 mg/L. Esta variación se da debido a que los volúmenes ingresados de materia orgánica fueron incrementándose a medida que se eleva la carga orgánica.

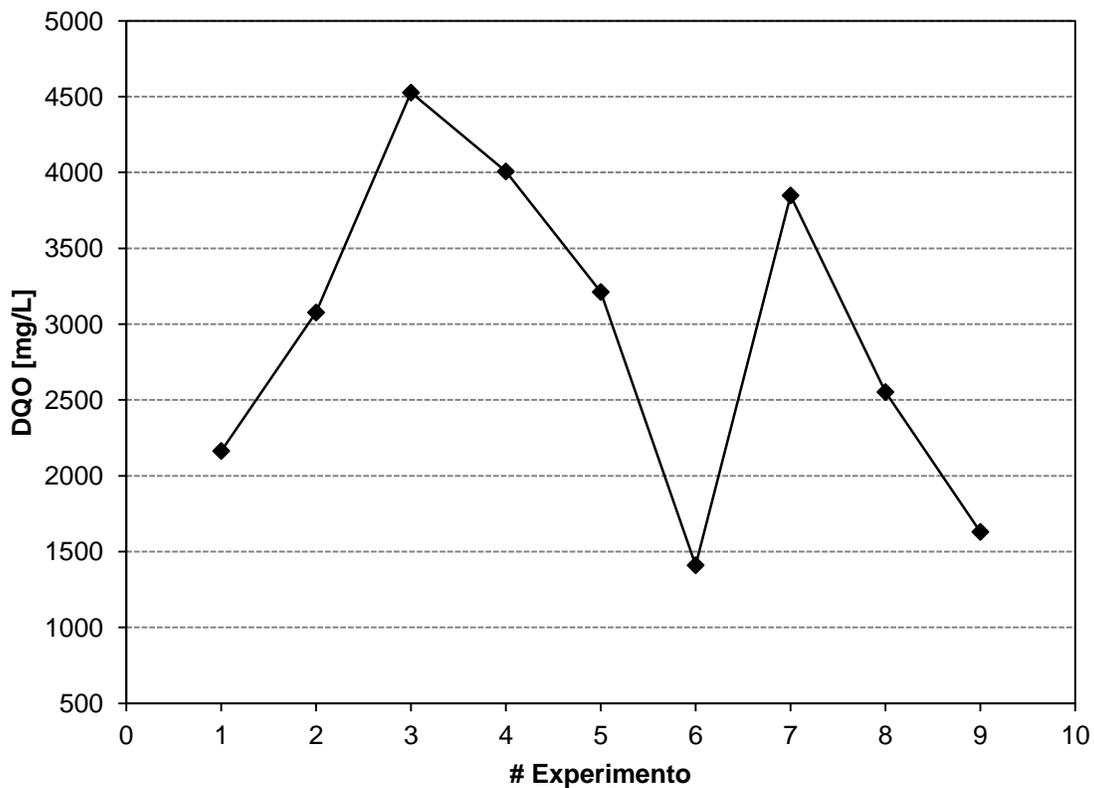


Figura 4.11. Demanda Química de Oxígeno para la mezcla reactiva

El límite de sólidos totales deseado en el digester del LaDEA es de 6%. Durante toda la operación se obtiene un porcentaje de sólidos inferior al límite permitido. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las frutas utilizadas durante los experimentos poseen un contenido de sólido elevado por lo cual se obtiene una parte sólida como producto

durante la operación del biodigestor. Por ello, es importante considerar que como subproducto se obtiene biosol.

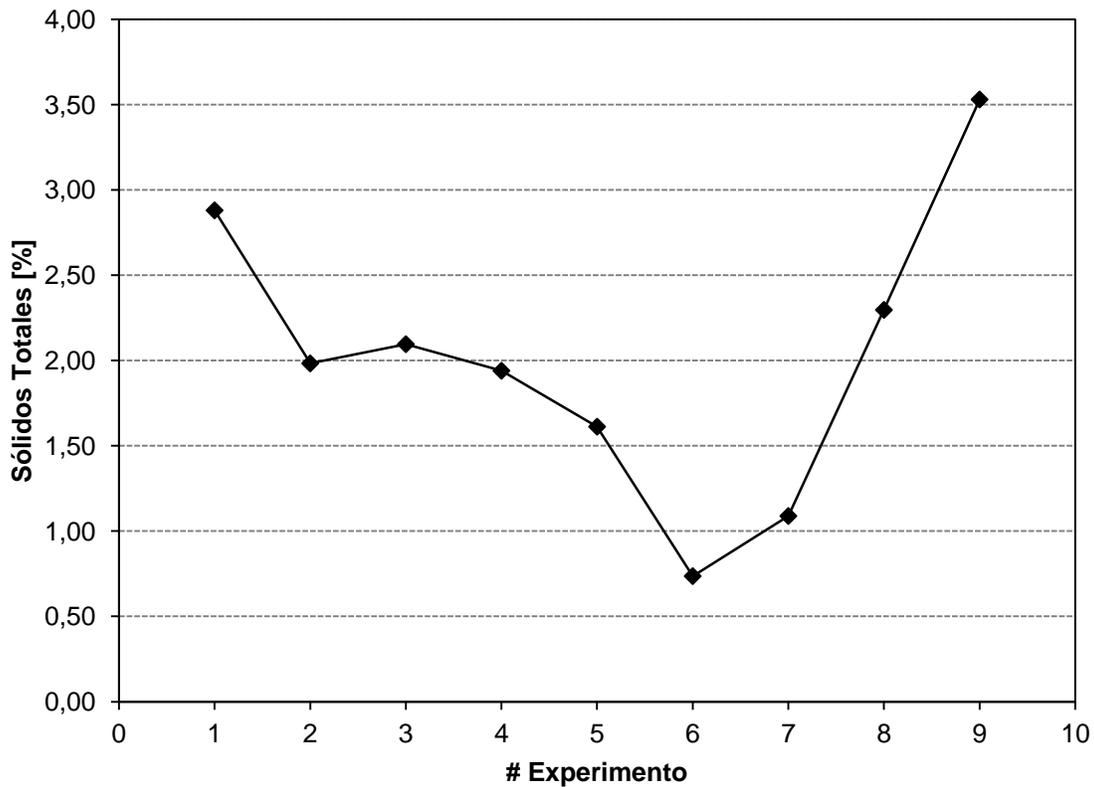


Figura 4.12. Sólidos totales en la mezcla reactiva extraída del biodigestor del LaDEA

Como se explica previamente, el biosol es un fertilizante sólido que también es resultado de la digestión anaerobia. Debido a este componente sólido que se depositó en el fondo del digestor, así como en los recipientes donde se almacenó el biol, se tuvieron problemas de taponamiento de bombas y tuberías. Especialmente en los experimentos de carga orgánica $2 \text{ kg DQO} / \text{m}^3 \text{ día}$ debido a que la cantidad de aditivo añadido para controlar el pH es más grande con lo que el porcentaje de sólidos se incrementó. Una muestra de biosol se presenta en la Figura 4.13.



Figura 4.13. Biosol obtenido luego de filtrar el biol extraído del biodigestor del LaDEA

En la Figura 4.14 se puede observar que el porcentaje de sólidos totales orgánicos en la mezcla reactiva no rebasa el 2%. Estos valores, conjuntamente con los de DQO, muestran que la materia orgánica en el interior del digestor fue degradada. Ambos indicadores se reducen dada la acción bacteriana. Específicamente, tanto el DQO como los OTS demuestran la transformación de la materia orgánica más no se orienta hacia la calidad del biogás obtenido. El estiércol y la fruta pudieron ser transformados en metano o en dióxido de carbono. Este criterio depende del análisis realizado al biogás y del volumen producido del mismo diariamente.

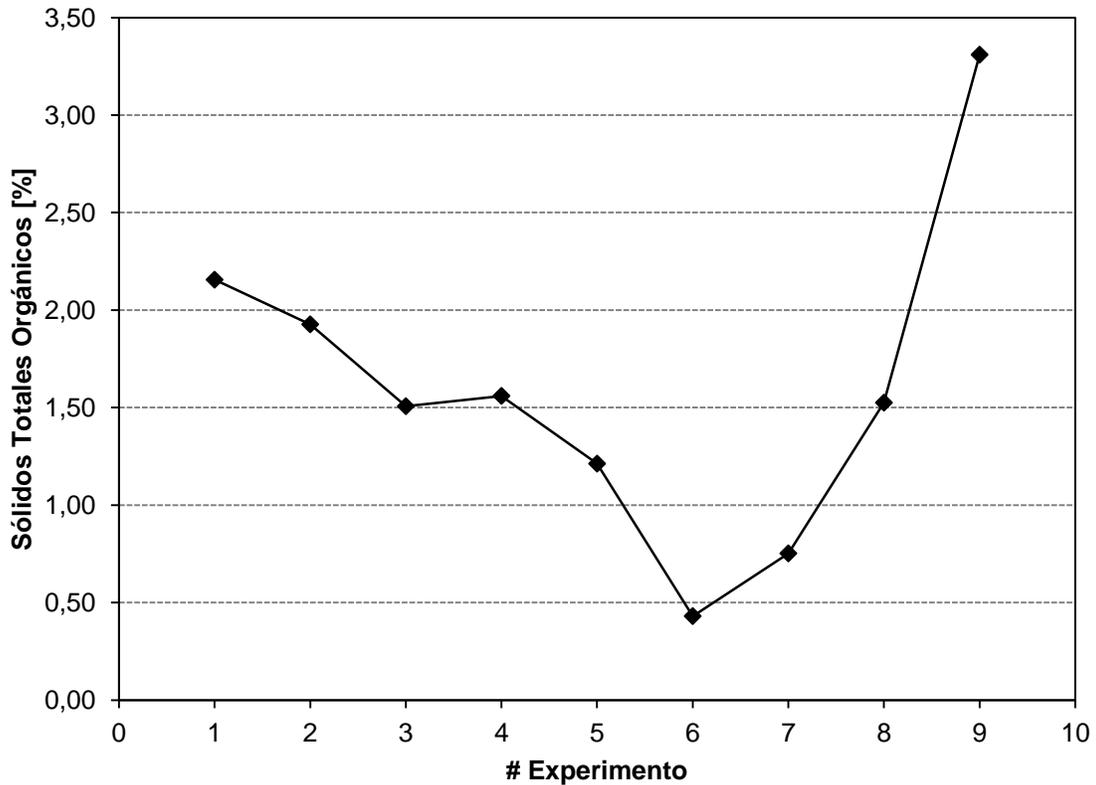


Figura 4.14. Sólidos Orgánicos Totales en la mezcla reactiva extraída del biodigestor del LaDEA

Uno de los criterios más importantes dentro de la operación del digestor consiste en la estabilidad del mismo dado los componentes que se encuentren en la mezcla reactiva. Cuando un experimento se da por terminado, se toma una muestra del contenido del digestor y se miden ácidos grasos volátiles y alcalinidad. Se sabe que la relación debe ser menor a 0.5 para que se considere al sistema estable y que la producción de gas sea la adecuada. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.4. Alcalinidad y AGV para experimentos realizados en el biodigestor

Experimento	Carga Orgánica $\left[\frac{kg\ DQO}{m^3\ día} \right]$	τ [días]	pH [-]	Alcalinidad [mg/L]	AGV [mg/L]	Relación AVG:Alc	Aditivo [g]
1	0.5	35	7.31	2650	1296	0.49	0
2	0.5	30	7.16	1510	1218	0.81	0
3	0.5	25	7.12	1950	1320	0.68	0
4	1.5	17.5	7.63	2900	1277.42	0.44	50
5	1.5	15	7.22	2045	1258	0.62	100
6	1.5	12.5	7.25	1789	1532	0.86	150
7	2	13	7.20	2676	2769	1.03	150
8	2	11	7.13	2431	2678	1.10	250
9	2	9	7.03	2284	2782	1.22	350

Se puede observar que la relación entre la cantidad de ácidos grasos volátiles, formados durante el proceso de digestión anaerobia, y la capacidad buffer, dada por la alcalinidad del sistema, es alta desde los primeros experimentos. Esto quiere decir que a pesar de que se pudo soportar la acidez presente en el digestor, una variación pequeña hubiese causado la pérdida de estabilidad en la producción de biogás. Durante los primeros experimentos no fue necesaria la adición de reactivos para mantener el pH en el rango óptimo. Sin embargo, a partir del experimento 4 en adelante se requiere agregar Cementina para poder controlar el pH. Este reactivo es una mezcla de hidróxido de calcio o cal apagada ($Ca(OH)_2$) y carbonato de calcio ($CaCO_3$); ambos reactivos se juntan con los iones hidronio reduciendo la acidez del sistema. Se observa en la tabla 4.4 que la cantidad de reactivo añadido se inicia a partir del experimento 4. Para los experimentos con carga orgánica de 2 kg DQO / m³ día, el peso añadido de cementina se incrementa considerablemente, deteniéndose como máximo en 350 g para no afectar al contenido de sólidos en el digestor.

4.4.3 Caracterización del biogás

Con la finalidad de poder determinar la mezcla de alimentación más apropiada, se tuvo que medir el volumen de biogás producido diariamente. Cada experimento se desarrolla hasta que la producción de biogás sea constante durante tres días. De esta forma se puede conocer que la transformación de la materia orgánica a biogás ha llegado a la estabilidad para la carga orgánica y tiempo de retención hidráulico dados. Además se debe realizar el análisis cualitativo y cuantitativo del biogás para conocer la calidad del mismo. De hecho, la producción de gas puede ser elevada y contener poca cantidad de metano, con lo que el biogás obtenido no es de buena calidad. Para el análisis cualitativo se comprueba la presencia de metano mediante la expulsión del gas cerca de una fuente de ignición como una vela encendida. La combustión del gas es la prueba de la presencia de metano con una llama de color azul y constante como se presenta en la figura 4.15.



Figura 4.15. Análisis cualitativo de biogás

Para todos los experimentos realizados se encuentra presencia de metano en el gas producido puesto que para todos ellos se quema el gas. Para los experimentos con carga orgánica 0.5 y 1.5 kg DQO / m³ día se observa una llama de color azul que se mantiene encendida por sí sola hasta que la presión de gas en el interior del digestor llega a cero. En el caso de los experimentos de carga orgánica 2 kg DQO / m³ día se quema el gas, pero el color de la llama es azul tenue y no muy intensa. Además, se apaga luego de unos 5 segundos por lo cual se tuvo que encender varias veces la llama para comprobar la presencia de metano.

Adicional a la determinación de la existencia de metano, se determina el porcentaje presente dentro del biogás producido. Para ello se absorbe el CO₂. Con dicha finalidad se toma la muestra de 60 mL de biogás que pasó ya por los filtros para retirar el H₂S y la trampa de humedad y se la hace burbujear a través de una solución con hidróxido de sodio al 4%, al final se recoge el gas por desplazamiento en una probeta invertida, para conocer el volumen de metano contenido en el gas analizado.

En la figura 4.16 se pudo observar que el biogás con el mayor porcentaje de metano es el que corresponde al experimento 3 con 72%. Para los experimentos 4, 5 y 6 se observa una fracción de metano que se encuentra dentro de los rangos aceptables para biogás aprovechable energéticamente ya que contienen alrededor de 60% del hidrocarburo, además se produce mayor cantidad de biogás que en los experimentos 1, 2 y 3. Finalmente, para los experimentos 7, 8 y 9, la cantidad de gas producida en el digestor es muy alta con 1000 litros de gas por día pero la desventaja es que la cantidad de metano presente es baja y se considera que el biogás no es de buena calidad.

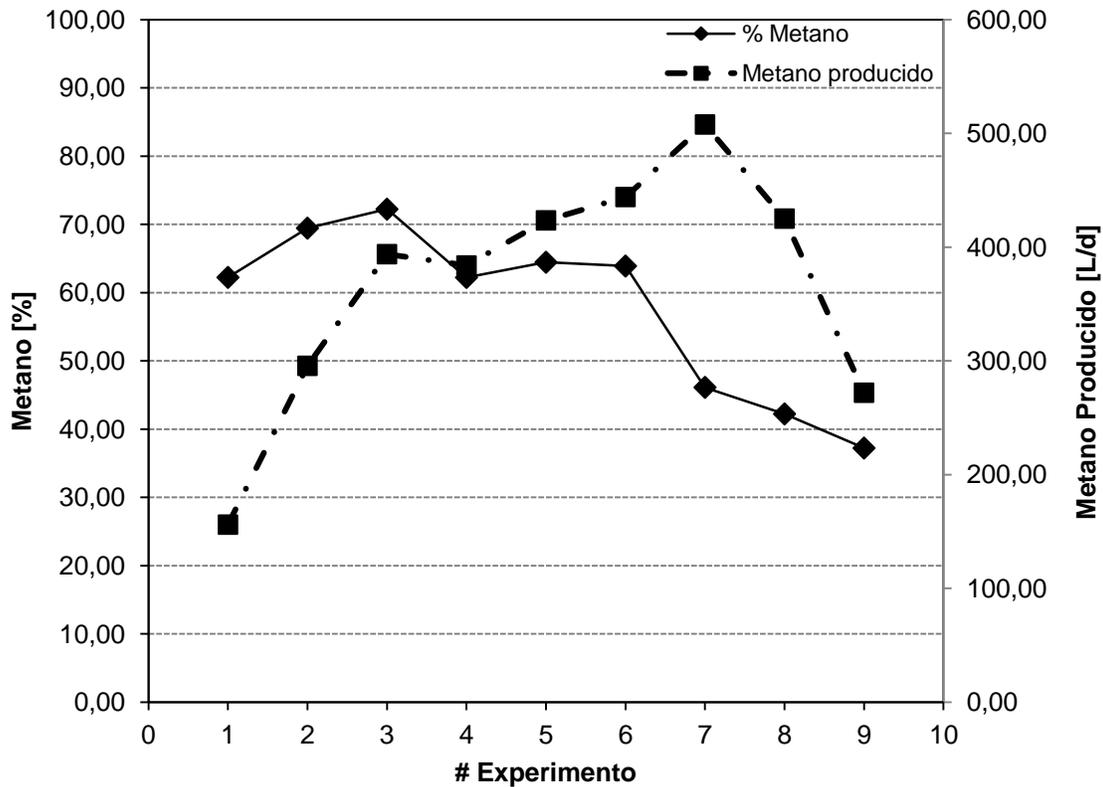


Figura 4.16. Porcentaje de metano en el biogás producido

4.4.4 Caracterización del biol

El otro producto de la digestión anaerobia es un fertilizante líquido conocido como biol. Este debe tener propiedades que aporten nutrientes al suelo y que lo acondicionen de forma apropiada para que las plantas puedan crecer con mayor vitalidad y se vea reflejada en el tamaño de las mismas y de su adaptabilidad a condiciones adversas.

4.4.4.1 Análisis de Macro y Microelementos

Considerando que el objetivo de la producción de biol es su aplicación en suelos, es necesario realizar análisis de ciertos elementos que son vitales como macro y

micronutrientes. Entre dichas pruebas también se lleva a cabo la determinación de nitrógeno. El nitrógeno ingresa al reactor en su forma orgánica como proteínas. Durante la digestión estas moléculas grandes son fraccionadas y el nitrógeno pasa a formas inorgánicas como amonio y amoníaco. Dado que en el biol se encuentra principalmente en su forma reducida como amonio, se determina la cantidad total de nitrógeno N-NH₄. Asimismo, otro nutriente que es importante cuantificar es el fósforo. Se mide la cantidad de fosfatos presentes en el biol ya que también son aprovechables por las plantas para llevar a cabo sus procesos metabólicos. En la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.5. Macronutrientes en el biol

Elemento	Muestra 1 [mg/L]	Muestra 2 [mg/L]	Muestra 3 [mg/L]	Promedio [mg/L]
Carbono	4190	3910	3470	3856
Nitrógeno	900	1000	1050	983
Fósforo	221	226	222	223
Potasio	1366	1153	1540	1353

Para el biol se debe determinar la relación C:N:P:K para conocer los efectos que tendrá sobre el suelo. Se obtuvo la relación 100 : 25 : 6 : 35.

Finalmente, dado que la aplicación del biol obtenido es para uso en suelos como fertilizante, es preciso determinar la presencia de microelementos. Esto se debe a que algunos de estos componentes pueden ser perjudiciales para los materiales de los cuales la planta puede ser construida. Además algunos de estos elementos son importantes como nutrientes para la vida vegetal y es crucial tenerlos presentes en el suelo. Mediante espectroscopia de absorción atómica se determinó la presencia de micronutrientes en el biol, en la tabla 4.6 están los valores encontrados.

Tabla 4.6. Micro y macro elementos en el biol

Elemento	Muestra 1 [ppm]	Muestra 2 [ppm]	Muestra 3 [ppm]	Promedio [ppm]
Cobre	5.29	4.09	4.27	4.55
Calcio	1546.67	1433.33	2246.67	1490.00
Magnesio	140.00	133.33	713.33	136.67
Manganeso	3.75	3.05	3.17	3.32
Hierro	80.00	100.00	426.67	90.00
Zinc	6.30	4.65	5.01	5.32

Se puede observar por lo tanto, que los nutrientes más abundantes fueron el calcio con 1490 ppm y magnesio con 1353 ppm. Adicionalmente, para poder comparar los valores de estos análisis, se envió una muestra de biol al Laboratorio de Nutrición del Iniap. Se presenta en la tabla 4.7 los resultados.

Tabla 4.7. Macro y Microelementos en el biol hechos en el Iniap

Elemento	Valor [ppm]
Calcio	1243.1
Fósforo	24.1
Magnesio	155.8
Potasio	1250
Sodio	44.7
Cobre	3.08
Hierro	24.52
Manganeso	1.82
Zinc	0.82

Se observa que los valores de los micronutrientes son muy similares para los análisis hechos en el Laboratorio de Química de la USFQ y los hechos en el Iniap. Para los macroelementos, se tiene que la presencia de potasio es similar pero el fósforo medido cambia por un orden de magnitud. Esto se debe al método empleado en ambos análisis.

4.4.4.2 Análisis Microbiológico

La acción bacteriana en el interior del digestor se da en ausencia de oxígeno. Gracias a ello los microorganismos anaerobios estrictos pueden tomar parte en el proceso y producir biogás. Dichas bacterias son principalmente las metanogénicas. Dado que las materias orgánicas animal y vegetal se encuentran a la intemperie, pueden poseer bacterias aerobias que deben ser eliminadas durante el proceso de digestión debido a la ausencia de oxígeno. Dichos microorganismos son las *coliformes* y particularmente la bacteria *E. Coli*. La ausencia de estos organismos en el biol indica el correcto desarrollo de la digestión anaerobia, así como la ausencia de fugas en el reactor.

Para llevar a cabo el análisis microbiológico se realizaron cultivos celulares como se explica en la sección 3.2.10. Para un primer cultivo se obtuvieron los resultados de la Figura 4.17.

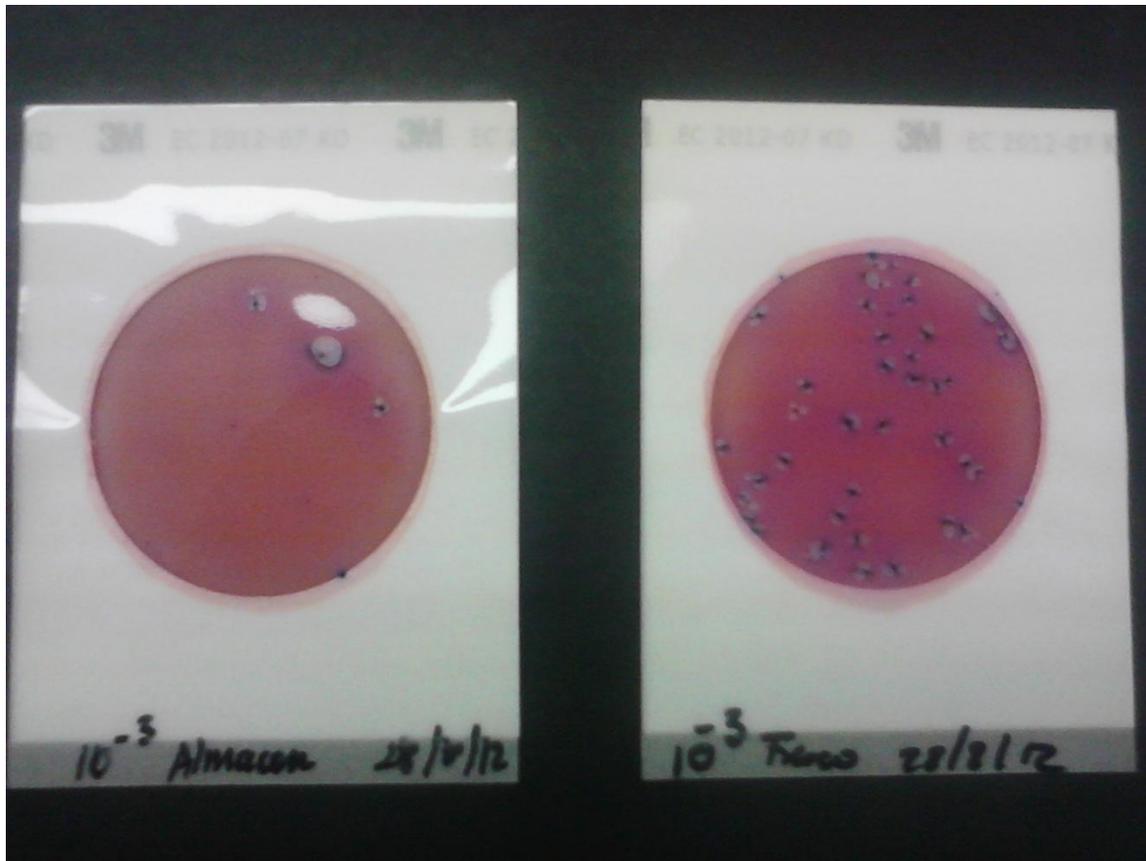


Figura 4.17. Primer análisis microbiológico de coliformes totales y E. Coli en biol almacenado (izquierda) y biol fresco (derecha)

En primera instancia se llevó a cabo el análisis del biol tomándolo directamente del digestor. En los cultivos, los puntos rojos con presencia de burbuja de gas corresponden a las coliformes totales y los puntos morados con presencia de burbuja de gas corresponden a E. Coli. Se tuvo gran presencia de este segundo tipo de bacteria cuando la presencia de ambas debió ser reducida o casi nula. Debido a estos resultados inesperados se decidió trabajar de una manera más higiénica utilizando un solo recipiente para el manejo del biol y de esta forma se evitó la contaminación cruzada. Adicionalmente, se revisó por la existencia de fugas en el digestor. La Figura 4.18 muestra los resultados que se obtuvieron en la repetición del experimento luego del cambio de condiciones de manejo de biol.

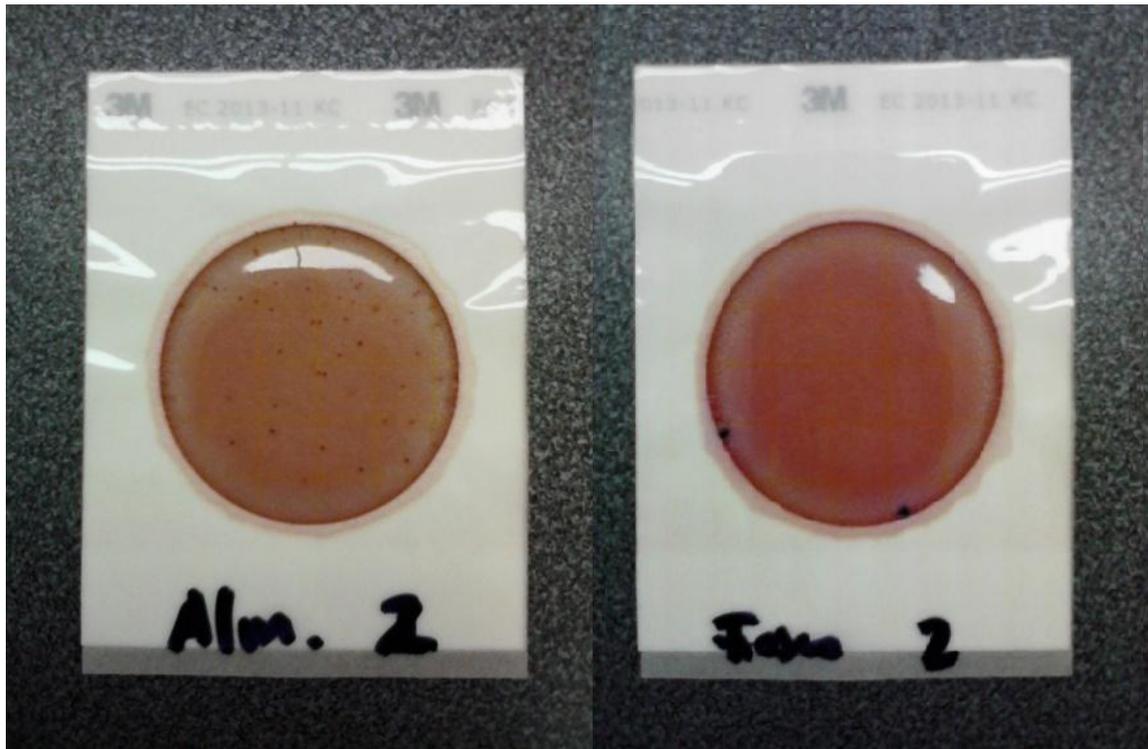


Figura 4.18. Segundo análisis microbiológico de coliformes totales y *E. Coli* en biol almacenado (izquierda) y biol fresco (derecha)

En el segundo experimento se puede observar que la cantidad de microorganismos contados se redujo drásticamente. Para el biol almacenado se tuvo la presencia de puntos rojos en el cultivo pero ninguno de ellos tiene burbuja de gas, por ello se concluye que no existieron *coliformes* totales. No se contaron puntos morados. En el biol fresco no se tuvieron puntos rojos, pero si puntos morados pero de la misma forma, no existió asociación con burbujas de gas por lo que se concluye que en el cultivo no estuvieron presentes *E. Coli*.

4.4.4.3 Aplicación de biol como fertilizante orgánico

Una vez que se caracteriza el biol producido durante la digestión anaerobia, se procede a realizar experimentos con el fin de poder conocer cuáles son los alcances del biol como fertilizante. El biol se ha caracterizado por ser un fluido que da nutrientes al suelo, los vuelve más disponibles y asimilables para las plantas y su método de aplicación es más sencillo dado que se encuentra en estado líquido a diferencia del estiércol o de los residuos de fruta.

El experimento consiste en estudiar el efecto del biol sobre el crecimiento de las plantas. Para este se utilizan tres tipos distintos de tierra. El primer tipo de tierra que se utilizó fue adquirida en un punto de venta y se conoce con el nombre de tierra abonada. Esta está preparada para sembrar, viene con mayores nutrientes y su porosidad es mayor. Dicha tierra posee un color negro y contiene restos de materiales orgánicos como raíces y restos de hojas.

El segundo tipo de tierra se la recogió de los exteriores del LaDEA. Esta tierra presenta características diferentes a la abonada. Su porosidad es reducida, no tiene ningún tipo de preparación para el experimento y no presentó vegetación a su alrededor. Era de color café claro y no presentaba ningún tipo de componentes adicionales.

El tercer tipo de tierra se recogió de la cancha de fútbol de la Universidad San Francisco de Quito. Esta presenta cualidades similares a la primera tierra. Su color es negro, contiene pequeños restos de raíces y su porosidad es mayor a la segunda tierra.

Para controlar y observar los efectos del biol en las plantas, se decide utilizar el mismo tipo de semillas durante todo el experimento. Se seleccionaron semillas de tomate, las cuales presentaban un tiempo de germinación de 4 días y de probabilidad de germinar de un 89%. En la Figura 4.19 se muestran las semillas.



Figura 4.19. Semillas de tomate

Todas las muestras de tierra se prepararon de dos formas distintas. El primer grupo (filas 1, 3, 5) se lo prepara antes de sembrar la semilla con biol producido en el LaDEA. Al segundo grupo (filas 2, 4, 6) se lo mezcla con agua previo a la adición de las semillas de tomate. Una vez lista la tierra, se la coloca en recipientes de poliestireno divididos a su vez en cinco grupos distintos. El primer grupo (A, F) debe ser rociado con agua, el segundo grupo (B, G) con una solución al 5% de biol, el tercero (C, H) con 10%, el cuarto (D, I) con 15% y finalmente el último grupo (E, J) con solución al 20% de biol. De esta forma se espera encontrar la mezcla apropiada para el crecimiento óptimo de las plantas de tomate. El análisis se lleva a cabo por duplicado. En la figura 4.20 se detalla el esquema del diseño de este experimento.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1											CB
2											SB
3											CB
4											SB
5											CB
6											SB
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20	

Contenido de biol en agua de riego [%]

Preparación de la tierra

Figura 4.20. Esquema de diseño de experimento para aplicación de biol
(CB con biol, SB sin biol)

En primera instancia se tuvieron únicamente los dos primeros tipos de tierra. Dado que el tiempo de germinación se prolongó para la tierra de los alrededores del LaDEA por 4 días, se decidió dar inicio al experimento con el tercer tipo de tierra.

En las Figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se presentan los arreglos de los diferentes experimentos en el primer día:



Figura 4.21. Primera repetición del experimento de aplicación de biol en el día 1.



Figura 4.22. Segunda repetición del experimento de aplicación de biol en el día 1.

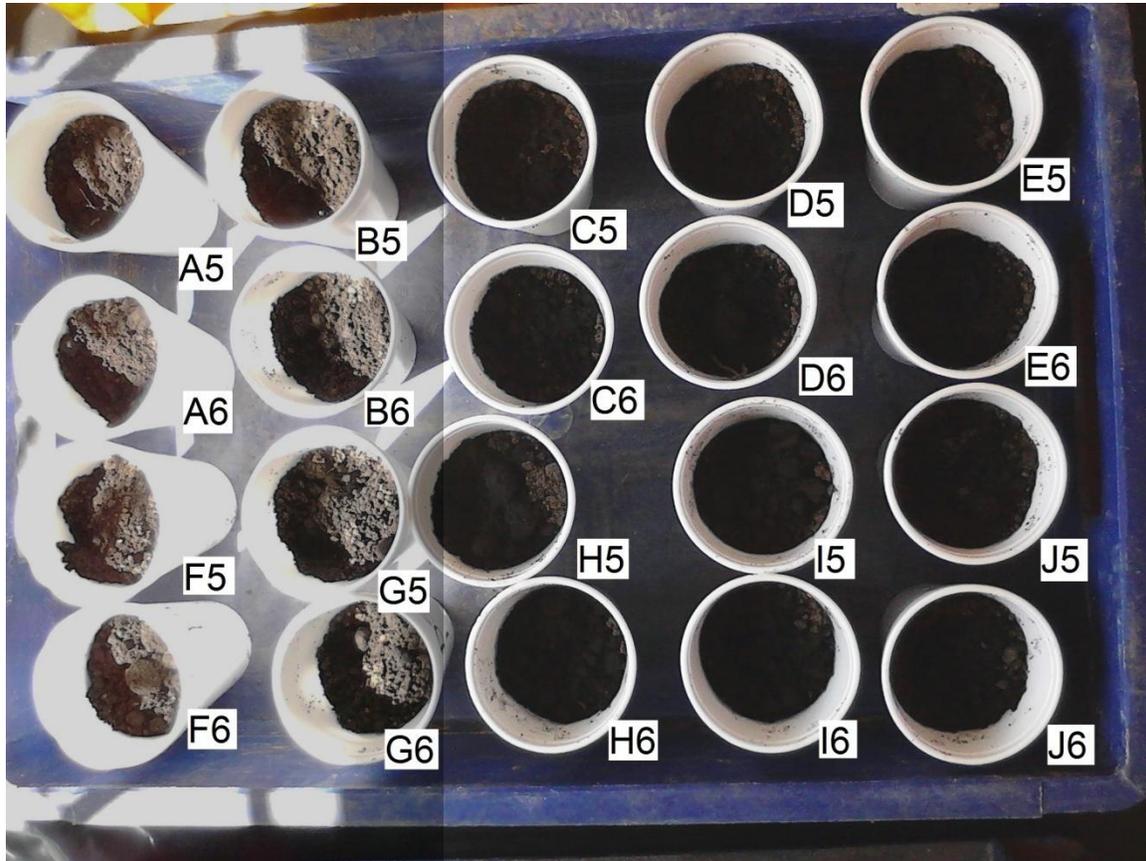


Figura 4.23. Tercer tipo de tierra. Primera y segunda repetición en el Día 1.

Para llevar a cabo el experimento se decide regar un volumen de 10 mL de agua diarios a las plantas que se ubicaron junto a una de las ventanas del LaDEA con el objetivo de que llegue suficiente luz para que puedan crecer. Se observa que este volumen causa que el agua se acumule especialmente para el segundo tipo de tierra dado que su porosidad es poca. Como resultado, se fija volumen de riego en 5 mL con lo que se tuvo buena humedad en el suelo. La germinación de las plantas tomó 7 días para el suelo abonado (primer tipo), 11 días para el segundo tipo y 8 días para el tercer suelo. Se muestran los resultados del crecimiento de las plantas para los días correspondientes en las Figuras 4.24, 4.25 y 4.26.



Figura 4.24. Experimento de aplicación de biol en el día 8.



Figura 4.25. Repetición de experimento de aplicación de biol en el día 8.

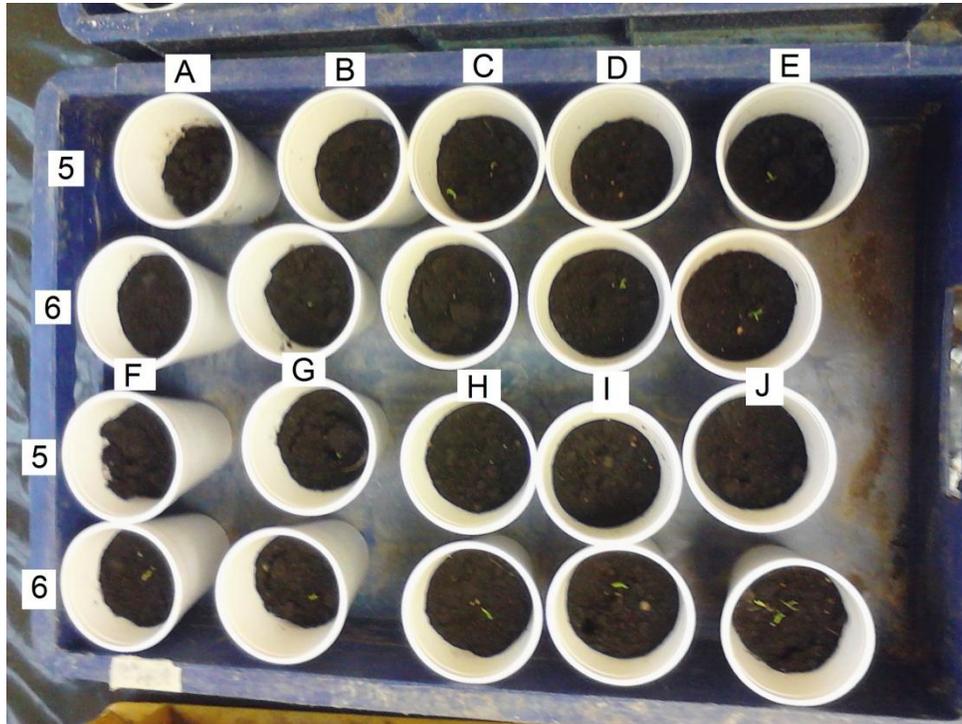


Figura 4.26. Tercer tipo de tierra. Experimento de aplicación de biol en el día 9.

Los resultados del estudio de los efectos del biol en el crecimiento de las plantas son los siguientes.

El uso de biol no presenta beneficios en la germinación y en la primera semana de crecimiento cuando se utiliza tierra abonada o de primer tipo. Pasado este período, las plantas regadas con la solución de agua con biol al 15% y 20% presentan un mayor crecimiento como se observa en la Figura 4.27.

La mezcla que tuvo 5% de biol resultó ser la que tuvo el menor efecto en el crecimiento de las plantas. Las plantas germinaron mejor cuando se utilizó la tierra preparada con agua.



Figura 4.27. Primer tipo de tierra. Experimento y duplicado en el Día 20.

Para el segundo tipo de tierra, se encuentra el problema de la baja permeabilidad de la tierra lo cual redujo drásticamente la capacidad de crecimiento de las plantas. Se observa que germinaron plantas para tierra preparada con agua y regadas con agua, solución de biol al 5% y al 10%. Luego de dos semanas más se tuvo la germinación de plantas en suelo preparado con biol y regadas con solución al 15% de biol. Estos resultados se observan en la Figura 4.28.



Figura 4.28. Segundo tipo de tierra. Experimento y duplicado. Día 20.

Por último, para el tercer tipo de tierra se observa que la preparada con biol resulta mucho más apta para la germinación de las plantas. Igualmente, las plantas regadas con solución de biol al 20% son las que crecieron más rápido y presentaron follaje más grande y de un color verde más intenso como se observa en la Figura 4.29.

Las plantas del primer tipo presentaron hojas de 2.5 cm de longitud como se observa en la Figura 4.27, las plantas del segundo tipo tuvieron hojas pequeñas de 1 cm de largo. Las hojas más grandes se formaron en la tierra de tercer tipo con longitudes de hasta 5 cm. Los tallos igualmente fueron más largos para el tercer tipo de tierra con longitudes de hasta 6 cm.

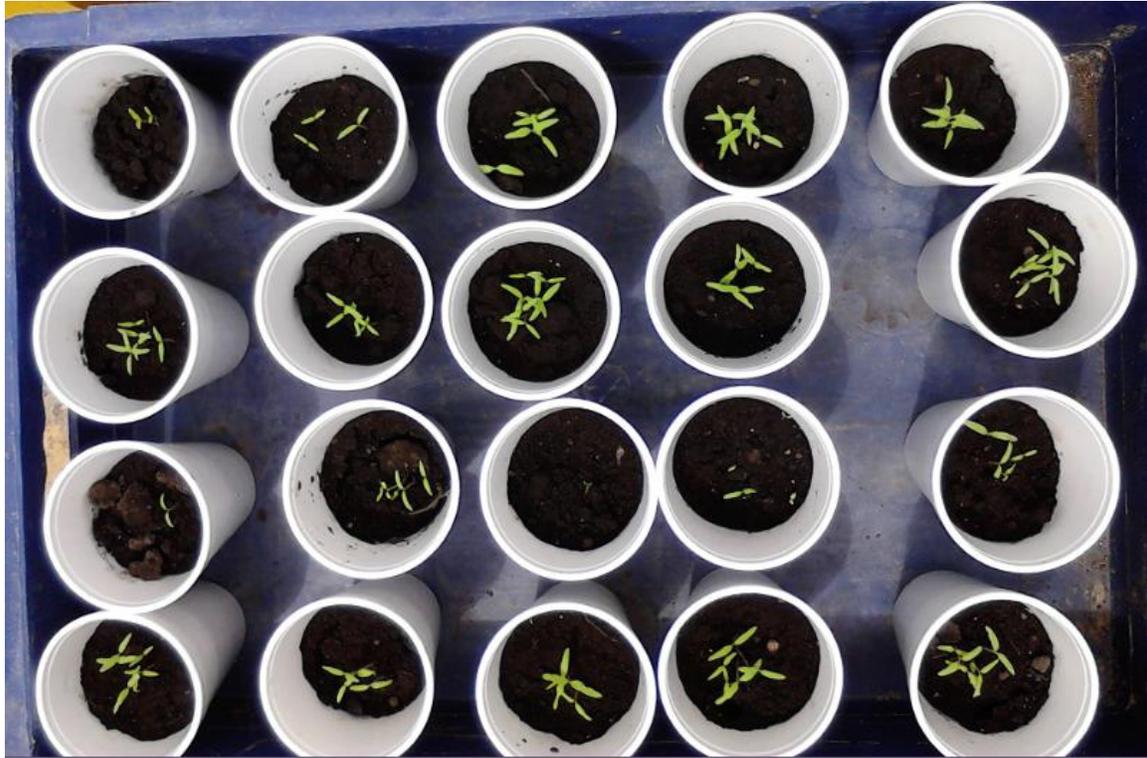


Figura 4.29. Tercer tipo de tierra. Experimento y duplicado. Día 14.

Las plantas del primer tipo presentaron hojas de 2.5 cm de longitud como se observa en la Figura 4.27, las plantas del segundo tipo tuvieron hojas pequeñas de 1 cm de largo. Las hojas más grandes se formaron en la tierra de tercer tipo con longitudes de hasta 5 cm. Los tallos igualmente fueron más largos para el tercer tipo de tierra con longitudes de hasta 6 cm. La relación encontrada es que a medida que se incrementa la presencia de biol en las soluciones preparadas, el tamaño de las hojas incrementa y el color verde es más intenso. Se presenta mejor calidad de hojas con el suelo preparado sin biol. Todas estas observaciones fueron más obvias en el tercer tipo de suelo como se observa en la Figura 4.29.

Adicionalmente, para comprobar los beneficios del biol como acondicionador y mejorador del suelo, se somete a las plantas más débiles que existieron, que fueron las del segundo tipo de suelo, a una prueba de resistencia. Para esta prueba se pone las plantas al sol y no se la regó un día entero. El objetivo de esta prueba es comprobar la capacidad de

las plantas de soportar condiciones extremas. Se realizaron las pruebas a las plantas en los vasos correspondientes a suelo del segundo tipo preparado con agua y regados con agua, solución al 5% y al 10% de biol. Como resultado, se obtiene que la planta regada con agua muere y no puede ser recuperada. La planta regada con solución al 5% de biol tiene un decaimiento notable pero puede ser recuperada en tanto que la planta con solución de 10% logra pasar la prueba y se mantiene vigorosa durante todo el experimento. Adicionalmente, cabe añadir que las plantas pequeñas que aparecieron en el suelo del segundo tipo preparado con biol y regadas con solución de biol al 15%, pasaron esta prueba sin mayores contratiempos. Los resultados se pueden observar en la Figura 4.30.

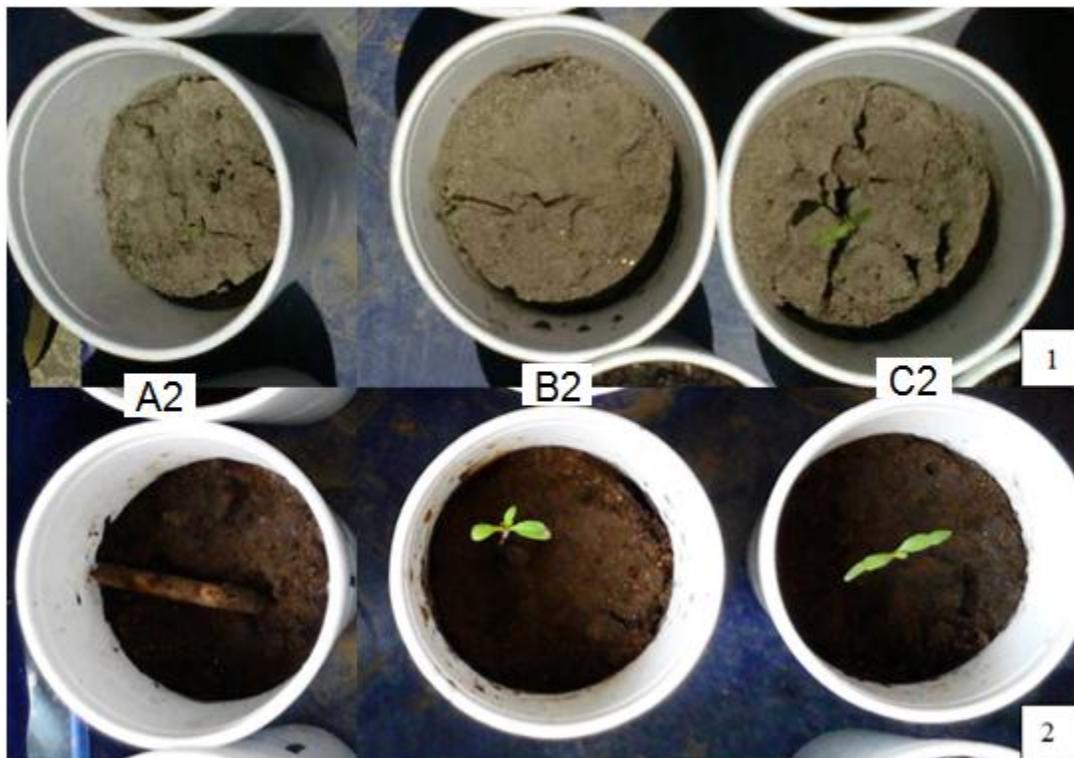


Figura 4.30. Plantas en segundo tipo de suelo después de la prueba de resistencia (1) y después de proceso de recuperación (2)

4.4.5 Biosol

El biosol que se recogió como subproducto de la digestión anaerobia en el LaDEA tuvo un color oscuro similar al del biol. El olor del mismo es moderado y no presenta problemas durante la filtración. Se observa mediante análisis visual que contiene restos de pepas de mora, pepas de maracuyá, cáscaras de tomate de árbol y fibras provenientes del estiércol. Se realiza análisis de sólidos también al biosol resumidos en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Análisis de sólidos realizado al Biosol

Experimento	TS [%]	OTS [%]
7	21.86	20.02
8	25.46	23.17

Se puede observar, que la cantidad de sólidos es alta en el biosol. Este porcentaje tiende a aumentar durante su almacenamiento debido a la pérdida de humedad. Durante la operación se encontraron problemas ocasionados por los sólidos, principalmente, con el medidor de nivel visual situado a un lado del reactor. Este se taponó constantemente ya que consistía de una manguera delgada de 5 mm de diámetro.

Como recomendación se propone adecuar las tuberías para el tipo de sustrato que se tendrá en el interior del diestor. Por ejemplo, durante los experimentos se tuvo taponamiento de tuberías y del medidor de nivel lateral del digestor a escala piloto del LaDEA. Se reemplazó la manguera delgada de 5 mm de diámetro con manguera de ¼ de pulgada. Este problema se ve solucionado hasta que se trabaja con carga orgánica de 2 kg DQO / m³ día, donde este medidor también se ve afectado por la presencia de sólidos.



Figura 4.31. Biodigestor con medidor de nivel antes y después de cambio de manguera

La cantidad de sólidos presente en el digestor también causa problemas con las vías de descarga del digestor, así como con la entrada y salida de las tuberías para alimentación y recirculación. Se recomienda destaparlos inmediatamente después de la alimentación para que no existan problemas posteriores de taponamiento que involucren desarmar el sistema.

Adicionalmente, para los experimentos 7, 8 y 9 se tuvo la presencia de sedimentos similares a piedras cuyo tamaño fue considerable. Afortunadamente, estas formaciones sedimentaron en el digestor y salieron al momento de evacuar la mezcla reactiva; caso contrario, su ingreso en la bomba pudo haberla afectado considerablemente. Se realizaron análisis de micro y macro elementos por absorción atómica a estas piedras para determinar su composición. Los resultados están resumidos en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Composición de sedimentos en base a macro y micro elementos

Elemento	Muestra 1 [%]	Muestra 1 [%]	Muestra 1 [%]	Promedio [%]
Cobre	0.003	0.003	0.003	0.003
Calcio	10.855	6.400	7.060	8.105
Magnesio	0.150	0.155	0.210	0.172
Manganeso	0.016	0.016	0.016	0.016
Hierro	0.650	0.850	0.900	0.800
Potasio	0.315	0.360	0.465	0.380
Zinc	0.005	0.004	0.004	0.004

Los resultados muestran que las piedras consisten principalmente de calcio. Este valor se esperaba dado que el calcio extra proviene del aditivo agregado con el fin de controlar el pH. Otros micro elementos también forman parte de los sedimentos entre los más importantes se pueden nombrar al hierro, el potasio y el magnesio. Cabe recalcar que estos porcentajes son con respecto a la muestra húmeda dado que ya se ha corregido dicho valor en los cálculos.

4.5 Interpretación y Evaluación de Resultados

En la Tabla 4.3 se presentaron los experimentos que se realizaron para conocer los parámetros óptimos de operación para maximizar la producción de metano. Los experimentos se llevaron a cabo hasta alcanzar estabilidad en la operación. Mientras se llevan a cabo los experimentos con carga orgánica de 0.5 kg DQO / m³ día, la operación se lleva a cabo sin contratiempos. Los volúmenes de alimentación son bajos en comparación con experimentos posteriores. Se puede observar una tendencia creciente de la producción de gas a medida que se reduce el tiempo de residencia.

Para los experimentos con carga orgánica de 1.5 kg DQO / m³día la producción de biogás también tuvo una tendencia ascendente como se puede observar en la figura 4.11. Para estos experimentos se comienza a observar que la producción de gas llega a su máximo. Además para estos experimentos se tiene problemas de descenso de pH. Esto se debe a una carga orgánica excesiva para las bacterias metanogénicas las cuales no pueden transformar toda la materia orgánica existente y por lo tanto, se comienza a utilizar aditivo con el fin de mantener el pH entre 6.5 y 7.5 Se agregan entre 50 y 200 gramos para los experimentos 4, 5 y 6. Ya se tuvieron problemas de taponamiento de la bomba, con lo cual se tiene que destapar para cada inicio de experimento, así como luego de 3 o 4 días de operación. Debido al descenso de pH, se repite el experimento 4. Para el experimento 5, se observó una variación considerable de la cantidad de AGVs, por ello la producción de gas no siguió el patrón creciente. Consecuentemente, se repite el experimento 5 hasta obtener los resultados que se reportan.

Para los experimentos con carga orgánica de 2 kg DQO / m³ día, la producción de biogás se vio incrementada pero el patrón fue decreciente. De forma adicional, la cantidad de metano no fue buena teniéndose que en el experimento 7 el porcentaje del mismo es de 46%, el más alto para esta carga orgánica. Se tiene problemas con los volúmenes de alimentación al ser excesivos y con la cantidad de aditivo que se debe añadir a la mezcla de alimentación para mantener el pH dentro del rango deseado. Se llega a poner entre 100 y 300 gramos por día de cementina. Las consecuencias incluyen taponamiento de la bomba y las tuberías. Para estos experimentos se observa inestabilidad en el proceso de digestión anaerobia como se observa en los valores de la Tabla 4.4 donde se muestra que la relación entre AGV y Alcalinidad llega a ser hasta de 1.22 cuando el valor normal debe llegar hasta 0.5.

La relación de la figura 4.32 muestra la degradación de los OTS ingresados en la mezcla de alimentación con respecto a los OTS medidos en la mezcla reactiva obtenida del reactor luego de la digestión anaerobia. Mientras los sólidos se acercan más a la línea diagonal significa que existió menor degradación. Se tienen tres valores que se encuentran en dicha línea. A pesar de ello, se tiene una reducción en la cantidad de OTS

durante los experimentos, lo que muestra buena actividad bacteriana en el digestor dado que sí existe degradación de materia orgánica.

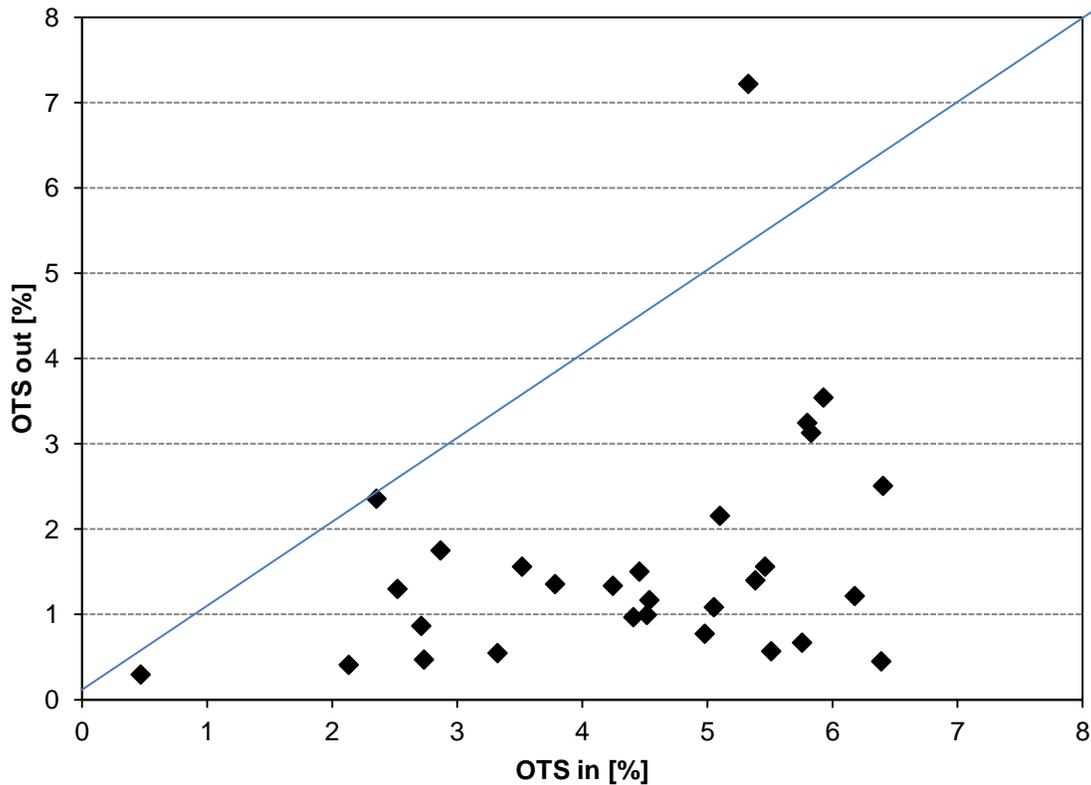


Figura 4.32. Relación de OTS ingresado versus OTS salida

La relación entre la producción diaria de biogás normalizada ($P = 1 \text{ atm}$, $T = 25^\circ\text{C}$) y la degradación de OTS durante los experimentos se presenta en la Figura 4.33. Se observa un ascenso de la producción de biogás para los experimentos de carga orgánica de 0.5 y 1 kg DQO / m^3 día, a excepción de los tres experimentos finales 7, 8 y 9. La mayor producción de biogás se obtiene para el experimento 7, pero cabe recalcar que la calidad del biogás obtenido es muy baja. Por lo tanto, se tiene que para un volumen de alimentación de 37 L/día y TRH de 12.5 días, la producción de biogás y contenido de

metano del mismo fueron altos como se muestra en la figura 4.17, además la degradación de OTS se acerca al 85%, siendo la más alta de todos los experimentos.

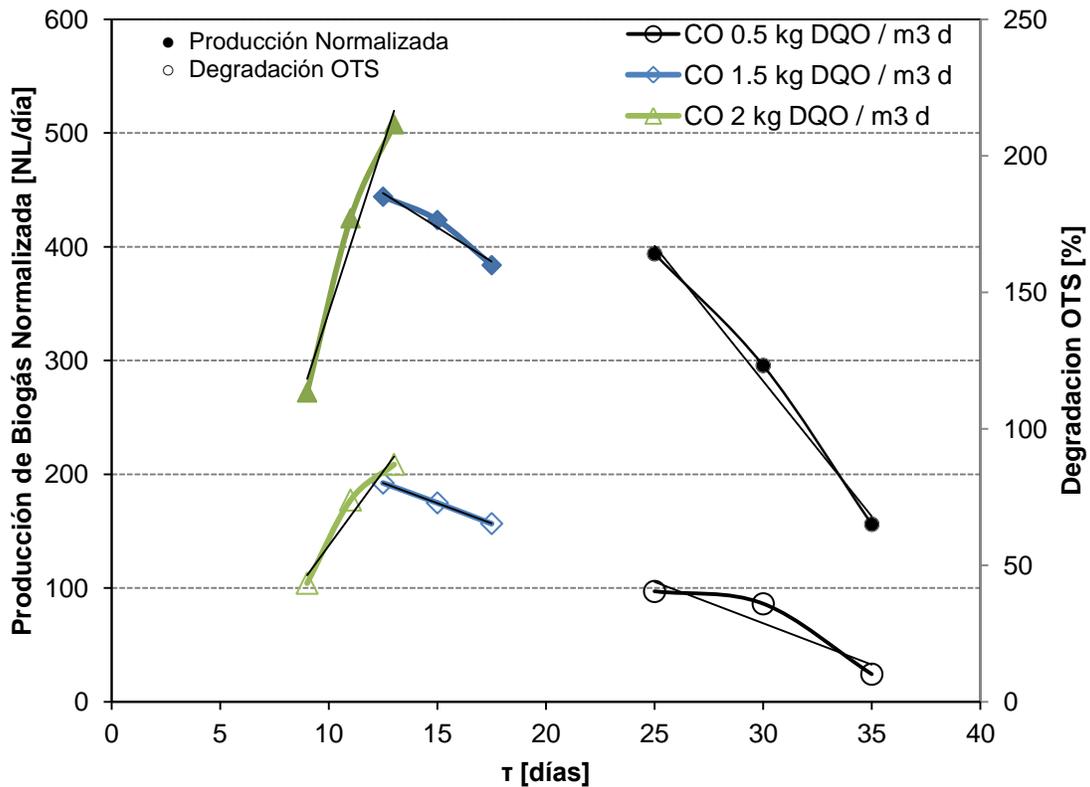


Figura 4.33. Relación de producción de metano normalizada y el porcentaje de degradación de OTS con respecto al tiempo de residencia

En la figura 4.34 se muestra la producción normalizada de biogás en función del tiempo de residencia y el pH promedio que se alcanza durante la operación. La relación encontrada es que a medida que se reducen los tiempos de residencia, la producción diaria de biogás se incrementa para los experimentos con carga orgánica 0.5 y 1 kg DQO / m³ día en tanto que el pH disminuye a medida que el tiempo de residencia disminuye. Se tiene una relación inversa. De otra parte, para los experimentos con carga orgánica de

2 kg DQO / m³ día se observa un patrón similar para el valor del pH, pero la producción de gas disminuye conforme disminuye el tiempo de residencia.

Dichas relaciones de crecimiento y reducción se dan debido a que la cantidad de materia orgánica va creciendo y el valor del pH se hace más complejo de controlar, por ello se requiere la utilización de aditivo para mantener el pH dentro del rango apropiado.

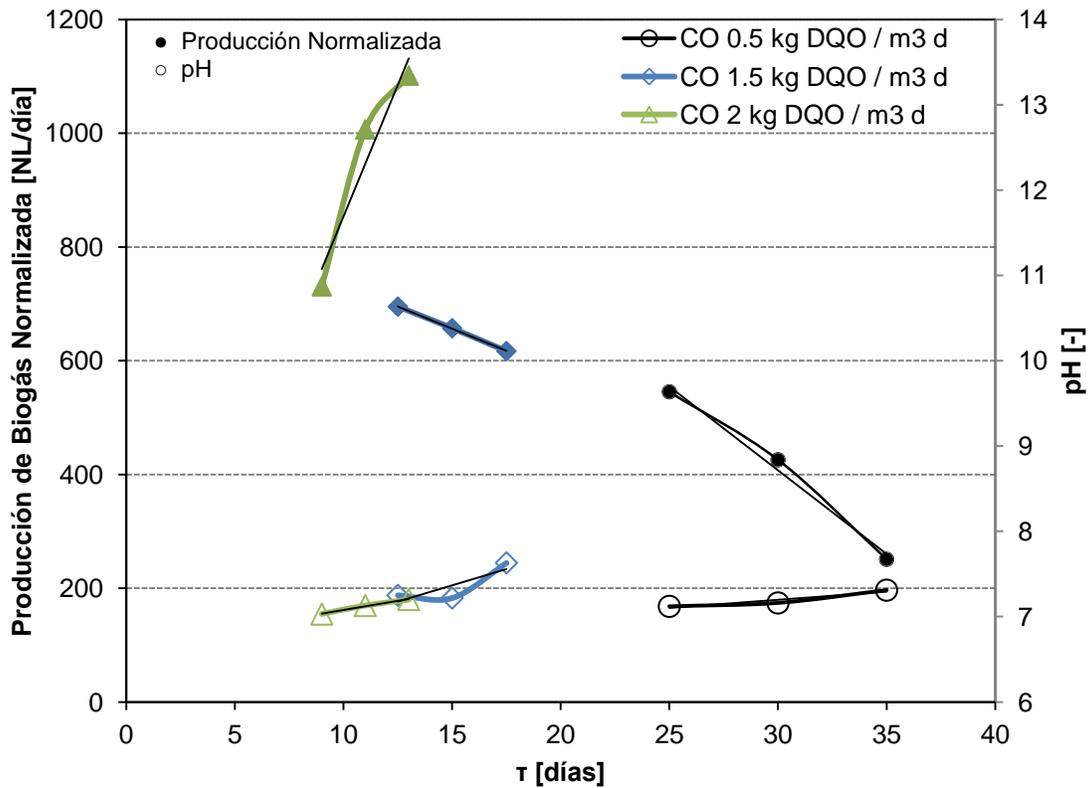


Figura 4.34. Relación de producción de biogás normalizada y pH con respecto al tiempo de residencia

En la figura 4.35 se presenta la comparación de producción específica en función del tiempo de residencia. En el primer eje, se calcula el volumen producido normalizado de biogás con respecto al volumen del digestor. Para ello se relaciona cada m³ de biogás producido diariamente por cada m³ de digestor. El segundo eje presenta la producción

específica de biogás producido diariamente con los kg DQO alimentado al digestor diariamente. Este segundo eje se obtiene mediante la medición del DQO de la alimentación y el volumen alimentado al digestor. Se observa una tendencia creciente en la producción de biogás con respecto al DQO alimentado, esto quiere decir que existió mayor cantidad de materia orgánica disponible y que las bacterias realizaron su trabajo adecuadamente excepto para los experimentos 7, 8 y 9 donde se tiene exceso de materia orgánica que no puede ser degradada y ocasiona inhibición bacteriana y una reducción en la producción de biogás. Se puede observar que para la carga orgánica de 0.5 kg DQO / m³ día la tendencia es creciente, en tanto que para la carga orgánica de 1.5 kg DQO / m³ día se puede observar un máximo en el experimento 5 con tiempo de retención de 15 días.

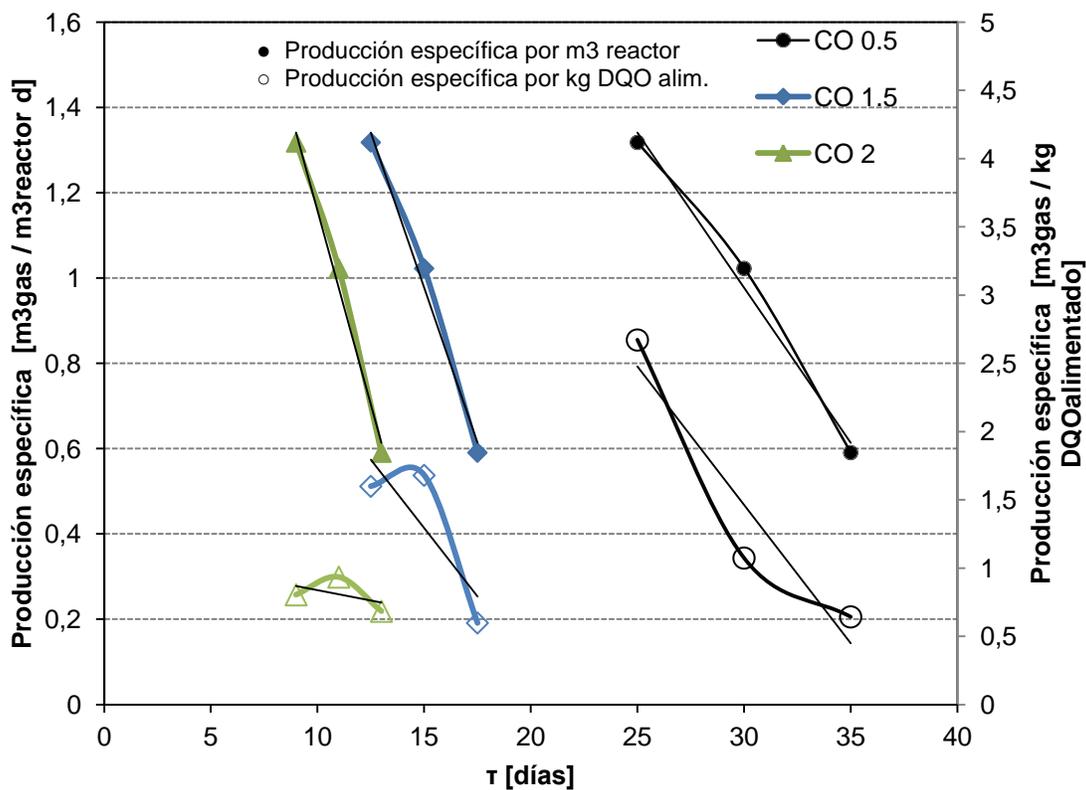


Figura 4.35. Relación de producción diaria de gas por volumen de reactor y producción diaria de gas por kg DQO alimentado diario con respecto al tiempo de residencia

Como resultado general se obtiene, que la carga orgánica apropiada para el digestor es de 1.5 kg DQO / m³ día con tiempo de residencia de 12.5 días. Con carga orgánica de 2 kg DQO / m³ día se comprueba que la operación del digestor es inestable y la producción de biogás no es óptima. Para el experimento número 6 que recoge ambos parámetros apropiados, se tiene una producción diaria de biogás de 723 litros por día con 63% de metano. Este biogás puede ser utilizado posteriormente en generación eléctrica y térmica.

4.6 Balance de masa

Con la finalidad de conocer la cantidad de materia orgánica que ingresa, la que ha sido transformada a biogás y la que no pudo ser transformada, se realiza un balance de masa en donde se incluyen valores como el volumen de alimentación, la carga orgánica, el biogás producido y la DQO de la mezcla de alimentación y de la mezcla reactiva.

Para un balance de masa, en términos generales, se toman en cuenta las corrientes de ingreso al sistema conjuntamente con las de salida para relacionarlas con la cantidad de materia orgánica que reaccionó en el interior del biodigestor y la que se queda sin ser transformada. La ecuación general para el balance de masa es (21):

$$A = E - S - C \quad (5.1)$$

en donde:

<i>A</i> :	Acumulación	[kg DQO / d]
<i>E</i> :	Entrada	[kg DQO / d]
<i>S</i> :	Salida	[kg DQO / d]
<i>C</i> :	Consumo	[kg DQO / d]

Para el balance de masa se deben tomar períodos de operación como referencia para poder hacer los cálculos. Se tomaron tres experimentos: el primero es de carga orgánica de 0.5 kg DQO / m³ d y tiempo de residencia de 25 días. El segundo es de carga orgánica

de 1.5 kg DQO / m³ d y tiempo de residencia de 12.5 días. Finalmente, el tercer período corresponde a una carga orgánica de 2 kg DQO / m³ d y tiempo de residencia de 9 días.

Para calcular el consumo, se utiliza una ecuación de cinética que relaciona el biogás producido como kg DQO degradado con la concentración de DQO en el interior del digesor (30). La ecuación utilizada es la 5.2.

$$R_A = k_A C_A^{3.3} \quad (5.2)$$

en donde:

R_A : Velocidad de producción de biogás como DQO degradado [kg DQO / m³ d]

k_A : Constante cinética de velocidad [d⁻¹]

C_A : Concentración de DQO en el reactor [kg DQO / m³]

Como resultados de los cálculos, se presenta la Tabla 4.10 con los valores encontrados.

Tabla 4.10. Balance de masa

	Período 1	Período 2	Período 3
Tiempo de operación [días]	7	8	8
Volumen de Alimentación [L/d]	18	29	48
Producción Biogás [L/d]	545	695	730
Carga Orgánica [kg DQO / m³ d]	0.38	1.44	1.75
Entrada [kg DQO / d]	0.147	0.278	5.386
Salida [kg DQO / d]	0.081	0.049	0.078
Acumulación [kg DQO / d]	0.022	0.129	5.258
Consumo [kg DQO / d]	0.043	0.099	0.050
Producción Específica [m³ biogás / kg DQO_{alim.}]	2.672	1.599	0.805

Se puede observar que para el primer período que corresponde al experimento 3, se tiene una cantidad considerable de consumo con respecto al valor de entrada. Se puede deducir que el biodigestor funciona correctamente y degrada la materia orgánica a biogás teniéndose una producción específica elevada. Para el experimento 6 que corresponde al segundo período, se tiene que la carga de entrada se eleva y el consumo de la misma manera. Sin embargo, la acumulación es mayor pero se sigue teniendo una producción específica elevada. Finalmente, para el experimento 9, la carga orgánica alimentada es muy alta, las bacterias no tienen la capacidad de procesarla y por ello el consumo es bajo comparado con la cantidad acumulada en el digestor. Como consecuencia, la producción específica en este experimento es baja comparada con los otros.

5 Conclusiones y Recomendaciones

La finalidad de encontrar formas de producción de energías alternativas a la proveniente de combustibles de origen fósil ha promovido el desarrollo e investigación de nuevas formas de energía verde. Con tal propósito, el presente trabajo lleva a cabo el estudio de la digestión anaerobia en el reactor a escala piloto del LaDEA. Se plantea encontrar la carga orgánica óptima así como el tiempo de retención hidráulico apropiados para que exista la mayor producción de biogás con un alto contenido de metano sea alto. Para tal finalidad se utilizan desechos de fruta como materia prima. Teniendo como principales a la mora, el tomate de árbol, la frutilla, las pepas de maracuyá y la piña. La materia orgánica animal requerida para llevar a cabo la digestión anaerobia consiste en estiércol de ganado bovino. Estas materias primas son diluidas, filtradas y combinadas en base a estudios previos y revisión de bibliografía. Se plantean los experimentos en base a la variación de la carga orgánica diaria así como del tiempo de retención hidráulico. Consecuentemente, se mantuvieron controlados parámetros operacionales importantes como la temperatura, el pH y la recirculación.

Para la preparación de la mezcla de alimentación se concluye que existen frutas que permiten su manejo de forma más sencilla mientras que otros desechos presentan problemas en su manipulación desde la trituración hasta la alimentación en el digester. Dentro de las frutas de mejor manejo se encuentran la frutilla, las pepas de maracuyá, la mora, el tomate de árbol y la piña. Estas frutas pueden ser trituradas y filtradas aprovechando la mayor parte y generando poca cantidad de desecho que no pudo ser utilizado en el proceso de digestión anaerobia. Las frutas que presentan gran dificultad en su manejo fueron el mango, el limón y la cáscara de maracuyá.

Se debe tomar en cuenta que el procesamiento de la mezcla de alimentación para este proceso es esencial dado que es el factor que más influye en el comportamiento del digester. Gracias a esta mezcla, se pueden mantener valores como el pH, sólidos totales, sólidos totales orgánicos en valores que son apropiados para mantener equilibrio en el digester anaerobio. El uso de un adecuado factor de dilución así como de reducción de

tamaño apropiado influyen de forma importante en la generación y calidad del biogás y en las propiedades del biol.

Como conclusión de los experimentos realizados se puede aseverar que el digester a escala piloto del LaDEA tuvo su producción máxima de biogás con 723 litros/día y con un contenido de metano de 63% durante el experimento llevado a cabo con 1.5 kg DQO/m³ día y un tiempo de retención hidráulico de 12.5 días. Para llegar a esta conclusión se realizaron experimentos con carga orgánica de 0.5 kg DQO/m³ día hasta 2 kg DQO/m³ día teniendo producción máxima de biogás de 1153 litros/día pero con un contenido de metano bajo de 46%. Además parámetros como AGVs y alcalinidad no se mantuvieron controlables con lo cual la estabilidad se vio afectada.

Además de comprobar que la presencia de metano fue buena en el biogás producido, se realizan análisis físico-químicos a la mezcla reactiva y análisis físico-químicos, microbiológicos y de aplicabilidad del biol descargado del digester. Se realizaron análisis de DQO, TS, OTS, TSS, VSS, alcalinidad y AGVs para conocer el estado del digester, así como para comprobar la degradación de materia orgánica durante todos los experimentos. Asimismo se pudo comprobar que el biol producido estuvo libre de microorganismos patógenos como son bacterias coliformes y específicamente *E. Coli*. Finalmente, se llevó a cabo un experimento de aplicabilidad del biol. Se sembraron semillas de tomate en tres tipos diferentes de tierra y se los regó con distintas soluciones que contuvieron desde 0% hasta 20% de biol. Se llegó a la conclusión de que la mejor solución fue la de 15% de biol puesto que produjo la mejor calidad de plantas cuyas hojas fueron más grandes y verdes. Adicionalmente, gracias a una prueba de resistencia a condiciones extremas, se pudo comprobar que el biol otorgó a las plantas la capacidad de resistir sin riego bajo condiciones de sequía.

A pesar de los contratiempos que se tuvieron durante el tiempo de operación, se pudo llegar a la conclusión de que la digestión anaerobia se presenta como una alternativa viable para los combustibles fósiles dado que la producción de metano fue óptima y su combustión presenta una alternativa en la generación de energía eléctrica y térmica. El mantenimiento de condiciones apropiadas en el interior del digester depende de la correcta preparación de la materia prima, utilización de aditivo, temperatura constante,

recirculación y agitación apropiada. Con estos parámetros se puede aseverar que la producción de biogás a nivel industrial se constituye como una alternativa viable, a la vez efectiva para reducir la cantidad de desechos producidos y tener un proceso en donde se tengan únicamente productos beneficiosos y de fin comercial.

6 Referencias Bibliográficas

1. **Fragela, M. Hernández, R. Jardines, S. Sánchez, J.** Los Biodigestores como aportadores de energía y mejoradores del suelo. *Universidad Camilo Cienfuegos*. Matanzas : s.n., 2008.
2. **U.S. Department of Energy.** Energy Information Administration. [Online] [Cited: Octubre 29, 2012.] www.eia.gov/petroleum.
3. **Brown.** *Química La Ciencia Central*. Barcelona : Pearson, 2010.
4. **Chiriboga, O.** *Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas*. Quito : Universidad San Francisco de Quito, 2010.
5. **Serrano, Javier.** Pulpa de fruta. *La Jugosa*. Noviembre 2012.
6. **Gómez, X. Cuetos, M. Tartakovsky, B.** A comparison of analytical techniques for evaluating food waste degradation by anaerobic digestion. *Bioprocess Biosystems Engineering*. León : s.n., 2010, Vol. 33.
7. **Weiland, P.** Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Braunschweig : s.n., 2010.
8. **Hilbert, J.** *Manual Para la Producción de Biogás*. Castelar : Instituto de Ingeniería Rural, 2005.
9. **Al Seadi, T. Rutz, D. Prassl, H. Köttner, M. Finsterwalder, T.** *Biogas Handbook*. Esbjerg : University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
10. **Wolfram Research Company.** Wolfram Alpha. [Online] [Cited: Agosto 17, 2012.] <http://www.wolframalpha.com/input/?i=biogas>.
11. **Metcalf & Eddy.** *Ingeniería de Aguas Residuales*. Madrid : McGraw-Hill, 1995.
12. **Chen, Ye. Cheng, Jay. Creamer, K.** Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. 2007.
13. **Syed, M. Soreanu, G. Falleta, P. Béland, M.** Removal of Hydrogen Sulfide from gas streams using biological processes - A review. *Le génie des biosystèmes au Canada*. 2006.
14. **Estrella, A.** Estudio de la utilización energética de biogás por medio directos e indirectos. *Universidad San Francisco de Quito*. 2012.

15. **Aparcana, S. Jansen, A.** *Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso de "Fermentación Anaeróbica" para producción de Biogás.* Lima : German ProfEC, 2008.
16. **Kangmin, L. Ho, M.** Biogas China. *Institute of Science in Society.* [Online] [Cited: Septiembre 12, 2012.] <http://www.i-sis.org.uk/BiogasChina.php>.
17. **Agriculture and Consumer Protection.** Anaerobic processes, plant design and control. *Food and Drugs Administration.* [Online] [Cited: Septiembre 12, 2012.] <http://www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E09.htm>.
18. **Wabnitz, G.** *Biogas from Kiwifruit Waste.* Wellington : Zespri, 2008.
19. **European Biomass Industry Association.** Anaerobic Digestion. *EUBIA.* [Online] [Cited: Septiembre 13, 2012.] <http://www.eubia.org/108.0.html>.
20. **Safferman, S. Henderson, E.** Anaerobic Treatability and Methane Production from Fruit and Vegetable Processing Wastes. *Michigan State University.* East Lansing : s.n., 2006.
21. **Proaño, G.** *Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y caracterización de productos y materia prima.* Quito : Universidad San Francisco de Quito, 2010.
22. **Banu, R. Raj, E. Kaliappan, S. Beck, D. Yeom, I.** *Solid State Biomethanation of Fruit Wastes.* Lucknow : Journal of Environmental Biology, 2007.
23. **Fongastitkul, P. Mavinic, D. Lo, K.** *A Two-Phased Anaerobic Digestion Process: Concept, Process Failure and Maximum System Loading Rate.* Vancouver : Water Environment Research, 1994.
24. **Hach.** *Manual de operación del Colorímetro Hach.*
25. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.** *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* Baltimore : United Book Press, 1998. 20th Ed..
26. **Romero, J.** *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño.* Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
27. *Volatile Fatty Acids and Alkalinity.* 2003.
28. **Jenangi, L. Harris, P.** *Producing Methane Gas from Effluent.* s.l. : Adelaide University, 2001.

29. *Petriefilm Placa Para el Recuento de E. Coli. Guía de Interpretación.* s.l. : 3M, 1995.
30. **Cabrera, K.** Estudio Cinético de la Digestión Anaerobia de Mezclas de Desechos de Fruta. [book auth.] USFQ. Quito : s.n., 2010.

7 Anexos

7.1 Análisis de Biol llevado a cabo en el Iniap

7.2 Procedimientos de análisis

7.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

7.2.2 Sólidos Totales (TS)

7.2.3 Sólidos Totales Orgánicos (OTS)

7.2.4 Sólidos Totales Suspendidos (TSS)

7.2.5 Sólidos Suspendidos Volátiles (VSS)

7.2.6 Alcalinidad

7.2.7 Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

7.2.8 Nitrógeno Total

7.2.9 Fósforo Total

7.2.10 Espectroscopia de Absorción Atómica (AA)

7.3 Hojas de análisis de biol hechos en el LaDEA

7.4 Hojas de análisis de desechos de fruta hechos en el LaDEA