

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
"CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍA**

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

**Título: "Estudio de factibilidad económica y
evaluación del Biol para el uso en producciones
agrícolas"**

Autor: Livan Parra Montoya

Tutor: Dr.C. Ing. Jesús Manuel Guzmán
Chinea

Colaboradores: Lic. Alejandro Perez Ponce
Ing. Carlos D. Arechavaleta
Zuaznabal

Ciudad de Cienfuegos, Cuba.
2015

“El éxito o el fracaso, no dependen de lo que nos falta, sino, de lo que seamos capaces de hacer con lo que tenemos”.

Fidel Castro Ruz.

Pensamiento



Gracias a una puerta que se abre, una mano extendida, una sonrisa que te alienta, una mirada que te comprende, una palabra que te anima, una crítica que te mejora, un dar sin exigir y una entrega sin calcular. A quienes me llenaron de estas bendiciones durante este largo camino ofrezco mis más sinceros agradecimientos.

- *A mis padres Bárbara y Ubarne por darme la educación y guiarme por el buen camino, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y alentarme a superarme en la casa de altos estudios.*
- *A mi hermana Jaydi y mi madrina Reina por hacer que las carencias tecnológicas y económicas no fueran motivo de preocupación a lo largo de la carrera.*
- *A mi novia Yamila y sus padres por abrirme las puertas de sus vidas en esta última etapa de la universidad.*
- *A mi tutor Dr.C. Jesús Manuel Guzmán Chinae por su ayuda en todo momento a pesar de las dificultades de salud.*
- *A los profes Ing. Carlos Arechavaleta y Lic. Alejandro Pérez quienes brindaron su apoyo certero hasta el final de esta investigación.*
- *Al equipo alfa: Leidis, Anabel, Mabelys y Frank por la cantidad de 5 que cogimos.*
- *A Yani que enderezó mi camino cuando amenacé perderme académicamente.*
- *A la totumada completa por las múltiples jornadas de alcohol y parrandas inolvidables.*
- *A mis buenos amigos Alexis, Arnaldo y Frank por su compañía y por soportarme tal como soy.*
- *A mis compañeros de aula, que no los cambio por nada, ni a los buenos, ni a los no tantos.*
- *A la Revolución cubana por permitirme estudiar esta maravillosa carrera.*

Ya mí también..... ¿Por qué, no?

Agradecimientos



A la memoria de mi padre Ignacio Ubarne Parra Gala, el profesor que guió mi vida hasta esta instancia, quien supo enseñar valores y me convirtió en el hombre de bien que soy, estoy seguro que en donde se encuentre está orgulloso de su hijo.

A mi madre Bárbara Montoya Betancourt, por su comprensión, esfuerzo y amor, por ser la mujer de mi vida.

A mi hermana Jaydi y mi madrina Reina por su apoyo constante.

A mis sobrinitas casi hijas Janiela y Daleina, espero que vean en mí su ejemplo.

*A todos los que confiaron en mí y los que no también, hoy ya soy
Ingeniero Químico.*

Dedicatoria



Resumen



La aplicación de tecnologías de bajo costo y fácil implementación cada vez se hacen más comunes para la generación de energías alternativas ya que contribuyen al mejoramiento y conservación del medio ambiente. Es así como con el estiércol animal y otros desechos orgánicos se producen Biogás. El Biogás es la mezcla de gases resultante de la descomposición de materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaeróbicas. La utilización de digestores en la producción porcina cobra cada vez mayor importancia ya que logra darle utilidad a las excretas y transformar las aguas y los sólidos contaminantes en efectivos biofertilizantes. Los biodigestores producen un efluente residual llamado Biol que puede utilizarse como acondicionador de suelos por sus características físico-químicas. El Biol es un abono foliar orgánico, valioso para los pequeños productores agrícolas, en especial para aquellos cuyos terrenos son de media a baja fertilidad, el uso del Biol se constituye en un complemento importante al abonamiento del suelo para la

obtención de mejores rendimientos, pues su uso aporta no solo los macro y micronutrientes para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas sino que son fuentes naturales de fitohormonas, haciendo de la fertilización una práctica agronómicamente estable, ecológicamente sostenible y económicamente rentable.

Abstract



The application of technologies with low cost and easy implementation increasingly become more common for the generation of alternative energy and contributing to the improvement and environmental conservation. Thus, with animal manure and other organic waste Biogas produced. Biogas is a mixture of gases resulting from the decomposition of organic matter by bacterial action in anaerobic conditions. The use of digesters in pig production is becoming increasingly important as utility manages to give excreta and transform water and solid contaminants in biofertilizers effective. Biodigesters produce a residual effluent called Biol which can be used as a soil conditioner for their physicochemical characteristics. Biol is of value to small farmers, especially for those whose land is half organic foliar fertilizer low fertility, Biol use constitutes an important complement to soil fertilization for obtaining better yields, as use not only provides macro and micronutrients for proper growth and development of plants but are natural sources of plant hormones, making an agronomically stable fertilization practice, ecologically sustainable and economically profitable.



Índice.

Introducción.	11
Capítulo I: Marco teórico referencial.	14
1.1 Generación de residuos orgánicos.	14
1.1.1. Su clasificación.	15
1.1.2. Tipos de Tratamientos.	19
1.1.3. Uso de residuos orgánicos en plantas de Biogás.	21
1.2 Proceso de digestión anaerobia.	22
1.3 Reactores de Biogás.	27
1.3.1 Tipos de reactores y sus características.	28
1.4 Productos finales de la digestión anaerobia.	34
1.5 Experiencias en Cuba y el mundo del uso del Biol en suelos y producciones agrícolas.	39
Conclusiones Parciales del Capítulo I.	40
Capítulo II: Metodología del diseño experimental.	41
2.1. Breve descripción de los centros donde se realizarán los experimentos.	41
2.1.1. Descripción de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.	41
2.1.2. Descripción de la CCS “Osvaldo Fuentes” de Cumanayagua.	42
2.1.3. Descripción de la Finca “El Tablón” de Cumanayagua.	43
2.2. Metodología de diseño de los experimentos.	43
2.2.1. Construcción de los biodigestores a escala de laboratorio.	47
2.2.2. Construcción de los Manómetros Diferenciales.	50
2.2.3. Recolección de muestras.	51
2.2.4. Formulación y preparación del Sustrato.	51
2.3. Técnicas y métodos utilizados para analizar las muestra.	53



ÍNDICE.

2.3.1.	Fundamento de los análisis de laboratorio.	53
2.3.2.	Instrumentos y equipos.....	56
2.3.3.	Metodología de preparación de la parcela agrícola.....	59
2.4.	Metodología de cálculos para determinar la calidad del Biol a partir de la eficiencia de los digestores.....	59
	Conclusiones Parciales del Capítulo II.....	64
	Capítulo III: Análisis de los resultados.	65
3.1.	Resultados de los análisis de biodigestores reales.....	65
3.1.1.	Análisis de resultados del Reactor de 42 m ³ de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.....	65
3.1.2.	Análisis de resultados del Reactor de 10 m ³ de la CCS “Osvaldo Fuentes” de Cumanayagua.	67
3.1.3.	Análisis de resultados del Reactor de 8 m ³ la Finca “El Tablón” de Cumanayagua.	69
3.1.4	Comparación de parámetros entre los biodigestores reales.....	71
3.2	Resultados de los análisis de los experimentos a escala laboratorio.	74
3.2.1	Reactor a escala de laboratorio con sustrato de mezcla de residuales agrícolas.	75
3.2.2	Reactor a escala de laboratorio con sustrato de residuo de café de la Torrefactora de Cienfuegos.....	76
3.2.3	Reactor a escala de laboratorio con sustrato de residuo de agua de maceración de la Fábrica de Glucosa de Cienfuegos.	77
3.3	Resultados del experimento in situ en producciones agrícolas.	80
3.4	Evaluación económica de la investigación.....	82
	Conclusiones Parciales del Capítulo III.	85
	Conclusiones Generales.	86
	Recomendaciones Generales.....	87
	Referencias bibliográficas.	88
	Anexos.....	92





Introducción.

En las últimas décadas la demanda de combustibles fósiles, ha aumentado significativamente a gran escala. La misma es provocada por el crecimiento poblacional y el gran crecimiento de las industrias manufactureras que satisface las necesidades de las sociedades, este crecimiento demandante por parte de las sociedades por combustibles fósiles impulsan cada vez más la llamada crisis energética. Crisis que impacta mayormente a los países importadores de petróleo o carburantes. El alto consumo experimentado en las últimas décadas ha causado la escasez de las fuentes de petróleo a nivel mundial. El déficit y la demanda por estos carburantes aumentan cada vez más, dando lugar a los altos precios en los últimos años y afectando directamente los precios de los alimentos sin contar el daño que causa al medio ambiente.

Estas problemáticas han despertado el interés por parte de la sociedad política y científica a nivel nacional e internacional, en la búsqueda de nuevas alternativas de producción de energía más limpia. En los últimos años se han centrado esfuerzos en investigación sobre nuevas fuentes de energías renovables debido al agotamiento de combustibles fósiles y los impactos que estos generan en el ambiente.

La creciente generación de residuos orgánicos y desechos producto de actividades humanas, así como la mala disposición final en su manejo, nos hace pensar en la necesidad de aplicar nuevas tecnologías con el fin de mejorar el ambiente y la economía de las poblaciones. Estos desechos poseen un valor económico potencial y son una fuente importante de materia prima para biodigestores que en su aplicación minimizan su impacto al ambiente.

En Cuba la utilización de digestores en la producción porcina cobra cada vez mayor importancia ya que logra darle utilidad a las excretas y transformar las aguas contaminantes en efectivos biofertilizantes (Biol y Lodos residuales).



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

Los biodigestores producen dos productos importantes: el Biogás, esencialmente metano (que puede ser utilizado como fuente de energía) y un efluente líquido llamado Biol que puede utilizarse como acondicionador de suelos y fertilizantes por sus características fisicoquímicas.

El Biol es un abono foliar orgánico, valioso para los pequeños productores agrícolas, en especial para aquellos cuyos terrenos son de media a baja fertilidad, el uso del Biol se constituye en un complemento importante al abonamiento del suelo para la obtención de mejores rendimientos, pues su uso aporta no solo los macro y micronutrientes para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas sino que son fuentes naturales de fitohormonas, entre otras, haciendo de la fertilización una práctica agronómicamente estable, ecológicamente sostenible y económicamente rentable.

Problema de Investigación.

La carencia de información y estudio del uso del Biol en los suelos y producciones agrícolas. A partir del desarrollo en Cuba de la construcción de plantas de Biogás y el uso integral de sus beneficios para hacer estos proyectos más rentables.

Objetivo General.

Estudiar los tipos de Biol producidos por diferentes digestores de Biogás y su uso en las producciones agrícolas, evaluando los rendimientos.

Objetivos Específicos.

1. Revisar la bibliografía sobre los residuos líquidos (Biol) de las plantas de Biogás, incluyendo experiencias existentes en el mundo y en Cuba.
2. Diseñar una propuesta de metodología para la investigación de los diferentes Biol según tipo de plantas estudiadas, su estudio para las condiciones de Cuba.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

3. Aplicar la metodología para obtener estudio de los tratamientos según tipo de planta y su factibilidad económica en la aplicación in situ en las producciones agrícolas, permitiendo evaluar el impacto.

Hipótesis de la Investigación.

El estudio del Biol podrá demostrar su uso y beneficios a los suelos y al aumento de los rendimientos agrícolas teniendo en cuenta que los factores en el proceso de la digestión anaerobia sean óptimos, evaluando su calidad y posibles precios.

Resultados Obtenidos.

Resultados de impacto técnico.

Se realizó un estudio del Biol proveniente de la salida de distintos biodigestores de Biogás reales y a escala de laboratorio, según substratos tipos de mezclas seleccionadas y su evaluación, desde el punto de vista de indicadores químicos y metodologías de cálculo y su factibilidad económica. Se determinó la clasificación técnica de diferentes tipos de Biol según su calidad.

Resultados de impacto económico.

Se evaluó la utilización del Biol como biofertilizante de las producciones agrícolas en el experimento in situ, quedando demostrada su eficiencia y eficacia al recuperar tierras improductivas y aumentando las ganancias por este concepto.

Resultados de impacto social.

La utilización del Biol evidenció un impacto social positivo, al disminuir los precios de los productos agrícolas y al ofertarle a la población productos frescos, de buena calidad y libres de fertilizantes químicos.

Resultados de impacto ambiental.

Mediante la implementación de tecnologías de biodigestores se trataron las excretas producidas y por este concepto se dejó de emitir a la atmosfera una carga significativa de CH₄ y CO₂, reduciendo la agresión al medio ambiente.



Capítulo I: Marco teórico referencial.

1.1 Generación de residuos orgánicos.

La generación de residuos en los procesos productivos se debe interpretar como un síntoma de ineficacia de un sistema productivo en el que se pierde gran cantidad de materiales que pasan a ser residuos en forma de emisiones, vertidos o desechos.

El modelo de producción actual necesita de importantes aportaciones de materias primas y energía, recursos que en muchos casos son escasos o están próximos a agotarse. Este modelo de producción lineal no cierra los ciclos productivos, como sí hace la naturaleza, en la que no hay residuos ya que todos los materiales se reutilizan y forman parte de nuevos procesos. Actualmente se vive en un modelo de producción que genera más residuos en cada una de sus fases (extracción de materias primas, transporte, fabricación, distribución y consumo) que la cantidad de bienes que produce. Este modelo no respeta los ciclos de la naturaleza ni tiene en cuenta sus límites físicos y ambientales, teniendo importantes consecuencias en el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación del aire, del agua y del suelo.

Los residuos y su minimización también son una oportunidad para las empresas para mejorar el funcionamiento de sus procesos productivos por lo que si se pretende alcanzar un desarrollo sostenible no sólo se tendrá que realizar una correcta gestión de los residuos, sino que será necesario además, desarrollarlos procesos productivos hacia la producción limpia, aumentando la eficiencia en el uso de recursos naturales, fomentando la prevención en la generación de residuos, priorizando la reutilización y el reciclaje, con el objetivo de cerrar los ciclos productivos. **(Crespo & Ferrer, 2006)**

Un residuo es todo aquello que se genera como consecuencia no deseada de una actividad humana y en general, de cualquier ser vivo. El ser humano, para subsistir tiene que transformar de manera continuada ciertos productos que se encuentran a su alcance en otros que pueda asimilar, generando consecuentemente una parte de residuos.

Los sistemas naturales no generan productos residuales de forma acumulable. El ciclo natural de la materia es cerrado y con el conjunto de los elementos químicos se hacen y deshacen



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

toda una serie de estructuras sin generar ningún tipo de residuo que no sea asimilable por la propia naturaleza. Es la intervención humana la que rompe este ciclo natural de la materia, cuando el hombre quiere obtener bienes que necesita para progresar y mejorar su calidad de vida. De esta manera, el hombre extrae las primeras materias y después de procesarlas y de utilizarlas deja una serie de restos que no son asimilables, sino que se acumulan o se depositan en zonas y lugares en muchas ocasiones sin ningún tipo de tratamiento.

La problemática de la producción creciente de residuos es ya un asunto de interés mundial. Reducir los residuos en el lugar donde se producen y reciclarlos son los mejores métodos para parar la creciente oleada de producción de desechos a todos los niveles.

El concepto de residuo viene definido de diversas formas:

Según la O.C.D.E. (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico) se define, el residuo como “aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no tienen, en el contexto en el que son producidas, ningún valor económico”. **(León, 2012)**

Estos materiales pueden estar en cualquier estado físico (sólido, líquido o gaseoso) y pueden ser liberados a cualquier medio receptor (agua, suelo, atmósfera). Por tanto, esta definición de residuo no sólo incluye los residuos sólidos, sino también los efluentes líquidos y las emisiones gaseosas.

1.1.1. Su clasificación.

Los residuos se pueden clasificar atendiendo a sus posibles tratamientos, su peligrosidad, sus características físico-químicas, su origen, etc.; pero es de gran importancia centrarse en la clasificación en función de su origen, ya que el mismo nos dará en muchos casos información de sus características y propiedades. De esta manera se distinguen los residuos procedentes del sector primario (residuos agrícolas, ganaderos y forestales), los procedentes del sector secundario (residuos industriales) y finalmente los procedentes del sector terciario o de servicios, constituidos por residuos sólidos urbanos (RSU). **(León, 2012)**

Residuos agrícolas.

Los residuos verdes de plantas no leguminosas, como las hortícolas, son susceptibles de ser empleados de forma casi inmediata como sustrato de plantas de Biogás. Deben ser triturados y secados previamente, lo que facilita su degradación rápida y posterior aplicación. En el caso de usarlos en la digestión anaerobia, es posible encontrarse con problemas de carencia de nutrientes. Se debe tener en cuenta que los residuos agrícolas producen una considerable cantidad de biomasa que debe ser aprovechada sobre todo como mezclas con el fin de aumentar el rendimiento de los biodigestores. En la tabla 1.1 (**Pozuelo, 2001**), podemos apreciar la composición nutritiva de algunos residuos de cosechas, especialmente de cereales y de hortícolas.

Tabla 1.1 Composición media en % de NKP de restos de cosecha.

Material	C/N	N	P	K
Trigo	105	0.49	0.11	1.06
Arroz	105	0.58	0.10	1.38
Maíz	55	0.59	0.31	1.31
Algodón	-	0.88	0.15	1.45
Patata	27	1.6	-	-
Lechuga	-	3.7	-	-
Cebolla	15	2.6	-	-
Tomate	12	2.1	0.3	0.20

Se destaca de manera notable que los restos de cereales presentan una mayor relación C/N, lo que se puede interpretar como que precisarán nitrógeno extra para su mineralización; en cambio debemos resaltar que los residuos de hortícolas suelen presentar una relación más baja lo que no favorece la digestión anaerobia.

Residuos forestales.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

Los restos forestales están compuestos fundamentalmente por materiales leñosos y de lenta mineralización, originados de forma natural y artificial en su mayor parte. Son obtenidos por procesos de poda y aclaren, como de otras labores que se practican en silvicultura. Además, a estos residuos, se puede asociar los derivados de las actividades de la industria de la madera, con características comunes a los restos de podas forestales en su mayor parte. **(Bardiya, Somayaji & Khanna, 1996)**

Residuos ganaderos.

El tratamiento de los residuos cada día reviste más importancia dada la dimensión del problema que representa, no sólo por el aumento de los volúmenes producidos, generado a su vez por una mayor intensificación de las producciones, sino también por la aparición de nuevos productos y principalmente por enfermedades que afectan la salud humana y animal que tienen directa relación con el manejo inadecuado de los desechos orgánicos.

Las camas de aves están constituidas por fecas y orina, material absorbente, resto de alimento y plumas. La composición química de las camas de aves es altamente variable, existiendo numerosos factores tales como: naturaleza y cantidad del material absorbente por unidad de superficie, densidad de aves, longitud de la crianza, número de crianzas sobre esa cama, nivel de nutrición de las aves, factores ambientales, tipo de piso.

Los cerdos excretan diariamente, en términos de su peso vivo, aproximadamente un 80 % de nitrógeno y el fósforo y cerca de 90 % del potasio de su ración. Según esto, el estiércol es un fertilizante y abono del suelo excelente.

El estiércol bovino es el mayor desecho producido en los agroecosistemas, un uso inapropiado puede crear problemas tales como mal olor, producción de nitratos y otros elementos contaminantes de cuerpos de agua.

La cantidad promedio de deyecciones producidas por animal/día pueden observarse en la tabla 1.2 **(López, 2005)**:

Tabla 1.2 Deyecciones de bovinos, cerdos y aves.



ANIMAL	EDAD (Meses)	DEYECCIONES PRODUCIDAS (ORINA + HECES kg/día)
Ternero	3-6	7
Vaca	24 +	28
Vaca lechera	24 +	45

ANIMAL	PESO (kg)	DEYECCIONES PRODUCIDAS (ORINA + HECES kg/día)
Lechón	15	1.04
Cerda	125	4.03
Padrillo	160	4.09

TIPO DE AVE	PESO (kg)	DEYECCIONES PRODUCIDAS (ORINA + HECES kg/día)
Ponedora	1.8	0.10
Parrillero	0.9	0.06

Residuos industriales.

Los residuos industriales son aquellos generados por la industria. Dada la gran variedad de residuos industriales posibles, estos se subdividen en cuatro tipos: residuos asimilables a urbanos, inertes, especiales y no especiales.

Los residuos asimilables a urbanos son los que, por sus características y composición, son similares o “equivalentes” a los residuos sólidos urbanos. Por ejemplo: papel de oficina, restos de comedores, virutas de madera y textiles.

Los residuos industriales inertes son aquellos que, al ser depositados en un vertedero, no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. No son solubles, combustibles, ni biodegradables y no se combinan ni reaccionan químicamente con ninguna

sustancia. Carecen de carácter contaminante y no son perjudiciales para la salud humana, aunque pueden producir un impacto visual negativo. Por ejemplo: escombros, gravas, arena.

Los residuos industriales especiales son potencialmente peligrosos para la salud y el medio ambiente, ya que son o contienen sustancias tóxicas, corrosivas, inflamables, cancerígenas e infecciosas, como ejemplos de este tipo de residuos, podemos nombrar: compuestos farmacéuticos, aceites usados minerales o sintéticos, alquitranes, pinturas, barnices, ácidos.

Los residuos industriales no especiales se definen por exclusión, ya que son aquellos que no se clasifican como especiales, ni como inertes ni tampoco son asimilables a urbanos. Por ejemplo: vehículos abandonados, neumáticos. **(Pérez, 2010)**

Residuos sólidos urbanos (RSU).

Los residuos sólidos urbanos constituyen uno de los más serios e importantes problemas que tienen las autoridades encargados de la recogida y tratamiento de los mismos. Una mala gestión de estos puede generar problemas de contaminación en los suelos, las aguas y la atmósfera. Se entiende por RSU todo desecho producido o generado por núcleos urbanos o centros domiciliarios. Los lugares que dan origen a estos residuos son: **(León, 2012)**

- Domicilios.
- Comercios y servicios.
- Hospitales, clínicas y ambulatorios.
- Muebles, vehículos y otros enseres abandonados.
- Residuos de pequeñas industrias, construcción y otros.

1.1.2. Tipos de Tratamientos.

Actualmente, el tratamiento de los residuos biodegradables es una actividad que se realiza sobre la base de criterios medioambientales. La justificación medioambiental de la eliminación de un residuo, combinada o no con su valorización para obtener productos no

energéticos, es el punto de partida para estudiar el posible aprovechamiento energético del Biogás producido mediante digestión anaerobia. Desde este punto de vista, el Biogás debe ser considerado como un subproducto del proceso de tratamiento.

Dentro de los residuos biodegradables se engloban los ganaderos, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales, los efluentes industriales y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU).

Los residuos ganaderos susceptibles de aprovechamiento energético se encuentran concentrados en las explotaciones intensivas, donde los elevados volúmenes de agua utilizados en los sistemas de alimentación y limpieza provocan grandes cantidades de residuos. Estos se caracterizan a partir del estado fisiológico y peso del ganado, de la composición de la ración alimenticia y de las características y el manejo de las explotaciones. La aplicación de procesos de digestión anaerobia al residuo producido, cuando se trata de residuos ganaderos, se trata tecnológicamente a partir de una elevada concentración de cabezas de ganado.

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos puede explotarse con viabilidad económica para conseguir un aprovechamiento energético del Biogás producido en vertederos controlados a partir del orden de las 200-250 ton/día de capacidad. La correcta gestión del vertedero exige que el gas se extraiga mediante pozos de captación colocados uniformemente a lo largo de la plataforma de vertido y tuberías perforadas que permitan su drenaje y lo conduzcan hasta las instalaciones dedicadas a su aprovechamiento.

Como aplicación tecnológica emergente se podría considerar la digestión anaerobia en bioreactores de la fracción orgánica de los RSU, aunque desde el punto de vista técnico-económico, parece más recomendable el compostaje directo tradicional por procedimientos aerobios pues la generación de energía no justifica la inversión necesaria. **(Casas, Torras, Garriga & Meritxell, 2005)**

Los residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales pueden someterse a digestión anaerobia para producir Biogás. Son industrias como la cervecera, azucarera,



conservera, alcoholera, la de derivados lácteos, la oleícola, la alimentaria y la papelera las que generan este tipo de residuos, de alta carga orgánica.

1.1.3. Uso de residuos orgánicos en plantas de Biogás.

La biomasa de acuerdo a su contenido de humedad puede utilizarse en diferentes procesos para su conversión en energía. En este sentido se recomiendan los procesos bioquímicos (digestión aeróbica o anaeróbica) cuando la humedad es superior al 60 % (**Biomasa, 2009**). Sin embargo existen experiencias con el uso de otros sustratos con un contenido de humedad inferior los cuales pueden utilizarse con algún tipo de pretratamiento que aumente su biodegradabilidad. (**Guardado & Cortada, 2010**)

Los microorganismos metanogénicos necesitan nutrientes para producir Biogás, por ello es necesario contar con suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa. La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de los cultivos, excretas de humanos y de animales) pueden dividirse en dos grupos, las materias primas ricas en nitrógeno y las materias primas ricas en carbono, el nitrógeno se utiliza como constituyente para la formación de la estructura celular, y el carbono se utiliza como fuente de energía.

Los microbios siempre consumen estos elementos en determinada proporción, medidos por la relación carbono-nitrógeno (C/N) que contiene la materia orgánica. Existen muchos criterios en lo referente a esta relación, pero se reconoce en general como aceptable una relación C/N de 20-30:1. (**Guzmán, 2013b**)

En general las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (paja y tallos). Mientras en los primeros 10 días de degradación las materias primas nitrogenadas generan de 34,4 %-46 % del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8,8 %. Por ello para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimiento y de distintas velocidades



de generación; también es conveniente agregar las materias primas ricas en nitrógenos a las materias primas de alta relación C/N, a fin de bajar esta relación. **(Guzmán, 2013b)**

Los lodos de la depuración de aguas residuales urbanas pueden someterse también a procesos de digestión anaerobia; se generan durante su tratamiento primario, en el decantador primario de la planta y secundario, por sedimentación de la biomasa bacteriana constituida por las partículas finas y disueltas de materia orgánica que fijan y metabolizan las bacterias durante los procesos de aireación en el decantador secundario. El nivel a partir del cual resulta de interés el aprovechamiento energético del Biogás producido mediante digestión anaerobia en todos estos casos es el que marca el vertido.

La situación en la que se encuentran en la actualidad este tipo tecnología varía según los residuos considerados. Así como para los residuos ganaderos, el nivel de este tipo de aplicaciones debe ser considerado como bajo, mientras que el Biogás producido a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos empieza a tener una aplicación energética creciente en los vertederos controlados. El producido a partir de los residuos de instalaciones industriales y de los lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas presenta ya un apreciable grado de aplicación.

Las necesidades futuras para potenciar el aprovechamiento de la tecnología del Biogás apuntan por un lado hacia la aplicación tecnológica de la digestión anaerobia para volúmenes pequeños, pero también hacia la utilización de bioreactores anaerobios para residuos sólidos urbanos que incluyan la codigestión con lodos de depuradoras. Tratar el Biogás obtenido para enriquecerlo y optimizar las instalaciones en función de las características de la materia a tratar son otros de los objetivos a conseguir en un futuro cercano. **(González, 2007)**

1.2 Proceso de digestión anaerobia.

Definición.



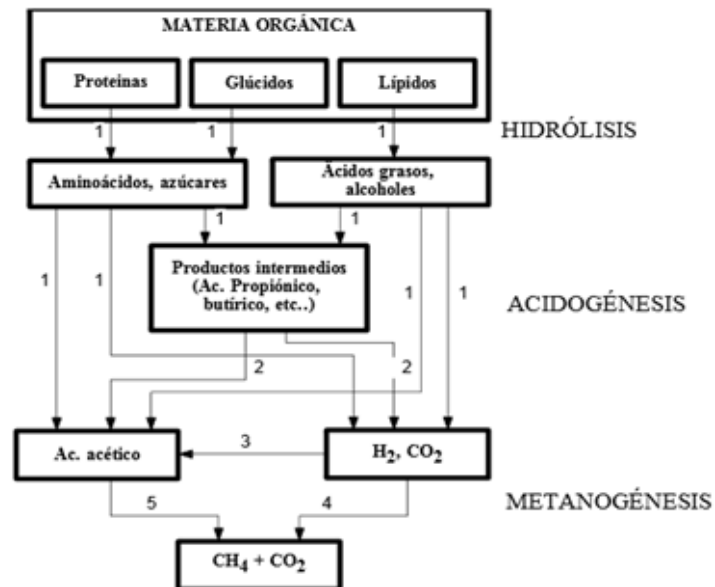
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

La digestión anaeróbica consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno para dar como resultado dos productos principales: Biogás (compuesto mayoritariamente por metano) y los llamados digestatos (Biol y Lodo).

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de digestión anaeróbica, un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo. **(Ahring, 1995)**

La materia prima preferentemente utilizada para someterla a este tratamiento es la biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente los residuos ganaderos y los lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas. Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar Biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias. **(Álvarez, Caneta & Moyano, 2003)**

La naturaleza y la composición química del substrato condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa, de manera que se establece un equilibrio fácilmente alterable cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones. La baja tasa de multiplicación de las bacterias involucradas y las bajas tasas de conversión del substrato en biomasa bacteriana, en comparación con los sistemas aerobios de eliminación de materia orgánica, se concluye que el proceso es lento, necesiándose varias semanas, incluso meses, de puesta en marcha para conseguir un equilibrio estable. **(Campos, 2001)**



Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Figura 1.1 Fases de la digestión anaerobia y poblaciones bacterianas.

Bioquímica de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar el alimento de los microorganismos), interviniendo diversas poblaciones de bacterias. La figura 1.1, describe cada una de las fases. **(Ahring & Westerman, 1987)**

Se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo 4 etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapas hidrolítica.

Los compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc. Se



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

trata de un proceso enzimático extracelular, y las bacterias responsables de su generación son las bacterias hidrolítico-acidogénicas.

Etapas acetogénica.

Los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtiene ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. El metabolismo acetogénico es muy dependiente de las concentraciones de estos productos, tal como se comprueba más adelante para el ácido butírico, Como ejemplos de bacterias acetogénicas, cabe mencionar *Syntrophobacter wolinii* que descompone el ácido propiónico, o *Syntrophomonas wolfei*, que descompone el butírico. Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies. En el grupo de bacterias acetogénicas se incluyen las homoacetogénicas, capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, perteneciente a los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* *Eubacterium*.

Etapas acidogénica

Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), como ácidos acéticos, propiónico, butírico y valérico, principalmente. Las bacterias acidogénicas comúnmente encontradas en digestores incluyen especies de *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium* spp, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Bifidobacterium* spp, *Lactobacillus*, *Streptococcus* y *Enterobacterias*. **(Bagley & Brodtkorb, 1999)**

Etapas metanogénica.

Constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a CH₄ y CO₂. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que consumen hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de formación del metano es la primera, con alrededor del 70 % del metano producido. A pesar de ser esa la vía más importante, los microorganismos de los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix*

son capaces de producir metano a partir de acético. Otros géneros a los que pertenecen microorganismos metanogénicos, en este caso hidrogenófilos, son *Methanobacterium*, *Methanococos*, *Methanobrevibacter* o *Methanogenium*, entre otros.

En la digestión anaeróbica la mayoría de las bacterias son no metanogénicas, y tienen una gran importancia en el desarrollo del proceso anaeróbico, ya que las bacterias productoras de Biogás no pueden aprovechar directamente los compuestos orgánicos a menos que éstos hayan sido degradados y convertidos en compuestos más sencillos, de menor peso molecular, gracias a la acción de las bacterias no metanogénicas. **(Banks & Humphereys, 1998)**

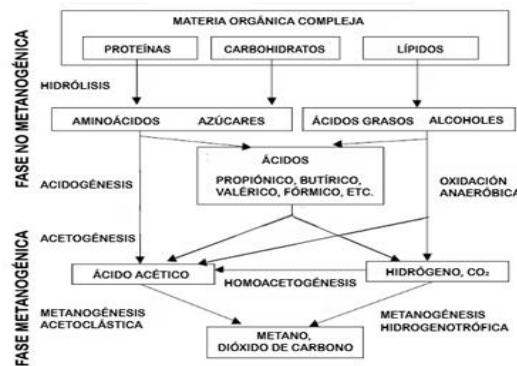


Figura 1.2 Degradación de la materia orgánica en la digestión anaerobia.

Variables que influyen en el proceso.

- **Temperatura:** se encuentra un óptimo de funcionamiento alrededor de los 30-35 °C.
- **Acidez:** determina la cantidad y el porcentaje de metano en el Biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6.
- **Contenido en sólidos:** se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10 % en sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- **Nutrientes:** para el crecimiento y la actividad de las bacterias, estas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.



- Tóxicos: aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas. (Angelidaki & Ahring, 1992)

1.3 Reactores de Biogás.

Los biodigestores son depósitos-tanques en los que se produce la digestión anaerobia aprovechando el recurso biomasa. Los elementos característicos de una planta de Biogás son los sustratos, el digestor y la unidad de cogeneración. Los sustratos son la materia orgánica que hace falta introducir dentro del digestor para crear el ecosistema idóneo para el cultivo de las bacterias que realizarán la digestión y por tanto, que generarán el Biogás. Estos sustratos pueden ser de origen y tipo de lo más variado, si bien los más usuales son: lodos de flotación, residuos de mataderos, herbáceos, entre otros. Para obtener una mayor producción de Biogás se puede realizar una codigestión, consistente en mezclar estos sustratos, de manera que se favorezca la actividad de los microorganismos que degradan la materia orgánica. Una vez está dispuesta la mezcla dentro del digestor el proceso consiste en ir mezclando y aportando sustratos y nutrientes continuamente hasta optimizar la producción de Biogás.

A grandes rasgos se pueden definir como recipientes o tanques que permiten la carga (afluente) de sustratos (biomasa) y descarga (efluente) de Biol y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de Biogás para su aprovechamiento energético.

Los biodigestores son apropiados para las condiciones técnicas y posibilidades económicas de los países desarrollados y subdesarrollados. La tecnología del Biogás está bien adaptada a las exigencias ecológicas, ambientales y económicas del futuro.

Es una tecnología de avanzada y de mucha aceptación por tratarse del aprovechamiento de emisiones de residuos para disminuir su impacto contaminante. El biodigestor es una forma barata y fácil de obtención de Biogás y Biol que tienen gran potencial para ser desarrollados y utilizados.

Un biodigestor o planta de Biogás se compone de un tanque de homogenización o carga, una bomba (opcional), el tanque de biodigestión, un mezclador o agitador, tuberías de captación

de Biogás, el recipiente para almacenar Biogás (puede estar integrado en el mismo biodigestor), tanque de descarga, tuberías y válvulas de seguridad, cierre y desagües, filtro de remoción de H_2S . (Hilbert, 2000)

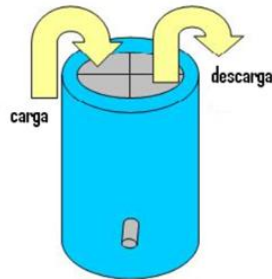
1.3.1 Tipos de reactores y sus características.

El hombre de acuerdo a la aplicación del gas, las características del material a ser digerido, a las exigencias en cuanto a niveles de descontaminación a lograr y a la relación costo-inversión-beneficio ha diseñado y probado a lo largo del desarrollo de esta tecnología diversos tipos de digestores, los cuales se fabrican de acuerdo a las exigencias económicas del consumidor, permitiendo que existan plantas de Biogás sencillas y de última generación.

Digestor tipo Batch/Lote.

Caracterizado por cargarse una vez y luego descargarse cuando concluye el proceso de digestión. Se tiene un orificio de alimentación que es tapado mientras se digiere; pero luego de la descarga (que se da en otro orificio) se vuelve a destapar para recibir la siguiente carga. La materia abastecida será la que se digiera y produzca el Biogás, por lo mismo, no hay recambio de carga que permita sostener los niveles de Biogás producido; para ello después de su respectivo tiempo de retención hidráulica (TRH) se descarga y se vuelve a alimentar. Usualmente al inicio del proceso, o mejor dicho la primera carga representa el 5 % - 30 % del volumen del digestor, puesto que el gas despedido no será utilizable, ya que tendrá altos contenidos de dióxido de carbono, por lo tanto hay un desfase de tiempo entre 1 -14 días antes de la primera producción de Biogás (esto también depende de la temperatura de los purines o carga así como la cantidad utilizada en el arranque).

Modelo de alimentación batch del digestor



Tasa de producción de biogás con respecto al tiempo



Fuente: Running a biogas programme, David Fulford

Figura 1.3 Digestor tipo Batch/Lote.

Este sistema es recomendable cuando la materia a procesar está a disposición de manera intermitente; además la ventaja de este tipo de digestor radica en que sirve para la digestión de materiales celulósicos o con contenidos de lignina que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida.

Como adición a esta ventaja, podemos decir que también acepta el trabajar con alimentaciones de altos contenidos sólidos, reduciendo así la necesidad de utilizar agua para mezclar la biomasa. **(León & Santana, 2003)**

Tipos de digestores según la frecuencia de carga de alimentación:

Digestor de tipo continuo.

Este tipo de digestores consiste en, una vez alimentado con la primera carga, se mantenga la alimentación regularmente. La biomasa a utilizar tiene que estar mezclada con agua, esta mezcla debe producirse fuera del digestor, antes de la alimentación.

Este tipo de digestor necesita de un elemento a la salida del mismo, para que en ella se puedan acumular los purines ya digeridos, que en realidad serán los lodos enriquecidos con elementos fertilizantes.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.

Una vez que el proceso de digestión se ha estabilizado, la tasa de producción es bastante constante (hay que mantener la velocidad de alimentación así como la temperatura). Hay que tener cuidado de que la entrada y salida de las tuberías no estén bloqueadas como consecuencia de la digestión.

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales, es decir es de aplicación industrial. En general son plantas muy grandes, por el cual se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control.

Digestores de tipo semicontinuo.

Es una combinación de las bondades tanto del tipo de digestor discontinuo o tipo Batch con el continuo. En este tipo de digestor, el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacúa por la salida. Como consecuencia el volumen del sustrato que alimenta el digestor permanece constante. La carga generalmente es en forma diaria, pero la descarga total a diferencia del tipo Batch sólo será una o dos veces al año, que generalmente coincide con el período de siembra para poder aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos fermentados, parte de éstos lodos es vuelto a utilizar como alimentación del digestor.

Este tipo de digestor es el más difundido a nivel mundial, y dentro de ellas existen pequeñas variaciones, pero todas parten del mismo principio. Por ello, es el tipo más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños o para uso doméstico. Los diseños más representativos son los Geomembrana, Cúpula Fija y Campana Flotante. **(Padrón & Wilfredo, 2009)**

Tipo de digestores de acuerdo a su funcionamiento:

Las plantas de tecnología simple, según el régimen de carga o llenado, se clasifican en dos tipos fundamentales: de flujo continuo, mayormente empleadas para la obtención de

volúmenes considerables de gas; y las de flujo discontinuo o Batch, para pequeñas producciones de Biogás. (Savón, 1999)

La gran ventaja de las primeras es que las bacterias metanogénicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen Biogás de manera más uniforme. Las plantas de tecnología simple más empleadas, y de flujo continuo, pueden agruparse en tres tipos ampliamente desarrollados en la práctica:

Planta de Geomembrana (PVC).

Los biodigestores PVC son un medio de tratamiento de las excretas de animales y de otros tipos de desechos orgánicos utilizando un proceso de digestión anaeróbica. El plástico con el que están fabricados los biodigestores es de forma tubular, de calibre 8, protegido con filtro contra luz ultravioleta (LUV) de 1,25 m de diámetro. Dentro de este plástico se descompone o degrada estiércol de diferentes especies de animales o de otro tipo de desechos orgánicos como: de mataderos, heces humanas y desperdicios agrícolas entre otros. (León & Santana, 2003)

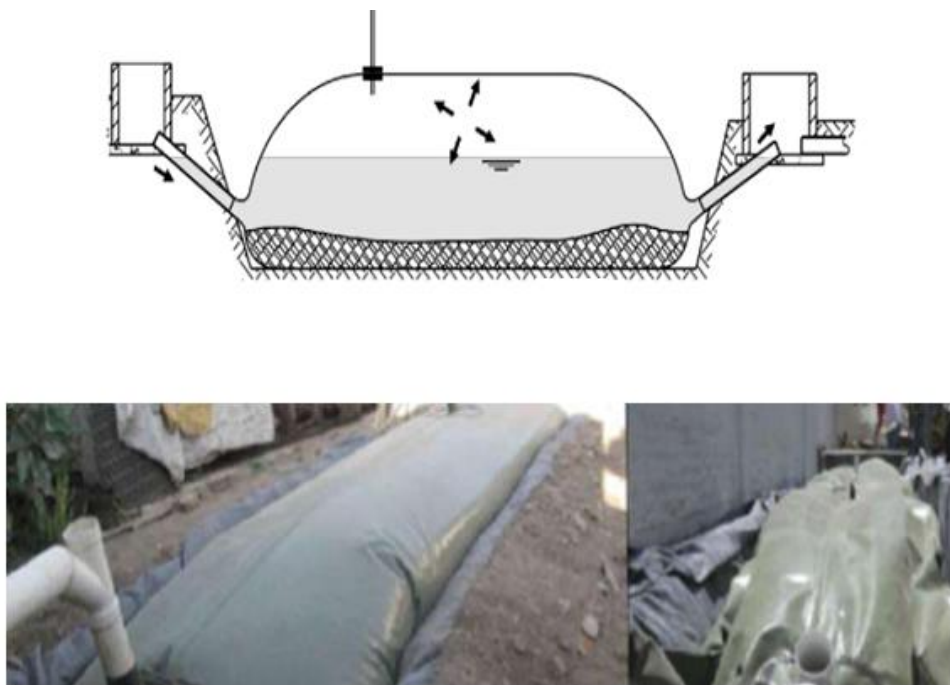


Figura 1.4 Digestor tipo Geomembrana.

Planta de Cúpula Móvil (campana flotante).

El gasómetro (compuesto generalmente por planchas metálicas) flota sobre el material orgánico en fermentación. Este modelo, cuando no se le construye tanque de compensación, que es lo más frecuente, funcionan de forma irregular, por lo cual es necesario abrirlo, limpiarlo y volverlo a cargar. También en la literatura se reconoce que su rendimiento de Biogás por unidad de volumen es menor que para el caso de los de Cúpula Fija. **(Padrón & Wilfredo, 2009)**

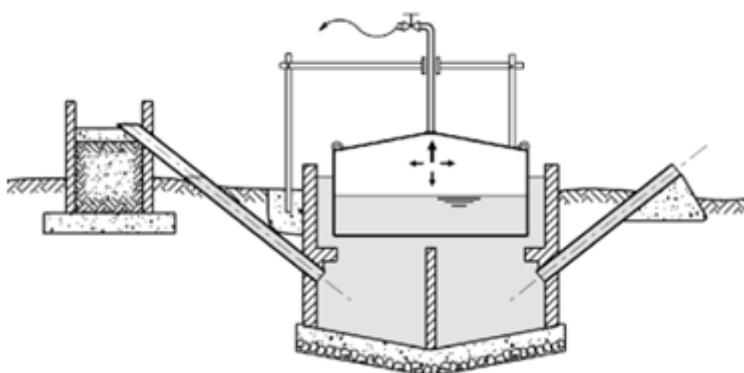


Figura 1.5 Digestor tipo Campana Flotante.

Planta de Cúpula Fija.

El gas se almacena en la parte superior debido al desplazamiento gaseoso. El funcionamiento desde el punto de vista físico del biodigestor de cúpula fija está estrechamente relacionado con el equilibrio entre las presiones hidrostáticas creadas en su interior debidas a la acumulación del Biogás generado en el domo o cúpula superior del cuerpo del biodigestor. El residual utilizado como materia prima para la generación del Biogás, previamente mezclado con agua, en las proporciones adecuadas en correspondencia con el tipo de que se trate, se adiciona por el registro de carga y cae dentro del biodigestor por gravedad. **(Cáceres, 2008)**

El material ya digerido es expulsado hacia la laguna de compensación donde puede recogerse ya como abono orgánico de un buen poder nutritivo para mejorar las condiciones de los

suelos donde se realizan los cultivos. Este proceso ocasiona que dentro del biodigestor exista una regulación de la presión del Biogás que no permita que pueda ocurrir una explosión, precisamente por esto es que esta parte recibe el nombre de laguna de compensación, porque compensa las presiones interiores. (León & Santana, 2003)

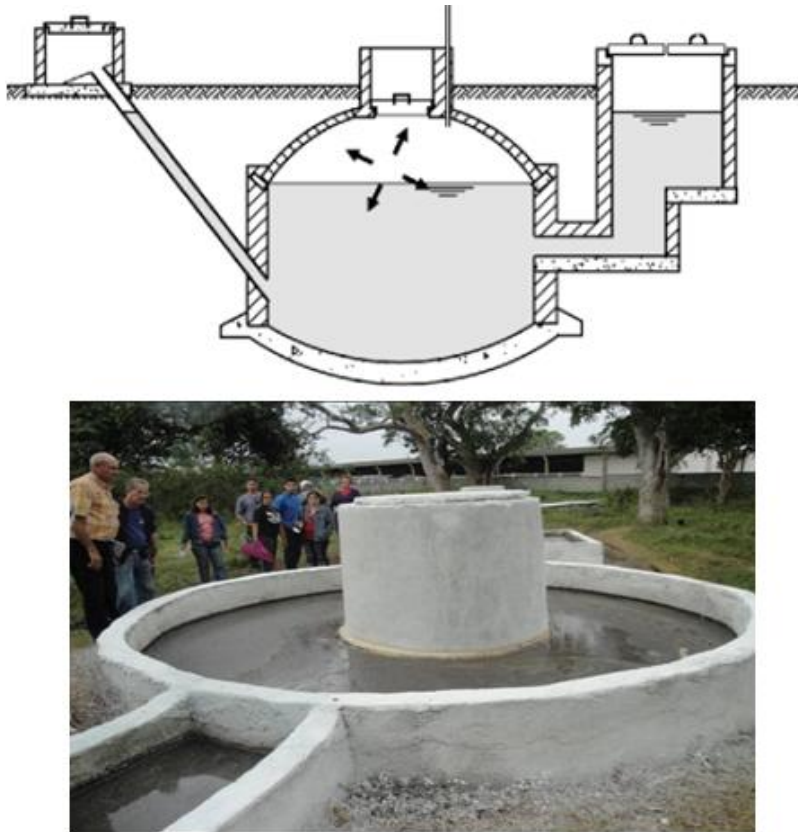


Figura 1.6 Digestor tipo Cúpula Fija.

Tabla 1.3 Comparación entre los distintos tipos de digestores.

Diseño / Criterio	Digestor de Domo Flotante	Digestor de Domo Fijo	Digestor de bolsa o balón
Componentes principales.	Digestor construido para almacenaje gas en tambor flotante	Digestor construido con fosa excavada.	Digestor y almacenaje gas integrado, material plástico.
Sustratos adecuados	Excrementos de animales con o sin residuos vegetales.	Excrementos animales con o sin residuos vegetales.	Excrementos animales solamente.
Vida útil prevista	8-10 años	12-20 años	2-5 años
Volumen del digestor	5-100 m ³	6-20 m ³	4-100 m ³
Ventajas	Fácil construcción, operación, presión uniforme, tecnología madura	Bajo Costo, vida útil larga, buen aislamiento.	Construcción prefabricada, fácil operación.
Inconvenientes	La cúpula de metal puede oxidarse.	Aislamiento de la parte superior de almacenaje de gas, fluctuación de la presión de gas.	No se construye in situ, vida útil corta (2-5 años) de material plástico, producción de gas baja.
Operación y mantenimiento	Fácil, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas.	Fácil, después de cuidadosa familiarización con la planta.	Fácil, control regular de la presión de gas.
Producción diaria de gas	0.3-0.3 m ³	0.2-0.5 m ³	0.3-0.8 m ³
Elementos costosos	Cúpula metálica de gas.	La combinación de digestor acumulador de gas y excavación	La lona de plástico.
Usos recomendados	Muy desarrollado, fiable en tamaños familiares.	Equipo no muy caro, bueno para residuos agrícolas.	Para plantas de pequeña escala o soluciones rápidas.

1.4 Productos finales de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia sucede en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno (medio anaerobio) y se prolonga el tiempo necesario, da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocido como Biogás y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos o fangos), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, el fósforo y los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa.



El Biogás es el principal producto obtenido en el proceso, pero como ya se ha comentado también se genera los denominados digestatos, que se puede decir que es la mezcla del residuo orgánico ya digerido y la biomasa microbiana producida.

El Biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65 %) y el dióxido de carbono (35-45 %) y en menor proporción, nitrógeno, (0-3 %), hidrógeno (0-1 %), oxígeno (0-1 %) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica por la acción de microorganismos. **(Baier & Schmidheiny, 1997)**

La composición de Biogás depende del tipo de materia prima y en cierta medida de la técnica utilizada en el proceso de la digestión anaerobia. La materia prima utilizada para la digestión anaerobia varía considerablemente en la composición, la homogeneidad y la biodegradabilidad. **(Daniel, 2009)**

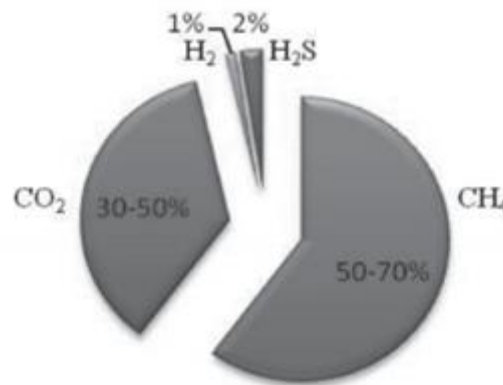


Figura 1.7 Composición del Biogás.

Rangos óptimos de los parámetros de producción de Biogás.

Los parámetros a optimizar en el proceso de la digestión anaerobia para la obtención de Biogás y digestatos se basan por indicadores de temperatura, alcalinidad, relación C/N, agua sólidos y tiempo de retención hidráulica.

Tabla 1.4 Parámetros óptimos para la producción de Biogás.

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
Temperatura(° C)	30-35
PH	6.8-7.5
Relación C/N	20-30
Tiempo de Retención (días)	10-25*
Relación agua/Sólidos	6-10

Guzmán Chinae, J . M, 2013

En la actualidad, las aplicaciones más comunes del Biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica ya que puede ser utilizado en una variedad de equipos comerciales: motores de combustión interna, estufas, etc. No obstante, existe un interés creciente por otras alternativas como son su aplicación como combustible de automoción y su integración en la red de gas natural. La purificación del Biogás incluye la eliminación de CO_2 , H_2S , NH_3 , agua y partículas sólidas. (Moreno, 2013)

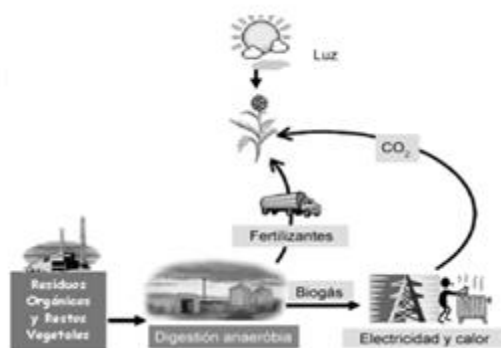


Figura 1.8 Utilización de los fertilizantes procedentes de las Plantas de Biogás.

La fracción líquida resultante del fango proveniente del fermentador o biodigestor es decantado o sedimentado obteniéndose una parte líquida a la cual se le llama Biol.

Aproximadamente el 90 % del material que ingresa al biodigestor se transforma a Biol. Esto depende naturalmente del tipo de material a fermentar y de las condiciones de fermentación. (Pineda, 2004)

Tabla 1.5 Composición química del Biol. (Pineda, 2004)

Componente	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4
pH	7,96	8,1	No menciona	6,7-7,9
Materia Seca	4,18 %	4,2 %	No menciona	1,4 %
Nitrógeno total	2,63 g/kg	2,4 g/kg	0,2 g/kg	0,9 g/kg
NH ₄	1,27 g/kg	1,08 g/kg	No menciona	No menciona
P	0,43 g/kg	1,01 g/kg	0,076 g/kg	0,048 g/kg
K	2,66 g/kg	2,94 g/kg	4,2 g/kg	0,29 g/kg
Ca	1,05 g/kg	0,50 g/kg	0,056 g/kg	2,1 g/kg
Mg	0,38 g/kg	No menciona	0,131 g/kg	0,135 g/kg
Na	0,404 g/kg	No menciona	2,1 g/kg	No menciona
S	No menciona	No menciona	6,4 g/kg	0,33 g/kg
C	No menciona	No menciona	1,1 g/kg	0,23-0,30 g/kg
Al	No menciona	No menciona	0,4 g/kg	No menciona
Zn	No menciona	No menciona	No menciona	0,05 mg/L

Fuente 1: Biol de estiércol vacuno.

Fuente 2: Biol de mezcla de sustratos: estiércol vacuno y restos de comida casera.

Fuente 3: Biol de banano promedio, tallo, hoja y frutos.

Fuente 4: Biol de estiércol vacuno.

Como se observa en la tabla, la composición depende del tipo de residuo que entra al digestor por lo que se puede decir que el Biol es “único”. El Biol presenta en común una baja presencia de materia seca (sólidos totales) que van desde 1-5 % respecto a la cantidad de sus nutrientes

(N, P, K y Mg) estos varían según la materia prima que haya sido degradada. La relación de N-P-K-Mg de la materia saliente (ya digerido Biol y Lodo) sería casi 1:1 con respecto al material entrante.

El uso del Biol es principalmente como promotor y fortalecedor del crecimiento de las plantas, raíces y frutos, gracias a la producción de hormonas vegetales, las cuales son desecho del metabolismo de las bacterias típicas de este tipo de digestión anaerobia. Estos beneficios hacen que se requieran menor cantidad de fertilizante mineral u otro empleado. **(Medina, 2002)**

Tabla 1.6 Composición bioquímica del Biol.

Componentes	Cantidad
Acido indol acetico (ng/g)	9.0
Giberelina (ng/g)	8.4
Purinas (ng/g)	9.3
Citoquininas	No detectado
Tiamina (Vit B1) (ng/g)	259,0
Riboflavina (vit B2) (ng/g)	56,4
Adenina	No detectado
Acido fólico (ng/g)	6,7
Acido pantoténico (ng/g)	142,0
Triptofano (ng/g)	26,0
Inositol	No detectado
Biotina	No detectado
Niacin	No detectado
Cianocobalamina (vit B12)(ng/g)	4,4
Piridoxina (vit B6) (ng/g)	8,6

Las hormonas vegetales o fitohormonas se definen como fitorreguladores en el desarrollo producidas por las plantas. A bajas concentraciones regulan los procesos fisiológicos y promueven el desarrollo físico de las plantas. El Biol cualquiera que sea su origen cuenta con estas fitohormonas por lo que encuentra un lugar importante dentro de la práctica de la agricultura orgánica, al tiempo que economiza los costos y mejora la productividad y la calidad de los cultivos.

El Lodo residual o Biosol es el resultado de separar la parte sólida del “fango” resultante de la fermentación anaerobia dentro del digestor. Dependiendo de la tecnología empleada, este



Lodo puede alcanzar entre 25 % a solo 10 % de humedad. Su composición depende mucho de los residuos que se utilizan en el biodigestor. Se puede utilizar solo o en conjunto, o con fertilizantes químicos para la preparación de suelos agrícolas. **(Aparcana & Janses, 2008)**

1.5 Experiencias en Cuba y el mundo del uso del Biol en suelos y producciones agrícolas.

Existen reportes de la utilización del Biol con el fin de aumentar las producciones agrícolas principalmente en países de Latinoamérica (Perú, Ecuador, Colombia, México y Cuba) y en Europa sobresale España, así por ejemplo: en pastos y forrajes aumenta hasta 10 toneladas por corte, en papas aumenta hasta 10 ton/ha. **(Medina, 2002)**

Otras ventajas de su uso son:

- Aumenta la cantidad de raíces.
- Incrementa la capacidad de producción de las plantas y mejora la calidad de la producción cosechada.
- Tiene efecto repelente sobre las plagas y enfermedades y reducen los costos del uso de insecticidas y abonos sintéticos.
- Otorga un color verde oscuro característico a las plantas.
- Mejora la calidad de las frutas y hortalizas.
- Se protege la salud de los productores y consumidores.

Durante la fermentación los materiales orgánicos utilizados por los microorganismos son transformados en Vitaminas, Minerales y Ácidos Orgánicos (sustancias esenciales para el desarrollo de las plantas). El Biol contiene fitohormonas naturales que favorecen el crecimiento, floración y fructificación de los cultivos.

El Biol puede ser utilizado en diferentes formas:

- Aplicaciones directas al suelo o incorporando en las composteras.
- Aplicado en sistemas de riego y/o en aplicaciones foliares, es importante filtrar bien para evitar que se atoren las boquillas del equipo de aplicación.

El Biol, puede utilizarse en los cultivos de papa, trigo, kiwicha, haba, maíz, fríjol, forrajes, frutales, hortalizas y ornamentales con aplicaciones dirigidas al follaje, al suelo, a la semilla y/o a la raíz de la planta. Se aplica durante todo el proceso de desarrollo de la planta.



En la provincia de Cienfuegos ya se ha comenzado a dar los primeros pasos para la implementación del uso del Biol como efectivo biofertilizante, realizándose ensayos en producciones agrícolas de corta duración, es así como en la UEB Genético Porcino la utilización del ferti-riego de frijoles ha mejorado en gran medida la producción de este grano y se pretende seguir avanzando en este sentido para llegar a ser capaces de utilizarlo en otros productos como el maíz, plátano, arroz, boniato, yuca y malanga, además de establecer, en un futuro no muy lejano una norma para su utilización con el fin de controlar y aumentar las producciones agrícolas.

Conclusiones Parciales del Capítulo I.

1. La generación de residuos en los procesos productivos se interpreta como un síntoma de ineficacia de los sistemas productivos, generándose desde el sector privado hasta el estatal.
2. La gestión de los residuos agrícolas, forestales, ganaderos, industriales y sólidos urbanos pueden realizarse mediante el uso de tecnologías de biodigestores reduciendo los costes económicos y el impacto medioambiental.
3. La digestión anaerobia permite descomponer la materia biodegradable en ausencia de oxígeno, produciendo dos productos finales; Biogás y Digestatos.
4. La digestión anaerobia se efectúa en un digestor que está formado por un tanque hermético donde ocurre la fermentación y un depósito de almacenaje de gas. Las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de gas puede ser de campana fija, flotante o de PVC.
5. El Biol es el efluente líquido de las plantas de biogás, el cual según su calidad se utiliza para la preparación de suelos o el ferti-riego para incrementar los rendimientos agrícolas.



Capítulo II: Metodología del diseño experimental.

2.1. Breve descripción de los centros donde se realizarán los experimentos.

Los análisis de muestras se llevarán a cabo indistintamente en el sector estatal, en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, cuyo digestor es de tipo Cúpula Fija, en los sectores privados CCS “Osvaldo Fuentes” y la finca “El Tablón” tomada al azar en el propio municipio cienfueguero de Cumanayagua, siendo los digestores de estos dos últimos de tipo Geomembrana. Se pretende establecer una comparación entre los tres biodigestores reales y los contruídos a escala de laboratorio tipo Batch/ Lote atendiendo a los parámetros de calidad del sustrato, TRH y eficiencia de los digestores para poder establecer la calidad a partir de los indicadores DQO y DBO₅ de los diferentes tipos de efluentes (Biol).

2.1.1. Descripción de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

La Unidad de Producción Genética Porcina se encuentra enclavada en el poblado de Venta del Río de la Ciudad de Cienfuegos. Su fundamental vía de acceso es un camino que se deriva de la Carretera de Rodas, limita por el Norte con el área cañera del CAI Elpidio Gómez, por el Oeste existe un camino vecinal por donde transitan personas, animales y equipos agrícolas, por el Este limita con el río Salado y por el Sur la carretera de acceso a la unidad donde existen alrededor de 120 núcleos familiares donde muchos de ellos son trabajadores del centro.

Objeto Social: según Resolución. 1026 del 2 de febrero del 2005 del Ministerio de Economía y Planificación (M.E.P), modifica el Objeto Social de la Empresa y se detalla a continuación:

- Producir y comercializar de forma mayorista cochinatos y cochinatas genéticos como reemplazo, precebas genéticas en pie, lechonas y lechones genéticas y pie de crías raciales, en moneda nacional y divisa.
- Administrar y controlar el desarrollo del genofondo en el país, según las políticas definidas por el Instituto de Investigaciones Porcinas.



- Comercializar de forma mayorista animales genéticos de desecho (mayores y menores), en banda y en pie, a los destinos planificados, en moneda nacional y divisa.
- Brindar servicios de maquinaria, taller, transporte, técnicos para la producción, reparación de las instalaciones del sistema de la agricultura y otras entidades fuera del sistema, así como efectuar la reparación y construcción de viviendas a los trabajadores del sistema, en moneda nacional.
- Prestar servicios de comedor, cafetería, recreación y alojamiento no turístico con gastronomía asociada a éste a los trabajadores del sistema porcino y de ganado menor, en moneda nacional.
- Producir y comercializar en forma minorista las producciones agropecuarias que resultan excedentes del autoconsumo a los trabajadores del sistema porcino en moneda nacional.

Misión: Preservar y mejorar el genofondo porcino del país y satisfacer las necesidades de pie de cría de alta calidad genética a todos los niveles productivos dentro y fuera del país.

Visión: Producción y comercialización de cochinatos y cochinatas de alta calidad genética, precebas y carne de cerdo, para todas las provincias centrales: desde Matanzas a Camagüey, inscriptos en el plan técnico-económico, con indicadores técnicos-productivos y económicos eficientes y eficaces, disminuyendo los daños al medio ambiente, en una empresa perfeccionada, con cuadros técnicos y trabajadores motivados y comprometidos con el pueblo y la revolución. **(Sarmiento, 2014)**

La entidad cuenta con un biodigestor tipo Cúpula Fija de capacidad de 42 m³, la cual es la encargada de tratar los residuales provenientes de las cochiqueras disminuyendo el impacto ambiental y aumentando el social. **(Anexo. A)**

2.1.2. Descripción de la CCS “Osvaldo Fuentes” de Cumanayagua.

La CCS “Osvaldo Fuentes” se encuentra situada en el poblado de Crespo a 8 km del municipio cienfueguero de Cumanayagua. Su fundamental vía de acceso es un camino que



se deriva de la Carretera de Cumanayagua hacia Cruces, limita con el municipio de Palmira, Cruces y con la provincia de Villa Clara. La entidad colinda con los asentamientos de Lomita, Crespo, parte de Quiñones y de Manaquita, posee una extensión de 675 hectáreas. La CCS cuenta en su haber con un biodigestor tipo Geomembrana o PVC proporcionado por Cuba Solar de capacidad 10 m³, con fin de producir Biogás para cocinar y para tratar los desechos provenientes de las cochiqueras.

2.1.3. Descripción de la Finca “El Tablón” de Cumanayagua.

La finca del sector privado “El Tablón” se encuentra enclavada en el municipio cienfueguero de Cumanayagua, localizada en el asentamiento Los Cocos a 35 km de la capital provincial. Colinda con los consejos populares de Barajagua y La Sidra.

La unidad cuenta con un contrato legal con la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, quien proporciona el abastecimiento de la comida de los animales, así como los pies de crías. A su vez cuenta con un biodigestor tipo Geomembrana de capacidad 8 m³ proporcionado por contrato contraído con Cuba Solar, es utilizado con fines domésticos en la cocina y para la disminución de la carga contaminante proveniente de las cochiqueras.

2.2. Metodología de diseño de los experimentos.

El diseño de los experimentos está concebido para realizarlo en los distintos biodigestores de las unidades caso de estudio y a los reactores construidos a escala de laboratorio al recolectar muestras tanto del afluente como el efluente para analizarlas mediante ensayos de laboratorio y aplicando la metodología de cálculo para brindarle al biodigestor una evaluación operacional e indicarle el índice de calidad y precio al Biol resultante. Posteriormente se realizará la prueba in situ en los suelos y las producciones agrícolas de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

Las tomas de muestras se realizarán por los estudiantes integrados al proyecto de investigación científica de Energía Renovable, auspiciado por la Universidad de Cienfuegos, mientras que los análisis de laboratorio se efectuarán en las instalaciones del Laboratorio de



Suelos y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cienfuegos (INRH). Con el apoyo de la Asociación Nacional de Agricultores Pequeños (ANAP) la selección de una parcela de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos para efectuar el ferti-riego para realizar las pruebas a los suelos y evaluar los rendimientos agrícolas.

Diseño de los experimentos:

1. Toma de muestra de producto (purín de cerdo) y de Biol de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, tipo Cúpula Fija.
2. Toma de muestra de producto (purín de cerdo) y de Biol de la Finca “El Tablón” del sector privado en Cumanayagua, tipo Geomembrana.
3. Toma de muestra de producto (purín de cerdo) y de Biol de la CCS “Osvaldo Fuentes” del sector privado en Cumanayagua, tipo Geomembrana.
4. Toma de muestra de producto (residuales) y de Biol de los digestores construidos a escala de laboratorio.
5. Realizar pruebas en suelos con el Biol proporcionado por la UEB Genético Porcino de Cienfuegos en producciones agrícolas evaluando sus rendimientos agrícolas.

Análisis de laboratorio:

- Análisis del residual liquido (Biol). Caracterización físico-química: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Fijos (STF), Sólidos Totales Volátiles (STV), Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (CE).
- Análisis de laboratorio de los productos que alimentan los digestores caso de estudio. Caracterización físico-química: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Fijos (STF), Sólidos Totales Volátiles (STV), Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica (CE).



Experimento No. 1: Residual líquido de la planta de Biogás, tipo Cúpula Fija de la UEB Genético Porcino.

- Tomar muestras del purín de cerdo.
- Toma de muestras del Biol.
- Realizar análisis al purín de cerdo. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.
- Realizar análisis al efluente (Biol) de los tratamientos. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.

Experimento No. 2: Residual líquido de planta del sector privado Finca “El Tablón”, tipo Geomembrana.

- Tomar muestras del purín de cerdo.
- Toma de muestras del Biol.
- Realizar análisis al purín de cerdo. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.
- Realizar análisis al efluente (Biol) de los tratamientos. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.

Experimento No. 3: Residual líquido de planta del sector privado CCS “Osvaldo Fuentes”, tipo Geomembrana.

- Tomar muestras del purín de cerdo.
- Toma de muestras del Biol.
- Realizar análisis al purín de cerdo. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.
- Realizar análisis al efluente (Biol) de los tratamientos. Determinando DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.

Experimento No. 4: Residual líquido de plantas de Biogás a escala de laboratorio.

- Realizar los experimentos con tiempo de retención inicial, 7 y 57 días.
- Realizar experimentos con residuos agrícolas e industriales.



- Realizar análisis al sustrato de los reactores. Determinar DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.
- Realizar análisis al residual (Biol) de los tratamientos. Determinar DQO, DBO, ST, STF, STV, pH y CE.

Experimento No. 5: Prueba in situ en producciones agrícolas de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

- Selección de parcela de suelos y de producciones agrícolas para el experimento in situ, del uso del ferti- riego del Biol.
- Evaluar las diferentes producciones agrícolas sin el uso del Biol (testigo) y con el uso de él pero de diferentes tipos clasificados.
- Evaluar rendimiento en las producciones agrícolas. Impacto económico.

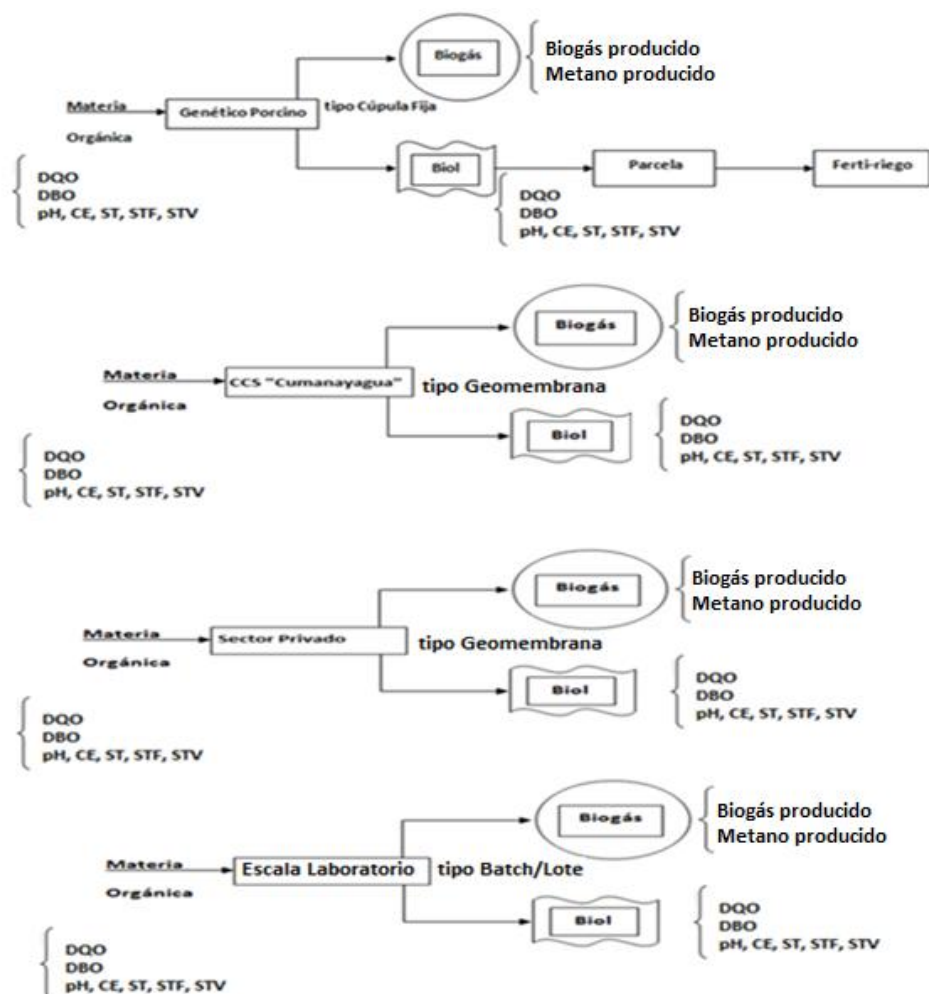


Figura 2.1 Diseño experimental.

2.2.1. Construcción de los biodigestores a escala de laboratorio.

Los biodigestores que se utilizaron para la investigación, pertenece al modelo Batch/Lote, estos son reactores discontinuos que permiten observar como se degrada el sustrato y brinda la posibilidad de medir o extraer los distintos productos de la digestión anaerobia. Se construyeron dos modelos de biodigestores, de material plástico y cristal, esencialmente los materiales utilizados fueron de fácil adquisición y económicamente razonable ya que la mayoría de éstos fueron reciclados.

Digestor Batch/Lote (Plástico).

Materiales utilizados.

- Para su fabricación se utilizaron pomos recuperados de Agua Mineral Ciego Montero de 5 000 mL, con su tapa correspondiente. La acción de las bacterias presentes en el inóculo, unido al sustrato introducido, produce la actividad fermentativa de las bacterias.
- Jeringuilla de insulina de ½ CC.
- Manguera de suero de 100 cm de largo y 5 mm de diámetro.
- Fibra de vidrio, resina de poliepóxido y catalizador de cobalto.
- Probeta graduada de 500 mL.

Fabricación: Primeramente se tomó una probeta graduada de 500 mL y se graduó el pomo plástico en escala de 1 L. Posteriormente se abrió un orificio en las tapas de los pomos a un diámetro donde se pudiera introducir la jeringuilla de manera holgada, para sellarlo con la mezcla de fibra de vidrio, resina de poliepóxido y catalizador de cobalto. Se dejó secar por un periodo de 24 h, para garantizar un sellado hermético y así evitar la pérdida de Biogás en el biodigestor. Se le cortó la punta de la jeringuilla y se le acopló la manguera de suero y esta a su vez fue conectada al manómetro diferencial.

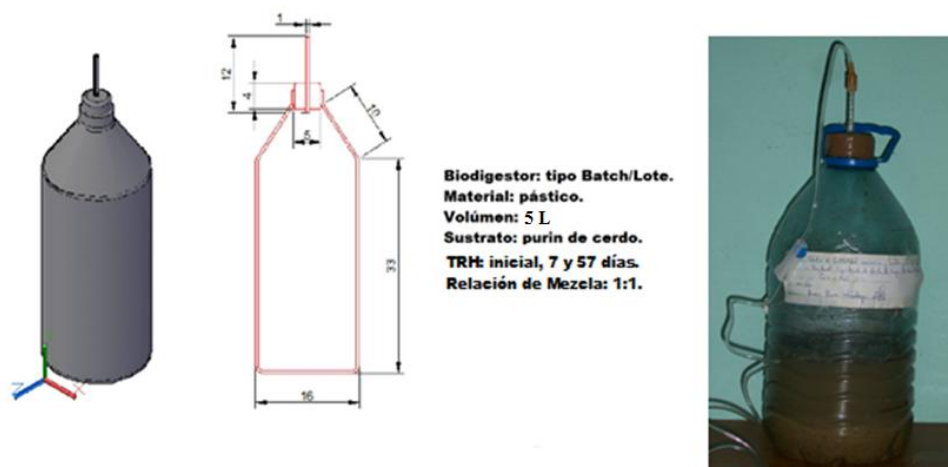


Figura 2.2 Biodigestor Batch/Lote (Plástico).



Digestor Batch/Lote (Cristal).

Materiales utilizados.

- Para su fabricación se utilizaron pomos de vidrio recuperados de 10 000 mL.
- Tapones de goma.
- Tubos de buretas de vidrio de diámetro 10 mm y largo 80 cm.
- Mangueras de goma de diámetro 10 mm y largo 15 cm.
- Tubos de vidrio en forma de U para electrólisis con tubuladuras lateral de diámetro 10 mm.
- Termómetros de escala 100 °C.
- Presillas de laboratorio Hoffmann: utilizadas para cerrar las mangueras y evitar la salida del gas formado en el biodigestor.
- Probeta graduada de 500 mL.

Fabricación: Primeramente se tomó una probeta graduada de 500 mL y se graduó el pomo de vidrio en escala de 1 L. Posteriormente se tomaron los tapones de goma y se horadaron. El tapón de goma superior del digestor se le realizó dos horadados para introducir el termómetro y el tubo en forma de U para electrólisis con tubuladuras lateral que permitiría la salida del Biogás, se puso ejerciendo tal fuerza que no permitiera la salida de los gases contenidos en el biodigestor. Al tubo en forma de U, se le acopló la manguera de goma la cual a su vez fue conectada al manómetro diferencial. El tapón de goma inferior se horadó con el fin de introducir un tubo de vidrio que permitiera la salida de los efluentes. Este biodigestor fue montado en una placa de calentamiento la cual brinda la posibilidad de calentar la mezcla y de agitarla magnéticamente si fuese necesario.



Figura 2.3 Biodigester Batch/Lote (Cristal).

2.2.2. Construcción de los Manómetros Diferenciales.

Materiales utilizados.

- Base de cartón.
- Tubos de buretas de vidrio de diámetro 10 mm y largo 80 cm.
- Mangueras de goma de diámetro 10 mm y largo 15 cm.
- Papel milimetrado.
- Hojas de papel, cinta adhesiva, alambres finos y pegamento.
- Soporte universal.

Fabricación: Este útil se construyó empleando buretas de vidrio, de diámetro 10 mm, largo 80 cm, los cuales se sujetaron con alambres finos, a una base de cartón de 25 cm de ancho por 100 cm de largo y 2,5 cm de espesor, previamente forrada con hojas de papel. La escala en mm.c.d.a fue pegada a ambos laterales de las columnas. El sistema se mantuvo fijado mediante un soporte universal. Para facilitar la lectura de la columna de agua se agregó dentro de las buretas una disolución de Agua y Sulfato de Cobre (II), tomando una tonalidad azul clara.

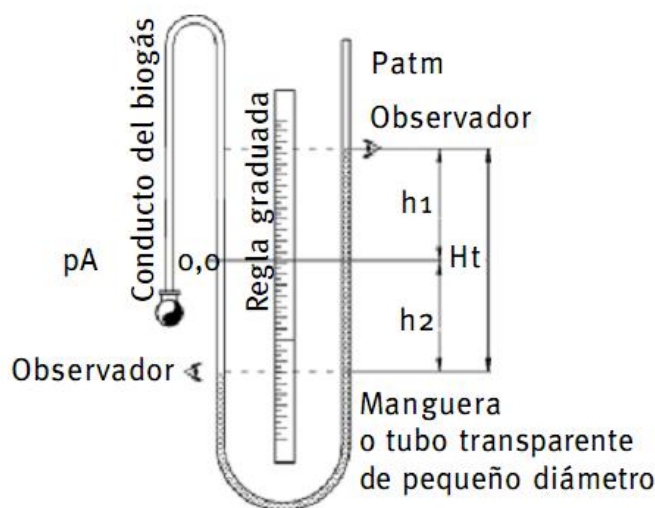


Figura 2.4 Manómetro Diferencial.

2.2.3. Recolección de muestras.

El proceso de recolección de muestra se realizó, atendiendo a las especificidades técnicas para la misma, respetando la limpieza de los envases de plástico con que se efectuó la misma. Se tomaron dos muestras de productos en las tres unidades previamente seleccionadas, tanto el Biol como la excreta fueron envasadas en pomos plásticos. Se tomó un volumen de 4,5 L de materia, de la misma manera con las muestras de sustratos y Biol de los reactores a escala de laboratorio con el fin de entregar a los Laboratorios de Suelos y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de la provincia. Las muestras fueron tomadas a la entrada de los reactores y a la salida, todas estas acciones se realizaron en horas de la mañana y siempre cuidando que las condiciones meteorológicas fueran idóneas para que los resultados fueran los más reales posibles.

2.2.4. Formulación y preparación del Sustrato.

La formulación del sustrato, se realizará a base de excreta animal proporcionada por las distintas unidades casos de estudio y los residuos industriales y agrícolas. Según **Guzmán, 2013c**) la relación óptima de digestores es de 1:1 a 1:2, esto quiere decir que por cada 1 kg de sustrato se ha de diluir con 1 o 2 kg de agua, además se respetó que la relación C/N

estuviera dentro de la óptima de 20-30/1 para garantizar la producción de Biogás. Se decidió utilizar estas relaciones para dejar las $\frac{3}{4}$ partes del biodigestor libre para la producción de Biogás, condicionados por la capacidad de los digestores contruidos.

Tabla 1.1 Relación Carbono/Nitrógeno de las materias primas utilizadas.

Material	% Materia Orgánica	% N	% P	% K	C/N
Estiércol Porcino	45	2.50	0.60	0.50	10/1
Estiércol Vacuno	65	1.50	0.62	0.90	25/1
Cachaza	79	2.10	2.32	1.32	22/1
Paja de arroz	80	0.60	0.30	3.50	29/1
Cáscara de café	90	1.80	0.30	3.50	29/1
Maíz	97	0.18	0.38	1.64	31/1
Suero lácteo	75	1.60	1.78	0.90	10/1

Guzman Chinaea, J. M, 2013

Preparación: En un beaker de 4 000 mL, se pesó en la Balanza Analítica 1 kg de sustrato y un 1 kg de agua, posteriormente se procedió a la mezcla con fin de homogenizar la misma. Se abasteció los biodigestores (2 L) y para las muestras de laboratorio (1,5 L). **(Anexo. B)**



Figura 2.5 Preparación del Sustrato.



2.3. Técnicas y métodos utilizados para analizar las muestra.

Los análisis de las muestras se realizaron por contrato entre el proyecto de investigación científica de Energía Renovable, auspiciada por la Universidad de Cienfuegos y los Laboratorios del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de Cienfuegos que se rige por los ensayos de Standar methods for examination of water and waster water (**American Public Health Asociation, 1995**), entidad acreditada por el Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba (ONARC). Los análisis operacionales de los biodigestores se realizaron en las instalaciones de la Universidad de Cienfuegos, se efectuaron mediciones de temperatura y presión para determinar la eficiencia de trabajo de los mismos. (**Anexo. C y D**)

2.3.1. Fundamento de los análisis de laboratorio.

Potencial de Hidrógeno (pH): El pH se define como el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógenos libres en agua, cuya escala varía entre 0 y 14, siendo 7 el punto neutro a 25 °C. El método se basa en la medida del potencial eléctrico que se crea en la membrana de vidrio del electrodo, que es función de la actividad de los iones hidrógenos a ambos lados de la pared de dicha membrana.

Los electrodos combinados están formados por dos electrodos, uno de referencia (a menudo un electrodo de calomelanos y otro de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio donde el último es influenciado por el pH. La disolución interna del electrodo de vidrio tiene una actividad constante de los iones de hidrógeno, mientras el pH de la solución exterior varía, por lo que se crea un potencial eléctrico en los electrodos.

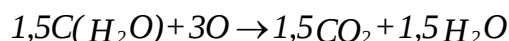
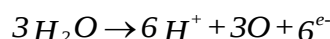
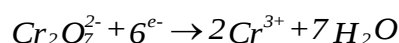
El pH se debe medir lo más rápido posible después del muestreo debido a que los procesos biológicos cambian el pH de la muestra. El método es aplicable a soluciones cuyo pH esté entre 3 y 10 U, de temperatura comprendida entre 10 y 35 °C.

Conductividad Eléctrica (CE): La capacidad que tiene el agua natural para transmitir la corriente eléctrica se expresa a través del término “conductividad eléctrica” de una disolución. Para medir la CE se utiliza el conductímetro que tiene una celda de medición que

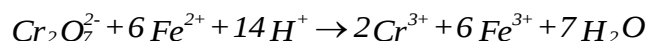


presenta dos placas de platino paralelas y con una distancia fija entre ellas. Cuando esta celda se sumerge en un líquido, se le aplica un voltaje a las placas lo que causa una corriente eléctrica que fluye a través del líquido entre las placas. El valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, mientras mayor sea esa concentración, mayor será la conductividad. El método descrito se aplica para disoluciones de CE comprendida entre 1,0 $\mu\text{S/cm}$ y 100 mS/cm , cuya temperatura sea de 5 a 40 $^{\circ}\text{C}$.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): La Demanda Química de Oxígeno es una medida de la cantidad de materia orgánica, la cual puede ser oxidada por un fuerte agente oxidante. La DQO es expresada como la cantidad de oxígeno que se corresponde con el consumo del agente oxidante. Muchos compuestos orgánicos son oxidados en una mezcla de ácido sulfúrico y dicromato de potasio.



El exceso de dicromato que queda entonces después de la digestión, es medido por valoración con sulfato de amonio ferroso:



La oxidación no es completa y su rendimiento varía con la composición química de la materia orgánica. El rendimiento es normalmente cerca del $\pm 90\%$ o un poco más bajo cuando son utilizados reactivos diluidos. Para oxidar algunos compuestos es utilizado un catalizador, en nuestro caso sulfato de plata. El método es aplicable a muestras con DQO mayor que 10 mg O_2 disuelto/L. Los valores de DQO entre 0 y 90 mg O_2 disuelto/L se consideran bajos y por encima de 100 mg O_2 disuelto/L se consideran altos



Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): La Demanda Bioquímica de Oxígeno es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas industriales y residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores.

La prueba de la DBO es un procedimiento experimental, tipo bioensayo, que mide el oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20 °C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento del agua, luz solar y la concentración de oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos deben tomar en cuenta los factores anteriores para lograr una adecuada interpretación.

Las muestras de agua residual o una dilución conveniente de las mismas, se incuban por cinco días a 20 °C en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método Winkler o una modificación del mismo, durante el período de incubación, produce una medida de la DBO. Es aplicable a aguas con una DBO superior a 2 mg O₂ disuelto/L en las que se haya determinado una DQO mayor de 10 mg/L.

Sólidos Totales (ST): Material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida. Los sólidos totales incluyen los “sólidos totales suspendidos”, o porción de sólidos totales retenida por un filtro, y los “sólidos disueltos totales” o porción que atraviesa el filtro. Se agita la muestra antes de abrir el frasco, posteriormente se transfiere 50 mL de muestra a la cápsula previamente tarada. Se evapora a sequedad en la estufa durante 24 h de 103 °C a 105 °C, se enfría en la desecadora durante 1 h aproximadamente. Finalmente se pesa la cápsula + residuos en la balanza analítica. Se recomienda realizar dos mediciones del peso (M₁ y M₂). Si el valor de M₁-M₂ es menor que 0,5 mg, se toma el valor de M₂ para el cálculo del residuo a 103 °C. Si

el valor de $M_1 - M_2$ es mayor que 0,5 mg, tiene que devolver la cápsula a la desecadora y volver a pesarla al cabo de otra hora para obtener M_3 (tercera medición de “cápsula +residuo”).

Sólidos Totales Fijos (STF) y Sólidos Totales Volátiles (STV): Representado por la diferencia de pesada resultante entre los sólidos totales secado a 105 °C y la porción de sólidos resultantes de la incineración (SV) a 550 °C.

2.3.2. Instrumentos y equipos.

Balanza analítica: La balanza analítica fue utilizada para el pesado de los sustratos, graduada a escala de 4 000 g, de modelo y marca DENVER INSTRUMENT.



Figura 2.6 Balanza analítica DENVER INSTRUMENT.

Termómetros: Los termómetros utilizados están graduados en escala de 0 °C a 100 °C y fueron situados para medir la temperatura ambiente (TA) y la temperatura de la atmósfera de gases (TG) contenida en el biodigestor, permitiendo establecer las diferencias entre las mismas.



Figura 2.7 Termómetro

Manómetro Diferencial: El Manómetro Diferencial está graduado en escala de 0 mm.c.d.a a 350 mm.c.d.a, lo que permite tener la certeza de la producción de Biogás dentro del biodigestor.



EQUIVALENCIAS DE PRESIONES	
1 mm. d.c.a	9.80665 Pa
1 mm. d.c.a	0.009807 kPa
1 mm. d.c.a	0.00142 PSI
1 mm. d.c.a	0.09807 milibar
1 mm. d.c.a	0.07356 mm de Hg (20 °C)

Figura 2.8 Manómetro Diferencial y Equivalencias de presión.

Placa de calentamiento con agitador magnético: La placa de calentamiento con agitador magnético de marca y modelo IKA RHbasic 1, permitió suministrar a la mezcla contenida en el biodigestor una temperatura constante y una agitación continua.



Figura 2.9 Placa de calentamiento con agitador magnético IKA RHbasic1.

Dispositivo Dual Temperature: El dispositivo Dual Temperature permitió medir las temperaturas en °C en distintos puntos en las paredes del biodigestor, tanto en la atmósfera de gases (TPG), como en la fase donde se encuentra la mezcla de Lodos y Biol (TPM).



Figura 2.10 Dispositivo Dual Temperature.

Horadores y Presillas: Los horadores se utilizaron para abrir los orificios en los tapones de goma y las presillas para garantizar la hermeticidad de las mangueras de goma.



Figura 2.11 Horador y Presillas.

Mortero y pistilo: El mortero y el pistilo se utilizaron para realizar el tratamiento previo a los distintos residuales tanto industriales como agrícolas.



Figura 2.12 Morteros y pistilos.



2.3.3. Metodología de preparación de la parcela agrícola.

La parcela es una pequeña superficie de terreno, donde se realizan distintas labores, específicamente el estudio de las producciones agrícolas. Según el caso de estudio UEB Genético Porcino de Cienfuegos, su preparación se realiza por tracción animal, después de este tratamiento se rotura la tierra, se da una primera grada, se cruza y se vuelve a dar grada, se procede a surcar el terreno y finalmente se siembra la planta. Este proceso se realiza respetando los períodos de tiempo que oscilan desde los 35 a 40 días entre todas las labores anteriormente citadas.

El Biol llega a la parcela proveniente de la tercera laguna de salida del biodigestor, impulsada por una bomba hasta el terreno.

Los productos agrícolas seleccionados son el grano de frijol, arroz, maíz, plátano, boniato, yuca y malanga, a los cuales se les hace incidir el Biol mediante la técnica de ferti-riego, intentando incorporarle a la planta los nutrientes necesarios para su desarrollo y fortalecimiento.

Mediante este proceso se pretende establecer una comparación entre las producciones sin el uso del Biol y utilizando el mismo para comprobar que el ferti-riego aumenta en gran medida la calidad y los rendimientos de las producciones agrícolas. (Rodríguez, 2015)

2.4. Metodología de cálculos para determinar la calidad del Biol a partir de la eficiencia de los digestores.

Datos generales:

- Cantidad de cerdos.
- Peso promedio.
- 1. $\text{Cantidad excreta/día} = \text{Cantidad Cerdos} \times \text{Índice (Promedio excreta húmeda diaria kg/cerdo)}$.
- 2. Para comprobar si es la cantidad de excreta diaria para alimentar el Reactor se realiza la siguiente ecuación:



$$V_r = (\text{Cantidad excreta/día} + \text{Cantidad agua/ día}) \times T.R / 1\,000$$

3. Cálculo Teórico:

Se toma para diluir la excreta en agua la proporción de 1:1.

T.R: Tiempo de retención = 40 días.

Consideramos que un litro de excreta = 1 kg.

Para 1 cerdo peso promedio 100 kg (vivo) 1 kg de DQO = 0,375 kg.

Para 1 cerdo peso promedio 80 kg (vivo) 1 kg de DQO = 0,3 kg.

En promedio se estima que la cantidad de heces y orina producida por un cerdo de 80 kg de peso vivo, es de 3,5 kg = 2 galones = 0,00335 m³.

En efecto por cada **80 kg** de peso vivo en granja se producen entre **4 y 5 kg de excretas al día**.

Tabla 2.2 Parámetros de estiércol de cerdo por cantidad de animales.

Parámetro	Por 100 kg de peso vivo	100 cerdos en ceba/día	Por año
Demanda Bioquímica de Oxígeno (kg)	0.25	12.5	4562
Demanda Química de Oxígeno (kg)	0.75	37.5	13687
Sólidos Suspendidos Totales (kg)	0.6	30	10950
Sólidos Totales (kg)	0.75	2.25	13687
Nitrógeno (kg)	0.045	1.5	547.5

Guzman Chinaea, J. M, 2015

4. Biogás producido (teórico) = Volumen del Reactor x Índice (rendimiento teórico del gas).

5. Rendimiento teórico del gas = Rendimiento CH_4 + CO_2 .

Tabla 2.3. Producción de Biogás por peso del animal.

Estiércol de animal			
Tipo de animal (peso corporal individual)	Producción de biogás (m^3/kg húmedo de estiércol)	Disponibilidad diaria de estiércol (kg)	Producción diaria (m^3)
Bovino (500 kg)	0,04	10,00	0,40
Porcino (50 kg)	0,06	2,25	0,14

Guzmán Chinaea, J.M, 2015

6. Biogás producido (real) = Cantidad excreta/día x Rendimiento diario

7. Metano producido (teórico) = Volumen del Reactor x índice (rendimiento teórico del metano).



8. Metano producido (real) = (Cantidad excreta/día / Ind. DQO) x DQO % digerido x Producción CH₄ x Rendimiento CH₄ / 1000.

Tabla 2.4 Producción de metano a diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Producción CH ₄ mL
25	381,2
28	386,0
30	388,2
35	395,3

Guzmán Chinaa, J.M, 2015

Al analizar el contenido de DQO del sustrato que estamos introduciendo en el digestor (que llamaremos influente) y la materia obtenida tras la digestión (efluente) podemos comprobar en qué medida se está eliminando la materia orgánica en nuestro digestor.

9. Cálculo del % de Sólidos en la Mezcla.

$$\% S_m = ST/STF$$

Los parámetros de Sólidos en la Mezcla óptimos se encuentran de (7-9 %), aunque es aceptable hasta 12 %.

9. Eficiencia de degradación del digestor.

El porcentaje de metano depende del material de fermentación, alcanzando los siguientes valores aproximadamente:

Estiércol de cerdo 67 % (Literatura) y 60 % (Promedio).

$$DQO_D = DQO_e - DQO_s$$

$$E = DQO_D/DQO_e$$

Siendo:

- DQO_D : Demanda Química de Oxígeno degradada.
- DQO_e : Demanda Química de Oxígeno a la entrada del biodigestor.
- DQO_s : Demanda Química de Oxígeno a la salida del digestor.
- E : Eficiencia de degradación del biodigestor.

Tabla 2.5 Eficiencias del proceso de producción de Biogás para diferentes biodigestores.

Residual.	Tipo de reactor.	Remoción de la carga orgánica (%)	Productividad (m^3 biogás/ m^3 reactor)
Porcino	UASB	85 – 90 (DQO)	5,00 – 7,00
	Cúpula fija	55 – 85 (STV)	0,75 – 1,30
	Campana flotante	55 – 60 (STV)	0,75 – 1,00
	Filtro anaerobio	80 – 90 (DQO)	1,00 – 3,50

Álvarez, J. M., Caneta, L., & Moyano, C. (2003).

10. Cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por microorganismos.

A partir de los análisis de laboratorios finales del efluente se toma el valor de DBO_5 . Al analizar el contenido de DBO_5 que se digiere, que debe ser lo más próximo a cero nos permite establecer la calidad microbiológica del efluente ya que tienen estrecha relación.

Actualmente en Cuba no existe una norma para el control del uso del Biol, no obstante se puede afirmar que existe diversos tipos de Biol y que se puede determinar su calidad según el valor de los análisis de laboratorio en función de: DQO y DBO. En relación a estos indicadores se propone la determinación de la calidad del Biol y su uso en algunos casos.

Tabla 2.6 Determinación de la calidad del Biol en Cuba.



Indicador	Excelente	Bueno	Aceptable	No Apto uso
DQO (%)	100-95	94-88	87-76	Menos 75
DBO (mg/L)	0-30	31-60	61-95	Mayor 96

Guzmán Chinae, J. M., 2015

Se debe tener un periodo de almacenamiento para el Biol, según su calidad, para su uso:
(Guzmán, 2015)

- Excelente (E): 5 días
- Bueno (B): 10 días
- Aceptable (A): 15 días.

Conclusiones Parciales del Capítulo II.

1. La recolección de muestras incide notablemente en la calidad de los análisis de laboratorio.
2. El estiércol de cerdo actúa como inóculo para la activación de la mezcla que alimenta los biodigestores.
3. Los parámetros óptimos para la producción de Biogás son los siguientes:
 - Temperatura: 30 -35 °C.
 - pH: 6,6-7,7 U.
 - Relación C/N: 20–30/1.
 - TRH: 20 a 40 días.
4. Los indicadores de DBO y DQO serán los datos para el cálculo de la eficiencia de los digestores.
5. Los resultados de DQO y DBO permitirá establecer un índice de calidad (Excelente, Bueno, Aceptable y No Apto) entre los diferentes tipos de Biol según los tipos de digestores caso de estudio.

Capítulo III: Análisis de los resultados.

3.1.Resultados de los análisis de biodigestores reales.

Los resultados de cálculos y laboratorio se dividirán en dos partes. Primero los resultados de los digestores reales de las distintas entidades caso de estudio. La comparación se efectuará entre los parámetros de calidad del sustrato, TRH y eficiencia de los digestores para poder establecer la calidad a partir de los indicadores DQO y DBO₅ de los diferentes tipos de efluentes (Biol).

3.1.1. Análisis de resultados del Reactor de 42 m³ de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

Resultados de Laboratorios.

Tabla 3.2 Identificación de muestras.

M	Identificación
601	Entrada Biogás – 1 ^{ra} Laguna
602	Entrada 3 ^{ra} Laguna
603	Salida 3 ^{ra} Laguna
604	Salida Biogás



Tabla 3.3 Resultados de los análisis de laboratorio de la UEB Genético Porcino.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25 °C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	STF mg/L	STV mg/L	SS ml/L
601	6.76-21.9	3 270	5 193	3 556	7 668	1 846	5 822	180
602	7.61-22.3	3 290	612	278	1 654	770	884	2.5
603	8.49-22.8	1 522	302	58	960	524	436	0
604	7.14-22.2	4 550	3 720	1 675	4 100	1 312	2 788	65.0

Tabla 3.4 Resultados de los cálculos del digestor de la UEB Genético Porcino.

Cantidad excreta/día	263,2 Kg/día
Sólidos en la Mezcla	4.15 %
Biogás producido (teórico)	21,33 m ³
Metano producido (teórico)	11,53 m ³
Biogás producido (real)	13,2 m ³
Metano producido (real)	2,96 m ³
Eficiencia de degradación del digestor	28 %
Eficiencia de degradación 3ra Laguna	94,18 %
Cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos Salida	1 675 mg/L
Cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos 3ra Laguna	58 mg/L

Evaluación: El biodigestor perteneciente a la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, tipo Cúpula Fija de 42 m³ de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas a la entrada del biodigestor hasta la salida a la 3^{ra} Laguna cuenta con valores de pH entre los parámetros óptimos, promedio de 7,5 U. La CE disminuye desde la entrada del digestor hasta la salida de la 3^{ra} Laguna lo que indica que disminuye la concentración de sólidos disueltos, no ocurre así en la salida de la Planta, donde se observa un aumento brusco indicando un aumento de la concentración de los sólidos disueltos.

Los parámetros de DQO y DBO disminuyen desde la entrada hasta la salida de la 3^{ra} Laguna lo que indica que la materia que ingresa se ha degradado aunque no en su totalidad. Es clave destacar que la materia alcanza estos niveles de degradación porque al salir de la Planta recibe tratamiento en las Lagunas de oxidación, lo que no pasa en la salida del digestor, donde se observa que la materia apenas se ha degradado indicando mal funcionamiento debido a la sobrecarga del biodigestor. El indicador de Sólidos en la Mezcla, muestra que está por debajo del rango óptimo lo que indica que la relación sólido-agua no es la correcta, porque se están lavando tanto sólidos como bacterias haciendo ineficiente la digestión anaerobia.

A partir de los cálculos realizados se puede llegar a la conclusión que el biodigestor de la UEB Genético Porcino opera de manera deficiente ya que el Biogás producido real con respecto al teórico es de 61,9 %, de igual modo el Metano producido real difiere del teórico en un 25,7 %. No obstante, gracias al tratamiento de lagunas de oxidación la eficiencia de degradación de la materia es muy buena, ya que funciona como un sistema integrado, quedando solo sin tratar un 5,8 % de la materia que entra al digestor, similar ocurre con la cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos quedando sin degradar 58 mg/L, proporcionándole al Biol que se utiliza en las producciones agrícolas de la entidad un rango de calidad BUENO.

Recomendaciones:

1. Alimentar el biodigestor con la relación sólido-agua óptimo, ya que es evidente que está sobrecargada y desfasada, se propone sólidos entre (7-9 %) y el resto de agua, para eliminar el lavado de bacterias.
2. Aumentar el TRH del digestor para garantizar que se completen las etapas de degradación de la Digestión Anaerobia.
3. Almacenar el Biol por un período de 10 días antes de su utilización para permitir que siga degradando la materia y que las partículas sólidas retenidas en el efluente sedimenten

3.1.2. Análisis de resultados del Reactor de 10 m³ de la CCS “Osvaldo Fuentes” de Cumanayagua.

Resultados de Laboratorios.

Tabla 3.5 Identificación de muestras.

M	Identificación
706	Purín de Cerdo
707	Salida final



Tabla 3.6 Resultados de los análisis de laboratorio de la CCS “Osvaldo Fuentes”.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25 °C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	STF mg/L	STV mg/L	SS ml/L
706	6.83-19.5	2 690	1 423.5	3 107	21 134	1 648	19 486	-
707	7.19-21.2	-	329	72	1 400	270	1 130	-

Tabla 3.7 Resultados de los cálculos de la CCS “Osvaldo Fuentes”.

Cantidad excreta/día	42,3 Kg/día
Sólidos en la Mezcla	12,82 %
Biogás producido (teórico)	2,5 m ³
Metano producido (teórico)	1,5 m ³
Biogás producido (real)	3,67 m ³
Metano producido (real)	1,5 m ³
Eficiencia de degradación del digestor	76,9 %
Cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos Salida	72 mg/L

Evaluación: El biodigestor perteneciente a la CCS “Osvaldo Fuentes” de Cumanayagua, tipo Geomembrana de 10 m³ de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas a la entrada del biodigestor hasta la salida del mismo, cuenta con valores de pH entre los parámetros óptimos, promedio de 7,01 U. La CE disminuye desde la entrada del digestor hasta la salida de la planta lo que indica que disminuye la concentración de sólidos disueltos.

Los parámetros de DQO y DBO disminuyen desde la entrada hasta la salida del digestor lo que indica que la materia que ingresa se ha degradado, aunque no en su totalidad indicando mal funcionamiento debido a la sobrecarga del digestor. Es clave destacar que este biodigestor tipo Geomembrana, pudiera trabajar aún mejor ya que se evidenció que los Sólidos en la Mezcla está por encima de los parámetros óptimos (12,82 %) desfasando la relación sólido-agua.

A partir de los cálculos realizados se puede llegar a la conclusión que el biodigestor de la CCS “Osvaldo Fuentes” opera de manera aceptable ya que el Biogás producido real con respecto al teórico aumenta en $1,17 \text{ m}^3$, de igual modo el Metano producido real con respecto al teórico es el ideal ya que produce el 100 % del diseñado. La eficiencia de degradación del digestor no es la deseada ya que deja sin remover un 23,1 % de la materia que entra a la Planta de igual manera ocurre con la cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos en el efluente de 72 mg/L , provocando que el Biol sea de calidad ACEPTABLE.

Recomendaciones:

1. Aumentar el TRH del digestor para garantizar que se completen las etapas de degradación de la Digestión Anaerobia.
2. Almacenar el Biol por un período de 15 días antes de su utilización para permitir que siga degradando la materia y que las partículas solidas retenidas en el efluente sedimenten.

3.1.3. Análisis de resultados del Reactor de 8 m^3 la Finca “El Tablón” de Cumanayagua.

Resultados de Laboratorios.

Tabla 3.8 Identificación de muestras.

M	Identificación
101	Purín de Cerdo
102	Salida final



Tabla 3.9 Resultados de los análisis de laboratorio de la Finca “El Tablón”.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25°C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	STF mg/L	STV mg/L	SS ml/L
101	6.47-21.9	-	1 974	2 396	20 512	1 280	17 163	800
102	6.87-20.2	-	329.6	87	1 250	250	1 127	20

Tabla 3.10 Resultados de los cálculos de la Finca “El Tablón”.

Cantidad excreta/día	42,3 Kg/día
Sólidos en la Mezcla	12,82 %
Biogás producido (teórico)	2,5 m ³
Metano producido (teórico)	1,5 m ³
Biogás producido (real)	3,67 m ³
Metano producido (real)	1,5 m ³
Eficiencia de degradación del digestor	76,9 %
Cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos Salida	72 mg/L

Evaluación: El biodigestor perteneciente a la Finca “El Tablón” de Cumanayagua, tipo Geomembrana de 8 m³ de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas a la entrada del biodigestor hasta la salida del mismo, cuenta con valores de pH entre los parámetros óptimos, promedio de 6,8 U. La CE disminuye desde la entrada del digestor hasta la salida de la Planta lo que indica que disminuye la concentración de sólidos disueltos.

Los parámetros de DQO y DBO disminuyen desde la entrada hasta la salida del digestor lo que indica que la materia que ingresa se ha degradado aunque no en su totalidad, indicando mal funcionamiento debido a la sobrecarga del reactor. Es clave destacar que este biodigestor, tipo Geomembrana, pudiera trabajar aún mejor ya que se evidenció que los Sólidos en la Mezcla está por encima de los parámetros óptimos (16,02 %) desfasando la relación sólido-agua.

A partir de los cálculos realizados se puede llegar a la conclusión que el biodigestor de la Finca “El Tablón” opera de manera aceptable ya que el Biogás producido real con respecto al teórico aumenta en 0,1 m³, de igual modo el Metano producido real difiere del teórico en 0,52 m³. La eficiencia de degradación del digestor no es la deseada ya que deja sin remover un 16,7 % de la materia que entra a la Planta de igual manera ocurre con cantidad de materia susceptible a ser consumida por microorganismos presente en el efluente de 87 mg/L, provocando que el Biol sea de calidad ACEPTABLE.

Recomendaciones:

4. Aumentar el TRH del digestor para garantizar que se completen las etapas de degradación de la Digestión Anaerobia.
5. Almacenar el Biol por un período de 15 días antes de su utilización para permitir que siga degradando la materia y que las partículas solidas retenidas en el efluente sedimenten.

3.1.4 Comparación de parámetros entre los biodigestores reales.

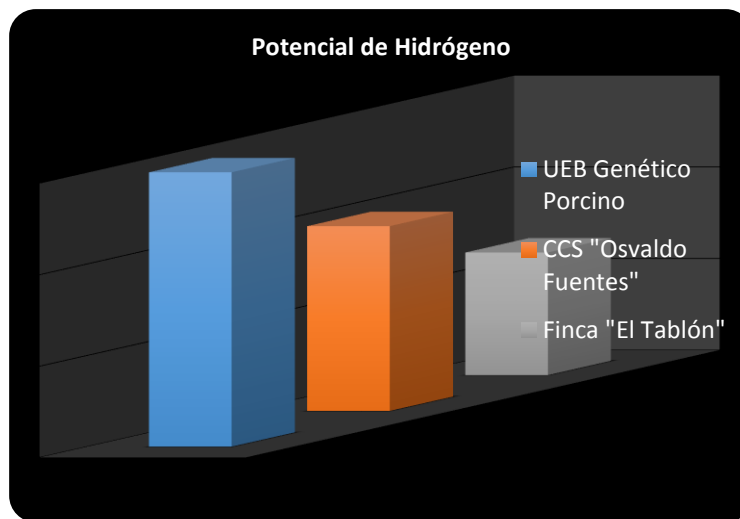


Figura 3.1 Potencial de Hidrógeno promedio de los biodigestores.

La figura 3.1 muestra como el pH promedio se encuentra entre los parámetros óptimos para la producción de Biogás oscilando entre los valores de 6,5 y 7,5 U, valores prácticamente neutros permitiendo que ocurra la Digestión Anaerobia dentro de los digestores.

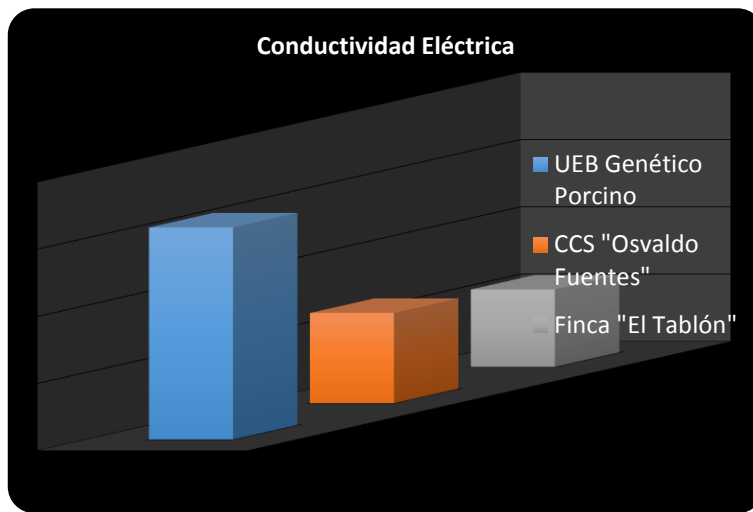


Figura 3.2 Conductividad Eléctrica promedio de los biodigestores.

La figura 3.2 muestra las diferencias existentes entre los biodigestores según el parámetro CE, los digestores de la CCS “Osvaldo Fuente” y la Finca “El Tablón” presentan similares valores de CE, indicando que presentan una menor concentración de los sólidos disueltos que el biodigestor de la UEB Genético Porcino que es superior en gran medida que los anteriores.

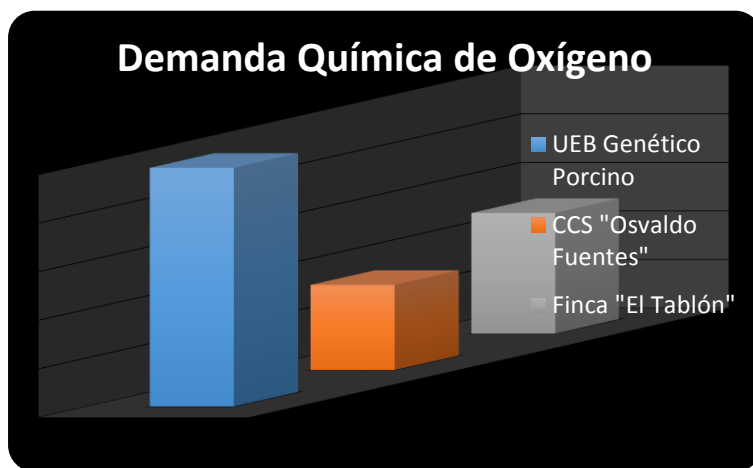


Figura 3.3 Demanda Química de Oxígeno promedio de los biodigestores.

La figura 3.3 muestra como se comporta la DQO de los reactores. El biodigestor de la UEB Genético Porcino posee el mayor índice por lo tanto es el que mejor degrada la materia, es

importante destacar que esta entidad sigue tratando los residuales una vez que salen del digestor, no ocurre de la misma manera con los biodigestores de la CCS “Osvaldo Fuentes” y la Finca “El Tablón” cuyos rangos están entre los 500 y 1200 mg/L, aunque pudieran ser mejorados si se implementa la optimización de la digestión anaerobia.

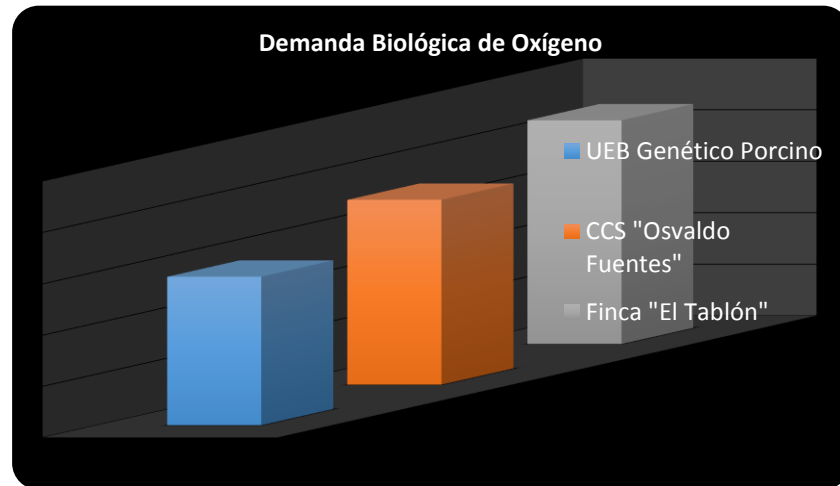


Figura 3.4 Demanda Biológica de Oxígeno de los biodigestores.

La figura 3.4 muestra los índices de DBO entre los digestores a escala real, los mejores en este sentido son los biodigestores de la UEB Genético Porcino y la CCS “Osvaldo Fuentes” cuyos parámetros son inferiores al de la Finca “El Tablón” que posee un valor relativamente alto lo que indica la deficiente operación del mismo aunque dentro de los índices para la utilización del Biol.

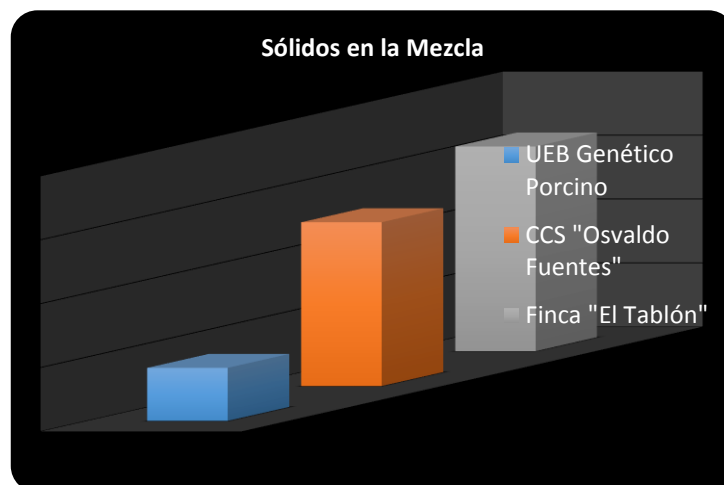


Figura 3.5 Comportamiento de sólidos de los biodigestores.

La figura 3.5 muestra el comportamiento de los Sólidos en las Mezclas de los reactores, el comportamiento de los biodigestores es deficiente en este indicador ya que todos están fuera de los parámetros óptimos ya sea por menor relación como es el caso de la UEB Genético Porcino que prácticamente lava las bacterias por el exceso de agua como la CCS “Osvaldo Fuentes” y la Finca “El Tablón” sobrecargan el digestor de materia orgánica; todo esto atenta que la degradación del sustrato no sea el deseado, atentando directamente con la calidad del Biol. (Anexo. E)

Tabla 3.11 Calidad del Biol de los casos de estudio reales.

CALIDAD DEL BIOL DE BIODIGESTORES REALES	
UEB Genético Porcino de Cienfuegos	BUENO
CCS “Osvaldo Fuentes”	ACEPTABLE
Finca “El Tablón”	ACEPTABLE

3.2 Resultados de los análisis de los experimentos a escala laboratorio.

Los resultados de cálculos y laboratorio se dividirán en dos etapas. Primero los resultados de los digestores a escala de laboratorio de las distintas relaciones de mezclas. La comparación se efectuará entre los parámetros de calidad del sustrato, TRH y eficiencia de

los digestores para poder establecer la calidad a partir de los indicadores DQO y DBO₅ de los diferentes tipos de efluentes (Biol). Los análisis iniciales y de 7 días se despreciaron porque los indicadores químicos fueron extremadamente altos, imposibilitando la utilización de la metodología de cálculo; no obstante la calidad del Biol se determinó atendiendo a criterios sobre el tiempo de retención máximo de 57 días.

3.2.1 Reactor a escala de laboratorio con sustrato de mezcla de residuales agrícolas.

Tabla 3.12 Identificación de muestras.

M	Identificación
1422	Final (57 días)



Tabla 3.13 Resultados de los Análisis de Laboratorio de Mezcla de residuos agrícolas.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25°C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	SS ml/L
1422	4.67 22.8	3740	4307	3975	38662	650.0

Evaluación: El biodigestor discontinuo, tipo Batch/Lote alimentado con mezcla de residuales agrícolas proporción 1:2 de 10 L de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas atendiendo a los 3 TRH, presenta valores de pH fuera de los parámetros óptimos para la producción de Biogás, promedio 4,67 U (ácido), provocando la inhibición de la etapa metanogénica de la digestión anaerobia. La CE presenta valores altos en los 3 TRH, provocando que la concentración de sólidos disueltos sea alta.

Los índices de DQO y DBO son extremadamente altos indicando que la degradación de la materia fue ineficiente provocado por el mal funcionamiento del reactor, por lo que se puede concluir que el biodigestor trabaja de manera deficiente, a pesar de eso produjo Biogás por las variaciones en el Manómetro Diferencial, se puede inferir que solo CO₂ y H₂, con

proporciones extremadamente pequeñas de CH₄ al inhibirse el proceso de Metanogénesis. A partir de los análisis de laboratorio se concluye que Biol posee una calidad NO APTO.

Recomendaciones:

1. Recalcular la formulación de los sustratos alimentados, ya que es evidente que la relación de residuos agrícolas + agua, se encuentra desfasada evidenciado por los altos índices de DQO y DBO.

3.2.2 Reactor a escala de laboratorio con sustrato de residuo de café de la Torrefactora de Cienfuegos.

Tabla 3.14 Identificación de muestras.

M	Identificación
1420	Final (57 días)



Tabla 3. 15 Resultados de los análisis de laboratorio de mezclas residuo de café.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25 °C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	SS ml/L
1420	4.67 22.4	8450	8176	6960	112754	350.0

Evaluación: El biodigestor discontinuo, tipo Batch/Lote alimentado con mezcla de residuales de café, proporción 1:1 de 10 L de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas atendiendo a los 3 TRH, presenta valores de pH fuera de los parámetros óptimos para la producción de Biogás, promedio 4,67 U (ácido), provocando la inhibición de la etapa metanogénica de la digestión anaerobia. La CE presenta valores altos en los 3 TRH, provocando que la concentración de sólidos disueltos sea alta.

Los índices de DQO y DBO son extremadamente altos indicando que la degradación de la materia fue ineficiente provocado por el mal funcionamiento del reactor, por lo que se puede concluir que el biodigestor trabaja de manera deficiente, a pesar de eso produjo Biogás por las variaciones en el Manómetro Diferencial, se puede inferir que solo CO_2 y H_2 , con pequeñas proporciones de CH_4 al inhibirse el proceso de Metanogénesis. A partir de los análisis de laboratorio se concluye que Biol posee una calidad NO APTO.

Recomendaciones:

1. Recalcular la formulación de los sustratos alimentados, ya que es evidente que la relación de residuos de café + agua, se encuentra desfasada evidenciado por los altos índices de DQO y DBO.

3.2.3 Reactor a escala de laboratorio con sustrato de residuo de agua de maceración de la Fábrica de Glucosa de Cienfuegos.

Tabla 3.16 Identificación de muestras.

M	Identificación
1421	Final (57 días)



Tabla 3.17 Resultados de los análisis de laboratorio de mezclas de agua de maceración de Glucosa.

M	pH (u), T °C U=±0,5	CE _{25 °C} μS/cm U=±0,3 %	DQO mg/L U=±30 %	DBO ₅ ²⁰ mg/L	ST mg/L	SS ml/L
1421	4.29 22.8	-	8979	1050	27290	9.0

Evaluación: El biodigestor discontinuo, tipo Batch/Lote alimentado con mezcla de residuo de agua de maceración proporción 1:1 de 10 L de volumen a partir de los análisis de laboratorio según muestras recolectadas atendiendo a los 3 TRH, presenta valores de pH



fuera de los parámetros óptimos para la producción de Biogás, promedio 4,29 U (ácido), provocando la inhibición de la etapa metanogénica de la digestión anaerobia. La CE presenta valores altos en los 3 TRH, indicando que la concentración de sólidos disueltos fue alta en todo momento.

Los índices de DQO y DBO son extremadamente altos indicando que la degradación de la materia fue ineficiente provocado por el mal funcionamiento del reactor, por lo que se puede concluir que el biodigestor trabaja de manera deficiente, a pesar de eso produjo Biogás por las variaciones en el Manómetro Diferencial, se puede inferir que solo CO_2 y H_2 , con apariciones de proporciones pequeñas de CH_4 al inhibirse el proceso de Metanogénesis. A partir de los análisis de laboratorio se concluye que Biol posee una calidad NO APTO.

Recomendaciones:

1. Recalcular la formulación de los sustratos alimentados, ya que es evidente que la relación de residuo de agua de maceración + agua, se encuentra desfasada evidenciado por los altos índices de DQO y DBO.

3.2.4 Comparación de parámetros entre los biodigestores a escala de laboratorio.

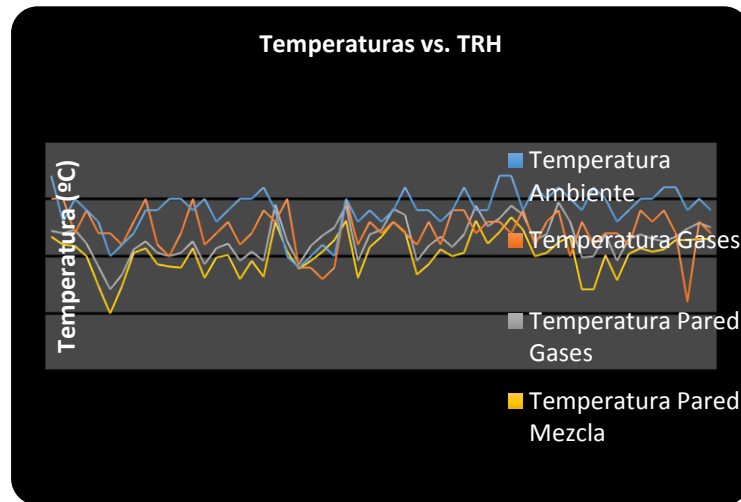


Figura 3.6 Comportamiento de las Temperaturas promedio de los biodigestores a escala de laboratorio.

La figura 3.6 muestra como los parámetros de temperaturas de los biodigestores permanecen a lo largo del TRH de manera estable entre (23-28 °C), sin alteraciones notorias lo que propició la degradación y por ende la producción de Biogás.

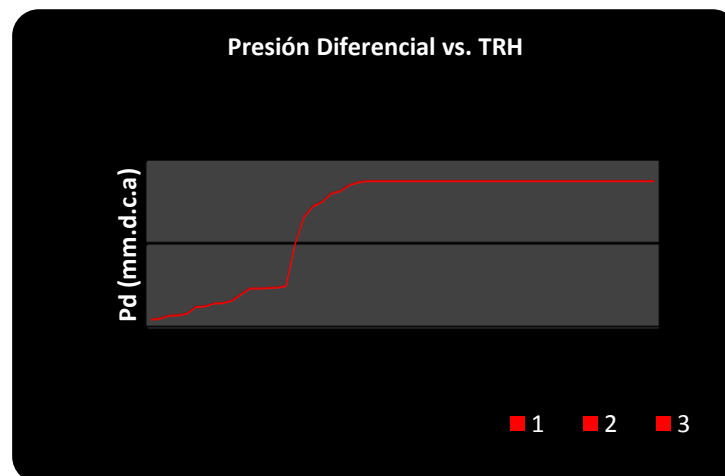


Figura 3.7 Comportamiento de la presión promedio en el Manómetro Diferencial.

En la figura 3.7 muestra como la presión promedio leída en el Manómetro Diferencial aumenta a medida que avanza el tiempo de retención hasta el día 25 donde se alcanza la presión diferencial máxima medible lo que confirma la producción de Biogás a escala de



laboratorio con trazas de CH₄ debido a la inhibición de la etapa metanogénica por estar el pH ácido.

Tabla 3.18 Calidad del Biol de los biodigestores a escala de laboratorio.

CALIDAD DEL BIOL DE BIODIGESTORES A ESCALA DE LABORATORIO	
Residuos Agrícolas	NO APTO USO
Agua de Maceración de Glucosa	NO APTO USO
Residuo de Café	NO APTO USO

3.3 Resultados del experimento in situ en producciones agrícolas.

Resultados Cualitativos.

- Se eliminan los costes por concepto de fertilizantes químicos.
- Aumento de las producciones agrícolas.
- Mejora de la textura del suelo.
- Respuesta biológica del cultivo (color verde intenso de la planta).
- Disminución de ataques de plagas.

Resultados Cuantitativos.

Se recupera 20 hectáreas de tierra no productivas al emplear el Biol como biofertilizante. Estas producciones se destinan al consumo animal y humano, tanto en el comedor como para la venta a los trabajadores.

Tabla 3.19 Resultados del experimento in situ.

RENDIMIENTO DE LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS (quintales x cordel)		
Productos	Sin Ferti-riego	Con Ferti- riego
Maíz	7	11
Plátano	1	3
Arroz	2	5
Boniato	5	8
Yuca	5	8
Malanga	2	3
Frijoles	4	7

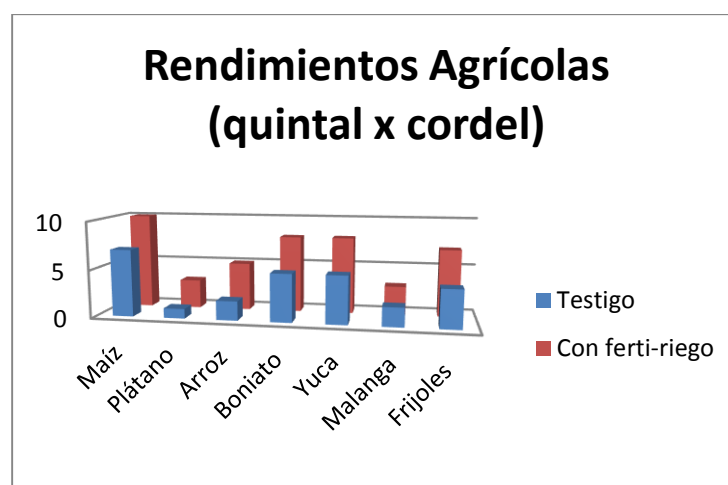


Figura 3.8 Rendimientos Agrícolas.

En la figura 3.8 se aprecia como con la utilización del Biol como biofertilizante, mediante la técnica del ferti-riego es posible obtener mayores rendimientos en las producciones agrícolas. Se concluye que los productos que se le aplicó la técnica superaron a la muestra en rangos de 3 y 4 quintales x cordel, corroborando en gran medida la importancia del efluente. **(Anexo. F)**

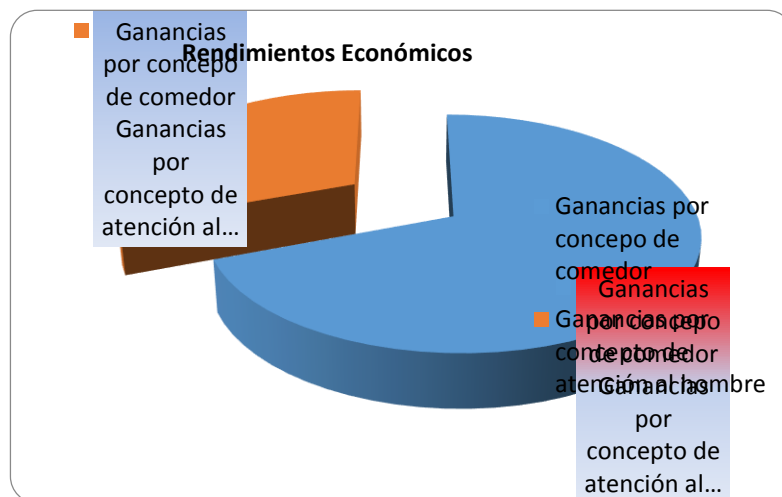


Figura 3.9 Rendimientos económicos del experimento in situ.

La figura 3.9 muestra como por concepto de poner a producir la tierra improductiva se obtuvieron rendimientos superiores de un 20 % en las producciones agrícolas, la administración obtiene ganancias de 19 440,00 CUP por concepto de comedor representando un 30,7 % de las ganancias totales y 8 590,00 CUP por atención al hombre representando un 69,3 % de las ganancias totales. El 100 % de las ganancias totales representan al año 28 030,00 CUP de ganancia por el uso del biofertilizante.

3.4 Evaluación económica de la investigación.

1. Análisis económico por uso del Biol.

En dependencia de la calidad del Biol será fijado su precio para comercializarlo. Según (Guzmán, 2015), se proponen los siguientes precios:

Tabla 3.20 Precios según calidad del Biol.

CALIDAD	PRECIO (CUP/1 L)	PRECIO (CUP/1 ton)
Excelente	0,80	800,00
Bueno	0,50	500,00
Aceptable	0,20	200,00

Para el análisis del caso de estudio UEB Genético Porcino de Cienfuegos, se parte asumiendo que $1 \text{ ton} = 1 \text{ m}^3$ por tanto:

Para los Efluentes de la Planta de Biogás.

- Lodo de salida: $263,2 \text{ kg/día} \times 365 \text{ día/año} = 96,1 \text{ m}^3/\text{año}$.
- Biol de salida: $789,6 \text{ kg/d} \times 365 \text{ día/año} = 288,2 \text{ m}^3/\text{año}$.

Por tanto:

$$288,2 \text{ m}^3/\text{año} \times 500,00 \text{ CUP/m}^3 = 144\,100,00 \text{ CUP/año}.$$

Este monto quiere decir que teóricamente la empresa por conceptos de comercializar el Biol deja de ganar 144 100,00 CUP/año. No obstante debemos decir que con el uso del Biol se recuperó 20 hectáreas de suelos y se puso a producir para la alimentación de los trabajadores, por concepto de comedor 19 440,00 CUP/año y por concepto de atención al hombre 8 590,00 CUP/año, lo que constituye una ganancia general para la empresa por producciones agrícolas a partir de la utilización del Biol como biofertilizante de 28 030,00 CUP/año.

El precio del Biol se determinó teniendo en cuenta su calidad y por la demanda y oferta del nuevo producto.

2. Análisis social.

El impacto de la utilización del Biol en la UEB Genético Porcino trajo como consecuencia la mejora de la alimentación en el comedor de los trabajadores de la entidad, brindando productos variados y frescos, libres de fertilizantes químicos y con buena calidad.

Se estimula todos los meses a los trabajadores de la entidad con una java de productos agrícolas a precios módicos, lo que incide positivamente con la motivación laboral.

3. Impacto ambiental.

La UEB Genético Porcino de Cienfuegos genera una alta carga contaminante por concepto de excreta de cerdo y emisión de CO₂ a la atmósfera.

$$263,2 \text{ kg excreta/día} \times 365 \text{ días/año} = 96\,068 \text{ kg/año}$$

$$96\,068 \text{ kg/año} \times 2,35 \text{ (índice de excreta de cerdo)} = 96,1 \text{ m}^3 \text{ (excreta)/año}$$

Esta excreta tratada por el biodigestor equivale a 60 % de CH₄ y 40 % de CO₂.

$$1 \text{ ton de CH}_4 = 23 \text{ ton de CO}_2.$$

$$96,1 \text{ ton (excreta)/año} \times 60 \% \text{ CH}_4 = 57,6 \text{ ton CH}_4/\text{año}$$

$$57,6 \text{ ton CH}_4/\text{año} \times 23 \text{ ton CO}_2 = 1\,324 \text{ ton CO}_2/\text{año}$$

$$96,1 \text{ ton (excreta)/año} \times 40 \% \text{ CO}_2 = 38,4 \text{ ton CO}_2/\text{año}$$

Por tanto:

$$\text{CO}_2 = (1\,324 + 38,4) \text{ ton CO}_2/\text{año}$$

$$\text{CO}_2 = 1\,362,4 \text{ ton CO}_2/\text{año}$$

Este análisis indica que se deja de emitir a la atmósfera 1 362,4 ton CO₂/año al tratar las excretas de cerdo de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, mediante Digestión Anaerobia en el biodigestor tipo Cúpula Fija de 42 m³ de volumen, disminuyendo la carga contaminante de este gas causante del efecto invernadero, siendo menos agresivo con el Medio Ambiente.



Conclusiones Parciales del Capítulo III.

1. El biodigestor de la UEB Genético Porcino tipo Cúpula Fija no está trabajando de manera aceptable aunque pudiera mejorar si se le realiza una reparación general incluyendo la limpieza del reactor y aplicando la optimización de la digestión anaerobia. La entidad cuenta con un Biol de calidad BUENO, según los índices de laboratorio y los cálculos realizados. Este Biol es de la salida de la tercera laguna del sistema de tratamiento.
2. El biodigestor de la CCS “Osvaldo Fuentes” opera de manera aceptable, pero pudiera trabajar mejor si se optimizan los indicadores de la digestión anaerobia. La entidad cuenta con un Biol de calidad ACEPTABLE, según los índices de laboratorio y los resultados de cálculos.
3. El biodigestor de la Finca “El Tablón” trabaja de manera aceptable, pero pudiera operar mejor si se utilizara la optimización de la digestión anaerobia. La entidad cuenta con un Biol de calidad ACEPTABLE, según los índices de laboratorio y los resultados de cálculo.
4. Los biodigestores construidos a escala de laboratorio cuyos sustratos de relaciones de mezcla de café, agua de maceración y agrícolas respectivamente produjeron Biogás aunque pequeñas proporciones de CH_4 al inhibirse la etapa metanogénica. Los digestores cuentan con Bioles de calidad NO APTO.
5. Se comprobó la efectividad del Biol como biofertilizante aumentando las producciones y rendimientos agrícolas.



Conclusiones Generales.

1. Los usuarios del Biogás deben utilizar el Biol para hacer rentable sus plantas.
2. La calidad del Biol se determina a partir de la eficiencia operacional del biodigestor, según el modelo, la calidad del sustrato y el tiempo de retención hidráulico.
3. Los indicadores de DBO y DQO, permiten establecer la calidad y el precio del Biol para su uso y no uso en las producciones agrícolas.
4. La utilización del Biol comprendido entre las calidades; Excelente, Bueno y Aceptable, pueden ser utilizados en los suelos y en la técnica de ferti-riego elevando los rendimientos agrícolas entre un 20 y 25 %, mientras que el Biol de calidad No Apto tiene un impacto negativo en la agricultura y la salud humana.
5. Por concepto de utilización del Biol en la agricultura, la UEB Genético Porcino de Cienfuegos recuperó 20 hectáreas de tierra improductiva y obtuvo ganancias de 28 030,00 CUP/año.
6. Por concepto de venta del Biol la UEB Genético Porcino de Cienfuegos deja de ingresar 144 100,00 CUP/año.
7. El impacto social de la utilización del Biol se refleja en los trabajadores de la UEB Genético Porcino de Cienfuegos, que son estimulados con mejora en la alimentación en el comedor de la entidad y la adquisición de productos frescos y de calidad a precios módicos.
8. A partir de la utilización de la tecnología de biodigestores la UEB Genético Porcino de Cienfuegos trata 96,1 ton/año de excretas y deja de emitir a la atmósfera 1 362,4 ton CO₂/año.



Recomendaciones Generales.

1. Capacitar los operadores de las plantas de Biogás para optimizar la Digestión Anaerobia y elevar la calidad del Biol.
2. Respetar los tiempos de almacenamiento según los índices de calidad del Biol para su implementación en la agricultura.
3. Recomendamos que este trabajo sea de aporte científico – técnico a las entidades usuarias del Biogás, en especial a la Empresa de Suelos en la provincia de Cienfuegos ya que es rectora de esta actividad y pueda implementar una norma para el uso del Biol y su control.
4. Continuar este estudio del Biol realizando una caracterización físico-química del mismo a las condiciones de Cuba.
5. Continuar la investigación para llegar a una norma del Biol en Cuba, en coordinación con el Instituto de Suelos nacional.
6. La UEB Genético Porcino de Cienfuegos incluya en su objeto social la comercialización del Biol.



Referencias bibliográficas.

- Ahring, B.(1995). *Methanogenesis in thermophilic. Antonie van Leuwnhoek.*
- Ahring, B. ., & Westerman, P. (1987).*Thermophilic anaerobic degradation of butirate by a butirate-utilizing bacterium in coculture and triculture with methanogenic bacterium. Applied and Embiromental Microbiology.*
- Álvarez, J. M., Caneta, L., & Moyano, C. (2003).*Biomass y Biogás. NACIONAL DEL NORDESTE, Ecuador.*
- American Public Health Asociation. (1995). *Standar methods for examination of water and waster water. (19 th.). Washington DC, USA.*
- Angelidaki, I., & Ahring, B. (1992). *Effect of free the clay mineral bentonite on ammonia inhibition of anaerobic reactors degrading animal waste. Biodegradation.*
- Aparcana Robles, S., & Janses, A. (2008). *Estudio sobre el valor fertilizante de los producos del proceso de “Fermentación Anaerobia” para la producción de Biogás.Lima, Perú.*
- Bagley, D. ., & Brodkorb, T. (1999). *Modeling microbial kcinetics in an anaerobic secuencing batch reactor-model development and experimentalvalidation. Water Environment Research.*
- Baier, U., & Schmidheiny, P. (1997).*Enhaced anaerobic degradation of mecvanicalli desintegratedbsludge. Water Science and Tehnology.*
- Banks, C. ., & Humphereys, P. (1998). *The anaerobic Treatment of a Lignocellulosic substrate offering little natural pH buffering capacity. Water Science and*



- Technology.*
- Bardiya, N., Somayaji, D., & Khanna, S. (1996). *Biomethanation of banana peel and pineapple waste. Bioresource Technology.*
- Barredo, M. ., & Evison, L. (1991). *Effect of propionate toxicity on methanogen-enriched sludge, Methanobrevibacter smithii at pH values. Applied and environmental microbiology.*
- Biomasa. (2009). Retrieved from <http://www.energias-renovables.com/articulos-Biomasa-Biomasa/tag/biogas/>
- Campos Pozuelo, A. E. (2001). *Optimización de la Digestión Anaerobia de Purines de Cerdo Mediante Codigestión con Residuos Orgánicos de la Industria Agroalimentaria.* Universitat de Lleida, Lleida.
- Casas Sabata, S. J. M. Torras, S. A., Garriga Elies, S. E., & Sra. Meritxell Martell, S. M. (2005). *Gestión de los residuos sólidos urbanos. Los residuos municipales y su gestión.* Barcelona, España. Retrieved from www.metropolis.org
- Crespo, M., & Ferrer Marquez, A. (2006). *La generación y minimización de residuos en el ámbito de las PYME en España.* Madrid, España.
- Daniel, B. (2009). *Mini biogasplants household.* Alemania.
- El Biol, un abono orgánico natural para mejorar la producción agrícola. (n.d.). Retrieved from: <http://www.monografias.com.htm>
- González, B. (2007). *Estudio para el diseño de la implementación de un sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de desechos biodegradable.*



- Guayaquil, Ecuador.
- Guardado Chacón, J. ., & Cortada Ferrera, J. . (2010). Sistema de tratamiento de Biobás.
Revista Energía y tú.
- Guzmán China, J. M. (2013a). *Evaluación económica de la energía renovable*. Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013b). *Optimización de la Digestión Anaerobia*. Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2013c). *Valoración de la eficiencia de plantas de Biogás a pequeña escala*. Académica Española.
- Guzmán China, J. M. (2015). *El Biol y su uso*. Cienfuegos, Cuba: Académica Española.
- Hilbert, J. (n.d.). *Manual para la producción de Biogás*.
- Ing. Rodríguez, Y. (2015). Preparación de una parcela agrícola.
- Kelety, A. (1990). *Análisis y evaluación de inversiones*. Madrid, España: EADA Gestión.
- León, E. (2012). *Procedimiento para el manejo de residuos líquidos industriales*.
Aplicación en Gydema, Cienfuegos.
- Leon, G., & Santana, Y. (2003). *Construcción y utilización de biodigestores en comunidades rurales en Nicaragua*.
- López, M. (2005). *Generación de energía con biogás de residuos agrícolas en plantas agroindustriales*. Perú.
- Medina Laura, C. (2002). *Biol mejorado*. Cusco, Perú.
- Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2014). Retrieved from:



- http://www..ecured.cu/index.php/Ministerio_de_Ciencia,_Tecnolog%C3%ADay_Medio_Ambiente
- Moreno Figueredo, C. (2013). Cuba hacia el 100 % con energía renovable. *Revista Energía y tú*.
- Padrón, & Wilfredo, R. (2009). *Biodigestores*.
- Pérez Gómez, J. (2010). *Gestión de residuos industriales. Guía para la intervención de los trabajadores*.
- Pineda, L. . (2004). Impacto Ambiental. Retrieved from:
<http://www.movografias.com/politica.shtml>
- Pozuelo, A. . (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánico de la industria agroalimentaria*.
- Santana Acea, L. (2014). *Principales deficiencias detectadas en la explotación de la planta de Biogás. Su factibilidad económica-ambiental en la empresa Genético Porcino de Cienfuegos*. Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Sarmiento García, Y. (2014). *Optimización de la digestión anaerobia de la planta de Biogás de la empresas Genético Porcino de Cienfuegos*. Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Savón, R. . (1999). *Ventaja del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de Biogás*. Cuba.
- Sosa Cáceres, R. (2008). *Tecnología de Biogás apropiadas*. *Revista Energía y tú*.

Anexos.

Anexo. A: Biodigestor tipo Cúpula Fija del caso de estudio UEB Genético Porcino de Cienfuegos.



Anexo. B: Relación de mezcla de los biodigestores Batch/Lote construidos a escala de laboratorio.

	Cachaza	A	B	MM	
X (g)	1 700	160	1 700	140	
C	0,79	0,8	0,9	0,85	3 120
N	0,021	0,006	0,005	0,42	103,96
C/N	30,01154				

	Cachaza	A	B	MM	P	
X (g)	1 700	160	1 700	140	1 700	
C	0,79	0,8	0,9	0,85	0,45	3 885
N	0,021	0,006	0,005	0,42	0,025	146,46
C/N	26, 52601					



Anexo. C: Tabla promedio de temperaturas controladas de los digestores a escala de laboratorio.

TRH	P d	TA	TG	TPG	TPM
1	20	32	30	27,2	28
2	22	28	30	27	24,9
3	29	30	27	27,3	25
4	30	29	29	26,1	26,9
5	34	28	27	24,1	24,6
6	50	25	27	22,1	26,5
7	51	26	26	23,4	26,9
8	58	27	28	25,6	26,5
9	59	29	30	26,3	26,3
10	65	29	26	5,3	26,7
11	80	30	25	25	27,4
12	94	30	27	25,3	27,9
13	94	29	30	26,3	27,5
14	95	30	26	24,3	27,2
15	96	28	27	25,7	27
16	100	29	28	26,1	27,3
17	200	30	26	24,6	26,1
18	265	30	27	25,4	24,1
19	290	31	29	24,6	22,1
20	300	29	28	29,5	23,4
21	320	25	30	26,3	25,6
22	326	24	24	24,3	26,3
23	340	25	24	25,9	5,3
24	347	26	23	26,8	25
25	350	25	24	27,5	25,3
26	350	30	30	29,4	26,3
27	350	28	26	24,6	27,5
28	350	29	28	26,9	29,4
29	350	28	27	27,3	24,6

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico (días).

Pd: Presión diferencial (mm.c.d.a).

TA: Temperatura ambiente (°C).

TG: Temperatura de los gases (°C).

TPG: Temperatura en la pared del digestor de los gases (°C).

TPM: Temperatura en la pared del digestor de la mezcla (°C).

NOTA: Solo aparecen las temperaturas y las presiones hasta los 29 días ya que la presión se mantuvo constante hasta el término del TRH que se diseñó.



Anexo. D: Análisis de laboratorios realizados a las muestras recolectadas.

MÉTODOS DE ENSAYO		
Ensayo	Nombre	Doc que lo ampara y método de ensayo
pH	Potencial de Hidrógeno	PA01, Método Electrométrico.
CE	Conductividad Eléctrica	PA02, Método Electrométrico.
DBO ₅ ²⁰	Demanda Bioquímica de Oxígeno	PA12, Prueba de DBO - 5 días.
DQO	Demanda Química de Oxígeno	PA11, Método acelerado autoclaveando muestras bajo presión con dicromato
ST	Sólidos Totales	SMWW 2540B, Método de los sólidos totales secados a 103-105 °C
STF	Sólidos Totales Fijos	SMWW 2540E, Sólidos fijos y volátiles incinerados a 500 °C
STV	Sólidos Totales Volátiles	
SS	Sólidos Sedimentables	PA13, Método de los sólidos sedimentable

Standard Methods for the examination of Water and Waste Water, SMWW 1998, 20th Ed

Anexo. E: Tabla resumen de los parámetros químicos de los biodigestores a escala real.

DIGESTOR/ANÁLISIS	pH	CE	DQO	DBO	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SS
Genético Porcino	7,5	3158	2456,75	1391,75	3595,5	1113,75	2482,5	61,875
CCS Cumanayagua	7,01	1345	876,25	1589,5	11267	959	10308	
Finca "El Tablón"	6,67	1151,8	1241,5	10881	765	9145	410	

Anexo. F: Ganancia obtenidos por la realización del experimento in situó en la UEB Genético Porcino de Cienfuegos.

Moneda Nacional		
Ganancias		
Totales	Ganancias por concepto de comedor	Ganancias por concepto de atención al hombre
28 030.00	19 440.00	8 590.00
100%	69,30%	30,70%