

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

FACULTAD DE CIENCIAS

Escuela Académico Profesional de Biología Microbiología

**“OBTENCIÓN DE BIOGAS DE ESTIÉRCOL PORCINO Y RESTOS
VEGETALES, POR FERMENTACIÓN SEMICONTINUA”**

Tesis

Presentada por:

Bach. BETTY LUCILA CUEVA ANCALLA

Para optar el título Profesional de:

BIÓLOGO MICROBIÓLOGO

TACNA - PERU

2012

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres y a mi familia, por brindarme su ejemplo, apoyo y confianza.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento:

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por la formación académica brindada a mi persona.

A mis profesores, por su amplia colaboración y exigencia en el estudio durante mi formación profesional.

A mi asesor el Magister Daladier Castillo Cotrina por su orientación y confianza a mi persona.

Al Ingeniero Manuel Chipana por su apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis amigos y compañeros de la universidad, y a todas las personas que siempre me dieron palabras de aliento y que de alguna manera colaboraron para la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN.....	01
1.1 Hipótesis.....	04
1.2 Objetivos.....	04
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 Biogas.....	05
2.2 Proceso Biológico.....	07
2.3 Fase del proceso metanogénico.....	09
2.4 Biodigestor.....	12
2.4.1 Tipos de biodigestores.....	12
2.5 Propiedades básicas de la materia orgánica.....	18
2.6 Material de carga del biodigestor.....	20
2.6.1 Clases de materia orgánica.....	21
2.7 Relación carbono-nitrógeno.....	22
2.8 Proporción sólido-líquido.....	24
2.9 Función de los materiales de arranque	25
2.10 Composición del biogas.....	26

2.11 Utilización del biogas.....	31
2.12 Tipos de biodigestores por su forma.....	33
2.13 Factores que influyen en el proceso de digestión anaerobia.....	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1 Lugar de experimentación.....	48
3.2 Material Biológico.....	49
3.3 Diseño de la investigación.....	50
3.4 Metodología.....	51
3.5 Análisis estadístico.....	70
IV. RESULTADOS.....	71
V. DISCUSIONES.....	82
VI. CONCLUSIONES.....	88
VII. RECOMENDACIONES.....	89
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
IX. ANEXOS.....	95

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue producir biogas a partir de estiércol porcino y residuos orgánicos, por fermentación semicontinua. La experimentación se llevó a cabo en el INPREX; Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. Se utilizó un biodigestor tipo chino modificado de fibra de vidrio de 250 cm³ de capacidad para realizar en ella la fermentación.

Se pre-fermentó el substrato fermentativo formado por excremento de cerdo, resto de vegetales del mercado, hojas de pecana y agua para obtener un compost que constituyó el material fermentativo que se cargo al biodigestor para la producción de biogas. La fermentación se realizo a temperatura de ambiente durante 4 meses (Octubre 2009-Enero 2010). Se obtuvo una producción promedio diario de biogas de 14,864 cm³ a partir de los 18 días de iniciada la fermentación y una producción acumulada, hasta los 58 días en que terminó la fermentación; Se obtuvo un volumen total de biogas de 644,668 cm³ durante la etapa del experimento.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de energía de fuentes renovables es cada vez más necesario e importante en vista de los efectos generados por el uso de derivados del petróleo, tales como el efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono, la contaminación de suelos, el cambio climático, etc. Existen una serie de alternativas al respecto como la energía eólica, solar, biomasa, hidráulica, geotérmica, etc. que se encuentran en pleno desarrollo y estudio, en respuesta a la significativa demanda de energía.

La producción de biogas a partir del estiércol tiene como primer propósito coadyuvar a la reducción de gases que provocan el efecto invernadero del planeta, pero también es una alternativa que permite obtener energía para cubrir las necesidades de granjas pecuarias y resolver problemas como la disposición final de desechos, malos olores, fauna nociva, transmisión de enfermedades y contaminación de mantos freáticos. Además de que se puede obtener biofertilizantes a partir de los lodos residuales y cobrar un porcentaje por la venta.

En el mundo se considera a la energía eléctrica como la de mayor consumo en el mundo. Nuestro país posee aproximadamente seis millones de habitantes que no tienen la posibilidad de utilizar la energía eléctrica, principalmente por, la dispersión de las poblaciones rurales, que hace que el costo de tendido de redes eléctricas sea alto, por lo que se hace muy necesario buscar alternativas de energía con modelos diferentes. Los recursos con que cuentan fundamentalmente las poblaciones rurales son diversos; sin embargo, en gran proporción no son aprovechables; uno de ellos es la biomasa que es aprovechada en un mínimo porcentaje (abono orgánico o combustible); Este puede constituirse en una alternativa de generación de energía para estas poblaciones.

En nuestra sociedad existe la tendencia general de deshacer sistemáticamente los restos orgánicos de nuestras actividades por considerarlos inservibles y molestos. Restos no comestibles de cosechas, podas, estiércol o basura se abandonan y/o se queman desaprovechándose el potencial útil que tienen y contaminando el ambiente.

Con la constante subida de los precios de los combustibles fósiles, unido a la crisis medioambiental que se genera, se vuelve a valorar la utilidad de los

desechos orgánicos y su aprovechamiento para obtener combustibles de ellos. De esta manera empieza a entenderse así lo poco sensato que resulta importar o extraer combustibles fósiles de zonas remotas para obtener una energía la cual puede conseguirse en buena medida de los materiales que desechamos habitualmente.

Las excretas porcinas, vistas por muchos como un contaminante ambiental de importancia, pueden generar recursos muy valiosos mediante su procesamiento, de forma tal que al reciclarse parte de la energía y de sus nutrientes contribuyen a hacer sostenible en el trópico la producción porcina y de otras especies animales integradas.

Desde el siglo pasado se conocía en la India y China el uso de procesos fermentativos para producir el biogas y tratar ecológicamente las excretas de animales de forma artesanal. En los biodigestores, que son las instalaciones donde ocurren estos procesos, se obtiene además un efluente líquido cuyo valor económico como fertilizante es equivalente al del biogas.

1.1 HIPÓTESIS

Se obtiene una elevada producción de biogas a partir de estiércol del ganado porcino y restos vegetales por fermentación semicontinua.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general:

- Producir biogas a partir de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un biodigestor para fermentación semicontinua.
- Obtener un semicompost a partir de restos vegetales y estiércol porcino.
- Producir biogas utilizando como sustrato fermentativo semicompost y estiércol porcino.
- Evaluar la producción de biogas en función del volumen de producción.

II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biogas

Es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias y está constituido principalmente por gas metano y bióxido de carbono. La generación natural de biogas es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente (Sandoval, 2 006)

El biogas es el producto más conocido y utilizado de la biodigestión, constituye una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, los cuales se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos.

El biogas se compone de las siguientes moléculas: metano (CH₄) en un 54-70%, bióxido de carbono (CO₂) en un 27- 45%, hidrógeno (H₂) en un 1-10%, nitrógeno (N₂) en un 0,3-3% y ácido sulfhídrico (H₂S) en un 0,1%, respectivamente (Valdivia, 2 000)

2.1.1. Características del biogas

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogas, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) Aunque la composición del biogas depende de muchas variables, es posible determinar un rango típico de sus componentes (Flotats *et al.*, 2 000)

La materia orgánica, constituye el sustrato fundamental para la producción de biogas. El material de fermentación puede ser de origen animal, tales como estiércol del ganado vacuno, cerdos, ovejas, caballos, aves, otras de origen vegetal, tales como pulpa de café, hojas de papa, desechos de banana, remolachas, cascarilla de arroz y otras; desechos de cultivos acuáticos como algas marinas, maleza acuática y de origen doméstico, aguas residuales de letrina y cocina, sin contenido de jabón (Flotats *et al.*, 2 000) variando su porcentaje de metano.

2.1.2. Utilización del biogas

A pequeña y mediana escala, el biogas ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa, sin embargo también puede ser utilizado para iluminación, calefacción, como reemplazo de la gasolina o el diesel en motores de combustión interna, operar maquinaria agrícola o bombear agua (Veeken y Hamerlars, 2 000)

El poder calorífico aprovechable depende del rendimiento de los quemadores o de los aparatos. Se debe tener especial cuidado con el ácido sulfhídrico del biogas, ya que ocasiona corrosión prematura en los equipos, por esta razón es necesario colocar una trampa de limadura de hierro en la línea de transporte del biogas (Valdivia, 2 000)

2.2 Proceso Biológico (Valdivia, 2 000)

Es un proceso biológico de digestión de la materia prima, dividido en 3 fases:

- a. Hidrólisis o licuación
- b. Producción de ácido
- c. Producción de gas

a. Primera Fase: Hidrólisis o Licuación

Las bacterias de fermentación secretan exoenzimas que hidrolizan las materias orgánicas (las descomponen). Durante este proceso existen diversas variedades de bacterias facultativas, las cuales cumplen funciones catabolizantes (descomponiendo y degradando) de celulosa, grasas o proteínas para producir monosacáridos, pépticos aminoácidos, glicerol y ácidos grasos.

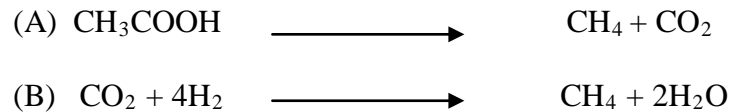
b. Segunda Fase: Producción de Ácidos

En esta fase las bacterias catabolizan los ácidos superiores, además de los ácidos grasos o de cadena Larga y aminoácidos aromáticos producto de la fase anterior, produciendo hidrógeno y ácido acético. Las bacterias protagónicas de esta fase son facultativas, es decir, viven con presencia y ausencia de oxígeno.

c. Tercera Fase: Producción de Gas

En esta fase las bacterias metanogénicas utilizan los compuestos simples (ácido acético, hidrógeno, ácido fórmico y CO_2), para formar metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2) siendo necesario que no exista ni la

más mínima cantidad de oxígeno para que estas bacterias puedan existir. La formación de metano se realiza partir de dos vías: Por fermentación de ácido acético (A) y por reducción de CO₂ (B) (principalmente). Las siguientes ecuaciones representan las mismas.



2.3 Fase del proceso metanogénico

Cabe señalar, además que las fases no son estrictamente consecutivas, es decir, una fase se puede estar desarrollándose paralelamente a otra. Durante el proceso de digestión la materia prima se vuelve líquida en un gran porcentaje. Una variable, de gran importancia, en el proceso de digestión, es la temperatura de trabajo del digestor, la cual marca la fermentación (digestión), es decir, el tipo de bacterias productoras de ácidos y metano existentes predominantemente durante el proceso. A pesar, que existen muchas diferencias entre los valores de temperaturas dados para una determinada bacteria, a continuación se da una referencia de los valores y las correspondientes bacterias existentes (Valdivia, 2 000)

Tabla 01: Bacterias existentes en un proceso anaeróbico según su temperatura de operación.

T° del digestor	Tipo de bacteria
De 10-20 °C	Bacterias Psicrófilas
De 30-40 °C	Bacterias mesófilas
De 50-60 °C	Bacterias Termófilas

Fuente: Valdivia, 2 000

Según la temperatura existente en el digestor, se puede definir también el tiempo de retención del mismo (tiempo de digestión), con su correspondiente producción.

Tabla 02: Tiempos de retención en función a las bacterias existentes.

Tipo de bacteria	Tiempo de retención	Descripción
Bacterias psicrófilas.	Más de 100 días	<ul style="list-style-type: none"> - Se considera que la digestión por las bacterias es estable. - La producción de gas es menor, debido a que la digestión es lenta.
Bacterias mesófilas	Más de 20 días	<ul style="list-style-type: none"> - Se considera como ideal. - Las bacterias son más estables. - Producen sedimentos de alta calidad como fertilizantes.

Bacterias termófilas	Más de 8 días	<ul style="list-style-type: none"> - Son muy sensibles a cualquier cambio en el digestor. - Los sedimentos que producen son de baja calidad como fertilizantes. - Digestión es más rápida.
----------------------	---------------	---

Fuente: Valdivia, 2 000

Otra variable importante es la presión interna del digestor, la cual ejerce cierta influencia al proceso; sin embargo se desconoce exactamente cómo afecta al mismo. En la Tabla 03 se muestra algunos resultados de estudios realizados en China, en digestores semicontinuos, los cuales nos muestran de una manera referencial el efecto de la presión sobre la producción.

Tabla 03: Relación entre la producción de gas y la presión interna del digestor

Grupo	Presión interna (mb)	Producción de gas (m³)	Porcentaje (%)
1	0-60	179,56	100
2	20	191,66	106
3	0	212,09	118

Fuente: Valdivia, 2 000

2.4 Biodigestor

Un Biodigestor, es una planta productora de biogas, biol y bioabono, donde se realiza un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales, residuos humanos, etc; Es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre sucede una digestión de la materia prima, luego de la cual se obtiene biogas, biol y bioabono (Bravo, 1 992)

2.4.1. Tipos de biodigestores

Los tipos de digestores están determinados por los procesos de digestión para producir biogas, los cuales se pueden dividir en 3 clases: (Bravo, 1 992)

2.4.1.1 Por la forma de alimentación

- **De fermentación continua**

Cuando comienza la digestión normal y la producción del biogas después de cierto periodo a partir de una carga inicial, se agregan materiales continuamente al digestor y el efluente se descarga en forma simultánea en la misma cantidad en que entra el material. De esta manera, la

fermentación en el digestor es un proceso interrumpido. El proceso se caracteriza por una fermentación constante, una producción uniforme de gas y facilidad de control, y es que se aplica comúnmente en zonas con materias residuales ricas y digestores de mediano y gran tamaño.

- **De fermentación semicontinua**

La primera carga consta de gran cantidad de materiales. Cuando va disminuyendo gradualmente el rendimiento de gas, se agregan nuevas materias primas y el efluente se va descargando gradualmente en la misma cantidad.

- **De fermentación discontinua o por lotes**

Los digestores se cargan con material en un solo lote. Cuando el rendimiento de gas decae a un bajo nivel después de un periodo de fermentación, se vacían los digestores por completo y se alimentan una vez más.

2.4.1.2. Por la temperatura

- **Fermentación termófila**

Como ya se indicó en las Tablas 01 y 02, se necesita una temperatura de trabajo alta y se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención. Este proceso se emplea para eliminar excrementos humanos y otros residuos por sus mejores características de desinfección.

- **Fermentación mesófila**

Es este caso la fermentación necesita una temperatura menor, comparada con la fermentación mesofílica, la descomposición de la carga es más lenta, pero presenta otras bondades.

- **Fermentación psicrófila o a temperatura ambiente**

La temperatura de fermentación varía según las condiciones atmosféricas, por lo cual el rendimiento de gas fluctúa marcadamente según la estación. Este proceso requiere poca inversión.

2.4.1.3. Por la fermentación

- **Fermentación en una sola etapa**

La digestión en un solo depósito de fermentación se denomina fermentación en una sola etapa, este tipo de fermentación demanda una estructura simple, bajos costos y es de fácil operación.

- **Fermentación en dos etapas y más**

Esto indica que la digestión ocurre en dos o más depósitos de fermentación. El material de la carga primero se degrada y produce gas en la primera etapa; El efluente de la primera etapa sufre un nuevo proceso de digestión en la segunda etapa. Por este principio pueden construirse digestores de tres o cuatro etapas.

Los digestores múltiples se caracterizan por un largo período de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión.

2.4.1.4. Proceso de fermentación de dos fases

Este proceso se diseña para tomar en cuenta una fase de formación de ácido y otra de formación de metano. Aún se están realizando investigaciones sobre este aspecto. (Rilling, 1 985)

- **Plantas de fermentación**

- a) **Plantas batch o discontinua**

Son aquellas que se cargan completamente de una sola vez y son vaciadas por completo después de un tiempo de retención fijado. Dentro de esta categoría la más conocida es la planta Olade de Guatemala.

El modelo tipo Batch es apropiado para cargar todo tipo de materiales de fermentación, debido a que el tiempo de retención con el que se trabaja es largo.

- b) **Plantas semicontinuas y continuas**

Dentro de estos modelos se tienen los biodigestores de tipo tanque agitado, cuya versión a nivel rural es el tipo chino, adecuado para el tratamiento de mezclas de estiércol y pajas. En el caso del modelo

hindú y el horizontal son recomendados para el tratamiento de estiércol puro, debido a que estos materiales se degradan más rápido que los residuos agrícolas, pues su textura es más homogénea.

La planta de cúpula fija (modelo chino), se compone de un digestor cerrado con cámara de gas inmóvil y fija. El gas es almacenado en la parte superior del digestor. Durante la producción de gas el cieno de fermentación es desplazado hacia el tanque de compensación. La presión del gas aumenta según la cantidad de gas almacenado. Si se encuentra poco gas en el depósito, la presión del gas también es baja.

c) La planta de campana flotante

La planta de campana flotante, se compone de un digestor y de un depósito de gas móvil. Este flota ya sea directamente en el cieno de fermentación o en un anillo de agua propio.

El gas se acumula en la campana, haciéndola subir. Cuando se extrae el gas, aquella vuelve a bajar, evitando que se ladee mediante el uso de guías (Rilling, 1985)

2.5 Propiedades básicas de la materia orgánica

Durante la digestión se encuentra que no toda materia prima se digiere, si no que parte se convierte en metano, otra en sedimento y habrá también una porción que no se digiere, esta y otras propiedades básicas de la materia se expresan casi siempre como sigue: (Valdivia, 2 000)

2.5.1. Humedad

Cantidad de agua existente en la materia a utilizar. Se obtiene al secarse el material a 104°C, hasta que no pierda peso; la diferencia entre el peso inicial y el peso final es equivalente a la humedad que contenía la materia.

2.5.2. Sólidos totales

Materia orgánica sin humedad es decir, el peso de la materia seca que queda después del secado como se indicó antes. El sólido total suele ser equivalente al peso en seco (sin embargo si se secan los materiales al sol, es de suponer que aun contendrán, cerca del 30% de humedad). El sólido total incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos”.

2.5.3. Sólidos volátiles (SV)

Los sólidos volátiles son considerados como la materia que realmente es transformada por las bacterias. Es el peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende (se calienta unos 538 °C).

2.5.4. Sólidos fijos (SF)

Material que no será transformado durante el proceso y es el peso que queda después del encendido (cenizas), se trata de material biológicamente inerte.

2.5.5. Acidez

El valor de pH recomendado esta dentro de los valores de 7 a 8 a pesar que durante la fase ácida el pH puede llegar a 6 o menos (sin llegar a bajar a 4, valor ante el cual debe corregirse inmediatamente el problema); pero mientras prosigue la digestión el pH se va elevando lentamente hasta alcanzar el valor adecuado e inclusive puede llegar a subir un poco más, pero luego se estabiliza automáticamente. En el periodo de arranque se produce gran cantidad de ácido orgánico en los digestores por la actividad de las bacterias acidógenicas y puede aparecer un valor bajo de pH. Después, a medida que

avanza la fermentación, la concentración de amoníaco puede neutralizar el ácido en los lodos de fermentación y volver el pH a su valor normal.

El tiempo de duración de digestión de la materia prima, es variable y depende directamente del tipo y calidad de materia prima con que se ha alimentado al digestor (Rilling, 1 985)

2.6 Material de carga del biodigestor (Rilling, 1 985)

Cada material de carga o materia se compone de:

- Sustancias sólidas orgánicas.
- Sustancias sólidas inorgánicas
- Agua

Como sabemos, el biogas se produce a partir del material orgánico. Los materiales inorgánicos (minerales y metales) son lastre no aprovechable y no son modificados durante el proceso de fermentación anaeróbica.

En presencia de agua, aumenta la fluidez del material de fermentación (dilución de la carga), lo cual es importante para el funcionamiento de una planta de biogas, puesto que en un medio líquido las bacterias de metano

llegan más rápidamente al material de fermentación fresco acelerándose así el proceso de fermentación, pero disminuyendo la productividad de la masa fermentada (rendimiento). La dilución de la carga expresa el contenido de sólidos totales en la misma, usualmente expresado en porcentaje; depende del tipo de fermentación con la que estemos trabajando (continua, semicontinua o por lotes). Para sistemas de fermentación continua el porcentaje de sólidos totales aconsejables es de 6 a 10 % y en sistemas discontinuos o por lotes los valores recomendados varían entre 25 a 35 % de sólidos totales.

2.6.1 Clases de materia orgánicas: (Lugones, 2 001)

Para el caso de las materias orgánicas, debido al requerimiento, podemos subdividirla en dos tipos:

2.6.1.1. Materias primas ricas en Nitrógeno

Este tipo de materias principalmente está integrado por los residuos humanos y animales. Se caracterizan por estar constituidos por partículas finas, contener compuestos de baja masa molecular, alto contenido de nitrógeno y mayor velocidad de biodegradación y generación de gas durante la fermentación.

2.6.1.2. Materias primas ricas en Carbono

Está integrada básicamente por residuos agrícolas, como diversos tallos y hojas; se componen generalmente de compuestos de estructura compleja o cadena larga (celulosa, lignina ceras y otros), se caracterizan por tener una lenta pero mayor producción de biogas en el proceso de fermentación.

Es muy importante la categorización de la materia orgánica, Un factor muy importante en la generación de gas del digestor, es la relación carbono-nitrógeno (C/N) de la materia orgánica con que alimentamos al mismo.

2.7. Relación de carbono-nitrógeno (Guevara, 1 996)

Desde el punto de vista biológico los digestores se pueden considerar como un cultivo de bacterias que se alimentan con los desechos orgánicos, transformándolos. Los alimentos principalmente de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, etc.)

El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de estructuras celulares. Esas bacterias utilizan carbono con una rapidez aproximada de 25-30 veces más que del nitrógeno.

Es por ello que la relación adecuada de C/N es de 25 a 30, sin la cual se tendría un desequilibrio en el proceso, si la relación es mayor a 30 (mayor cantidad de carbono), el ritmo de producción disminuirá debido a que el nitrógeno se consumirá más rápido que el carbono, acidificando la masa de fermentación (El valor del pH desciende); pero si la relación es menor (menos cantidad de carbono), el proceso consumirá rápidamente el carbono y al agotarse este, el proceso parara, elevando el valor de pH (la masa de digestión se vuelve alcalina), y el nitrógeno sobrante se perderá en forma de amoníaco (NH_3).

Existen muchas tablas estándar que dan razones C/N de varios materiales orgánicos, pero pueden resultar engañosas debido a que la razón medida en el laboratorio no es la misma que la razón disponible como alimento para las bacterias (parte del alimento no podrán digerirlo). Esta es la principal razón para que estas tablas sean engañosas, que el contenido de carbono y nitrógeno en la materia prima (Residuos agrícolas y desechos humanos y animales) varíe de acuerdo a la zona, edad de la planta o el animal, etc.

2.8. Proporción sólido-líquido

Para la fermentación en la producción del biogas, es necesario diluir la carga apropiadamente, lo que implica mantener un porcentaje entre los sólidos totales (ST) y el líquido total de fermentación.

No es útil para la producción de gas que la carga esté demasiado concentrada o demasiado diluído, pues como se explicó anteriormente las bacterias llegan rápidamente a los materiales frescos en un medio adecuadamente diluído. Con bajas concentraciones; la tasa de aprovechamiento de la carga sería alta, con baja producción de gas; es decir, el rendimiento del digester sería alto, la producción diaria también sería alta con una producción acumulada y relativamente baja en un tiempo corto de digestión. Por el contrario, una alta concentración permite obtener cantidad de gas pero con una baja tasa de utilización de la carga, debido a que las bacterias no alcanzarían a degradar toda la masa de fermentación, pues el medio no sería lo suficientemente propicio (por la baja dilución de la carga); la producción diaria sería baja, la producción acumulada sería relativamente alta en un tiempo largo de digestión (Bravo, 1 992)

2.9. Función de los materiales de arranque

La degradación de los residuos mediante el proceso general de fermentación metanogénicas exige como material de arranque la presencia de un grupo de bacterias anaeróbicas y facultativas que se encuentran muy generalizadas en la naturaleza. Después de cierto período de descomposición, los excrementos humanos y animales y otras materias primas de fermentación pueden desempeñar un papel de enriquecimiento de bacterias. Generando gas a gran velocidad dentro de un digestor. El material de carga descompuesto con anterioridad más un lodo activado puede servir como material de arranque que da una gran velocidad de formación de metano (Guevara, 1 996)

2.10. Composición del biogas

El biogas es un poco más liviano que el aire y está compuesto de diversos gases, los cuales se detallan a continuación (Lugones, 2 001)

Tabla 04: Composición química del biogas

Gas		Contenido %
Metano	CH ₄	54,00 - 70,00
Dióxido de carbono	CO ₂	27,00 - 45,00
Nitrógeno	N ₂	0,50 - 3,00
Hidrógeno	H ₂	1,00 - 10,00
Monóxido de carbono	CO	0,10
Oxígeno	O ₂	0,10
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,15 - 0,50

Fuente: Lugones, 2001

El sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico es un gas incoloro sumamente tóxico. Es combustible y forma con el aire mezclas explosivas. Este gas posee un olor característico a huevos podridos. Este olor se percibe a baja concentración (0,05 hasta 500 ppm)

El ácido sulfhídrico es soluble en agua, formando con ésta un ácido débil. El producto de la combustión del H₂S es el SO₂, el cual actúa de manera

altamente corrosiva en los gases de escape (ácido sulfuroso) y contamina el medio ambiente (lluvia ácida) (Contreras, 2 006)

Este ácido se forma en las plantas de biogas por formación de proteínas sulfurosas. Estas pueden provenir de materiales vegetales o de restos de forraje de animales, siendo el estiércol de gallinas, reses y de cerdos los que generan en promedio hasta un 0,5 % de H₂S.

2.10.1. Acción de H₂S (Valdivia, 2 000)

El H₂S gaseoso presente en el biogas tiene una acción corrosiva sobre las partes metálicas. El H₂S ataca superficialmente el fierro pero, sin causar mayores destrucciones. Los materiales galvanizados son también atacados en la superficie.

Mas grave es la destrucción de metales no ferrosos o de aparatos con componentes de metales no ferrosos, tales como reguladores de presión, medidores de gas, válvulas y griferías. Estos componentes son destruídos rápidamente. El efecto del SO₂ en conjunto con el agua actúa directamente sobre el motor causando corrosión en la cámara de combustión, en el sistema de escape, etc.

2.10.2. Efectos de H₂S en el ser humano (Contreras, 2 006)

El H₂S es un veneno muy potente (comparable al ácido cianhídrico o ácido prúsico). El H₂S modifica el pigmento rojo de la sangre la que cambia de color café hasta verde oliva. El transporte del oxígeno se dificulta, lo que lleva una “asfixia interna”. Como síntomas se presentan la irritación de las mucosas (incluso de los ojos), nauseas, vómitos, disnea, cianosis (cambio de color de la piel), delirios y espasmos, así como parálisis respiratorios y paro cardiaco, a altas concentraciones de H₂S los síntomas únicos e inmediatos son la parálisis respiratoria y el paro cardiaco. Si la persona afectada sobrevive a un envenenamiento quedan secuelas en el sistema nervioso central y en el corazón.

Si la persona se ve sometida a la influencia de pequeñas cantidades de H₂S durante largo tiempo, se puede producir un envenenamiento crónico, en el presentaría como síntomas la irritación de las mucosas, fotofobia, bronquitis, dolor de cabeza, debilidad, trastornos circulatorios y pérdida de peso; Las dosis letales son:

- 1,2 hasta 2,8 mg H₂S / l, de aire (0,1 %) es inmediatamente mortal
- 0,6 mg H₂S mg /l, de aire es mortal en el espacio de media hora.

2.10.3. Efectos del H₂S sobre el ambiente

El SO₂ producido durante la combustión contamina el medio ambiente en forma de “lluvia ácida”, un contenido relativo bajo de SO₂ en el aire daña las plantas. La acumulación de SO₂ en los suelos pobres en cal trae consigo una lenta acidificación de los suelos. (Contreras, 2 006)

2.10.4. Detección del H₂S

Existen varios métodos cualitativos y cuantitativos para detectar la presencia de H₂S en el biogas, una forma práctica y económica de detectarlo cualitativamente es mediante el empleo de una solución alcohólica de yodo. Una pequeña cantidad de biogas es introducida con sumo cuidado en la solución de yodo. En presencia de H₂S se decolora la solución color rojo-marrón. Debido a la formación de azufre elemental se produce un enturbiamiento lechoso. (Bravo, 1 992)

2.10.5. Procesos para eliminar H₂S del biogas

Existen varios procesos de eliminación del H₂S, pero los que más se ajustan a una planta artesanal por sus costos, son posprocedimientos “secos”. La desulfuración del biogas se basa en la reacción química de H₂S con una sustancia apropiada. (Contreras, 2 006)

2.10.6. Procedimiento con cal (Valdivia, 2 000)

El procedimiento de desulfuración de gases con cal viva o apagada, ya sea en forma sólida (trozos) o como solución acuosa, produce gran cantidad de residuos malolientes. Las soluciones acuosas o suspensiones de cal apagada requieren gran cantidad o despliegue de aparatos para su operación.

En presencia de grandes cantidades de CO_2 en el gas, como se da el caso en el biogas, es difícil lograr una eliminación satisfactoria del H_2S . El CO_2 también reacciona con cal viva o apagada y la consume demasiado rápido.

Procedimientos utilizando masas ferrosas en forma de tierra natural o de ciertos minerales ferrosos son utilizados frecuentemente para eliminar el H_2S . En este caso los contenidos de óxidos de hierro, en las masas ferrosas reaccionan con el H_2S obteniéndose sulfuros y agua.

El principio de estos equipos de desulfuración consiste en un cajón o tonel. En su parte interior se encuentra la masa purificadora ya preparada. Esta es depositada sobre varias planchas perforadas, de manera que las capas purificadoras no sobrepasen un espesor de 20 a 30 cm de lo contrario la masa

se comprimiría con suma facilidad, aumentando su resistencia al paso de biogas que entra en el cajón (purificador) por la parte superior, fluye a través de la masa, abandona el purificador por la parte superior ya liberado de H₂S. Una vez que la masa está saturada, esta se puede mezclar con el bioabono para que los sulfuros se trasformen en sulfatos y sean absorbidos por la tierra y podamos cerrar el ciclo.

2.11. Utilización del biogas

El biogas puede ser utilizado como cualquier otro combustible con poder calorífico, está en directa relación con el porcentaje de metano contenido en la mezcla, pero usualmente varía entre 16500 Kj/Kg y 21000 Kj/Kg (Valdivia, 2 000)

2.11.1. Energía térmica

Es la aplicación más difundida. El biogas se utiliza en aparatos como cocinillas y lámparas, quemándolo y obteniendo calor. Este tipo de uso fue impulsado, debido a que se quema con una llama azul, no produciendo hollín ni olores desagradables.

2.11.2. Energía eléctrica

La utilización de biogas como combustible alternativo en motores de combustión interna, es una nueva solución para el problema energético a nivel rural en algunos países. Los cuales actualmente están en procesos de mejorar las eficiencias, alentados por los resultados obtenidos.

Estos resultados son directamente aplicados para la generación de electricidad mediante motogeneradores. La utilización más difundida de la electricidad es el alumbrado doméstico, la cual presenta una mayor eficiencia frente a la opción térmica de quemadores para alumbrado, a parte de las ventajas en la iluminación obtenida.

2.11.3. Factores ambientales y el biogas

La generación de biogas, ayuda a eliminar malos olores generados por materias orgánicas descompuestas al aire libre; al mismo tiempo que elimina focos infecciosos responsables de muchísimas epidemias en la humanidad, siendo una de las más recientes el cólera; por lo que no solo protege el medioambiente, sino que ayudada a mejorar la salud pública

(siempre y cuando controlemos la composición del biogas, sobre todo ante un elevado valor de H₂S). (Valdivia, 2 000)

Además se genera un combustible de características muy buenas, con residuos de combustión poco contaminantes, obteniéndose además excelentes nutrientes para la tierra, apoyando así a la agricultura, principal actividad socioeconómica de nuestro país y por supuesto la reforestación.

El problema observado es la cantidad de CO₂ obtenido en la generación de biogas, pues como se sabe es el principal responsable del efecto invernadero; sin embargo programas complementarios de reforestación con utilización del bioabono obtenido podrían aminorar el mismo; o también se podría someter al biogas a un proceso de purificación, con una inversión un poco mayor. (Guevara, 1 996)

2.12. Tipos de biodigestores por su forma

Principalmente se conocen tres tipos de biodigestores: De cúpula fija, de cúpula móvil y biodigestor tipo salchicha. Estos biodigestores son de flujo continuo lo que permite la entrada y salida constante de fluido. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos: (Contreras, 2 006)

2.12.1. De cúpula fija

Son aquellos armados en una sola estructura que por regla general es hecha en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio el uso de mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción.

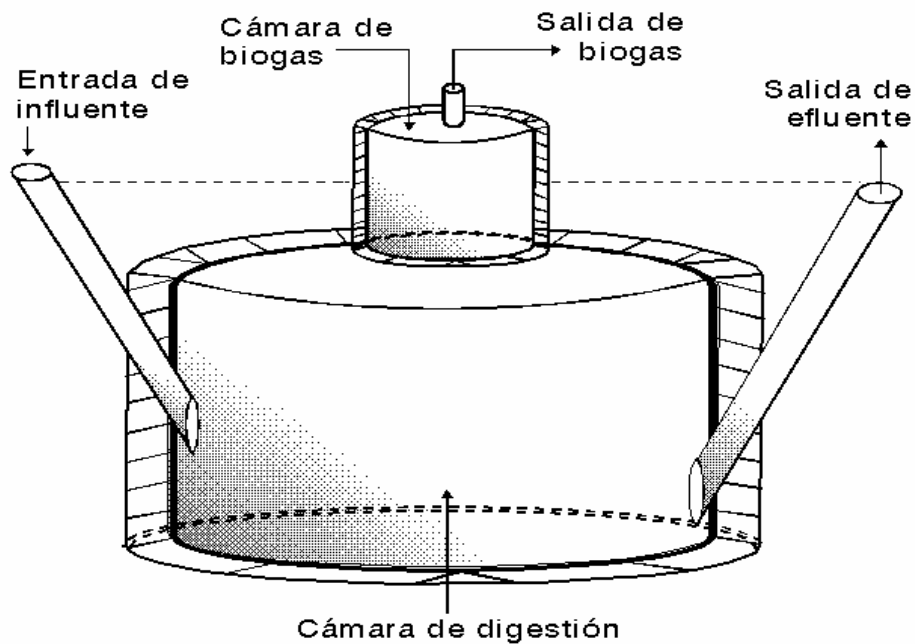


Figura 01 : Camara de digestion con cupula fija

2.12.2. Biodigestor de cúpula fija o tipo chino

El modelo de cúpula fija tiene como principal característica que trabaja con presión variable; sus principales desventajas, son que la presión de gas no es constante y que la cúpula debe ser completamente hermética, ello implica cierta complejidad en la construcción y costos adicionales en impermeabilizantes. Sin embargo, este modelo presenta la ventaja de que los materiales de construcción son fáciles de adquirir a nivel local, así como la inexistencia de partes metálicas que pueden oxidarse y una larga vida útil si se le da mantenimiento, además de ser una construcción subterránea (Jarauta, 2 004)

2.12.3. De cúpula móvil

Los biodigestores de este grupo tienen dos estructuras: la primera al igual que en los de estructura sólida fija, va enterrada y hecha en concreto, bloque o ladrillo; la segunda en la mayoría de los casos es una campana metálica que “flota” sobre la primera estructura. (Valdivia, 2 000)

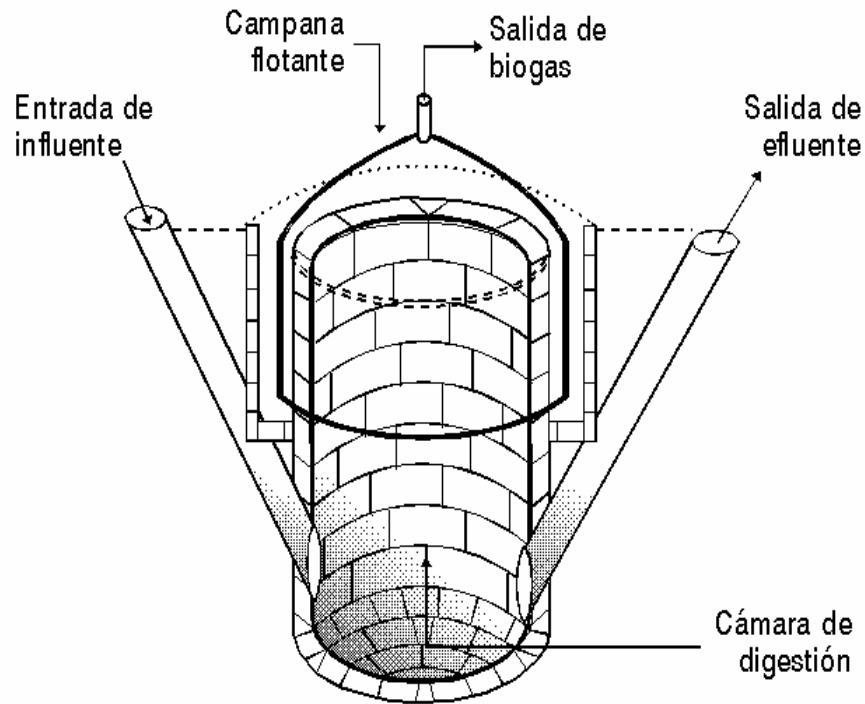


Figura 02 : Cámara de digestión con cúpula móvil

2.12.4. Biodigestor de cúpula móvil

Se caracteriza por tener un depósito de gas móvil a manera de campana flotante, esta campana puede flotar en la masa de fermentación o en un anillo de agua. Las ventajas de este tipo de planta son que trabajan a presión constante y se puede determinar la cantidad de gas almacenado por el nivel de la campana; pero tiene como desventaja que está expuesto a la corrosión ya que las campanas son generalmente metálicas (Contreras, 2 000)

Últimamente se ha experimentado con fibra de vidrio y se han obtenido buenos resultados. Además, presenta costos altos de construcción y de mantenimiento, debido al uso periódico de pintura anticorrosiva (Jarauta, 2 004)

2.13. Factores que influyen el proceso de digestión anaerobia (Contreras,2 006)

Durante mucho tiempo se consideró a la digestión anaerobia como un sistema bifásico, compuesto por la fase no metanogénica en que las bacterias anaerobias transformaban los substratos en productos solubles y gaseosos incluyendo acetatos, CO_2 , H_2 ; y otra, la metanogénica donde las bacterias formadoras de metano (CH_4) utilizaban el acetato, mezclas de H_2 y CO_2 entre otros substratos para su metabolismo. Los términos con que se han identificado estas fases (acidificación y gasificación) no fueron del todo correctos; por cuanto, en la primera etapa no todos los productos que se forman son ácidos; así como no todos los productos gaseosos son derivados de la llamada etapa de gasificación.

Más tarde, se admitió que en la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- Hidrólisis o licuefacción: en esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.
- Acidogénesis: en esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.
- Acetogénesis: se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Metanogénesis: en esta etapa metabólica el CH_4 es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas según la Figura 03.

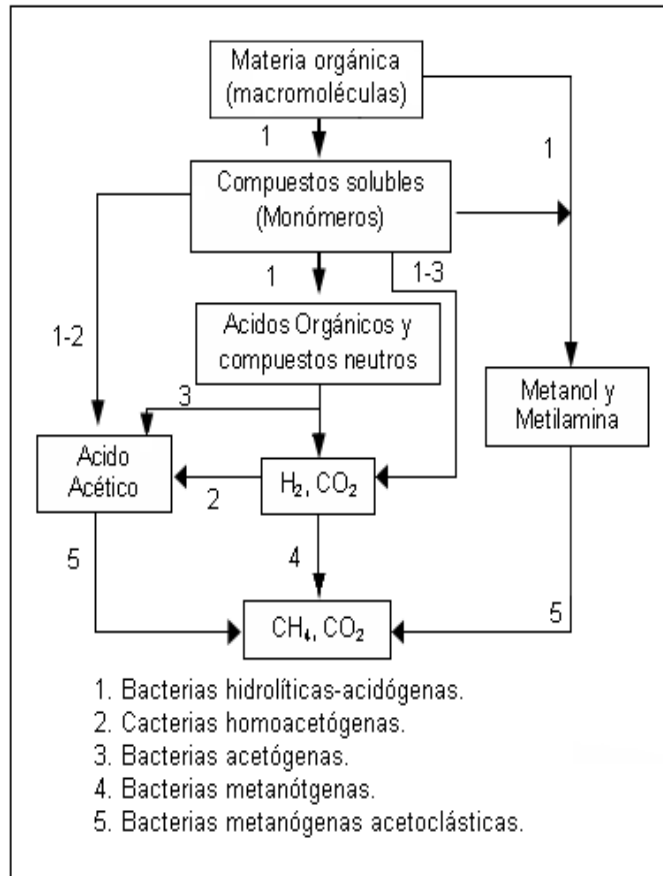


Figura 03: Etapas de la fermentación bacteriana (Valdivia, 2 000)

En el proceso de conversión anaerobia también intervienen otros factores como por ejemplo: del pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, el tiempo de retención, la relación carbono-nitrógeno (C:N) y el nivel de carga. (Contreras, 2 006)

2.13.1. pH (Dobelmann J.K and D.H. Muller, 2 000)

El rango de pH óptimo es de 6,6 a 7,6. Los ácidos grasos volátiles y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los ácidos grasos volátiles a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH en el biodigestor. Sin embargo, el equilibrio CO₂ bicarbonato opone resistencia al cambio de pH.

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el biodigestor. El primero es parar la alimentación del biodigestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los ácidos grasos volátiles; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los ácidos grasos volátiles. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del biodigestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los

requerimientos de buffer varían según el residual, los sistemas de operación y tipos de operación.

Es de vital importancia para el sistema, ya que una disminución del pH puede traer como resultado la inhibición del crecimiento de las bacterias metanogénicas, ello hace que disminuya la producción de metano y aumente el contenido de dióxido de carbono y se produzcan olores desagradables por el aumento del contenido de sulfuro de hidrógeno (Lay *et al.*, 1 998)

De manera general, el pH se mantiene bastante estable a pesar de la producción de ácidos por las bacterias, ya que en el medio fermentativo se generan sustancias tampones que garantizan un rango de pH adecuado. Además, la velocidad de formación de ácido depende de la velocidad de la conversión a biogas. Se acepta generalmente que los valores óptimos del pH oscilen entre 5.5 y 8.0, sin embargo en el sistema de dos etapas el pH recomendado depende de la fase anaeróbica (Valdivia, 2 000)

2.13.2. Temperatura

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los biodigestores de biogas esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el biodigestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas (Sandoval, 2006)

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primero es el mesófilo (de 20 a 45 °C), el segundo es el termófilo (por encima de 45 °C). El óptimo puede ser de 35 °C a 55 °C. La ventaja de la digestión termófilo es que la producción de biogas es aproximadamente el doble que la mesófilo, así que los

biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general.

Se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados. Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55 °C. El tercer rango (psicrofílico) ocurre entre los 10 y 25 °C. Existen algunas restricciones para el uso de esta temperatura en la digestión anaerobia, como son la necesidad de utilización de: reactores anaerobios de cama fija, inóculos mesofílicos, un tiempo de retención alto y mantener una acidificación baja (Dobelman J.K. and D.H. Müller, 2 000)

Es una variable muy importante ya que a medida que aumenta la temperatura también aumenta la actividad metabólica de las bacterias (Veeken y Hamelers, 2000), requiriéndose menor tiempo de retención para que se complete el proceso de fermentación.

A mayor temperatura se obtiene mayor agilidad en el desarrollo del proceso, permitiéndose la posibilidad de emplear dimensiones menores en el reactor, no obstante lo anterior, cuando se trabaja a temperaturas muy elevadas el proceso puede dejar de ser rentable, por lo cual es común que los digestores operen en un rango mesófilo.

2.13.3. Nutrientes

Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran en más que suficientes las cantidades de nutrientes. (Contreras, 2 006)

Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el período de producción de biogas es más prolongado. Los materiales con diferentes relaciones de C:N difieren grandemente en la producción de biogas. Por ejemplo, la relación de C:N en residuales porcinos es de 9 a 3; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 30:1 hasta 10:1, una relación menor de 8:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio. (Dobelmann J.K and D.H. Müller, 2 000)

2.13.4. Toxicidad

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante.

Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe ser mantenido en 80 ppm. Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada. (Dobelmann J.K. and D.H. Müller, 2 000)

Se debe tener precaución para evitar la entrada al biodigestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas. Se reportado la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos.

2.13.5. Nivel de carga.

Este parámetro es calculado como la materia seca total (MS) o materia orgánica (MO) que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de biodigestor. La MO o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la MS o sólidos totales (TS), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 500 °C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10 % de la mezcla agua estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10 % de la mezcla agua estiércol en la mayoría de los casos. Por eso, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados (Dobelman J.K. and D.H. Müller, 2 000)

La eficiencia de la producción de biogas se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. En China, la concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27 °C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23 °C.

3.13.6. Tiempo de retención

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el biodigestor:

- 1- El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de MO o SV que entra al biodigestor entre la cantidad de MO que sale del sistema cada día. El TRSB es asumido para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el biodigestor.
- 2- El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación entre el volumen del biodigestor (VD) y la media de la carga diaria.

Estos parámetros son importantes para los biodigestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del TRH a través de la retención de la biomasa. La medición del TRH es más fácil y más práctico que el TRSB a nivel de las granjas (Dobelmann J.K. and D.H. Müller, 2 000)

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se llevó a cabo en el local del INPREX de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, desde setiembre del 2 009 hasta enero del 2 010 en condición ambiental natural.

El Instituto de Investigación, Producción y Extensión Agraria “INPREX” se encuentra ubicado geográficamente a una Latitud sur de $17^{\circ}59'38''$; a una longitud Oeste de $70^{\circ}14'22''$; a una altitud de 532 m.s.n.m. ubicado en el distrito Gregorio Albarracín avenida cusco s/n y con una extensión de de 18.9000 Has. Políticamente se encuentra en la región Tacna, en el Distrito de G. Albarracín.

3.2. MATERIAL BIOLÓGICO

A) Estiércol porcino:

Se utilizó excremento fresco porcino que se recolectó en depósitos limpios de polietileno para ser trasladado desde el criadero de cerdos del INPREX al lugar de experimentación.

B) Restos vegetales:

B.1. Restos vegetales de mercado:

Se utilizaron restos frescos de diferentes vegetales que quedan de los vegetales que se expenden en el mercado Grau de Tacna; los cuales se recolectaron el mismo día en que se inicio el semicompostaje.

Los restos vegetales recolectados fueron: cebolla, zapallo, hojas de lechuga, tomate, cascara de alverjas, habas, cebolla, perejil, tronco de acelga entre otras verduras frescas del día.

B.2. Hojas de pecana:

Las hojas de pecana fueron recolectadas del suelo de los alrededores de los árboles, que se encuentran en el INPREX.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:

Se empleó diseño: Descriptivo, Transversal Prospectivo.

Las variables de estudio fueron:

- Variable independiente(X)** : Restos vegetales (restos vegetales de mercado y hojas de pecana) y estiércol porcino.
- Variable dependiente (Y)** : Producción de biogas
- Variables intervinientes** : Condiciones ambientales naturales

3.4 METODOLOGÍA

3.4.1. Diseño y construcción del biodigestor (Itintec, 1 983)

El modelo de biodigestor se hizo en base al biodigestor tipo chino



Foto 01: Biodigestor utilizado en la experimentación

Se diseñó considerando las siguientes partes:

- **Componente de carga:** Tubo alargado (lado izquierdo) por el cual se hizo el cargado.

- **Componente biodigestor propiamente dicho:** Recipiente central algo cilíndrico en el que se realizó la fermentación de la carga y que tuvo un volumen de capacidad de 250 litros.
- **Componente de descarga:** Tubo corto (lado derecho) por el cual se hizo la descarga.

3.4.2. Diseño y construcción del manómetro de columna de agua

El manómetro utilizado en este trabajo se construyó como se muestra en la (Foto 02)



Foto 02: Manómetro utilizado en la experimentación

El tubo en forma de “U” fue una manguera de $\frac{1}{4}$ de diámetro, plástico transparente, graduado en centímetros con ayuda de una cinta métrica y un marcador indeleble. Todo el tubo en forma de ”U” estuvo fijo al soporte rectangular de madera de triplay. Para fijar el tubo al soporte se utilizó cinta adhesiva. Uno de los extremos del tubo es el estuvo libre para ser conectado al tubo de salida del biogas del biodigestor a través de una unión en forma de “T”. El otro extremo del tubo se hizo que atravesara la tapa de jebe de un frasco de vidrio de $\frac{1}{2}$ litro de capacidad que estuvo en posición invertida y el cual a su vez tuvo un segmento de tubo de vidrio de 10 cm de longitud, abierto en sus extremos que atravesar la tapa de jebe del frasco de vidrio, conectando el interior del frasco con el exterior.

El tubo en forma de “U” fue llenado con agua coloreada (rojo de metilo) para apreciar mejor la diferencia de niveles, en la medición de la presión, en ambas ramas del tubo

3.4.3. Diseño y construcción del gasómetro

El gasómetro utilizado consistió de un tanque cilíndrico con agua de 20 litros de capacidad dentro del cual estuvo un recipiente invertido, con libertad de movimiento, ambos graduados para medir el desplazamiento hacia arriba del recipiente invertido, a medida que ingresaba el biogas dentro del recipiente invertido, de tal modo que por desplazamiento del volumen de H₂O se midió el volumen de producción de biogas (Foto 03)



Foto 03: Gasómetro utilizado en la experimentación

3.4.4. Almacenamiento del biogas

Para el almacenamiento del biogas se utilizó una cámara de llanta N° 20 la cual se conectó a una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro que a su vez estuvo conectado al gasómetro (Foto 04)



Foto 04: Cámara de llanta N° 20 para almacenar biogas

3.4.5. Determinación de la relación carbono-nitrógeno de los sustratos fermentativos antes del prefermentado: (Itintec, 1 983)

3.4.5.1. Relación C/N de la mezcla

➤ Se asumió como conocidas las cantidades de estiércol y restos vegetales que se utilizó.

✓ 10 kg estiércol

✓ 10 kg restos vegetales del mercado; cada componente de estos restos tuvo una proporción de 1:1 en volumen

✓ 7 kg hojas de pecana

➤ Se sumó la masa o volumen de los componentes de la mezcla:

$$10 + 10 + 7 = 27 \text{ kg}$$

Esto representó el 100% de masa de toda la mezcla (estiércol y restos vegetales)

➤ Se halló el porcentaje correspondiente a cada componente de la mezcla :

- ✓ Se determinó el porcentaje de estiércol porcino

27 kg de mezcla ----- 100 % de la mezcla

10 kg de estiércol de cerdo ----- x

$$X = \frac{10 \text{ kg de estiércol de cerdo} * 100 \% \text{ de la mezcla}}{27 \text{ kg de mezcla}}$$

27 kg de mezcla

$$X = 37,037 \%$$

- ✓ Se determinó el porcentaje de los restos vegetales

27 kg de mezcla -----100 % de la mezcla

10 kg restos vegetales de mercado ----- x

$$X = \frac{10 \text{ kg restos vegetales de mercado} * 100 \% \text{ de la mezcla}}{27 \text{ kg de mezcla}}$$

27 kg de mezcla

$$X = 37,037$$

- ✓ Se determinó el porcentaje de las hojas de pecana

27 kg de mezcla -----100 % de la mezcla

7 kg de hojas de pecana ----- x

$$X = \frac{7 \text{ kg de hojas de pecana} * 100 \% \text{ de la mezcla}}{27 \text{ kg de mezcla}}$$

27 kg de mezcla

$$X = 25,925 \%$$

Teniendo el porcentaje de cada componente de la mezcla, se dividió cada uno de estos resultados por 100

3.4.5.2. Para el estiércol porcino :

$$\frac{37,037 \%}{100} = 0,37037$$

100

3.4.5.3. Para restos vegetales de mercado (1/1):

$$\frac{37,037 \%}{100} = 0,37037$$

100

3.4.5.4. Para hojas de pecana :

$$\frac{25,925 \%}{100} = 0,25925$$

100

Seguidamente estos últimos resultados anteriores se multiplicaron por sus correspondientes valores de la tabla Carbono-Nitrógeno de las muestras orgánicas que se muestran a continuación.

Tabla 05: Carbono-nitrógeno de las muestras orgánicas determinadas en el laboratorio de química de la UNJBG de Tacna.

Residuos orgánico	Carbono	Nitrógeno	Relación C/N
Estiércol porcino	12	1	12
Restos vegetales de mercado (1/1)	25	1	25
Hojas pecana	40	1	40

- **Para el estiércol porcino**

$$0,37037 * 12 = 4,444$$

- **Para los restos vegetales**

$$0,37037 * 25 = 9,25925$$

- **Para las hojas de pecana**

$$0,25925 * 40 = 10,37$$

Sumando estos valores se obtuvo la relación C/N de toda la mezcla de 24,073

Para obtener el semicompost se multiplicó por cinco los Kg. del estiércol de porcino y de los restos vegetales.

✓ 10 kg de estiércol	* 5	=	50 kg
✓ 10 kg de residuos orgánicos	* 5	=	50 kg
✓ 7 kg de hojas de pecana	* 5	=	<u>35 kg</u>
			135 Kg de mezcla

3.4.6. Obtención del semicompost

- a) El estiércol porcino obtenido se diluyó en agua en la proporción de 1:4
- b) Las hojas de pecana se les picó en tamaños iguales de 3 cm a 5 cm para facilitar la degradación de la celulosa.
- c) A los restos vegetales de mercado se les mezcló homogéneamente luego se les cortó en tamaños de 2 a 4 cm para obtener una mezcla homogénea.
- d) La mezcla homogénea obtenida se sometió al proceso del prefermentado ; para esto se utilizó el método Indore continuando la secuencia de prefermentación (Itintec, 1 985)

- Se cortó los restos vegetales tanto de mercado como hojas de pecana en trozos de 2 a 4 cm de longitud y se homogenizó.
- Se colocó una quinta parte del homogenizado formando una superficie plana de 10 cm de altura sobre una capa de hojas de pecana que tuvo una altura de 8 cm.
- La forma del área de las capas fue rectangular y tuvo una medida de 1,40 x 0,60 metros.
 - Se humedeció con H₂O de caño de forma uniforme, las dos capas anteriormente preparadas. Sobre estas dos capas se colocó una capa de estiércol porcino diluido (equivalentemente a 10 litros de estiércol porcino diluido)
 - Se roció con lechada de cal al 2% toda la superficie de la capa de estiércol de porcino.
 - En el centro de la pila se colocó una madera en posición vertical, para permitir una ligera aireación.
 - Se repitió la formación de capas por 5 veces y el agregado de lechada de cal.

- Terminando el apilamiento del material, se recubrió la pila con una capa de estiércol porcino diluido, en forma uniforme toda la superficie externa de la pila.
- Se dejó reposar la pila 7 días con cubierta de plástico para acelerar el proceso.
- El material en fermentación a los 7 días se mezcló, hasta obtener un material homogéneo, que luego fue nuevamente apilado y cubierto con estiércol de porcino diluido.
- 7 días después nuevamente el material se mezcló, se apiló y recubrió nuevamente con estiércol de porcino diluido dejándolo en reposo durante 2 días.
- Cumplido el periodo de tiempo de 2 días de reposo, se consideró obtenido el semicompost (Sustrato fermentativo para cargar al digestor)

La preparación del semicompost se inició el 05 de noviembre del 2 009 y terminó el 21 de noviembre del 2 009.

3.4.7. Agregado del semicompost e inóculo al biodigestor: E inicio de la biodigestion (Itintec, 1 985)

Estando el semicompost a “punto”, se inició el cargado inicial teniendo en cuenta que del 10 al 15 % del volumen total del digestor serviría como cámara de almacenamiento de gas y el resto (90 al 85 %) para ser llenado o cargado con el semicompost y el inóculo.

El cargado se realizó como se describe a continuación:

- Se agregó al biodigestor inóculo constituido por rumen de vaca fresco en una cantidad del 10% del volumen del biodigestor (20 litros).
- Se separó un tercio del semicompost preparado y se introdujo en el biodigestor.
- Se le añadió agua 45 litros al biodigestor tratando de mezclarlo con el semicompost bien y en forma uniforme.
- Se repitió el procedimiento hasta completar los tres tercios del semicompost, con un agregado en total de agua de 135 litros y se

siguió mezclando hasta homogenizar totalmente todo el sustrato fermentativo con el agua en el biodigestor.

- Se incubó a temperatura ambiente el biodigestor para que se iniciara la fermentación.

3.4.8. Alimentación periódica al biodigestor (Itintec,1 983)

Se inició a los 25 días de iniciado la incubación del biodigestor y se continuó hasta que se dió por terminado la fermentación. Se determinó el volumen de la carga periódica por la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen de carga (Kg/día)} = \frac{\text{Volumen efectivo del digestor en Kg}}{\text{Tiempo de retención (días)}}$$

$$\text{Volumen de carga} = \frac{152,3 \text{ Kg}}{30 \text{ días}} = 5,07 \text{ Kg de estiércol fresco diluido/día}$$

Se preparó el volumen de carga de la siguiente manera, a un recipiente conteniendo 3,733 litros de H₂O de caño se le agregó y mezcló 1,343 Kg de estiércol porcino fresco. Esta proporción agua estiércol se aplicó en la obtención del semicompost (estiércol porcino diluido) 1:4

Para la alimentación periódica se procedió de la siguiente manera:

- ✓ Se retiró 10 litros de material fermentado por la cámara de salida del biodigestor.
- ✓ Se agregó 10 litros de una mezcla de 5 litros de volumen de carga preparado en el paso anterior con 5 litros de H₂O de caño (1:1) por el canal de entrada del biodigestor.
- ✓ Se continuó dejando incubar el biodigestor.
- ✓ Se agitó la mezcla interior del biodigestor introduciendo una herramienta larga por el canal de entrada, removiendo el material de fermentación en forma circular de arriba hacia abajo.
- ✓ Concluida esta operación, se abrió la válvula del biodigestor para permitir el paso del biogas hacia el gasómetro y el manómetro.

3.4.9. Evaluación de la producción de biogas (Itintec, 1 983)

a) Producción de biogas en el digestor

La primera cosecha de producción de biogas se hizo a los 18 días de iniciado la fermentación cuando en el manómetro de columna de H₂O la presión era elevada. Luego se continuó cosechando y evaluando la producción de biogas diariamente, cada 24 horas en término promedio durante 40 días.

La cosecha de biogas se hizo trasvasando el biogas desde el biodigestor hacia el gasómetro abriendo la llave del biodigestor hasta que en el gasómetro no se registraba incremento de volumen. La llave del biodigestor luego se cerró para continuar la producción de biogas.

La medición de biogas se hizo registrando la diferencia de nivel de agua producida dentro del depósito invertido graduado del gasómetro a causa del desplazamiento del volumen de agua dentro del gasómetro al ingresar el biogas proveniente del biodigestor.

La diferencia de nivel de agua dentro del gasómetro medida en centímetros fue reemplazado en la fórmula siguiente para la determinación del volumen de biogas producido.

Forma de volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 H$$

V = Volumen (cm³)

π = 3,1416

r = radio de la base del recipiente interior graduado o gasómetro = 10 cm

H = Diferencia de nivel desplazamiento de agua registrado en recipiente interior graduado de gasómetro.

b) Medición del pH en el proceso de la biodigestion

Se midió el pH diariamente empleando el método de la cinta y del potenciómetro. Para el método de la cinta se tomó una muestra del medio fermentado del biodigestor y se la depositó en un beacker conteniendo de 50-200 ml de agua destilada. Se agitó cuidadosamente la mezcla hasta obtener una mezcla homogénea dejándola reposar por 15 minutos; finalmente la mezcla se filtró a través de un papel watmann N° 50. Se introdujo dentro del filtrado un pedazo de papel indicador universal Merck de rango 0 a 14 para obtener el valor del pH mediante comparación con la respectiva carta de colores.

c) Medición de la T° del material fermentativo en el proceso de biodigestion

La evaluación de la temperatura se realizó todos los días entre las 7:00 am a 12:30 pm, para lo cual el émbolo del termómetro utilizado estuvo dentro del biodigestor y la parte graduada o escala fuera del biodigestor que sirvió para ver el valor de la temperatura registrada y hacer la lectura diaria correspondiente.

d) Medición de la presión manométrica originada por el biogas acumulado diariamente en el biodigestor

La presión manométrica se midió con el manómetro manual de columna de agua que estuvo acoplado al biodigestor de tal modo que cuando se abría la llave del biodigestor, el biogas fluía hacia el manómetro desplazando una altura de columna de H₂O del manómetro, que medido en centímetros constituyó el valor de la presión de biogas. Esta medición se hizo diariamente paralelo a la cosecha de biogas.

e) Determinación de la calidad y el tiempo de consumo del biogas en un mechero tipo Bunsen

Se conectó la manguera de la cámara de llanta llena de biogas a la entrada de un mechero tipo bunsen. Luego se abrió la llave del mechero y de la cámara para permitir la salida del gas hacia el mechero, inmediatamente con ayuda de un encendedor se prendió fuego al biogas que salía por la boca del mechero. Si el color de la llama era rojo se consideró de mala calidad; naranja a naranja azul de regular calidad; azul transparente de buena calidad.

El tiempo de duración de consumo de biogas se midió en función del tiempo que duró encendida la llama, hasta que se agoto el biogas almacenado en la cámara de llanta. En los primeros minutos el fuego en el mechero se mantenía constante, la presión del biogas que salía de la cámara era suficiente para que se mantuviera el fuego, después de esos primeros minutos se tuvo que hacer presión manual sobre la cámara en forma progresiva hasta que no hubo nada de gas en la cámara para que se mantuviera el fuego en el mechero.

3.5. Análisis estadístico

Se empleo la estadística descriptiva: promedio, desviación estándar, máxima y mínima producción diaria de biogas, así mismo el análisis de correlación lineal para la producción de biogas versus el tiempo de fermentación. Utilizando la herramienta computación del software Excel y programa STATGRAPHICS PLUS versión 5,1.

IV. RESULTADOS

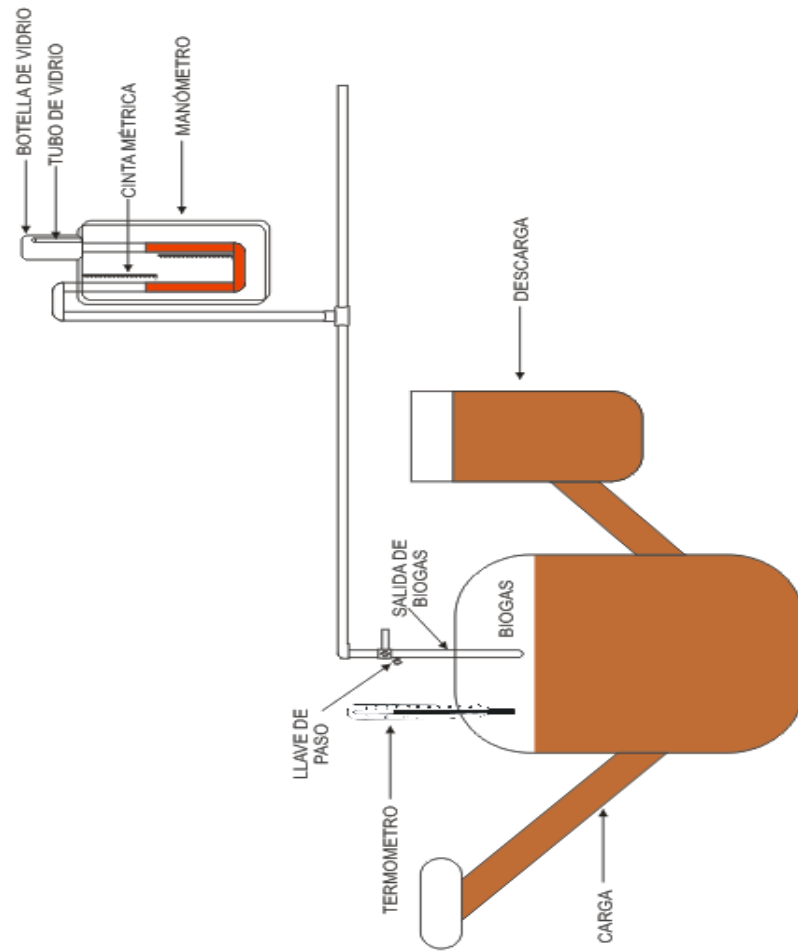
4.1. Biodigestor diseñado y construido

Se diseño y construyó un biodigestor tipo chino modificado, con un volumen de capacidad de 250 litros para un proceso semicontinuo (Foto 05) (Esquema 01)



Foto 05: Biodigestor utilizado en la experimentación

Esquema 01: Biodigestor tipo chino modificado conectado al manómetro de presión de columna de agua



4.2. Semicompost obtenido

Se obtuvo un semicompost a partir de estiércol de porcino, restos vegetales de mercado y hojas de pecana, en un lapso de 17 días por fermentación aeróbica en pila (Foto 06)



Foto 06: Semicompost obtenido en el proceso de experimentación

4.3. Producción diaria de biogas

Se obtuvo producción de biogas por fermentación semicontinua de excremento porcino y semicompost de excremento porcino y restos vegetales desde los 18 días de iniciado la fermentación que fue corroborado cuando se prendió fuego al biogas que se hizo salir a través de un mechero bunsen (Foto 07)



Foto 07: Biogas obtenido y corroborado cuando se prendió fuego.

Esta producción transcurrió en un rango variable de T° interna en el biodigestor desde el inicio hasta termino de la fermentación con un promedio de $28,9^{\circ}\text{C}$ y una desviación estándar de $6,237$ un máximo $35,240$ y un mínimo de $4,948$; así mismo en un rango variable de presión manométrica dentro del biodigestor desde los 18 días de inicio hasta el término de la fermentación del biodigestor con un promedio de $13,87$ cmH_2O (Anexo 01)

La primera evaluación de producción, fue a los 18 días de iniciado la fermentación y la última a los 58 días del inicio de la fermentación; siendo el total de producciones 41.

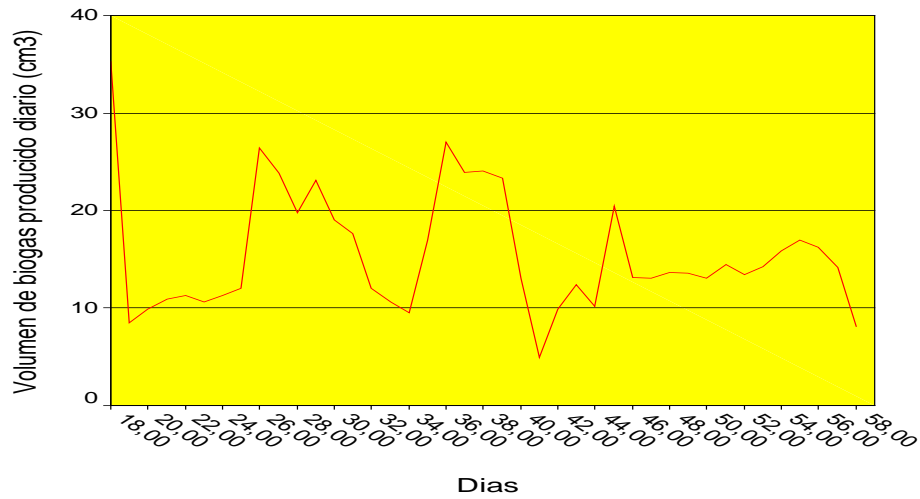
La máxima producción diaria de biogas fue de 35,240 cm³ y la mínima de 4,948 cm³ a los 58 días del inicio de la fermentación (Tabla 06) (Grafica 01)

Tabla 06: Producción diaria de biogas desde los 18 días hasta los 58 días de la fermentación

DÍA DE FERMENTACION	FECHA	PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS cm ³
18	23/11/2009 - 10/12/2009	35,24
19	11/12/2009	8,482
20	12/12/2009	9,896
21	13/12/2009	10,956
22	14/12/2009	11,309
23	15/12/2009	10,602
24	16/12/2009	11,309
25	17/12/2009	12,016
26	18/12/2009	26,436
27	19/12/2009	23,821
28	20/12/2009	19,782
29	21/12/2009	23,114
30	22/12/2009	19,014
31	23/12/2009	17,671
32	24/12/2009	12,016
33	25/12/2009	10,602
34	26/12/2009	9,542
35	27/12/2009	16,964

DÍA DE FERMENTACION	FECHA	PRODUCCION DIARIA DE BIOGAS cm³
36	28/12/2009	27,002
37	29/12/2009	23,891
38	30/12/2009	24,033
39	31/12/2009	23,326
40	01/01/2010	13,076
41	02/01/2010	4,948
42	03/01/2010	9,896
43	04/01/2010	12,370
44	05/01/2010	10,178
45	06/01/2010	20,428
46	07/01/2010	13,147
47	08/01/2010	13,076
48	09/01/2010	13,642
49	10/01/2010	13,571
50	11/01/2010	13,076
51	12/01/2010	14,490
52	13/01/2010	13,430
53	14/01/2010	14,207
54	15/01/2010	15,904
55	16/01/2010	16,964
56	17/01/2010	16,257
57	18/01/2010	14,137
58	21/01/2010	8,128

Fuente: Datos experimentales



Grafica 01: Producción diaria de biogas desde los 18 hasta los 58 días de la fermentación.

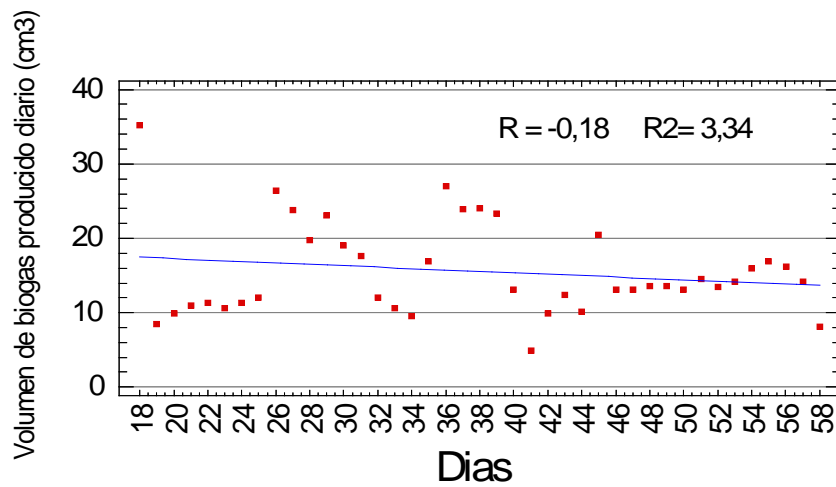


Grafico 02: Correlación lineal de la producción diaria de biogas versus tiempo de fermentación.

El coeficiente de correlación de Pearson, $R = -0,18$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogas disminuye, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 3,34\%$ indica que el 3,34 % del volumen de gas producido se debe a los días de fermentación.

Tabla 07: Análisis estadístico descriptivo de la producción diaria biogas desde los 18 días hasta los 58 días de la fermentación

N°	Media	Desviación estándar	Varianza	Rango	
				Mínimo	Máximo
41	15,56	6,237	38,909	4,948	35,240

Fuente: elaboración propia

La Tabla 07 señala que promedio de la producción de biogas fue $15,56 \text{ cm}^3$, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias $6,237 \text{ cm}^3$. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de $4,948 \text{ cm}^3$ y el rango máximo $35,240 \text{ cm}^3$ con una varianza de 38,909 respectivamente.

4.4. Producción acumulada de biogas: La producción acumulada de biogas es de 644,668 cm³ a los 58 días de la fermentación.

Tabla 08: Producción acumulada de biogas hasta los 58 días de la Fermentación

DÍA DE FERMENTACION	FECHA	PRODUCCION ACUMULADA DE BIOGAS EN CM ³
18	23/11/2009 - 10/12/2009	35,24
19	11/12/2009	43,722
20	12/12/2009	53,618
21	13/12/2009	64,574
22	14/12/2009	75,883
23	15/12/2009	87,192
24	16/12/2009	97,794
25	17/12/2009	109,81
26	18/12/2009	134,246
27	19/12/2009	160,682
28	20/12/2009	184,503
29	21/12/2009	204,285
30	22/12/2009	227,399
31	23/12/2009	246,413
32	24/12/2009	264,084
33	25/12/2009	276,10
34	26/12/2009	286,702
35	27/12/2009	296,244
36	28/12/2009	313,208
37	29/12/2009	340,21
38	30/12/2009	364,101
39	31/12/2009	388,134
40	01/01/2010	411,46
41	02/01/2010	424,536
42	03/01/2010	429,484
43	04/01/2010	439,38
44	05/01/2010	451,75

DÍA DE FERMENTACION	FECHA	PRODUCCION ACUMULADA DE BIOGAS EN CM ³
45	06/01/2010	461,928
46	07/01/2010	482,356
47	08/01/2010	495,503
48	09/01/2010	508,579
49	10/01/2010	522,221
50	11/01/2010	535,792
51	12/01/2010	548,868
52	13/01/2010	563,358
53	14/01/2010	576,788
54	15/01/2010	590,995
55	16/01/2010	606,899
56	17/01/2010	623,863
57	18/01/2010	636,12
58	21/01/2010	644,668

Fuente: Datos experimentales

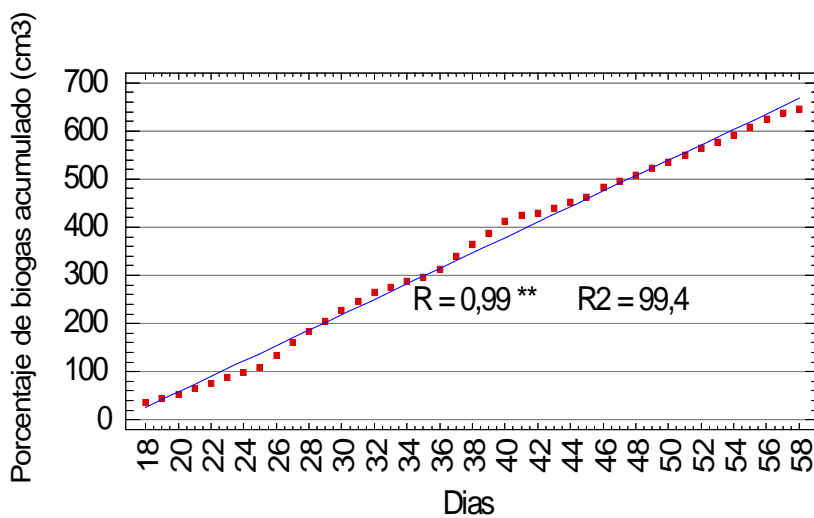


Gráfico 03: Volumen acumulado de biogás versus tiempo de fermentación.

En el gráfico 03 se observa el volumen acumulado de biogas donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R= 0,99 **$ señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de de determinación fue de 99,44%. El volumen acumulado de biogas fue de $644,668 \text{ m}^3$ durante la etapa del ensayo.

Tabla 09: Análisis estadístico descriptivo de la producción de gas acumulada

N°	Media	Desviación estándar	Varianza	Rango	
				Mínimo	Máximo
41	34,55	192,72	37140,89	35,240	644,668

Fuente: elaboración propia

La Tabla 09 señala que promedio de la producción de acumulada biogas fue $34,55 \text{ cm}^3$, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias $192,72 \text{ cm}^3$. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de $35,240 \text{ cm}^3$ y el rango máximo $644,668 \text{ cm}^3$ con una varianza de 37140,89 respectivamente.

V. DISCUSIÓN

El biogas obtenido, ha sido de buena calidad, es producido por bacterias en la biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias (sin aire) y está constituido principalmente por gas metano (Sandoval, 2 006)

La aplicación de los procesos anaerobios tiene interesantes perspectivas ya que, no solo se podían alcanzar resultados positivos en la mejora del medio ambiente, sino que, además, se obtendrían cantidades importantes de biogas de múltiples usos, esto permitiría amortizar, en parte en algunos casos totalmente, la inversión de no solo el proceso anaerobio sino también de la planta de tratamiento de residuales que se construya (De la Fuente, 1 995)

La característica de ser combustible sobre todo cuando se encuentra en un 70 % a más dentro de la mezcla de gases que compone el biogas permite identificar al biogas como de buena calidad al ser encendido y originar una llama de color azul transparente y sin olor (Omer y Fadalla, 2 003)

La producción de biogas está influenciada por varios factores como son el tipo de sustrato fermentativo, la temperatura, el tipo de fermentación, la relación carbono nitrógeno en el sustrato entre otros.

Existen diversos procesos para convertir la biomasa en energía, estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos para producir combustibles, siendo el más importante la digestión anaerobia, proceso en que la biomasa a través de las bacterias generan un gas combustibles llamado biogas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono, además de la materia sólida remanente del proceso que es un buen fertilizante orgánico (Jeason, 2 000)

El volumen promedio diario y acumulado de biogas obtenido son valores significativos. Comparado a otras investigaciones. Para Tacna se tiene el reporte de una poquísima producción de biogas por fermentación discontinua de excremento de cuy (Delgado, 2 006); así de mismo de una producción acumulada de 452 litros de biogas en 7 meses y 19 días de fermentación discontinua de excremento de cuy con rastrojo vegetal (Castillo y Tito, 2 010)

El biodigestor tipo chino modificado diseñado y construido en este trabajo ha sido eficiente para los objetivos planteados, ha permitido que haya facilidad para la realización de la fermentación semicontinua de producción de biogas sin que origine en ella problemas, rajaduras o deterioro (Contreras, 2 006)

El diseño de este biodigestor hecho en base a fibra de vidrio se constituye en una alternativa diferente a otros diseños de biodigestores para la producción de biogas. No se ha encontrado reportes sobre biodigestores hecho en base a fibra de vidrio.

China es hoy la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, aproximadamente 6,7 millones (Lugones, 2 001)

La planta de Grinda cerca de Oslo (noruega procesa 50,000 toneladas de desecho domésticos por año, y utiliza un nuevo proceso para convertir alrededor del 55% de estos desechos en briqueta de combustible, las cuales utilizan una planta papelera local como una fuente alternativa de energía para sus procesos de producción. Del resto de los desechos, el 35% se procesa para abono orgánico, y el 10 % restante por lo general metales, piedra y vidrio se elimina en vertederos (The Regency Corporation Limited, 1 998)

En Dinamarca, la planta de incineración de Amagerforbraending procesa 320,000 toneladas de desechos domésticos por año una tercera parte del total de la zona y extrae suficiente energía para establecer 1,5 millón de giga joules en calefacción para este distrito. Todas las fases de la generación se controlan por ordenadores supermodernos que también atienden técnicas de tratamiento y filtración de los gases de combustión. Esto lleva a mantener las emisiones dentro de los valores que dictan las normas (The Regency Corporation Limited, 1 998)

En Europa Alemania es líder en biodigestores industriales (2,500 Mw. instalados al 2004) (Tardillo y col., 2 008)

Un proyecto de implementación de biodigestores en Bolivia se desarrolló en comunidades campesinas de Mizque 2,200 metros de altura, Cochabamba-Bolivia, el año 2001. Lo cual sirvió de experiencia piloto para que se aplique los digestores de polietileno tubular de bajo costo fuera de ecorregiones tropicales a nivel internacional, y ha significado el principio de difusión de esta tecnología apropiada en Bolivia. Tanto la aceptación y participación de los campesinos como la viabilidad de estos temas fuera del trópico ha sido un éxito (Campero, 2 007)

En el Perú existen 106 biodigestores (en 15 departamentos) con predominio de modelos artesanales chinos (Tardillo y col., 2 008)

Como todo proceso biológico, la digestión anaerobia debe ser controlada, pues existen diversos factores que influyen considerablemente el éxito o no de la misma. Un desbalance en alguno de estos factores puede provocar la ruptura del equilibrio entre las comunidades microbianas y por consiguiente el no funcionamiento del sistema, la no producción de biogas (Flotats, 1 997)

En la zona de Huachipa en Lima, una empresa privada ha implementado un proyecto con fines energéticos usando la basura (seleccionada) de cuatro distritos de Lima (Tardillo y col., 2 008)

En Tacna se conoce que existió un biodigestor modelo tipo chino que estuvo en funcionamiento para la producción de biogas y también para obtener biofertilizantes a partir de los residuos sólidos orgánicos, éste modelo de biodigestor, se encuentra en el distrito de la Yarada donde se tiene conocimiento que abastecio de energía eléctrica aprox. a una familia; según informa el Sr. Alfonso Valdivia.

La investigación realizada sobre producción de biogas promueve la importancia y atención que se le debe dar para contribuir con el desarrollo del país, en otros países los estudios y aplicaciones sobre las biotransformaciones de material orgánico para obtener biogas están bastantes desarrolladas.

VI. CONCLUSIONES

1. Se diseño y construyó un biodigestor para fermentación semicontinua de producción de biogas.
2. Se obtuvo semicompost a partir de restos vegetales y estiércol porcino en un tiempo de 17 días de fermentación aeróbica en pila.
3. Se produjo biogas de buena calidad a partir de estiércol porcino, hojas de pecana y residuos vegetales que se expenden en el mercado.
4. Se obtuvo una producción promedio diario de biogas de $14,864 \text{ cm}^3$ a partir de los 18 días de iniciada la fermentación y una producción acumulada $644,668 \text{ cm}^3$ en 58 días en que termino la fermentación.

VII. RECOMENDACIONES

1. Investigar la mejora del sistema de compostaje haciendo uso de microorganismos iniciadores obtenidos en otras pilas durante la etapa final.
2. Investigar la producción de biogas por fermentación discontinua los mismos con substratos empleados en este trabajo.
3. Es importante dar a conocer la tecnología de sistemas de tratamiento de excretas de ganado porcino utilizando biodigestores en las comunidades que lo requieran, ya que en la mayoría de nuestro país se conoce muy poco de los beneficios que tiene el tratar adecuadamente las excretas.

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. Bravo G., J. 1 992. Construcción de un Biodigestor en Ferrocemento. Tesis. Valdivia, Univ. Austral de Chile, Fac. Cs.
2. Contreras, L. 2 006. Producción de biogas con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico
3. Campero Rivero, Oliver. 2 007. Tecnologías en desarrollo. Cochabamba-Bolivia.
4. Castillo C., Daladier y Carlos Tito V. 2 010. Obtención de biogas a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna-Perú. ESBI.FACI.COIN.UNJBG.TACNA-PERU.
5. De la Fuente, E. 1 995. Estudio de la producción de biogas en una unidad experimental de Relleno sanitario, trabajo de tesis para optar al grado de Ingeniero Civil Industrial, Otorgado por la Universidad de Barcelona, España
6. Dobelmann J.K. and D.H. Müller. 2 000. "The sustainable winery". ABIRER, Germany.

7. Delgado T., Victorino. 2 006. Production de biogas de estiercol de cuy (*cavia porcelus*). ESBI.FACI.COIN.UNJBG.TACNA-PERU.
8. Flotats, X.1 997. Digestión Anaerobia Termofílica de Purines de Cerdo y Lodos de Plantas Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas. Congreso Ambiental, Bilbao.
9. Flotats, X., Bonmati, A., Campos, E., Teira, R. 2 000. El proceso de secado de purines en el marco de Gestión Integral de Residuos Ganadero, Tratamiento de residuos ganaderos, Enero, Madrid (España)
10. Guevara Vera, Antonio. 1 996. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Oficina regional de la organización mundial de la salud. Lima-peru
11. Hernández, S. 2 004. Metodología de la investigación. Ediciones McGraw – Hill. Edo. De México.
12. Itintec. 1 980. Evacuación de Biogas a nivel de laboratorio. ITINTEC. Perú.

13. Itintec. 1 983. Como construir un Biodigestor,” Hágalo Usted Mismo”. ITINTEC. Perú.
14. Itintec. 1 985. Operación, Control y Mantenimiento de Digestores ITINTEC. Perú.
15. Jeason, D. 2 000. Avances en Biotecnología Ambiental, tratamiento de residuos líquidos y sólidos, vol 1, pp 35-52, Ed Acribia, Madrid, España
16. Jarauta, L., 2 004. Digestión Anaeróbica para el Tratamiento de Residuos Orgánicos, caso Perú. PERU. 128 p.
17. Lay, J., li, Y., Noyke, T. 1 998. “The Influence of pH and Ammonia Concentration on the Methane Production in High-Solids Digestion Processes”. Water Environment Research, Vol 50, N°5.
18. Lugones López, Bárbaro. 2 001. Análisis de biodigestores; Especialista de Cubaenergía. Miembro de Cubasolar. Cuba.
19. Omer, M.A., Y. Fadalla. 2 003. Biogas energy technology in Sudan. Renewable Energy. 28:499-507.

20. Rilling L., E. 1 985. Construcción y Prueba de un Biodigestor Anaeróbico con Estiércol de Vacuno. Tesis. Valdivia, Univ. Austral de Chile, Fac. Cs. Ag.
21. Sandoval Alvarado, Leandro. 2 006. Manual de Tecnologías Limpias en PYMES del Sector Residuos Sólidos. Concytec – Perú.
22. The Regency Corporation Limited. 1 998. El desarrollo económico y las Tecnologías Ecológicas. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; Una Empresa con futuro. Londres-Reino Unido.
23. Tardillo H, Guillermo A. 2 008. Situación Actual de Las Energías Renovables en el Perú. Ministerio de Energía y Minas, Oficina de Planeamiento, Inversiones y Cooperación Internacional. Tarapoto-Perú.
24. Valdivia Tapia, Raúl Vicente. 2 000. Uso de Biogas para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado.
25. Veeken, A., Hamelers, B. 2 000. Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowast. Review Technology, vol 5.
26. <http://www.redrrss.pe/material/20090128192419.pdf>

27. <http://waste.ideal.es/biodigestores.htm>
28. <http://www.bioenergylists.org/techdesbiogas>
29. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/ENERGIA22/HTML/articulo04.ht>
30. http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/GVEP/talleres/expo_tarapoto.pdf

IX. ANEXOS

ANEXO 01: Datos tomados en Noviembre, Diciembre del 2 009 y Enero del 2 010

FECHA	DÍA DE FERMENTACION	DÍA DE PRODUCCION	DÍA DE CARGA	T (°C)	PRESION (Cm de H2O)	PH	PRODUCCION DIARIA DE BIOGAS CM ³	PRODUCCION ACUMULADA DE BIOGAS CM ³
23/11/2009	1	_____	_____	25	12	6.69		
24/11/2009	2	_____	_____	40.5	25	6.84		
25/11/2009	3	_____	_____	30	15	7.04		
26/11/2009	4	_____	_____	25.5	21	6.84		
27/11/2009	5	_____	_____	24	12	7.04		
28/11/2009	6	_____	_____	26	12.5	7.05		
29/11/2009	7	_____	_____	21.4	9.5	7.3		
30/11/2009	8	_____	_____	22.7	12.5	6.85		
01/12/2009	9	_____	_____	29	14	6.84		
02/12/2009	10	_____	_____	36	23	7.04		
03/12/2009	11	_____	_____	35	22.5	7.72		
04/12/2009	12	_____	_____	23.8	12.8	6.85		
05/12/2009	13	_____	_____	25	21.5	6.84		
06/12/2009	14	_____	_____	32	15.5	6.24		
07/12/2009	15	_____	_____	24	12	6.5		
08/12/2009	16	_____	_____	27	13.5	6.68		
09/12/2009	17	_____	_____	29	14.8	7.3		
10/12/2009	18	_____	_____	31	15	7.5	35,24	35,24
11/12/2009	19	1	_____	24.5	12.9	6.69	8,482	43,722
12/12/2009	20	2	_____	29	15	6.84	9,896	53,618
13/12/2009	21	3	_____	24.3	11.5	7.04	10,956	64,574
14/12/2009	22	4	_____	28.5	11.5	6.84	11,309	75,883
15/12/2009	23	5	_____	34.5	14.9	7.04	10,602	87,192
16/12/2009	24	6	_____	29	12.9	7.05	11,309	97,794
17/12/2009	25	7	_____	31	13.4	7.3	12,016	109,81
18/12/2009	26	8	_____	36	10.9	6.85	26,436	134,246
19/12/2009	27	9	_____	28.8	15	6.84	23,821	160,682
20/12/2009	28	10	_____	25	13	7.04	19,782	184,503

FECHA	DÍA DE FERMENTACION	DÍA DE PRODUCCION	DÍA DE CARGA	T (°C)	PRESION (Cm de H2O)	PH	PRODUCCION DIARIA DE BIOGAS cm ³	PRODUCCION ACUMULADA DE BIOGAS cm ³
21/12/2009	29	11		25.7	11	7.72	23,114	204,285
22/12/2009	30	12	10	27.5	8	6.85	19,014	227,399
23/12/2009	31	13		24	12	6.84	17,671	246,413
24/12/2009	32	14		23.3	15.5	7.7	12,016	264,084
25/12/2009	33	15		31	14	7.05	10,602	276,10
26/12/2009	34	16		22	15	7.3	9,542	286,702
27/12/2009	35	17	10	26	19	6.85	16,964	296,244
28/12/2009	36	18		28	20	6.84	27,002	313,208
29/12/2009	37	19		24.7	18.5	7.04	23,891	340,21
30/12/2009	38	20		24.9	18.7	7.8	24,033	364,101
31/12/2009	39	21		26	18.1	6.69	23,326	388,134
01/01/2010	40	22	10	31.9	14.1	6.84	13,076	411,46
02/01/2010	41	23		27	13	7.7	4,948	424,536
03/01/2010	42	24		38.5	12.7	7.05	9,896	429,484
04/01/2010	43	25		27.3	9.3	7.3	12,370	439,38
05/01/2010	44	26		28.5	9.1	6.85	10,178	451,75
06/01/2010	45	27	10	28.2	10.2	6.84	20,428	461,928
07/01/2010	46	28		29	11.6	7.8	13,147	482,356
08/01/2010	47	29		29.2	9.7	7.05	13,076	495,503
09/01/2010	48	30		27.5	8.5	7.3	13,642	508,579
10/01/2010	49	31		32.7	11.5	6.85	13,571	522,221
11/01/2010	50	32	10	28.7	11.3	6.84	13,076	535,792
12/01/2010	51	33		32.5	12.1	7.7	14,490	548,868
13/01/2010	52	34		26	10	7.05	13,430	563,358
14/01/2010	53	35		28.5	8.7	7.04	14,207	576,788
15/01/2010	54	36		41.5	14.8	7.05	15,904	590,995
16/01/2010	55	37	10	37.5	15.7	7.3	16,964	606,899
17/01/2010	56	38		28	14	6.85	16,257	623,863
18/01/2010	57	39		37.5	12.2	6.84	14,137	636,12

21/01/2010	58	40	_____	41.5	15.5	7.04	8,128	644,668
FECHA	DÍA DE FERMENTACION	DÍA DE PRODUCCION	DÍA DE CARGA	T (°C)	PRESION (Cm de H2O)	PH	PRODUCCION DIARIA DE BIOGAS cm³	PRODUCCION ACUMULADA DE BIOGAS cm³
TOTAL	_____	_____	_____	_____	_____	_____	644,668	
PROMEDIO	_____	_____	_____	28.9	13.87	7.05	14,864	

Fuente: Datos experimentales



ANEXO 02: Prefermentado, realizado en el Inprex de la UNJBG.



ANEXO 03: Materia prima a cargar a biodigestor



ANEXO 04: Remoción de materia prima para mejorar el prefermentado



ANEXO 05: Mezcla y rociado de agua al prefermentado



ANEXO 06: Agregado de capa de estiércol al prefermentado



ANEXO 07: Final del apilamiento en capas



ANEXO 08: Biodigestor modelo tipo Chino Modificado



ANEXO 09: Domo superior del Biodigestor donde se observa; el termómetro y las llaves de paso que permiten la salida de biogas del Biodigestor, uno al Manómetro y otro al Gasómetro



ANEXO 10: Manómetro utilizado



ANEXO 11: Gasómetro del biodigestor utilizado



ANEXO 12: Obtención de biogas



ANEXO 13: Volumen de biogas obtenido en Gasómetro



ANEXO 14: Medición del biogas obtenido en Gasómetro



ANEXO 15: Recolección de estiércol porcino para la carga al Biodigestor



ANEXO 16: Estiércol porcino fresco



ANEXO 17: Estiercol listo para la alimentación al biodigestor



ANEXO 18: Final de la carga al Biodigestor



ANEXO 19: Biol obtenido al final de la alimentación al Biodigestor



ANEXO 20: Biogas obtenido, probado en un mechero bunsen