

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

**“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO,
UTILIZANDO ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO Y
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (TORTA DE PIÑÓN,
CASCARILLA DE ARROZ Y RUMEN DE GANADO VACUNO)
EN LA E.E.A. EL PORVENIR - DISTRITO DE JUAN GUERRA”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PRESENTADO POR:

Bach. ERIK CORNEJO RAMÍREZ.

TARAPOTO – PERÚ

2012

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN MARTÍN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

**“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO,
UTILIZANDO ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO Y
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES (TORTA DE PIÑÓN,
CASCARILLA DE ARROZ Y RUMEN DE GANADO
VACUNO) EN LA E.E.A. EL PORVENIR - DISTRITO DE
JUAN GUERRA”.**


TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Presentado por el Bachiller

ERIK CORNEJO RAMÍREZ



Ing. M. Sc. Carlos Rafael Maldonado Tito
PRESIDENTE



Ing. M. Sc. Enrique Terleira García
SECRETARIO



Ing. M. Sc. Jaime Guillermo Guerrero Marina
MIEMBRO



Ing. Dra. Mari Luz Medida Vivanco
ASESOR

DEDICATORIA

Esta tesis es la culminación de mis estudios, pero sin duda el punto final a un duro camino que he tenido que recorrer hasta poder coronar la cima de este Everest particular y donde que sin el apoyo de ciertas personas no hubiera sido posible.

Dedico esta tesis de graduación a:

A Dios a mi gran padre celestial, que siempre estuvo y está conmigo en todos los momentos, por haberme dado la vida, la sabiduría y el entendimiento para alcanzar mis objetivos.

A mis padres MADRITH RAMÍREZ CORDOVA y ANIBAL P. CORNEJO GOMEZ que me educaron en la infancia y que siempre me apoyaron en la búsqueda de alcanzar mis objetivos. Sé que este día será especial para mis padres, por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

A mi hermana ANDREA LUZ CORNEJO RAMIREZ por su apoyo, confianza y por las fuerzas que me inspiran, que me llena por dentro para conseguir un equilibrio que me permita dar el máximo de mí.

A todos mis tíos en especial MIGUEL LOZANO, ELIANA RAMÍREZ, DORIS CALDERON, WALDIR ARIAS, ALEJANDRO CORNEJO, SULMITH Y ALBERTO RAMIREZ por creer en mí y estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar, gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y profesional.

A mis amigos CARLOS SANTILLAN DE LA CRUZ Y JIMMY MORENO SALCEDO, por el entusiasmo de vida por estar a mi lado y compartir conmigo alegrías y tropiezos por compartir parte de su vida conmigo y por seguir siendo mis mejores amigos.

En fin, a todas las personas que de manera directa o indirecto me apoyaron en la realización de este trabajo, a todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Y en memoria de un gran primo hermano JUANITO M. CORNEJO BALDEÓN, que fue un gran hijo, hermano, padre, profesional y un gran bombero, orgulloso de poder haberte conocido y poder saber la gran persona que fuiste y serás por siempre, descansa en paz hermano, algún día nos volveremos a ver.

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud, principalmente está dirigida a DIOS por haberme dado la existencia y por permitirme concluir una etapa más en mi vida profesional.

A mi asesor de tesis Dr. Ing. MARI LUZ MEDINA VIVANCO catedrática de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de San Martín y una de las personas que más admiro por su inteligencia y sus conocimientos, por su asesoramiento, su paciencia y su saber, en la ejecución del presente trabajo de investigación.

Al mi coasesor Ing. RICHER GARAY MONTES, agradezco de manera especial y sincera por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Estación Experimental Agraria El Porvenir, por acogerme en su institución, por darme la oportunidad de realizar mí proyecto.

Al Ing. ANTONIO ARCE GARCÍA Director del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Estación Experimental Agraria El Porvenir, gracias a su hospitalidad y por el soporte institucional dado para la realización de este trabajo, hago extensivo mi más sincero agradecimiento, en la realización de este proyecto.

Al SNV y a los miembros conformado por dicha institución por el apoyo brindado con equipos y su colaboración para alcanzar los objetivos perseguidos.

A mis compañeros de labores: Jorge Fasanando, Marlon Guevara, Gabriel Ramírez, Alan Moreno, agradezco su colaboración y disponibilidad. Al Ing. Cesar Priale y Juan Carlos López, agradezco su amabilidad y apoyo técnico fue de gran ayuda durante mis estancias en el laboratorio, las cuales tuve todo el soporte profesional y logístico.

A la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de San Martín y a todos los maestros de mi vida estudiantil.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Biogás.....	4
2.2.	Digestión anaeróbica.....	4
2.3.	Composición de biogás.....	5
2.4.	Proceso de producción de biogás.....	5
2.4.1.	Hidrólisis.....	6
2.4.2.	Acidogénesis.....	6
2.4.3.	Acetogénesis.....	6
2.4.4.	Metanogénesis.....	7
2.5.	Biodigestor.....	7
2.6.	Digestor experimental batch.....	8
2.7.	Tratamiento de co-sustratos (co-digestión).....	9
2.8.	Materia prima para la producción de biogás.....	11
2.8.1.	Estiércol de ganado vacuno.....	11
2.8.2.	Torta de piñón.....	13
2.8.3.	Cascarilla de arroz.....	15
2.8.4.	Rumen de ganado vacuno.....	17
2.9.	Factores determinantes para el proceso de digestión.....	18
2.9.1.	Temperatura.....	19
2.9.2.	Rangos de pH.....	19
2.9.3.	Contenido de sólidos.....	20
2.9.4.	Relación carbono/nitrógeno.....	20
2.9.5.	Porcentaje de composición de la dilución.....	21
2.9.6.	Inhibidores.....	22
2.9.7.	Agitación-mezclado.....	22
2.9.8.	Tiempo de retención.....	23
2.10.	Utilización de biogás.....	24
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1.	Lugar y fecha de ejecución.....	25

3.2.	Materiales y reactivos.....	25
3.2.1.	Materiales de laboratorio.....	25
3.2.2.	Reactivos de laboratorio.....	26
3.2.3.	Equipos del laboratorio.....	26
3.2.4.	Materiales Utilizados en la construcción de los biodigestores.....	26
3.3.	Metodología.....	27
3.3.1.	Producción de biogás.....	27
3.3.2.	Análisis físico-químico de la materia prima.....	33
3.4.	Diseño experimental.....	33
3.4.1.	Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-torta de piñón.....	33
3.4.2.	Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-cascarilla de arroz.....	33
3.4.3.	Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-rumen de ganado vacuno.....	34
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1.	Análisis físico-químico.....	35
4.1.1.	Caracterización de la materia prima.....	35
4.1.1.1.	Estiércol de ganado vacuno.....	35
4.1.1.2.	Torta de piñón.....	36
4.1.1.3.	Cascarilla de arroz.....	37
4.1.1.4.	Rumen de ganado vacuno.....	38
4.1.2.	Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado bovino mezclado con torta de piñón.....	39
4.1.2.1.	Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua.....	39
4.1.2.2.	Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua.....	40
4.1.2.3.	Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua.....	41

4.1.2.4.	Influencia de la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	44
4.1.2.5.	Influencia de la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días.....	46
4.1.3.	Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado bovino mezclado con cascarilla de arroz.....	48
4.1.3.1.	Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua.....	48
4.1.3.2.	Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua....	49
4.1.3.3.	Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua.....	50
4.1.3.4.	Influencia de la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	53
4.1.3.5.	Influencia de la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días.....	54
4.1.4.	Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado bovino mezclado con rumen de ganado vacuno.....	57
4.1.4.1.	Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua.....	57
4.1.4.2.	Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua.....	58
4.1.4.3.	Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua.....	59
4.1.4.4.	Influencia de la adición de rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de	

	biogás a los 35 días.....	62
4.1.4.4.	Influencia de la adición de rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días.....	64
V.	CONCLUSIONES.....	66
VI.	RECOMENDACIONES.....	67
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	68
VIII.	ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Esquema de la producción de biogás.....	31
Figura 2:	Flujograma experimental.....	32
Figura 3:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	40
Figura 4:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	41
Figura 5:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	42
Figura 6:	Análisis de superficie de respuesta de producción de biogás con la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	45
Figura 7:	Análisis de superficie de respuesta de producción de metano con la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	47
Figura 8:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	49
Figura 9:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	50
Figura 10:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	51

Figura 11:	Análisis de superficie de respuesta de producción de biogás con la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	54
Figura 12:	Análisis de superficie de respuesta de producción de metano con la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	56
Figura 13:	Volumen de biogás acumulado (estiércol-rumen de ganado); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	58
Figura 14:	Volumen de biogás acumulado (estiércol- rumen de ganado); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	59
Figura 15:	Volumen de biogás acumulado (estiércol- rumen de ganado); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.....	60
Figura 16:	Análisis de superficie de respuesta de producción de biogás con la adición de rumen de ganado en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	63
Figura 17:	Análisis de superficie de respuesta de producción de metano con la adición de rumen de ganado en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1:	Composición típica del biogás.....	5
Cuadro 2:	Composición de estiércol de ganado vacuno.....	12
Cuadro 3:	Composición de estiércol de la torta de piñón.....	15
Cuadro 4:	Composición de la cascarilla de arroz.....	16
Cuadro 5:	Composición del rumen de ganado vacuno.....	18
Cuadro 6:	Dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua.....	29
Cuadro 7:	Dilución 33.3% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6% de agua.....	29
Cuadro 8:	Dilución 25% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua.....	29
Cuadro 9:	Composición físico-química promedio (%) del estiércol de ganado vacuno.....	35
Cuadro 10:	Composición físico-química promedio (%) de la torta de piñón.....	36
Cuadro 11:	Composición físico-química promedio (%) de la cascarilla de arroz.....	37
Cuadro 12:	Composición físico-química promedio (%) del rumen de ganado vacuno.....	38
Cuadro 13:	Promedio de producción de metano (%) producido en 35 días en los biodigestores con estiércol de ganado y torta de piñón.....	46
Cuadro 14:	Promedio de producción de metano (%) producido en 35 días en los biodigestores con estiércol de ganado y cascarilla de arroz.....	55
Cuadro 15:	Promedio de producción de metano (%) producido en 35 días en los biodigestores con estiércol de ganado y rumen de ganado vacuno.....	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1:	Análisis de varianza de la producción de biogás con torta de piñón a los 35 días.....	75
Anexo 2:	Análisis de varianza de la producción de biogás con cascarilla de arroz a los 35 días.....	75
Anexo 3:	Análisis de varianza de la producción de biogás con rumen de ganado vacuno a los 35 días.....	76
Anexo 4:	Análisis de varianza de la producción de metano con torta de piñón a los 35 días.....	76
Anexo 5:	Análisis de varianza de la producción de metano con cascarilla de arroz a los 35 días.....	77
Anexo 6:	Análisis de varianza de la producción de metano con rumen de ganado vacuno a los 35 días.....	77
Anexo 7:	Imágenes referente al desarrolla de la investigación.....	78

RESÚMEN

En el presente trabajo se estudió la obtención de biogás con el estiércol de ganado vacuno y los residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado bovino). Los biodigestores fueron botellas de plástico de 1750 ml. El biogás producido se colectó por desplazamiento de agua, en botellas calibradas de plástico de 260 ml, durante 35 días. El objetivo principal fue determinar el rendimiento óptimo de la mezcla de estiércol y residuos agroindustriales en la producción de biogás. Además de evaluar la producción de biogás generado por las mezclas de estiércol con los residuos agroindustriales. Dicho trabajo se realizó en las instalaciones de la E.E.A. El PORVENIR – INIA, ubicada en el distrito de Juan Guerra, Provincia de San Martín.

Para evaluar el rendimiento se trabajó con los combinaciones de mezclas en peso (%), sustrato : co-sustrato (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60) y con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p) 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

Se determinó que la producción de biogás es mas alta con la mezcla, estiércol: torta de piñón (50:50) y en la relación de dilución, mezcla : agua (50:50), pero presentando un contenido de metano del 5.5%.

La mayor producción de metano obtenida con la torta de piñón fue de 20.7%, con la mezcla, estiércol : torta de piñón (20:80) y la relación de dilución, mezcla : agua (25:75), con una producción 1248 ml de biogás/ kg de mezcla, resultando un biogás de baja calidad, no siendo factible para la combustión y/o producción de energía. La cascarilla de arroz brinda favorables condiciones para la producción de biogás generando una producción de 2735 ml de biogás/ kg de mezcla, con la mezcla, estiércol : cascarilla de arroz (50:50), con la relación de dilución, mezcla : agua (33.3:66.6), presentando un contenido de metano del (48.9%). Al igual que el rumen de ganado bovino, generando una producción de 1128 ml de biogás/ kg de mezcla con la mezcla, estiércol : rumen de ganado vacuno (50:50), con la relación de dilución, mezcla : agua (50:50), presentando un contenido de metano del (47.2%).

Palabras clave: Biogás, digestores tipo Batch, producción de biogás.

ABSTRACT

This work carried out with the waste from cattle manure and agro-industrial waste (pinion cake, rice bran and rumen of cattle) to produce biogas. The digesters were plastic bottles of 1750 ml. The biogas produced was collected by water displacement, calibrated plastic bottles of 260 ml, during 35 days. The main objective was to determine the optimum mix of manure and agro-industrial waste in biogas production. Also to evaluate the generation of biogas manure mixes with agro-industrial waste. This work was conducted in the premises of the EEA El Porvenir - INIA, located in the district of Juan Guerra, Province of San Martín.

To evaluate the performance of working with mixtures combinations in weight (%) substrate: co-substrate (100:0, 80:20, 50:50 and 40:60), with dilutions,% mixture:% water (w / w) 50:50; 33.3:66.6, and 25:75 respectively.

It's determined that biogas production is higher with the mixture, manure: cake pinion (50:50) and the dilution ratio, mixture: water (50:50), but having a methane content of 5.5%.

The increased production of methane obtained with cake pinion was 20.7%, with the mixture, manure: cake pinion (20:80) and the dilution ratio, mixture: water (25:75), producing 1248 ml biogas / kg of mixture, resulting in a low quality biogas, is unfeasible for combustion and / or energy production. Rice hulls provides favorable conditions for generating biogas production of biogas 2735 ml of biogas/ kg of mixture, with the mixture, substrate: co-substrate (50:50), with the dilution, mix: water (33.3:66.6), presenting a methane content (48.9%). Like the rumen of cattle, generating a production of 1128 ml of biogas / kg of mixture to the mixture, substrate: co-substrate (50:50), with the dilution, mix: water (50:50) presenting a methane content of (47.2%).

Keywords: Biogas, digesters type Batch, biogas production.

I. INTRODUCCIÓN

El país donde se desarrolló por primera vez la tecnología de los biodigestores fue la India, donde se construyó la primera instalación para producir biogás, fecha cercana al año 1900; a partir de ese momento se ha incrementado el número de biodigestores en ese país y actualmente funcionan alrededor de 200,000 unidades. Sin embargo, China es la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, aproximadamente 6.7 millones (**Ardón, 1992**).

En el Perú esta tecnología se encuentra muy difundida en Cajamarca y Puno contando con plantas dedicadas a la producción de biogás a partir del estiércol del ganado bovino y cerdo, ya que en el Perú se cuenta con una población rural, dedicados a la producción agrícola, pecuario y forestal por ello podemos comprender la importancia de impulsar esta tecnología alternativa ya que el biogás es un combustible ecológico, que se obtiene en biodigestores por fermentación anaeróbica.

Los residuos orgánicos (estiércoles, restos de cultivos y otros) para la producción de biogás viene siendo promovido en la Región San Martín por instituciones nacionales e internacionales, invirtiendo en investigaciones y promoción, permitiendo plantear nuevas propuestas de generación de energía con base científica y tecnológica teniendo en cuenta la sostenibilidad del medio ambiente. La región San Martín cuenta con un planta piloto de producción de biogás de 16 m³ instalada en la EEA EL PORVENIR INIA, ubicada en el distrito de Juan Guerra Provincia de San Martín, y en otras empresas privadas.

La producción de biogás es una actividad no desarrollada en lo referente a lo tecnológico y además tiene una gran importancia en la industria puesto que se cuenta con residuos agrícolas (pajas, rastrojos, cascarillas), residuos de origen animal (estiércol, desechos de establos), residuos agroindustriales (tortas de oleaginosas, bagazo, cascarilla de arroz) y residuos forestales (hojas, cortezas), generando un potencial en biomasa para ser transformado en biogás mediante el proceso de digestión anaeróbica. Por ello el presente trabajo de investigación tuvo

por finalidad estudiar la producción de biogás empleando los residuos ganaderos como el estiércol del ganado vacuno y residuos agroindustriales como la torta de piñón, cascarilla de arroz, rumen de ganado vacuno (contenido del estómago vacuno).

La finalidad del presente trabajo de investigación fue lograr los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

Objetivo General.

Determinar el rendimiento óptimo de la mezcla de estiércol y residuos agroindustriales en la producción de biogás.

Objetivos Específicos:

- Evaluar la producción de biogás generado por la mezcla de estiércol de ganado vacuno con torta de piñón.
- Evaluar la producción de biogás generado por la mezcla de estiércol de ganado vacuno con cascarilla de arroz.
- Evaluar la producción de biogás generado por la mezcla de estiércol de ganado vacuno con rumen de ganado vacuno.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biogás

El biogás es una mezcla de gases que se origina de las bacterias en el proceso de biodegradación de material biológico bajo condiciones anaerobias (sin oxígeno) **(Kossmann et al., 2000)**.

Se le llama biogás a la mezcla constituida por metano, dióxido de carbono, y pequeñas proporciones de hidrogeno, nitrógeno y sulfuro de hidrogeno. Esta generación se debe a la descomposición que genera la actividad bacteriológica anaeróbica en la carga de materia orgánica. En la naturaleza hay una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales se puede generar biogás **(Botero et al., 1987)**.

2.2. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (O_2). El proceso de descomposición realizado por los microorganismos anaeróbicos es favorecido por las condiciones herméticas que se dan en el interior del biodigestores. Debido a esto se generan temperaturas mas altas en el interior del biodigestor, indicando que la digestión o descomposición de la carga de materia orgánica se lleva a cabo por parte de las bacterias **(Oyuela, 2010)**.

Este proceso biológico también conocido como respiración anaeróbica o fermentación anaeróbica se desarrolla naturalmente tanto en ecosistemas formados por la naturaleza como pantanos, lagos, manglares, lechos de los ríos; así como en ecosistemas formados por el hombre como los rellenos sanitarios, pozos sépticos, cultivos de arroz, lagunas anaeróbicas para la acumulación de residuos ganaderos y biodigestores **(Watanabe et al., 2009)**.

2.3. Biogás y su composición

La composición del biogás depende del tipo de material o desecho orgánico que se esté utilizando y las condiciones del proceso. Es difícil determinar exactamente cual es la composición del biogás en si **(Botero et al., 1987)**.

El biogás consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene muchas otras impurezas. El biogás con un contenido de metano superior al 45% es inflamable **(Deublein y Steinhauser, 2008)**.

La composición del biogás se muestra en el cuadro 1, mostrando la mayor cantidad de metano seguido del dióxido de carbono y los otros gases en menor cantidad.

Cuadro 1. Composición típica del biogás.

Componentes	Formula Química	Porcentaje (%)
Metano	CH ₄	54-70
Dióxido de carbono	CO ₂	27-45
Nitrógeno	N ₂	0.3-3
Hidrogeno	H ₂	0.1-10
Monóxido de carbono	CO	0-1
Oxigeno	O ₂	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	Trazas

Fuente: Sociedad de Agricultores de Colombia (2002)

2.4. Proceso de producción de biogás

El proceso de producción de biogás se da por diferentes factores, y lo más importante de su producción es que el metano sea el de mayor contenido en su composición **(Oyuela, 2010)**.

A continuación se describen brevemente las etapas que componen el proceso de digestión anaeróbica **(Middlebrooks et al., 1982)**.

2.4.1 Hidrólisis

Etapa en la cual las bacterias Hidrolíticas actúan sobre los compuestos orgánicos de gran tamaño del sustrato, tales como celulosa, almidones, proteínas y grasas entre otras, transformándolos por hidrólisis en compuestos orgánicos solubles **(Angelidaki, 1997)**.

Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles (lípidos, proteínas y carbohidratos) en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes **(Moreno, 1991)**.

2.4.2 Acidogénesis

Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles (acetato, propionato, butirato, etc.), alcoholes y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas **(Moreno, 1991)**.

2.4.3 Acetogénesis

Los productos finales de la etapa anterior son transformados en acetato, hidrógeno y CO_2 por un grupo de bacterias que aportan aproximadamente el 54% del hidrógeno que se utilizará en la formación de metano. La función de estos microorganismos en el proceso de digestión anaerobia es generar los sustratos (hidrógeno, CO_2 y acetato) para las bacterias metanogénicas **(Veeken et al., 2002)**.

Las bacterias acetogénicas son microorganismos que viven en estrecha colaboración con las archaeas metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de transformar los ácidos grasos resultantes de la etapa anterior

en los sustratos propios de la metanogénesis (acetato, dióxido de carbono e hidrógeno) **(Moreno, 1991)**.

2.4.4 Metanogénesis

Una vez que se han formado ácidos orgánicos, dos nuevas categorías de bacterias entra en acción, aquellas que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono (acetoclásticos) y aquellas que combinan el dióxido de carbono y el hidrógeno para producir metano y agua (hidrotróficos). A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, el metabolismo de estas bacterias es más lento y además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales, tales como pH y temperatura **(Moreno, 1991)**.

Actúan las bacterias especializadas, degradando estos ácidos y alcoholes, obteniéndose como productos finales del proceso metabólico gas metano, principal componente del biogás **(Soria, 2000)**.

2.5. Biodigestor

Según **Botero et al. (1987)**, los biodigestores son una estructura ya sea de plástico o metálica, en cuya parte interna se lleva a cabo un proceso de fermentación anaeróbica causada por las mezclas de desechos orgánicos que se obtienen de las actividades humanas (efluentes, biomasa, estiércol animal). Como resultado de las actividades de fermentación que se dan por los microorganismos anaeróbicos descomponedores se obtiene el biogás como fuente de energía y el biol o bioabono que puede ser usado como biofertilizante. Los biodigestores funcionan como una cámara hermética evitando que no se de la salida de gas ni entrada de oxígeno. Una vez que se ha llevado a cabo el proceso de fermentación en la mezcla desaparecen los malos olores en el líquido obtenido en la salida del sistema llamado biol o biofertilizante.

El biodigestor o simplemente digestor, consiste en una cámara cerrada, hermética e impermeable, que proporciona condiciones anaeróbicas para

la fermentación del sustrato (excretas animales y humanas, desechos vegetales u otros) compuesto de agua, materia orgánica y minerales disueltos, para la producción de biogás **(Coto y Maldonado, 2005)**.

Los biodigestores pueden operar de forma continua o discontinua, según sea la disponibilidad y calidad de la materia orgánica confinada **(Barrena et al., 2009)**.

2.6. Digestor experimental batch

Un biodigestor tipo batch tiene un funcionamiento por lotes, donde el reactor es cargado a su nivel máximo de operación, se cierra y se lleva a cabo la digestión anaeróbica durante el tiempo que se requiera. La principal característica del biodigestor batch es que no existe transferencia de masa durante el proceso. Es decir los reactantes son introducidos al inicio de la operación y los productos son extraídos al final de la digestión. Es por esto que al biodigestor batch se lo conoce como un reactor discontinuo, ya que no hay entrada ni salida de componentes al reactor durante la operación. Para operar el digestor tipo batch la biomasa es suministrada en el primer paso. Una vez cargado el reactor se mantiene herméticamente cerrado para que no ingrese oxígeno y así se mantengan las condiciones anaeróbicas hasta que la digestión se haya completado. La operación se divide en dos etapas. Primero se deben desarrollar los microorganismos para luego seguir con la etapa de producción de biogás. El tiempo que se requiere para llevar a cabo la digestión depende principalmente de la cantidad de materia orgánica y de las condiciones de operación. Es vital para el proceso evitar el contacto de las bacterias con oxígeno y mantener la temperatura estable en los niveles óptimos de operación **(Chiriboga, 2010)**.

Los digestores batch son utilizados cuando la cantidad de materia que se desea tratar es pequeña. Otro factor que determina el uso de un digestor batch es el costo ya que los reactores batch requieren de menor

tecnología y pueden ser armados de forma artesanal y pueden ser operados de manera manual (**Karaj et al., 2009**).

Barrena et al. (2009) utilizaron en su investigación botellas de plástico de 1750 ml como biodigestores batch, y el biogás producido colecto mediante el proceso de desplazamiento de agua, en botellas calibradas de plástico de 260 ml.

Henríquez et al. (2006) construyeron para su estudio un digestor experimental batch de laboratorio, el que disponían de un sistema de agitación, el cual se cargaba una sola vez de forma total y se descargaba cuando se había completado el proceso. El digestor tenía una capacidad total de 5.00 l que lo denominaban volumen útil, sin embargo, por seguridad se dejaban un espacio sin llenar de sustrato que variaba entre 1/4 - 1/8 del volumen total.

2.7. Tratamiento de co-sustratos (co-digestión)

Se observó que la co-digestión mejora el proceso de digestión e incrementa la generación de biogás (efecto cinérgico), este podría ser atribuido a la presencia de nutrientes y la reducción/dilución de sustancias inhibitoras debido a la mezcla de los residuos (**Karaj et al., 2009**).

Por otro lado, **Bohn et al. (2007)** mencionan que cuando se usan co-sustratos de residuos agrícolas que incluyen estiércol y residuos de cosechas incrementan la digestión anaeróbica en la producción de biogás; estas mezclas son utilizadas en más del 90% de los digestores.

La co-digestión de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales y estiércol de vaca tienen un aparente efecto sinérgico el cual supera el desequilibrio en nutrientes y mejora la biodegradación, este efecto resulta en altos rendimientos de metano comparado con la digestión anaeróbica de estiércol de vaca como sustrato simple (**Macias-Corral et al., 2008**).

El aceite de colza (en proporción de 2 % a 3.5 % v/v) como co-sustrato con el estiércol de vaca parece mostrar una influencia positiva en la

producción de biogás, lo que significa que los metanogénicos son fuertemente beneficiados de un influente con alta proporción de lípidos **(Lübken et al., 2007)**.

La mezcla de diferentes sustratos da flexibilidad para compensar las fluctuaciones estacionales de residuos permitiendo que el proceso de digestión pueda ser mantenido a velocidad constante **(Pino, 2005)**.

Es decir, el uso de un co-sustrato, que en la mayoría de los casos mejora las producciones de biogás debido a los sinergismos y la fuente de alimentación que falta en el proceso y que es proporcionada al adicionar co-sustratos **(Weiland, 2003)**.

La co-digestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos de otros orígenes en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa a escala mundial. En este proceso se combinan varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables, logrando aumentar el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado. Existe un gran número de ejemplos donde se ha demostrado la efectividad de este proceso y donde la producción de biogás incluso se ha triplicado. La principal ventaja de la co-digestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar las carencias de cada uno de los sustratos por separado. La digestión anaerobia de mezclas de diferentes tipos de residuos ha dado buenos resultados a escala laboratorio y en algunos casos a escala industrial, tal como se observa en la literatura, donde se ha reportado buenos resultados para mezclas de varios tipos de residuos de industrias cárnicas y mataderos (ricos en grasas), consiguiendo altas producciones de metano **(Brinkman, 1999)**.

Schanbacher et al. (2005) señalan en *Anaerobic Digestion of Biomass for Energy and the Environment*, que se puede incrementar el volumen y la calidad de la producción de biogás con la suplementación con mezclas o combinaciones de diferentes tipos de biomasa degradable. Señalando que las grasas y aceites tendrían un potencial altamente energético, así como

los residuos de alimentos, muy superior al de las excretas de animales, normalmente utilizados en los biodigestores para la producción de biogás.

De acuerdo a la experiencia de algunas plantas de biogás con diversos sustratos se ha notado que la combinación de biomasa y co-sustratos ayuda a disminuir el contenido de CO₂ producido durante el proceso de fermentación. Con grasa como co-fermento, el contenido de CO₂ es cerca del 35% menor que el obtenido con solo fermentar el estiércol (cerca del 40%) **(Deublein y Steinhauser, 2008)**.

2.8. Materia prima para la producción de biogás

A continuación se presenta la materia prima, uno de los factores más importantes utilizados para la obtención de biogás, sobre todo los residuos de ganadería y de industria.

2.8.1 Estiércol de ganado vacuno

La libre disposición de estiércol de ganado en el campo o su tratamiento inadecuado lo convierte en una fuente de contaminación ambiental y en un foco infeccioso para seres humanos, puesto que propicia el desarrollo de vectores de enfermedades **(Atlas et al., 2002)**.

El estiércol de los rumiantes, particularmente vacuno, es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, puesto que este tiene un contenido elevado de bacterias metanogénicas. Por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de sustratos por dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa. La orina, que contiene menos nutrientes, contribuye poco a la producción específica de gas, pero incrementan notablemente las propiedades fertilizantes del biol, a la vez que diluye el sustrato, ahorrando agua **(Van Lier et al., 2008)**.

Brinkman (1999) consiguió buenos resultados en la co-digestión de residuos ganaderos con varios tipos de residuos orgánicos industriales; señalando también que la co-digestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa tanto en rango termofílico como en el mesofílico.

Sin embargo, estos residuos son una buena base para la co-digestión porque generalmente presentan un contenido de agua más alto que la mayoría de los residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios (**Angelidaki, 1997**).

Barrena et al. (2010) en su investigación obtuvo la máxima producción de biogás a partir estiércol de ganado vacuno, en una relación estiércol: agua de 1:2. Señalando que la relación estiércol: agua empleado de 1:2 produce mayor volumen de biogás que las relaciones menor (1:3) y mayor (1:1). Por otro lado (**Chiriboga, 2010**) realizó un estudio con estiércol de ganado y desecho de fruta en biodigestores batch, señalando que la mezcla óptima de desecho de fruta con estiércol de vaca es de 1:1.

En el cuadro 2 se presentan la composición del estiércol de ganado vacuno. Estos presentan una concentración variable porque depende de diversos factores. En el caso de los estiércoles está determinada por la especie animal, su edad, alimentación, tipo de cama y manejo.

Cuadro 2: Composición física-química promedio (%) del estiércol de ganado vacuno (b.h).

Componente	Porcentaje (%)
Humedad	81.41
Proteína	1.63
Grasa	0.39
Cenizas	2.41

Fuente: Liu et al. (2009).

2.8.2 Torta de piñón (*Jatropha curcas*)

El piñón cuenta con un gran potencial para la producción de biocombustibles, pero también tiene el potencial para ser usado para la elaboración de otros productos de uso humano. Un ejemplo de ello es la torta de piñón, un sub producto que se obtiene después que se ha realizado la extracción del aceite. Es una mezcla de carbohidratos, fibras, proteínas y aceites que no pueden ser extraídos. Estos compuestos pueden ser usados para la generación de diferentes productos: producción de biogás, alimento animal, biofertilizante o bioinsecticida **(Santologo et al., 2007)**.

El biogás es obtenido por las actividades de microorganismos fermentadores, bajo condiciones anaeróbicas. Durante el proceso se obtiene además del biogás un sub producto conocido como biol, que es el líquido que se genera durante el proceso fermentación en los biodigestores **(Oyuela, 2010)**.

La torta de piñón, que es un subproducto que se obtienen durante el proceso de extracción de aceite, constituyendo entre el 55 y 70 % del contenido de la semilla. Este subproducto esta constituido principalmente de carbohidratos, fibra, proteínas, un pequeño porcentaje de aceite que no se extrae. La calidad de la extracción depende de la tecnología utilizada **(Santologo et al., 2007)**.

Muchas investigaciones han buscado alternativas de uso, para hacer más competitiva y rentable del piñón. En los últimos años se han realizado varios experimentos relativos a la producción de biogás a partir de la torta de piñón. Realizaron un estudio usando torta de piñón para evaluar la digestión anaeróbica y potencial de uso para la producción de biogás, evaluando cuatro diferentes composiciones de diluciones. Determinando que se da un proceso de digestión y que la producción de biogás es alta debido al alto contenido de materia orgánica, pero el contenido de Metano (CH₄) fue menor a lo esperado **(Visser et al., 2007)**.

Según **Oyuela et al. (2010)** la torta de piñón contiene valiosos nutrientes para ser utilizado como biomasa sólida para producir energía o como abono. El aceite que queda en la torta promueve la actividad bacteriana y es por lo tanto un excelente insumo para el biodigestor, solo el 25% de la semilla es aceite puro el resto es torta, sedimento y sirve como sustrato.

Nafisa et al. (2010) realizaron un estudio que se llevó a cabo en un tipo de tambor flotante (planta de biogás). Inicialmente con solo estiércol de ganado puro, que poco a poco sustituyo por aceite de Jatropha torta (0 - 100%), concluyendo que su investigación que aumentó la producción de biogás hasta un 25% en la duración de tiempo razonable, de la combinación de 75% de excremento de ganado y el 25% torta de Jatropha.

Medors (2007) menciona en su estudio que la utilización eficiente de torta de Jatropha se puede utilizar para la producción de biogás, demostrado haber encontrando una alternativa eficiente de materia prima para generar biogás mucho más rápido que las convencionales alimentaciones de estiércol de ganado.

Agarwal (2007) señala que la torta de jatropha se puede utilizar como abono o como materia prima para la producción de biogás, alimentos para animales, etc.

A pesar de todo ello (**Oyuela et al., 2010**) señalan en su trabajo que el proceso de digestión de la torta de piñón con el estiércol, genera malos olores producto de la mala digestión y el contenido de aceites aun después del proceso de digestión. Al igual (**Staubmann et al., 1981**) argumentan en su trabajo que la torta de piñón desengrasada (pastel de la prensa) contiene ciertas fitotoxinas como curcina que no puede ser utilizada directamente para la alimentación animal y crecimiento de las plantas. Pero sin embargo, este residuo puede servir como buen sustrato en la planta de biogás; por ser rico en contenido de minerales y proteínas, para su uso en la producción de biogás.

Makkar (1997) determinó en los estudios preliminares realizados a la torta de jatropha, encontrando componentes esenciales para la generación de biogás como carbono, nitrógeno, potasio y fósforo. Tiene alta cantidad de proteínas y lípidos que puede ser utilizado por los microbios durante el proceso anaeróbico.

En el cuadro 3 se observa que la torta tuvo valor elevado de lípidos (13.29%) y contenido de proteínas (21.1%).

Cuadro 3: Composición física-química promedio (%) de la torta de piñón (b.h).

COMPOSICIÓN	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	10.2±0.5
GRASA	13.29± 0.5
FIBRA	9.87± 1.7
CENIZA	7.00± 0.1
PROTEÍNA	21.10± 1.5

Media ± SD de determinaciones triplicados

Fuente: Saetae et al. (2010).

2.8.3 Cascarilla de arroz

Quiceno et al. (2010) manifiestan que la cascarilla de arroz brinda favorables condiciones para ser utilizada como combustible gaseoso (biogás), debido a que este residuo agroindustrial, tiene características importantes.

Gómez y Gutiérrez (2002) señalan que la celulosa que se encuentra en la cascarilla de arroz es esencial para el proceso de los fermentadores, o digestores ya que se esta sustancia se degrada en un gas, produciéndose hasta alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico.

Arbeláez (2001) manifiesta que la cascarilla de arroz posee características químicas, físicas, energéticas y bromatológicas que dificultan en algunas ocasiones su manejo y aprovechamiento.

Para el caso concreto del arroz, se sabe que este tiene un contenido muy alto de silicio, que por ser inorgánico no se degrada por el tratamiento orgánico y se acumula en el digestor, pudiendo llegar a crear problemas de colapso (Zhang y Z. Zhang, 1999).

En el mismo estudio (Zhang y Z. Zhang, 1999) señalaron que los residuos del cultivo del arroz, presentan un ratio C/N de 75, con lo que inicialmente se precisa de una fuente de aportación de nutrientes, como podrían ser residuos orgánicos o estiércol de animales que son una fuente muy remarcable de nitrógeno. Concluyendo que es factible el tratamiento de la digestión anaerobia de los residuos del arroz, obteniendo una fuente de energía renovable, a la vez que se solventa el problema de la disposición de estos. Al cabo de 24 días, obtuvo un rendimiento de biogás de 0,38 m³/kg. Cuando se pretrataba el sustrato mediante trituración hasta 10 mm, tratamiento térmico a 110°C y tratamiento químico con amonio, se llegaban a alcanzar niveles de 0,471 m³/kg. Señalando que el tratamiento físico no tiene una gran influencia a menos que se combine con otros. Por último, el 75-80% de la producción de biogás se obtenía en los 14 primeros días, la composición de metano en todos los casos era del 50%.

La composición de la cascarilla de arroz se muestra en el cuadro 4, el mayor contenido que se presenta en la cascarilla de arroz fue el contenido de fibra.

Cuadro 4: Composición física-química promedio (%) de la cascarilla de arroz (b.h).

COMPONENTES	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	6.41
CENIZAS	13.01
GRASA	0.53
PROTEÍNA	2.27
FIBRA	47.85

Fuente: Guevara (1995).

2.8.4 Rumen de ganado vacuno (contenido del estómago vacuno)

Es un producto obtenido de la matanza en los mataderos y representa el alimento ingerido por los animales poligástricos que es desechado al momento del sacrificio **(Uicab-Brito et al., 2003)**.

Es una mezcla de material no digerido que tiene la consistencia de una papilla, con un color de amarillo a verdoso y un olor característico muy intenso, además posee gran cantidad de flora y fauna microbiana y productos propios de la fermentación ruminal **(Domínguez, 2002)**.

Este residuo se caracteriza por contener lignocelulosa, mucosas, fermentos digestivos y una elevada carga de microorganismos patógenos **(CONAMA, 1998)**.

Valencia et al. (2011) realizaron un estudio para la producción de biogás para ello utilizaron un digestor tipo batch con agitación a escala de laboratorio, que mantuvieron a 35°C durante 35 días; para evaluar la eficiencia del proceso trabajaron con una concentración de sólidos totales en el sustrato de 3%, 6% y 9%, en base seca; midiendo la cantidad de biogás obtenido. Concluyendo que el rango de porcentajes de sólidos totales de 3% y 6% presentaban las mejores condiciones para la digestión anaeróbica, al igual que la producción de biogás y la relación CH₄/CO₂; no así para la concentración de sólidos totales de 9% donde se genera el fenómeno de sobrecarga orgánica. Señalando al final en su trabajo que bajo las condiciones anteriores, el desecho de rumen bovino podría constituirse en un recurso bioenergético.

Por su parte, **Laines et al. (2001)** realizaron un estudio utilizando rumen de ganado y agua, con una carga previamente mezclada de 600kg de agua y 600kg de residuo desechado (rumen de la vaca) en una proporción (1:1) el cual se introdujo dentro de un biodigestor. Durante 45 días se observó la producción de gas metano, teniendo como promedio de 65.03% de metano.

Laines et al. (2001) promovieron en el Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP) de la Universidad de Juárez, un proyecto denominado “Obtención de biogás a partir de la excreta de ganado bovino usando un biodigestor ecológico”, en el cual trabajó con 7,300 kilogramos de rumen, y se le pusieron 41 mil 600 litros de agua, donde se dio un proceso de degradación en el cual los microorganismos y bacterias empezaron a consumir ese rumen y al multiplicarse, crecer y seguir comiendo, empezaron a liberar gas”. Observando que desde los primeros cinco días del proceso ya hay producción de gas.

Por otra parte, la composición química de los contenidos ruminal es poco variable en cual se muestra en el cuadro 5, debido a que la alimentación de los bovinos es básicamente de pasto.

Cuadro 5: Composición física-química promedio (%) del rumen de ganado vacuno (b.h).

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	85.00
PROTEÍNA	1.44
GRASA	0.43
FIBRA	4.05
CENIZA	0.62
CARBOHIDRATOS	8.46

Fuente: Falla (2002)

2.9. Factores determinantes para el proceso de digestión

Para que se realice una descomposición y digestión óptima en los biodigestores, se debe tener en cuenta una serie de factores los cuales son detallados a continuación:

2.9.1 Temperatura

La temperatura es primordial para la producción de biogás. Según **Werner et al. (2010)** el proceso de fermentación anaeróbica se da desde los 3 °C hasta los 70°C. Este amplio rango de temperatura se generan en tres niveles: en el nivel uno se encuentran los Psicrófilicos con temperaturas menores a los 20°C, en el nivel dos los Mesófilos con temperaturas ente 30°C y 40°C, y en el nivel tres los Termófilicos con temperaturas entre los 50°C y 70°C.

Por su parte **Shuler et al. (2002)** mencionan que la temperatura es un factor muy importante ya que determina el crecimiento bacteriano durante el proceso de fermentación. Existen tres zonas de actividad microbiana: la psicrófilica que es debajo de los 28 °C, mesófilica que está en el rango de los 28 °C a los 42 °C y la termófilica que esta sobre los 42 °C. La cantidad de metano producido en la zona psicrófilica es menor, comparado a las zonas mesófilica y termófilica, que son de gran interés para la producción comercial de metano

El biodigestor debe permanecer preferentemente a una temperatura constante, de 35°C, que es la óptima para que las bacterias anaerobias vivan y realicen su trabajo eficientemente. Un proceso tendrá una duración aproximada de 20 a 60 días, dependiendo de la temperatura a la cual se trabaje, mientras más cerca de los 35°C, más rápida será la producción de biogás (**Chamy et al., 2004**).

2.9.2 Rangos de pH

Cada grupo de microorganismos involucrados en la degradación anaeróbica tiene una región de pH óptima para su crecimiento, para los microorganismos acidogénicos el pH óptimo es alrededor de 6, para los microorganismos acetogénicos y metanogénicos el pH óptimo es alrededor de 7. En un proceso de tratamiento anaeróbico de una sola etapa el pH debería mantenerse próximo a la neutralidad dado que las

bacterias acidogénicas también trabajan a pH cerca de la neutralidad y la etapa metanogénica es frecuentemente la etapa limitante (**Alvarez et al., 2004**).

Debido a las distintas poblaciones que intervienen en la producción de metano es posible que un biodigestor se acidifique. Esto puede ocurrir por una desincronización, ya que las bacterias acidogénicas pueden estar produciendo más ácido de lo que pueden consumir las bacterias metanogénicas. Esto sucede cuando se suministra de manera muy rápida o excesiva la cantidad de sustrato (**Chiriboga, 2010**).

En la digestión se presentan diferentes rangos de pH, pero donde las bacterias presentan una mayor eficiencia en sus actividades es entre 6 y 8. Según **Botero (1987)** los factores que afectan o promueven la acidificación en la parte líquida dentro del biodigestor son:

- La cantidad de agua utilizada.
- Alimentación con productos tóxicos.
- Fluctuaciones bruscas en las temperaturas.

2.9.3 Contenido de sólidos

El contenido o porcentaje de sólidos en un proceso de fermentación anaeróbica en biodigestores depende de la capacidad de asimilación o descomposición de los organismos, y del tamaño o escala del biodigestor. En términos de digestibilidad las bacterias solo asimilan entre el 6% y 8% de la materia orgánica (**Oyuela, 2010**).

2.9.4 Relación carbono/nitrógeno

Flotats et al. (1997) mencionaron que los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y nitrógeno (N), indicaron también que si el contenido de este último es muy alto, la reproducción de las bacterias se inhibe debido a la alta alcalinidad y si las relaciones C/N son menores; por ejemplo 8:1 se inhiben la actividad

bacteriana por excesivo contenido de amonio. Al final reportaron que una relación C/N de 20:1 a 30:1 es ideal.

Rodríguez (2010) reportó que las mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno (por ejemplo estiércol de gallina) con material de fermentación con alto contenido de carbono (por ejemplo tamo de arroz) dan una elevada producción de gas.

Ostrem (2004) menciona que la relación C:N es una medida de las cantidades relativas de carbón orgánico y de nitrógeno presentes en la materia de base donde la relación depende del tipo de residuos que se integren al proceso de digestión anaeróbica, por ejemplo, los residuos sólidos vegetales (RSV) contribuyen más con carbono y los residuos cárnicos son altos en nitrógeno.

La relación carbono y nitrógeno (C:N) juega un papel muy importante en las actividades microbianas. El nivel óptimo de esta relación se encuentra entre 9:1 y 25:1, permitiendo una mejor actividad en la digestión realizada por los organismos (**Flotats et al., 1997**).

2.9.5 Porcentaje de composición de la dilución

La dilución es una mezcla de materia o desechos orgánicos con agua. Por lo general las diluciones son compuestas por excrementos de ganado, cerdos, o cualquier tipo de desecho generado por las actividades humanas. Esta dilución por lo general esta dividida en 30% de materia solida o materia orgánica y 70% de agua (**Oyuela, 2010**).

El medio también necesita algunos nutrientes para el desarrollo de los microorganismos; este medio se puede remplazar con sólo utilizar agua común y no agua destilada (**Méndez, 1997**).

Barrena et al. (2010) reportaron que un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material degradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua. También dedujeron que aumentando el volumen de

agua de desagüe no se logra aumentar la producción de biogás, sino por el contrario se reduce.

2.9.6 Inhibidores

Los metales pesados, los antibióticos, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias como detergentes y pesticidas, son productos que inhiben el proceso de producción de biogás **(Flotats, 1997)**.

La fibra presenta problemas ya que se enreda y tapa las mangueras de alimentación, razón por la cual no es recomendable utilizar desechos de frutas con altos contenidos de fibra. Además las fibras están constituidas de celulosa, sustancias pécticas y lignina, las cuales son difíciles de degradar anaeróbicamente **(Chiriboga, 2010)**.

La luz no es letal para los organismos metanogénicos, pero inhibe la metanogénesis, por lo tanto se requiere completa oscuridad. Además el ingreso de luz solar puede favorecer el crecimiento de algas al interior del reactor dando como resultado interferencia.

2.9.7 Agitación – mezclado

La mezcla debe estar homogeneizada para que los microorganismos accedan al sustrato con facilidad, que con la agitación habrá una mejor remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica **(Fernández et al., 2006)**.

El grado de agitación o mezclado es un punto clave en el diseño del sistema de digestión anaeróbica, puesto que este parámetro es esencial para un correcto funcionamiento del proceso debido a que estimula el contacto directo del sustrato orgánico con las poblaciones bacterianas que desarrollan el proceso **(Von Munch et al., 1994)**.

Sin embargo existen opiniones contradictorias acerca del mezclado ya que la intensidad y frecuencia de la agitación deben ser específicas para los distintos sustratos y tipos de tratamiento aplicados al material orgánico. El mezclado provee el contacto directo entre el sustrato que ingresa al reactor y los cúmulos de poblaciones microbianas, además previene la formación de nata o sobrenadante al interior del reactor **(Karim et al., 2005)**.

El mezclado mínimo permite un excelente desempeño de la digestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos, lo cual se evidencia en una más alta velocidad de producción de biogás así como una mayor producción específica de metano **(Stroot et al., 2001)**.

2.9.8 Tiempo de retención

Se le llama tiempo de retención al tiempo adecuado o cantidad de días necesarios para que se de una digestión eficiente de la materia orgánica, o también se interpreta como el tiempo que la materia orgánica o dilución permanece en el biodigestor. Según **Aliaga (2006)** el tiempo de retención óptimo en un proceso de digestión es de 50 días, pero puede ser afectado por diferentes factores como la temperatura, el tipo de dilución usada y el contenido de sustancias inhibidoras.

Es el tiempo que se mantiene la materia orgánica dentro del digestor, varía con los parámetros del proceso, tales como temperatura y composición de los residuos. Bajo condiciones mesofílicas el rango es de 15 a 30 días y en condiciones termofílicas es de 12-14 días **(Monnet, 2004)**.

Castelar (2010) señala que mientras más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable. Define como el tiempo que el sustrato está

sometido a la acción de los microorganismos en el reactor. Cabe indicar que este parámetro solo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos (batch), donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. Una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

2.10. Utilización del biogás

A pequeña y mediana escala, el biogás 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 remplazo de la gasolina o el diesel en motores de combustión interna, operar maquinaria agrícola o bombear agua **(Veeken et al., 2002)**.

Efluente líquido o biol es el segundo producto derivado de la digestión anaerobia. Una vez finalizado el proceso, el biol es un afluente inodoro con excelentes propiedades y que se suele emplear para abonar las tierras. Inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se está considerando de la misma importancia, o mayor, que el biogás ya que provee a las familias campesinas de un fertilizante natural que mejora mucho el rendimiento de las cosechas. **(Rodríguez, 2010)**.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta la metodología que fue utilizada para el desarrollo del presente trabajo experimental, así como una descripción de los equipos y técnicas empleados para la consecución de los objetivos planteados en el apartado anterior.

3.1. Lugar y fecha de ejecución

La parte experimental del presente proyecto de investigación se llevó a cabo en los exteriores de la planta de producción de biodiesel de la Estación Experimental Agraria “El Porvenir” y la parte de análisis se realizó en el Laboratorio Postcosecha y Agroindustrias y de Suelos de la misma Institución. La Estación Experimental Agraria “El Porvenir” está localizada en el distrito de Juan Guerra, Provincia San Martín, Departamento de San Martín. La localización geográfica de la Estación Experimental Agraria “El Porvenir”, esta ubicada a 13 km al sur de la ciudad de Tarapoto, situada a 330 msnm, presenta un clima Cálido - húmedo que varía entre 28°C y 32°C. El experimento de campo fue hecho en un área no techada con temperaturas variables entre 29.5 y 31.5°C (temperatura ambiente). El experimento inició el 09 de octubre del 2011 y finalizó el 10 de abril del 2012, con la última toma de muestras y medición de volumen de biogás.

3.2. Materiales y Reactivos

3.2.1. Materiales de laboratorio

- Placas Petri de 2.5 cm y 9.0 cm de diámetro.
- Papel filtro (WHATMAN Nro. 40 de 125 mm de diámetro).
- Pinza de metal
- Pipetas de 10ml, 5ml y 1ml.
- Probetas de 50 ml, 100 ml y 500 ml.
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml y 300 ml.
- Vasos de precipitación de 300 ml, 500 ml y 800 ml.

- Embudos de Plástico y metal.
- Parafilm 4 IN. * 125 FT.
- Papel toalla.
- Espátula de acero inoxidable (STAINLESS PAKISTAN).
- Soporte universal

3.2.2. Reactivos de laboratorio

- Agua destilada.
- Ácido sulfúrico.
- Éter de petróleo
- Alcohol etílico 96%; Alcohol neutro.

3.2.3. Equipos del laboratorio

- Balanza analítica (METTLER AS 50, capacidad 25 g, mín. 0.0001 g.).
- Balanza analítica (METTLER AS 50, capacidad 10kg).
- Estufa digital (BINDER, temperatura nominal 300°C, 1.20 KW).
- Estufa (MEMMERT).
- Termómetro digital (OAKTON, modelo TEMP10K).
- Equipo SOXHLET de 6 unidades (THERMO SCIENTIFIC).
- Campanas desecadoras.
- Mufia.
- Prensa mecánica de sin fin de fabricación alemana marca KEK, modelo P0020, eficiencia 30%, rendimiento 20 kg/h, velocidad de trabajo 22rpm.
- Equipo portátil analizador de Biogás.

3.2.4. Materiales Utilizados en la construcción de los biodigestores (tipo batch)

- Bandejas
- Soportes de fierro

- Manguera de $\frac{1}{4}$
- Tapa de botellas descartables
- Silicona
- Soldimix
- Botellas descartables de 1750ml
- Botellas descartables de 260ml

3.3. Metodología

3.3.1 Producción de biogás

- **Recolección de muestras:**

El estiércol se recolectó de los ambientes donde se alimentaban y descansaban los ganados, localizados dentro de las instalaciones del establo de la Estación Experimental Agraria “El Porvenir”. El estiércol era fresco, recolectado una sola vez para cada repetición, para su utilización inmediata, realizadas en horas de la mañana, ya que se consideraba que a esa hora del día era más variada su composición (por tanto más representativa).

La torta de piñón se recolecto de los ambientes de la planta de producción de biodiesel, localizados dentro de las instalaciones de la Estación Experimental Agraria “El Porvenir”, la torta se recolecto de los sacos que se encontraban almacenados, los cuales tenían 3 semanas de almacenado.

La cascarilla de arroz se recolecto de los ambientes del molino León Rojo, localizado en el distrito de la Morales, Provincia de San Martín, la cascarilla de arroz se recolecto de los exteriores del molino encontrándose estos residuos a la intemperie.

El rumen o bazofia proveniente del estómago del ganado vacuno recién sacrificado, este material se obtuvo del camal de Tarapoto, localizado en el distrito de la Banda de Shilcayo, extraído una sola vez en el día, para su inmediata utilización.

- **Molienda y zarandeo**

Se redujeron los tamaños de las muestras con una zaranda de fierro el cual se zarandeaba manualmente filtrando las muestras, esta tipo de reducción (molido) y separación solo se realizó con la materia con menor humedad (cascarilla de arroz y torta de piñón) en el caso de las materias con mayor contenido de humedad (rumen de ganado vacuno y estiércol de ganado vacuno) solo se procedió a reducir mediante unas palas de fierro y separación de impurezas fue en forma manual, posteriormente se realizó la caracterización de materia prima: torta de piñón, estiércol de ganado vacuno, rumen de ganado vacuno y cascarilla de arroz mediante el Análisis Proximal: Humedad, Cenizas, Proteínas, Grasa, Fibra, Carbohidratos.

- **Pesado**

Se pesaron las muestras (estiércol de ganado vacuno, torta de piñón, cascarilla de arroz, rumen de ganado vacuno), utilizando la balanza analítica de capacidad de 10kg.

- **Mezclado**

Se realizó la homogenización utilizando una varilla pequeña de madera que se utilizó para mover la mezcla en forma manual, mezclando el sustrato (estiércol de ganado vacuno) con los co-sustratos (torta de piñón, cascarilla de arroz, rumen de ganado vacuno), con las siguientes relaciones: g sustrato/g co-sustrato, (100:0); (80:20); (50:50); (40:60).

- **Adición de agua**

En este proceso se realizó la dilución de las mezclas, con las diluciones de mezcla (g) : agua (ml) (50:50), (33,3:66,6); (25:75). El agua utilizada para realizar la mezcla, provenía de la red de distribución. La mezcla utilizada fue la que se obtuvo en el proceso anterior.

A continuación se presentan las proporciones utilizadas de las mezclas del sustrato (estiércol de ganado vacuno) - cosustrato (torta de piñón-cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno) y agua.

En los cuadros 6, 7 y 8 se presentan las mezclas que se utilizaron en los biodigestores a escala laboratorio. El sustrato correspondió al estiércol de ganado vacuno y el cosustrato a los residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno), como se muestra en los cuadros a continuación:

Cuadro 6: Dilución 50% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50% de agua.

Biodigestor	Mezcla Porcentaje de mezcla en peso (%)	Cantidades agregadas (g)		
		Sustrato (g)	Cosustrato (g)	Agua (ml)
1	Sustrato-cosustrato (100-0)	500	0	500
2	Sustrato-cosustrato (80-20)	400	100	500
3	Sustrato-cosustrato (50-50)	250	250	500
4	Sustrato-cosustrato (40-60)	200	300	500

Cuadro 7: Dilución 33.3% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6% de agua.

Biodigestor	Mezcla Porcentaje de mezcla en peso (%)	Cantidades agregadas (g)		
		Sustrato (g)	Cosustrato (g)	Agua (ml)
1	Sustrato-cosustrato (100-0)	333.34	0	666.66
2	Sustrato-cosustrato (80-20)	266.67	66.67	666.66
3	Sustrato-cosustrato (50-50)	166.67	166.67	666.66
4	Sustrato-cosustrato (40-60)	133.36	199.98	666.66

Cuadro 8: Dilución 25% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75% de agua.

Biodigestor	Mezcla Porcentaje de mezcla en peso (%)	Cantidades agregadas (g)		
		Sustrato (g)	Cosustrato (g)	Agua (ml)
1	Sustrato-cosustrato (100-0)	250	0	750
2	Sustrato-cosustrato (80-20)	200	50	750
3	Sustrato-cosustrato (50-50)	125	125	750
4	Sustrato-cosustrato (40-60)	100	150	750

- **Carga de biodigestor**

El digestor (botella de plástico) de capacidad de 1750ml, fueron cargados con la mezcla (sustrato:co-sustrato) mas agua, que ocupo aproximadamente el 60% del volumen total del digestor, dejando un espacio sin llenar de aproximadamente 40% que fue dedicado al espacio donde se originó el biogás y que posteriormente se fue almacenando en el recolector de biogás (botellas de plástico de 260ml). Se prepararon 36 mezclas para cada biodigestor, tal como se explica en el diseño experimental.

El llenado de las 36 mezclas se realizó mediante un tubo de alimentación, utilizando para esto un embudo cónico de 2", previamente la mezcla fue homogenizada como se explicó anteriormente y posteriormente anotándose la fecha y hora de la carga del equipo.

- **Medición del volumen de la producción de biogás en los biodigestores tipo batch**

La frecuencia de medición fue diaria, realizadas durante 35 días, en horas de la tarde (2:00pm), además fue registrada en forma diaria la temperatura ambiental.

Esta variable se midió con colectores de biogás (botellas descartables de 260ml) dentro de las cuales se almacenó el biogás, esto consistió que a medida que entraba el biogás a los colectores, este desplazaba el volumen de agua equivalente al volumen de biogás admitido durante todo el proceso de fermentación, las botellas de plástico de 260ml (colectores de biogás), se encontraban debidamente calibradas y marcadas cada 20 ml, el método utilizado para medir la producción de biogás fue un diseño artesanal, diseño que utilizó **(Barrena et al., 2009)** en su investigación. Inicialmente, las botellas se encontraban llenas de agua y libre de burbujas de aire, las que fueron colocadas en forma invertida en una tina llena con agua, éstas recolectaron el biogás producido por cada biodigestor, con esto se obtuvieron una serie de datos que permitieron

conocer el volumen de biogás producido y almacenado en función del tiempo, tal como se muestra en la **Figura 1**.

- **Medición del contenido de metano del biogás en los biodigestores tipo batch**

Para la medición de metano presente en el biogás se realizó la medición durante el último día (día 35).

El contenido de metano fue medido mediante el equipo portátil analizador de biogás (metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y oxígeno) el cual se muestra en el Anexo 7, utilizando el kit de muestreo de biogás (sonda) del equipo analizador de biogás se procedía a introducir dentro de los biodigestores, el cual absorbía todos los gases presentes del biodigestor (gas circulante), el cual mostraba el contenido de los gases en la pantalla digital, los principales gases que se obtenían median en el rango siguiente: 0-100% volumen CH_4 ; 0-100% volumen CO_2 ; 0-25% volumen O_2 ; 0-200ppm H_2S , tomando solo para la investigación el contenido de metano.



Figura 1: Esquema de la producción de biogás.

En el siguiente flujograma se muestra el proceso de producción de biogás.

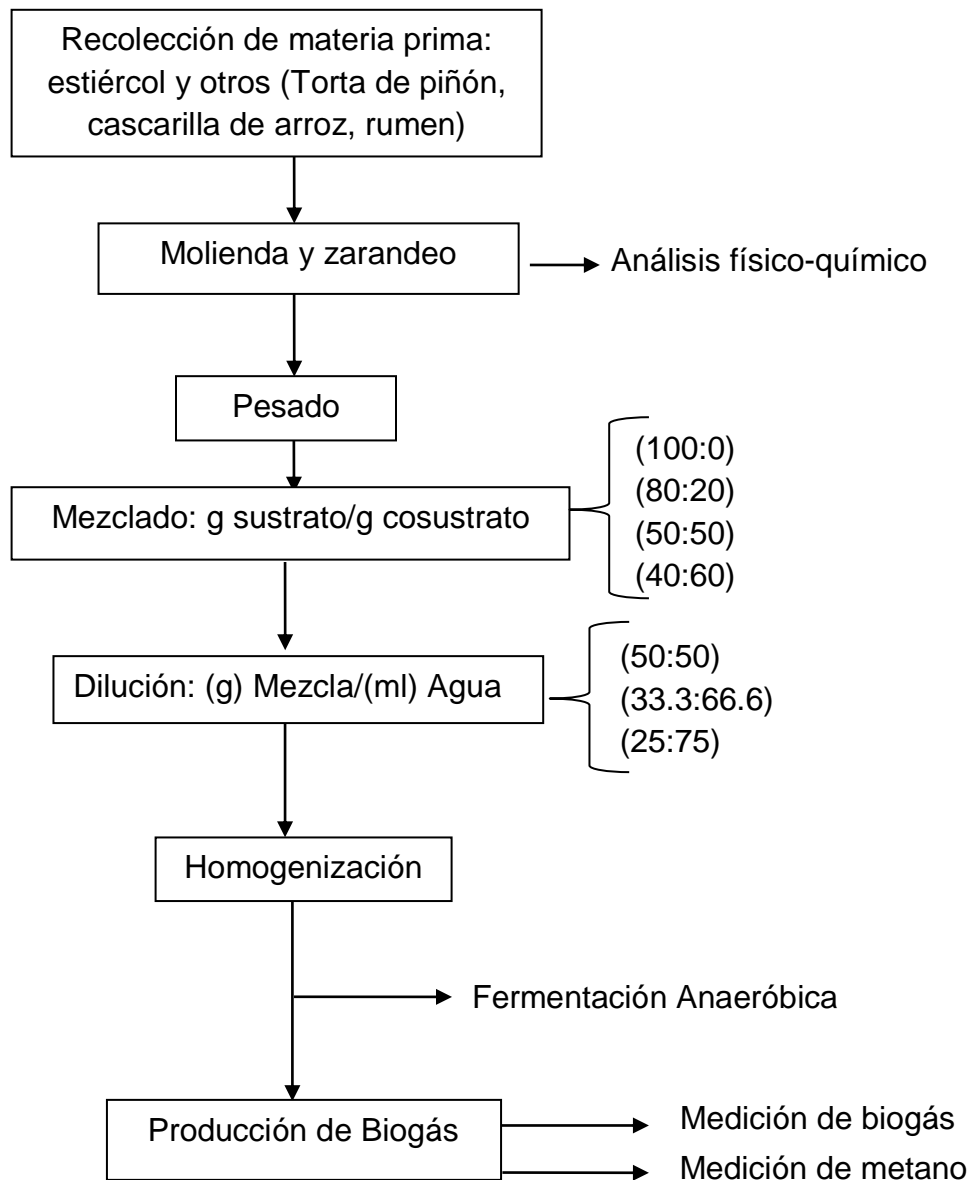


Figura 2: Flujograma Experimental.

3.3.2 Análisis físico - químicos de la materia prima (para cada muestra)

Se realizaron los siguientes análisis:

- ✓ **Humedad y materias volátiles**, por el método de secado en estufa a 105°C (AOAC, 1979).
- ✓ **Cenizas totales**, método horno mufla a 550 °C por 24 horas (AOAC, 1979).
- ✓ **Proteínas**, por método de Kjeldahl.
- ✓ **Grasa total**, por el método de soxhlet (AOAC, 1990).
- ✓ **Fibra total**, por hidrólisis ácida y alcalina (AOAC, 1990).
- ✓ **Carbohidratos totales**, se obtendrá por diferencia, restándose de 100 la sumatoria de porcentajes de humedad, proteína, grasa, ceniza y fibra.

3.4. Diseño Experimental

3.4.1. Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-torta de piñón

Para evaluar la influencia de la adición de torta de piñón en la producción de biogás, se realizó un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial (4x3) (dos factores) con 3 repeticiones totalizando 36 ensayos. El primer factor fue la relación mezcla de Kg estiércol/Kg de torta de piñón, en 4 relaciones (100:0); (80:20); (50:50);(40:60), el segundo factor fue la obtención de la dilución de la mezcla(Kg estiércol/Kg de torta de piñón) en agua (litro), con una relación de (50:50);(33,3:66,6);(25:75).

3.4.2. Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-cascarilla de arroz

Para evaluar la influencia de la adición de cascarilla de arroz en la producción de biogás, se realizó un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial (4x3) (dos factores) con 3 repeticiones totalizando 36

ensayos. El primer factor fue la relación mezcla Kg estiércol/Kg cascarilla de arroz, en 4 relaciones (100:0); (80:20); (50:50);(40:60), el segundo factor fue la obtención de la dilución de la mezcla(Kg estiércol/Kg cascarilla de arroz) en agua (litro), con una relación de (50:50);(33,3:66,6);(25:75).

3.4.3. Obtención de biogás a partir de la mezcla estiércol-rumen de ganado vacuno

Para evaluar la influencia de la adición de cascarilla de arroz en la producción de biogás, se realizó un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial (4x3) (dos factores) con 3 repeticiones totalizando 36 ensayos. El primer factor fue la relación mezcla Kg estiércol/Kg rumen de ganado vacuno, en 4 relaciones (100:0); (80:20); (50:50);(40:60), el segundo factor fue la obtención de la dilución de la mezcla(Kg estiércol/Kg ganado vacuno) en agua (litro), con una relación de (50:50);(33,3:66,6);(25:75).

- La variable respuesta fue el biogás producido (ml) para todas las mezclas.
- Se realizaron análisis de varianza al 95% de confianza para determinar diferencias significativas entre los tratamientos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis físico-químico

En esta sección se tratan todos los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación y su interpretación. Se discute desde la composición de la materia prima, los resultados en los biodigestores de escala laboratorio.

4.1.1 Caracterización de la Materia

4.1.1.1 Estiércol de Ganado Vacuno

Cuadro 9. Composición físico-química promedio (%) del estiércol de ganado vacuno.

CONTENIDO	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	93.45
CENIZAS	0.85
PROTEÍNA	0.57
GRASA	0.14
FIBRA	1.77
CARBOHIDRATOS	3.22

La composición proximal del estiércol de ganado vacuno obtenido en este trabajo se muestra en el cuadro 9. El contenido de proteínas fue de 0.57%, valor menor a lo reportado por **Liu et al. (2009)** con un 1.63%. El contenido de grasa fue de 0.14%, valor menor a lo reportado por **Liu et al. (2009)** con un 0.39%. El contenido de cenizas fue de 0.85% valor relativamente bajo comparado con lo reportado por **Liu et al. (2009)** con 2.41%. Estas diferencias posiblemente se debieron a la dieta del ganado (alimentación y nutrición), raza y condiciones sanitarias.

4.1.1.2 Torta de Piñón.

Cuadro 10: Composición física-química promedio (%) de la torta de piñón.

CONTENIDO	PORCENTAJE (%)
GRASA	10.8
FIBRA	9.81
CENIZAS	6.95
PROTEÍNA	20.96
HUMEDAD	10.2
CARBOHIDRATOS	38.88

En el cuadro 10 se observa que los mayores valores se encuentran en el contenido de proteína y carbohidratos presentes, comparativamente el contenido de grasas de este trabajo fue de 10.8%, siendo este menor que lo reportado por **Saetae et al. (2010)** con 13.29%. El contenido de fibra fue de 9.81%, siendo este menor a lo reportado por **Saetae et al. (2010)** con 9.87%. El contenido de cenizas fue de 6.95% valor relativamente menor a lo reportado por **Saetae et al. (2010)** con 7.0% y contenido de proteínas fue de 20.96%, valor menor a lo reportado por **Saetae et al. (2010)** con 21.1%. La diferencia entre los resultados obtenidos y los reportados por el autor citado, puede deberse por las distintas variedades de piñón, condiciones de crecimiento, clima, suelo, parte de la semilla y métodos de extracción de aceite.

4.1.1.3 Cascarilla de Arroz.

Cuadro 11. Composición físico-química promedio (%) de la cascarilla de arroz.

CONTENIDO	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	7.46
CENIZAS	12.87
GRASA	0.52
PROTEÍNA	2.24
FIBRA	47.31
CARBOHIDRATOS	29.6

Como se puede observar en el cuadro 11, se presenta la Composición físico-química promedio (%) de la cascarilla de arroz, donde se confirma su alto contenido de fibra y carbohidratos; el contenido de cenizas presentó un 12.87%, porcentaje cercano a lo reportado por **Guevara (1995)** con 13.01%. El contenido de grasa fue de 0.52%, siendo este valor muy cercano a lo reportado por **Guevara (1995)** con 0.53%, el contenido de proteínas fue de 2.24%, siendo este resultado cercano a lo obtenido por **Guevara (1995)** con 2.27%, probablemente, estas diferencias se han debido a las diferentes procedencias (clima, suelo, etc.) y a otros factores ambientales de la zona de producción.

4.1.1.4 Rumen de Ganado Vacuno.

Cuadro N°12. Composición proximal físico-químico promedio (%) del rumen de ganado vacuno.

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
HUMEDAD	89.00
PROTEINA	1.15
GRASA	0.34
FIBRA	3.24
CENIZA	0.49
CARBOHIDRATOS	6.93

Al comparar la composición del contenido ruminal utilizada en este trabajo se observa que el contenido de fibra y carbohidratos es más alto que los demás componentes y comparativamente la composición química del contenido ruminal de este trabajo (cuadro 12), los resultados obtenidos son ligeramente menores a lo reportado por el autor citado en este trabajo. El contenido de proteína fue de 1.15%, valor relativamente menor al que reporta **Falla (2002)** con 1.44%. El contenido de cenizas fue de 0.49%, valor menor a lo reportado por **Falla (2002)** con 0.62%. El contenido de grasa fue de 0.34%, valor menor a lo obtenido por **Falla (2002)** con 0.43%. El contenido de fibra fue de 3.24%, valor relativamente menor a lo reportado por **Falla (2002)** con 4.05%. Los datos obtenidos, en la mayoría de los casos, son superiores, probablemente, a que ellos utilizaron el contenido ruminal sin el líquido y este trabajo se usó con todo el líquido o debido a la dieta y sanidad del ganado vacuno.

4.1.2 Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado vacuno mezclado con torta de piñón

Fueron obtenidas cinéticas de producción de biogás para las diferentes proporciones (estiércol - torta de piñón - agua), las cuales se trabajó con una temperatura promedio de 30.5°C, reportan a continuación.

4.1.2.1 Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua

La Figura 3 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml agua (50:50), como se muestra en el Cuadro 6. Este proceso se realizó en un periodo de 35 días, tiempo en el cual se generó un total de 1097ml, 2223ml, 5650ml y 5585ml de biogás acumulado para 0%, 20%, 50% y 60% de torta de piñón en la mezcla, respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (5650ml) fue obtenida con 50% de torta de piñón, seguidos en orden decreciente por los experimentos con 60% (5585ml), 20% (2223ml) y 0% (1097ml) de torta de piñón; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 5650 ml fue de 98.84%, 39.34% y 19.41% respectivamente.

También podemos mencionar que en la figura 3 se observa la producción de gas durante el tiempo de digestión. Al inicio de la digestión las curvas presentan una gran pendiente en todos los experimentos con torta de piñón, debido a la gran producción de biogás. Conforme transcurren los 15 días, las pendientes disminuyen, similar comportamiento reportaron **Oyuela et al. (2010)**, utilizando en sus mezclas torta con estiércol, comportamiento podría atribuirse a que en esta etapa decrece la producción de dióxido de carbono y la producción de metano empieza a incrementar.

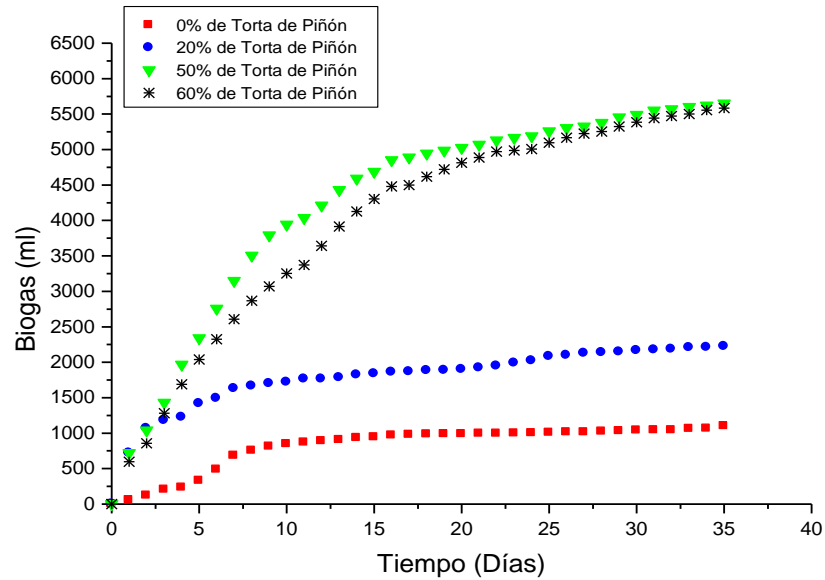


Figura 3. Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.2.2 Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 33.3% de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6% de agua

La Figura 4 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml agua (33.3:66.6), como se muestra en el Cuadro 7. Este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 551ml, 2052ml, 4497ml y 4258 ml para 0%, 20%, 50% y 60% de torta de piñón en la mezcla, respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (4497ml) fue obtenida con 50% de torta de piñón, seguidos en orden decreciente por los experimentos 60% (4258ml), 20% (2052ml) y 0% (551ml) de torta de piñón; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 4497 ml fue de 94.68%, 45.63% y 12.25% respectivamente.

Al igual como se menciona en la figura anterior las mayores pendientes de producción se produce en los primeros 15 días.

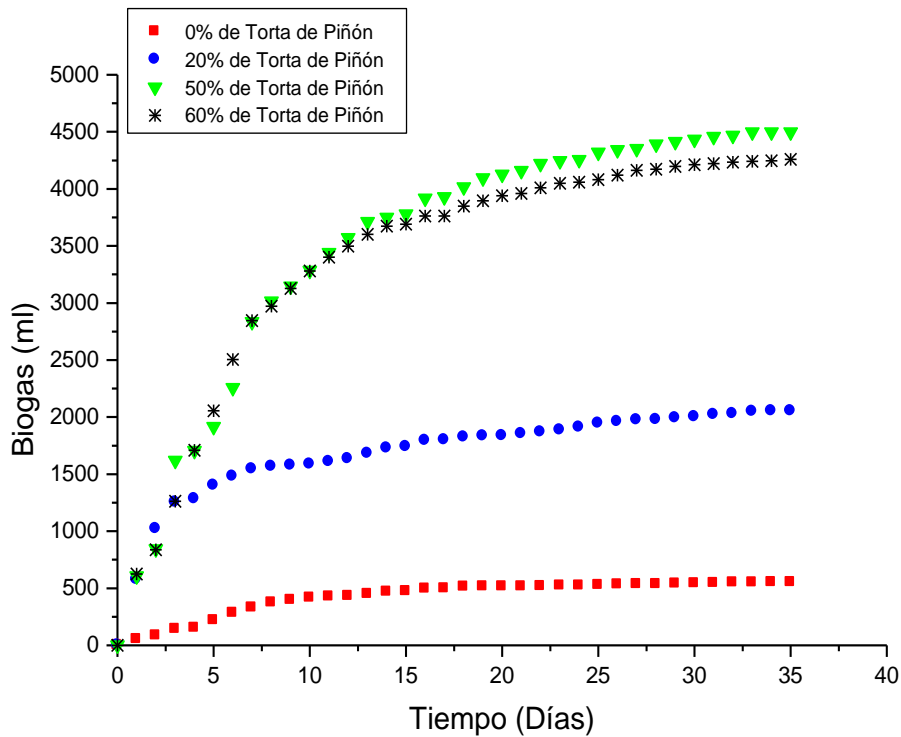


Figura 4. Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.2.3 Cinética de producción de biogás (estiércol-torta de piñón); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua

La figura 5 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml agua (25:75), como se muestra en el Cuadro 8; este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 701ml, 1248ml, 2842ml y 3188ml para 0%, 20%, 50% y 60% de torta de piñón respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (3188ml) fue obtenida con 60% de torta de piñón, seguidos en orden decreciente por los experimentos 50% (2842ml), 20% (1248ml) y 0% (701ml) de torta de piñón; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 3188ml fue de 89.14%, 39.14% y 21.98% respectivamente.

En el caso de la figura 5 las mayores pendientes de producción llegan hasta los 10 días, posiblemente, por la presencia de un mayor contenido de agua debido y menor contenido de materia orgánica, en las mezclas contenidas en los biodigestores.

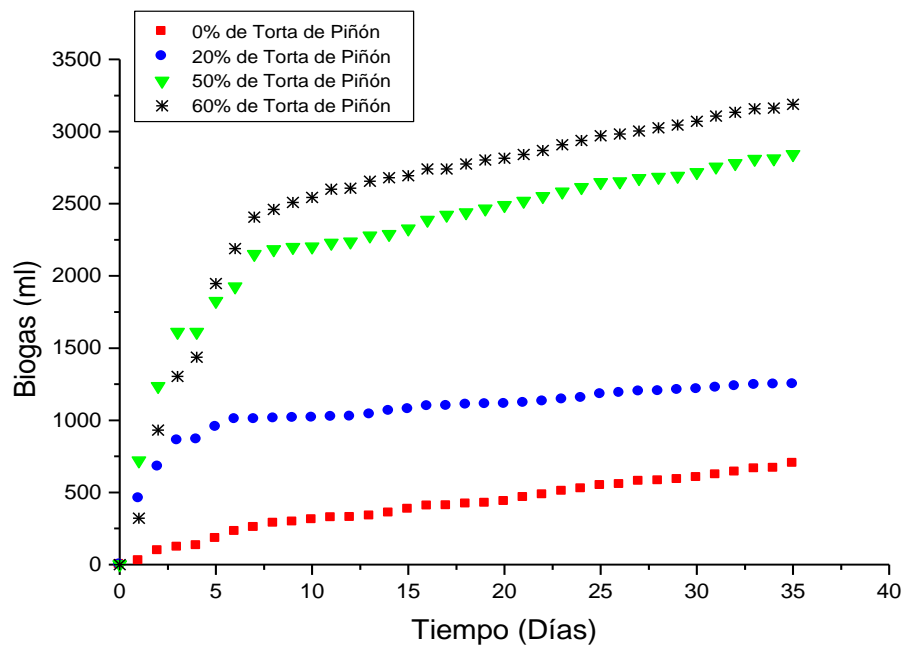


Figura 5. Volumen de biogás acumulado (estiércol-torta de piñón); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

En las Figuras 3, 4 y 5 se puede observar que hubo mayor producción de biogás cuando se utilizaron mezclas con 50 y 60 % de torta de piñón, esto indica que la torta de piñón, tiene componentes esenciales para la generación de biogás como: proteínas y grasas (cuadro 9), que puede ser utilizado por los bacterias durante la producción anaeróbica (**Makkar,**

1997). De esa manera pudiendo corroborar lo reportado por **(Lübken et al., 2007)** donde señalan que los metanogénicos son fuertemente beneficiados de un influente con alta proporción de lípidos.

El resultado obtenido concuerda con lo reportado por **Oyuela et al. (2010)** y **Medors (2007)** quienes afirman que la torta de piñón se puede utilizar para la producción de biogás, considerándola como una alternativa eficiente de materia prima para generar biogás mucho más rápido que las convencionales alimentaciones de estiércol de ganado.

Así mismo, de las figuras arriba mencionadas, se puede observar que no se produjo mayor producción de biogás en las mezclas que no contenían torta de piñón: este resultado concuerda con lo reportado por **Angelidaki et al. (1997)**, quienes mencionan que los residuos ganaderos tienen un potencial de producción de biogás que es relativamente bajo, debido a su poco contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, y la baja biodegradabilidad de la materia orgánica. Por su parte **Wu et al. (2010)** reconocen que solamente el uso del estiércol animal puede no representar la forma más eficiente de producir biogás debido a su inherente deficiencia de carbono, es decir, una relación C:N baja.

En términos de maximización de producción de biogás se observa que el biodigestor con la mezcla de mejor rendimiento es de 50% de torta de piñón en mezcla y en la relación de dilución 50 % de mezcla : 50% de agua (Figura 3), obteniendo 5650 ml/kg (5.650L/kg), ya que su producción supera los niveles de producción de biogás de las otras mezclas experimentales. Comparativamente este resultado fue mayor a lo obtenido por **Olayuela (2010)** quien obtuvo una producción máxima de 4.9 litros de biogás/kg de mezcla en un biodigestor de capacidad de 19 l, utilizando una relación de mezcla, torta : estiércol (50:50) y una relación mezcla: agua (30:70). Es probable que estas diferencias, sean atribuidas a las condiciones de operación, la calidad de sustrato utilizado, el factor dilución, la capacidad de biodigestor y otros factores determinantes en el

proceso de producción de biogás (temperatura, ph, contenido de sólidos, relación C/N, agitación-mezclado, tiempo de retención).

4.1.2.4 Influencia de la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días

En la Figura 6 se muestra la producción de biogás total producidos durante 35 días, utilizando las mezclas, g estiércol de ganado : g torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p), 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

En la Figura 6 se observa que la producción de biogás se incrementó con la adición de la torta de piñón en la mezcla, notándose producciones máximas con 50 y 60 % de adición de torta de piñón. Así mismo, se observa que para bajos porcentajes de adición de torta de piñón, la cantidad de agua adicionada no influyó en la producción de biogás.

En el Anexo 1 muestra los resultados del análisis de varianza, en él se muestra que existió influencia significativa ($P < 0,05$) del porcentaje de adición de torta de piñón, la adición de agua y de la interacción de ambas variables.

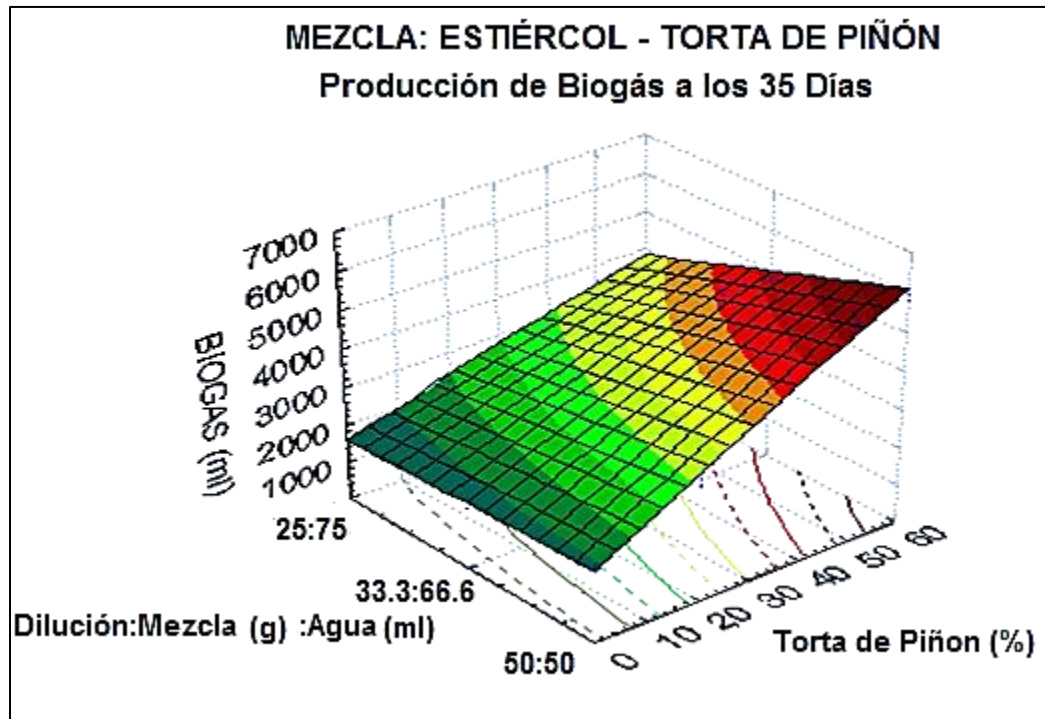


Figura 6: Análisis de superficie de respuesta de la producción de biogás con la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

De lo antes mencionado de la Figura 6 confirma lo reportado por **Barrena et al. (2010)** señalando que un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada; deduciendo que aumentando el volumen de agua de no se logra aumentar la producción de biogás, sino por el contrario se reduce. Por su parte **Oyuela (2010)** señala que la dilución por lo general debe estar dividida en 30% de materia sólida o materia orgánica y 70% de agua.

4.1.2.5 Influencia de la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días

En el cuadro 13 se muestra los valores máximos del porcentaje de metano en el biogás, obtenido del día 35, en los biodigestores con las mezclas, estiércol de ganado : torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p), 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

Cuadro 13: Promedio de producción de metano (%), obtenido en 35 días, en los biodigestores con estiércol de ganado, torta de piñón y agua.

Dilución Mezcla	Mezcla : Agua (50:50)	Mezcla : Agua (33.3:66.6)	Mezcla : Agua (25:75)
Estiércol : torta (100:0)	30	26	34
Estiércol : torta (20:80)	12.6	13.5	20.7
Estiércol : torta (50:50)	5.5	0.4	11
Estiércol : torta (60:40)	0.3	0.3	5

Con los resultados obtenidos en el cuadro 13, se realizó el análisis de superficie de respuesta de producción de Metano en la Figura 7, donde se muestra la producción de biogás total obtenidos durante 35 días, utilizando las mezclas, g estiércol de ganado : g torta de piñón (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p), 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

En la Figura 7 se observa que la producción de metano disminuyó con la adición de la torta de piñón en la mezcla, notándose producciones máximas con 0 % de adición de torta de piñón.

En el Anexo 4 muestra los resultados del análisis de varianza, en él se muestra que existió influencia significativa ($P < 0,05$) del porcentaje de adición de torta de piñón y la adición de agua.

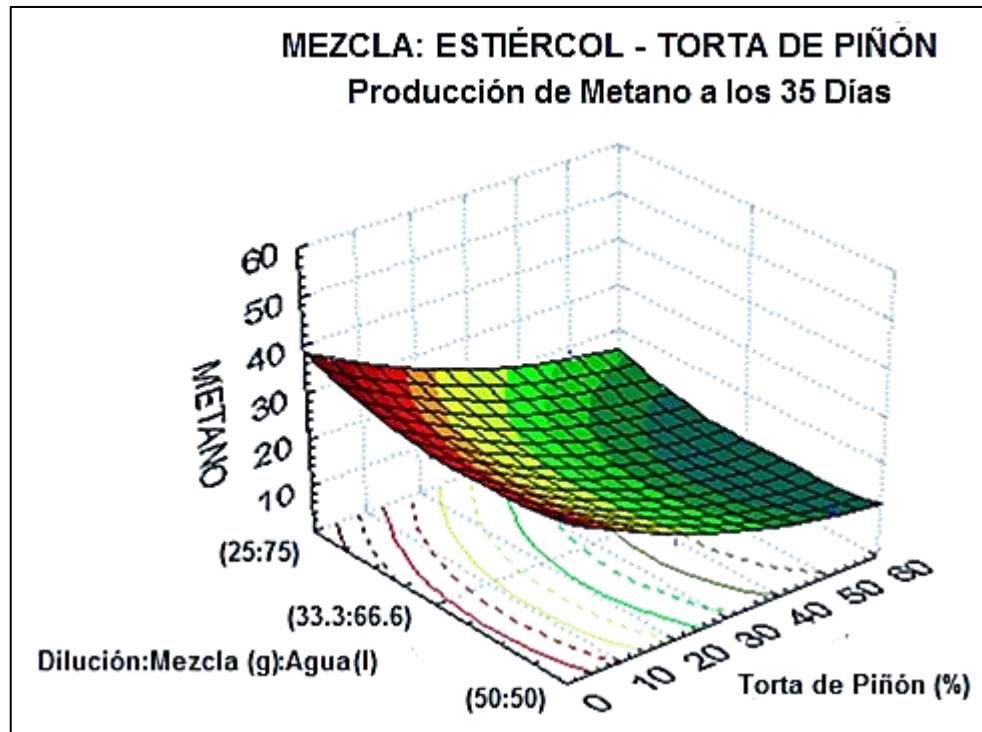


Figura 7: Análisis de superficie de respuesta de la producción de Metano con la adición de torta de piñón en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

De los resultados obtenidos en la Figura 7 confirma lo reportado por **Visser et al. (2007)** en su investigación, señalando que la torta de piñón tiene un potencial uso para la producción de biogás. Concluyendo que con la torta se da un proceso de digestión y que la producción de biogás es alta debido al alto contenido de materia orgánica, pero el contenido de Metano es menor.

Los resultados mostraron un contenido máximo de metano con la mezcla de torta de piñón de (20.7%), el cual se no aproxima bien con lo reportado en la literatura de 45% para ser inflamable (**Deublein y Steinhauser, 2008**). Por su parte **Castelar (2010)** señala que con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

4.1.3 Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado vacuno mezclado con cascarilla de arroz

Fueron obtenidas cinéticas de producción de biogás para las diferentes proporciones (estiércol – cascarilla de arroz - agua), las cuales se trabajó con una temperatura promedio de 30.5°C, reportan a continuación.

4.1.3.1 Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua

La Figura 8 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (50:50), como se muestra en el Cuadro 6; este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 1804ml, 3450ml, 4271ml y 4214ml para 0%, 20%, 50% y 60% de cascarilla de arroz respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (4271ml) con 50% de cascarilla de arroz, seguidos en orden decreciente por los experimentos 60% (4214 ml), 20% (3455 ml) y 0% (1804ml) de cascarilla de arroz; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 4271ml fue de 98.67%, 80.78% y 42.24% respectivamente.

También se podemos mencionar que en la figura 8 se observa la producción de gas durante el tiempo de digestión. Al inicio de la digestión las curvas presentan un crecimiento lento en todos los experimentos con cascarilla de arroz, posteriormente es a partir día 20 que se incrementan y la producción se prolonga a lo largo de los 35 días de digestión

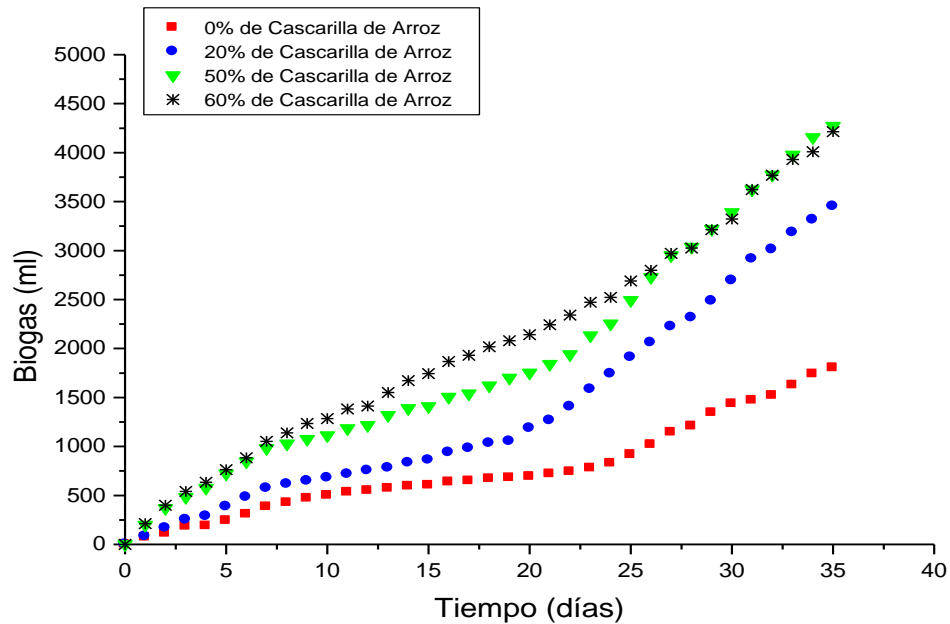


Figura 8: Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50% de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.3.2 Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua

La Figura 9 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (33,3:66,6), como se muestra en el Cuadro 7; este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 990ml, 2692ml, 2735ml y 2024ml para 0%, 20%, 50% y 60% de cascarilla de arroz respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (2735ml) con 50% de cascarilla de arroz, seguidos en orden decreciente por los experimentos 20% (2692ml), 60% (2024ml) y 0% (990ml) de cascarilla de arroz; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 2735ml fue de 98.42%, 74.00% y 36.19% respectivamente.

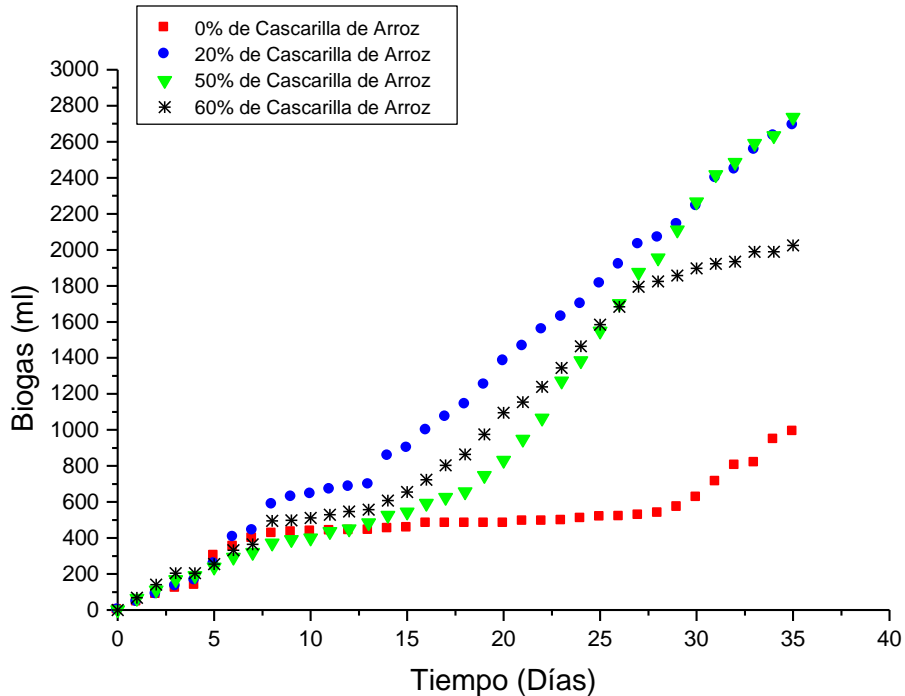


Figura 9: Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.3.3 Cinética de producción de biogás (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua

La Figura 10 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (25:75), como se muestra en el Cuadro 8; este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 942ml, 2005ml, 1633ml y 1835ml para 0%, 20%, 50% y 60% de cascarilla de arroz respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (2005ml) con 20% de cascarilla de arroz, seguidos en orden decreciente por los experimentos 60% (1835ml), 50% (1633ml) y 0% (942ml) de cascarilla de arroz; el porcentaje

de producción de biogás con respecto al máximo de 2005ml fue de 91.52%, 81.44% y 46.98% respectivamente.

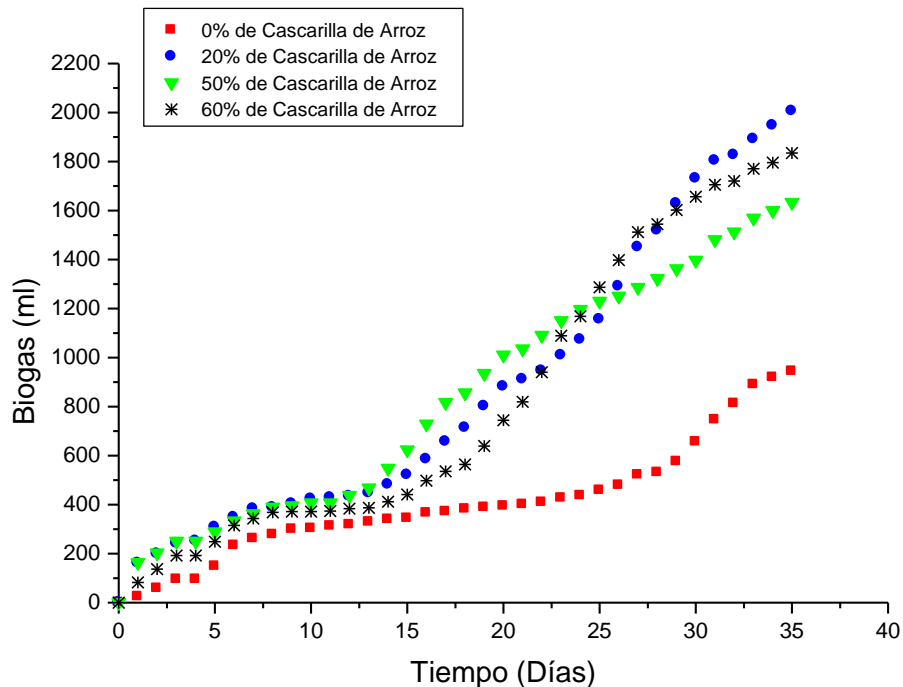


Figura 10: Volumen de biogás acumulado (estiércol-cascarilla de arroz); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

En las Figuras 8, 9 y 10 se puede observar la mayor producción de biogás fue cuando se utilizaron mezclas con 20, 50 y 60 % de cascarilla de arroz, esto indica que la cascarilla de arroz tiene componentes esenciales para la generación de biogás como carbohidratos (celulosa) y fibra (cuadro 10), que puede ser utilizado para el proceso de biodigestión (**Gómez, 2003**)

También podemos mencionar que en las figuras 8,9 y 10 se observa que la mayor producción de las mezclas con cascarilla de arroz, se genera aproximadamente a partir del día 20 en adelante, contrariamente (**Zhang y Zhang, 1999**) señalan en su investigación, que la mayor producción obtuvo en los 14 primeros días, utilizando la cascarilla de arroz, posiblemente estas diferencias se deban a las condiciones de operación realizadas antes de su mezclado y homogenizado como el pre-tratamiento

ya que la cascarilla de arroz presenta un alto contenido de silicio que son difíciles de degradar en un corto tiempo.

El resultado obtenido concuerda con lo reportado por **Quiceno et al. (2010)** y **(Zhang y Zhang, 1999)** quienes afirman que la cascarilla de arroz se puede utilizar y que es factible el tratamiento de la digestión anaerobia para la producción de biogás, considerándola como una alternativa eficiente de materia prima para ser utilizada como combustible gaseoso (biogás), debido a que este residuo agroindustrial, tiene características importantes.

Así mismo como se menciona anteriormente en las figuras 3, 4 y 5 con las mezclas que no contenían torta de piñón solo estiércol y agua no presentaron mayor producción de biogás, al igual en el figuras 8, 9 y 10 con las mezclas que no contenían cascarilla de arroz, presentando el mismo comportamiento, coincidiendo de esta manera con lo reportado por **Angelidaki et al. (1997)** y **Wu et al. (2010)** señalando que residuos ganaderos tienen un potencial de producción de biogás que es relativamente bajo y que solamente el uso del estiércol animal puede no representar la forma más eficiente de producir biogás debido a su inherente deficiencia de carbono, es decir, una relación C:N baja.

En términos de maximización de producción de biogás se observa que el biodigestor con 50% de cascarilla de arroz en mezcla y en la relación de dilución 50 % de mezcla : 50% de agua, generó el mayor rendimiento (Figura 8), obteniendo 4271 ml/kg (4.271 l/kg), ya que su producción supera los niveles de producción de biogás de las otras mezclas experimentales. Comparativamente este resultado fue menor a lo obtenido por **Henríquez et al. (2006)** quien obtuvo una producción máxima de 250 l de biogás/kg de mezcla en un biodigestor de 5 l, cargados con pollinaza (Residuo orgánico de los pollos para engorde mezclado con cascarilla de arroz), con la relación mezcla : agua (20:80). Esta diferencia se debió, probablemente, a la calidad de sustrato utilizado, factor dilución,

capacidad del biodigestor y otros factores determinantes en el proceso de producción de biogás (temperatura, ph, contenido de sólidos, inhibidores, agitación-mezclado, relación C/N, tiempo de retención).

4.1.3.4 Influencia de la adición de la cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días

La Figura 11 corresponde a la producción de biogás total producidos durante 35 días, utilizando las mezclas: g estiércol de ganado : g cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p) 50:50; 33.3:66.6 y 25:75 respectivamente.

En la Figura 11 se observa que la producción de biogás se incrementó con la adición de la cascarilla de arroz en la mezcla, notándose producciones máximas entre 20 y 60 % de adición de cascarilla de arroz. Así mismo se observa que para bajos porcentajes de adición de cascarilla de arroz, la cantidad de agua adicionada no influyó en la producción de biogás, sin embargo para porcentajes de sustitución de 20 y 60 %, se observó una mayor producción de biogás.

En el Anexo 2 muestra resultados del análisis de varianza, en él se muestra que existió influencia significativa ($P < 0,05$) del porcentaje de adición de cascarilla de arroz, la adición de agua y de la interacción de ambas variables.

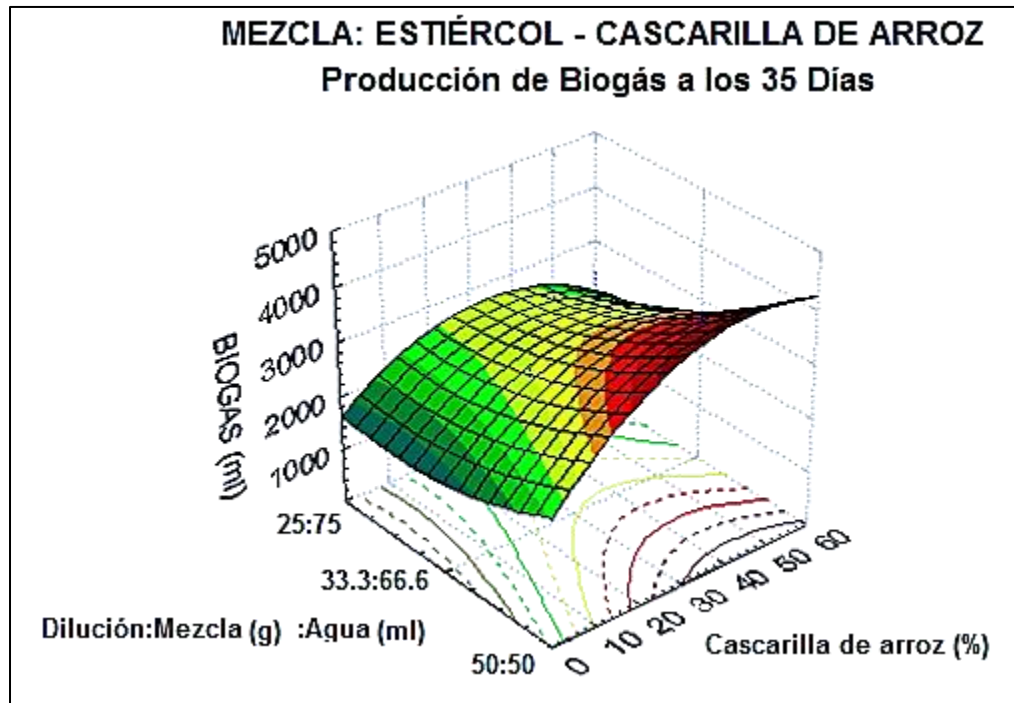


Figura 11: Análisis de superficie de respuesta de la producción de biogás con la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

4.1.3.5 Influencia de la adición de la cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días

En el cuadro 14 se muestra los valores máximos de porcentajes de metano en el biogás, obtenido del día 35, en los biodigestores con las mezclas, estiércol de ganado : cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p), 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

Cuadro 14: Promedio de producción de metano (%), obtenido en 35 días, en los biodigestores con estiércol de ganado, cascarilla de arroz y agua.

Dilución Mezcla	Mezcla : Agua (50:50)	Mezcla : Agua (33.3:66.6)	Mezcla : Agua (25:75)
Estiércol : cascarilla (100:0)	37.7	45	49
Estiércol : cascarilla (20:80)	46.5	41	47.8
Estiércol : cascarilla (50:50)	31	48.9	41
Estiércol : cascarilla (60:40)	38	47	38

Con los resultados obtenidos en el cuadro 14, se realizó el análisis de superficie de respuesta de producción de Metano en la Figura 12, correspondiente a la producción de biogás total obtenidos durante 35 días, utilizando las mezclas: g estiércol de ganado : g cascarilla de arroz (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p) 50.50; 33.3:66.6 y 25:75 respectivamente.

En la Figura 12 se observa que la producción de metano de la cascarilla es similar para todos los tratamientos.

En el Anexo 5 muestra resultados del análisis de varianza, en él se muestra que no existió influencia significativa ($P < 0,05$) de las variables estudiadas en la producción de metano.

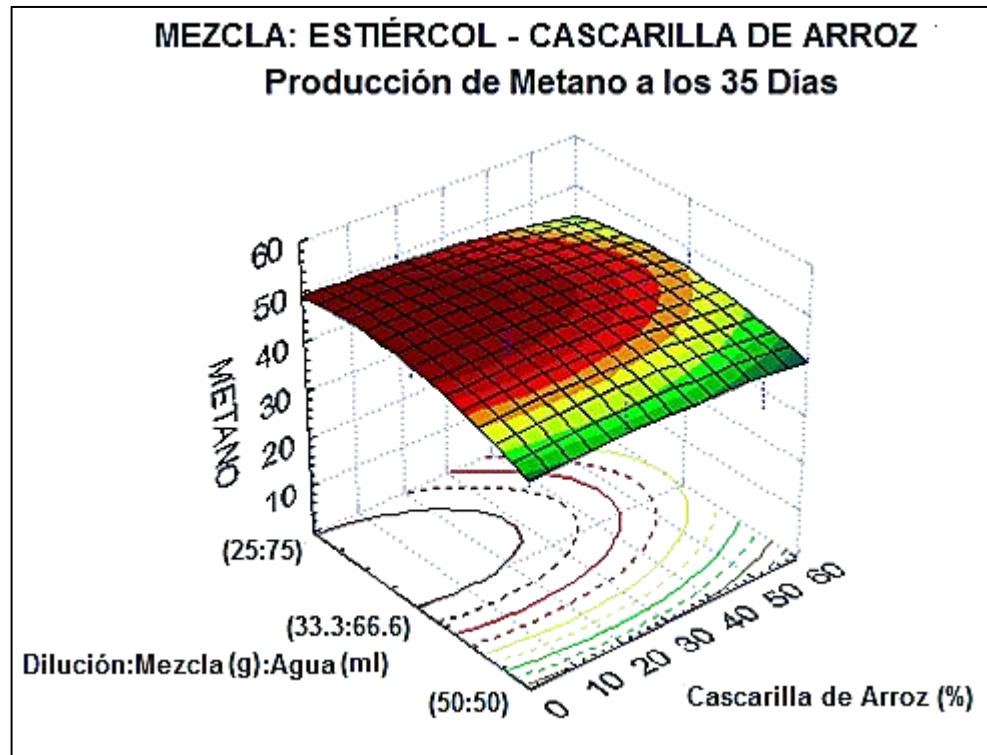


Figura 12: Análisis de superficie de respuesta de producción de metano con la adición de cascarilla de arroz en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

Los resultados mostraron un contenido máximo de metano 48.9% con la mezcla de cascarilla de arroz, el cual supera el rango mínimo de metano, reportado en la literatura de 45% para ser inflamable (**Deublein y Steinhauser, 2008**). Pero por lo contrario no se encuentra en el rango mínimo que reporta **Castelar (2010)** señalando con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

Por otro lado, los resultados mostraron un contenido de metano de 48.9% utilizando cascarilla de arroz, el cual se aproxima bien con lo reportado en la literatura de 50% con cascarilla de arroz (**Zhang y Zhang, 1999**).

4.1.4 Cinética de producción de biogás a partir del estiércol de ganado vacuno mezclado con rumen de ganado vacuno

Fueron obtenidas cinéticas de producción de biogás para las diferentes proporciones (estiércol – rumen de ganado vacuno - agua), las cuales se trabajó con una temperatura promedio de 30.5°C, reportan a continuación.

4.1.4.1 Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado vacuno); Dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua

La Figura 13 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (50:50), como se muestra en el Cuadro 6; este proceso se realizó en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 891ml, 1269ml, 1128ml y 1222ml para 0%, 20%, 50% y 60% de rumen de ganado bovino respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (1269ml) con 20% de rumen de ganado vacuno, seguidos en orden decreciente por los experimentos 60% (1222ml), 50% (1128ml) y 0% (891ml) de rumen de ganado vacuno; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 1269ml fue de 96.29%, 88.88% y 70.21% respectivamente.

También podemos observar en la figura 13 la producción de gas durante el tiempo de digestión. Al inicio de la digestión las curvas presentan un crecimiento lento en todos los experimentos en los primeros 15 días, posteriormente se observa una mayor producción, que se prolonga a lo largo de los 35 días de digestión solo en el caso de las mezclas con rumen.

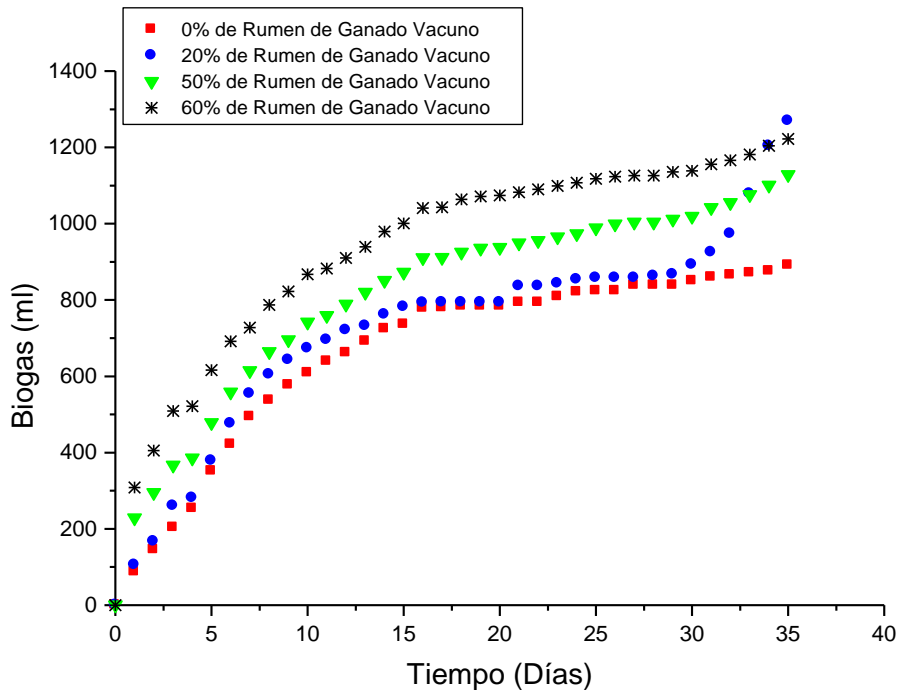


Figura 13: Volumen de biogás acumulado (estiércol-rumen de ganado vacuno); dilución 50 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 50 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.4.2 Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado vacuno); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua

La Figura 14 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (33,3:66,6), como se muestra en el Cuadro 7, en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 670ml, 762ml, 1082ml y 1164ml para 0%, 20%, 50% y 60% de rumen de ganado bovino respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (1164ml) con 60% de rumen de ganado vacuno, seguidos en orden decreciente por los experimentos 50% (1082ml), 20% (762ml) y 0% (670ml) de rumen de ganado vacuno; el

porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 1164ml fue de 92.95%, 65.46% y 57.56% respectivamente.

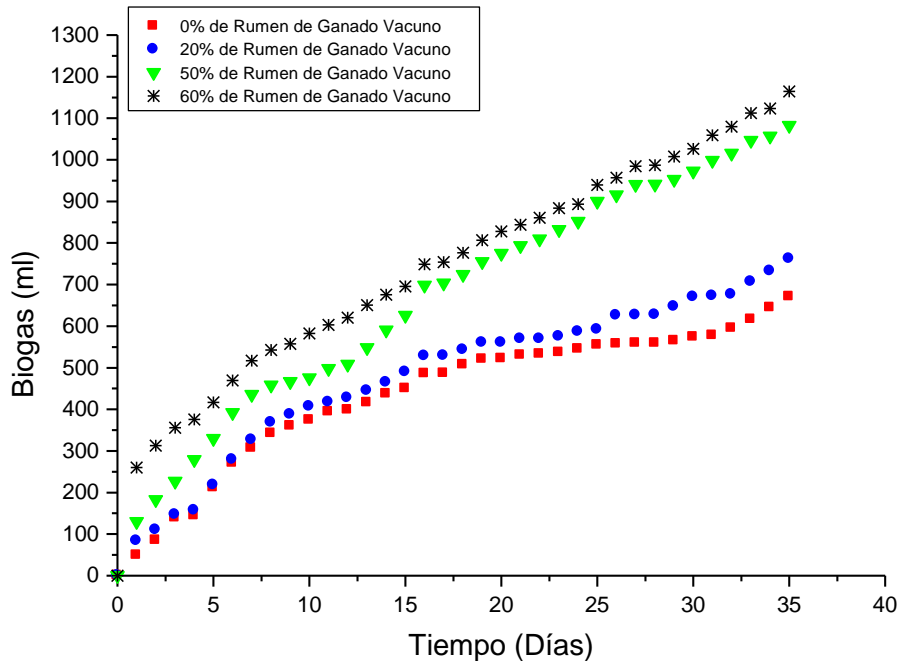


Figura 14: Volumen de biogás acumulado (estiércol-rumen de ganado vacuno); dilución 33.3 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 66.6 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

4.1.4.3 Cinética de producción de biogás (estiércol-rumen de ganado vacuno); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua

La Figura 15 muestra la cinética de producción de biogás acumulado con las mezclas: g estiércol de ganado : g rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), en una dilución, g de mezcla : ml de agua (25:75), como se muestra en el Cuadro 8, en un periodo de 35 días consecutivos, tiempo en el cual se generó un total de 810ml, 849ml, 742ml y 785ml para 0%, 20%, 50% y 60% de rumen de ganado vacuno respectivamente.

La mayor cantidad de biogás acumulado (849ml) con 20% de rumen de ganado vacuno, seguidos en orden decreciente por los experimentos 0%

(810ml), 60% (785ml) y 50% (742ml) de rumen de ganado vacuno; el porcentaje de producción de biogás con respecto al máximo de 849ml fue de 95.40%, 92.46% y 87.39% respectivamente.

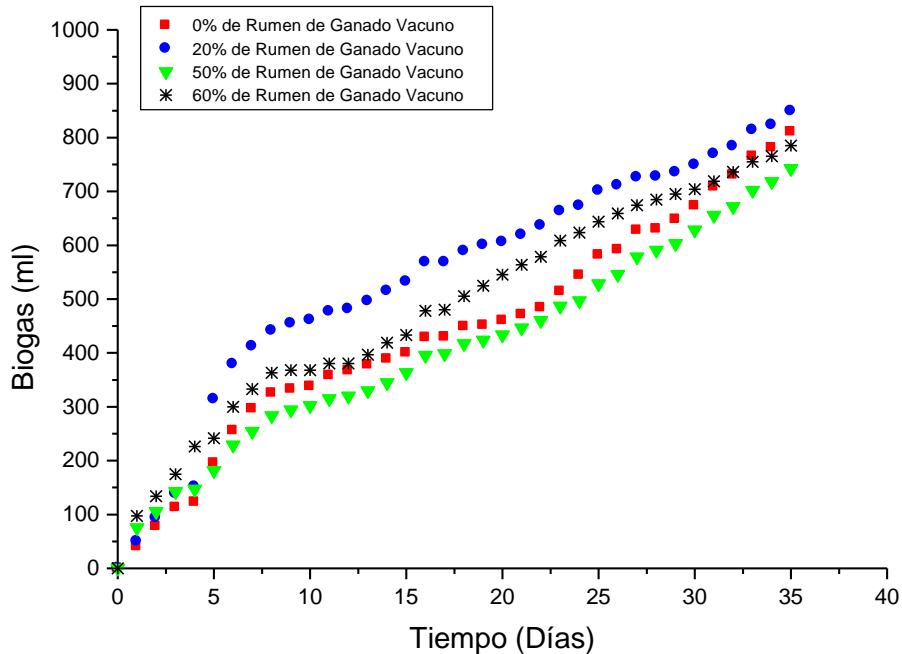


Figura 15: Volumen de biogás acumulado (estiércol-rumen de ganado vacuno); dilución 25 % de mezcla (sustrato-cosustrato) y 75 % de agua en los biodigestores batch, a los 35 días.

En las figuras 13, 14 y 15 se puede observar que en las figuras hubo mayor producción de biogás cuando se utilizaron mezclas con 20, 50 y 60 % de rumen de ganado vacuno, esto indica que el rumen de ganado vacuno tiene componentes esenciales para la generación de biogás como carbohidratos y fibra (cuadro 11), que puede ser utilizado por la carga alta de microorganismos anaeróbicos responsables del proceso de fermentación y la producción de biogás (**Moreno, 1991**).

El resultado obtenido concuerda con lo reportado por **Valencia et al. (2011)** quienes afirman que el rumen de ganado vacuno proporciona un

sustrato adecuado para la producción de biogás y servir como inóculo para la degradación de diversos desechos,

Así mismo, de las figuras arriba mencionadas, se puede observar que no se produjo mayor producción de biogás en las mezclas que no contenían rumen de ganado: este resultado concuerda con lo reportado por **Angelidaki et al. (1997)**, quienes mencionan que los residuos ganaderos tienen un potencial de producción de biogás que es relativamente bajo, debido a su poco contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, y la baja biodegradabilidad de la materia orgánica. Por su parte **Wu et al. (2010)** reconocen que solamente el uso del estiércol animal puede no representar la forma más eficiente de producir biogás debido a su inherente deficiencia de carbono, es decir, una relación C:N baja.

En términos de maximización de producción de biogás se observa que el biodigestor con 20% de rumen de ganado vacuno en mezcla y en la relación de dilución 50 % de mezcla : 50% de agua, generó el mayor rendimiento (Figura 13), obteniendo 1269 ml/kg (1.269 l/kg), ya que su producción supera los niveles de producción de biogás de las otras mezclas experimentales. Comparativamente este resultado fue menor a lo obtenido por **Alvarez et al. (2004)** quien obtuvo una producción máxima de 4.5 l de biogás/kg de mezcla con un biodigestor de capacidad de 2 l, con 6.11% de rumen de ganado en la mezcla y con una relación mezcla : agua (30:70). Esta diferencia se debió, posiblemente, a la diferente calidad de sustrato utilizado, el factor dilución, la capacidad de biodigestor y otros factores determinantes en el proceso de producción de biogás (temperatura, ph, contenido de sólidos, relación C/N, inhibidores, agitación-mezclado, tiempo de retención) como también depende del aparato gastrointestinal del animal que está relacionado con el tiempo que dure el alimento circulando a través de este.

4.1.4.4 Influencia de la adición del rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de biogás a los 35 días

La Figura 16 corresponde a la producción de biogás total producidos durante 35 días, utilizando las mezclas: g estiércol de ganado : g rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p) 50.50; 33.3:66.6 y 25:75 respectivamente.

En la Figura 16 se observa que la producción de biogás se incrementó con la adición del rumen de ganado vacuno en la mezcla, notándose producciones máximas entre 20, 50 y 60 % de adición de rumen de ganado. Así mismo se observa que para bajos porcentajes de adición de rumen de ganado vacuno, la cantidad de agua adicionada no influyó en la producción de biogás, sin embargo para porcentajes de sustitución de 20, 50 y 60 %, se observó una mayor producción de biogás.

En el Anexo 3 muestra los resultados del análisis de varianza, en él se muestra que existió influencia significativa ($P < 0,05$) del porcentaje de adición de agua.

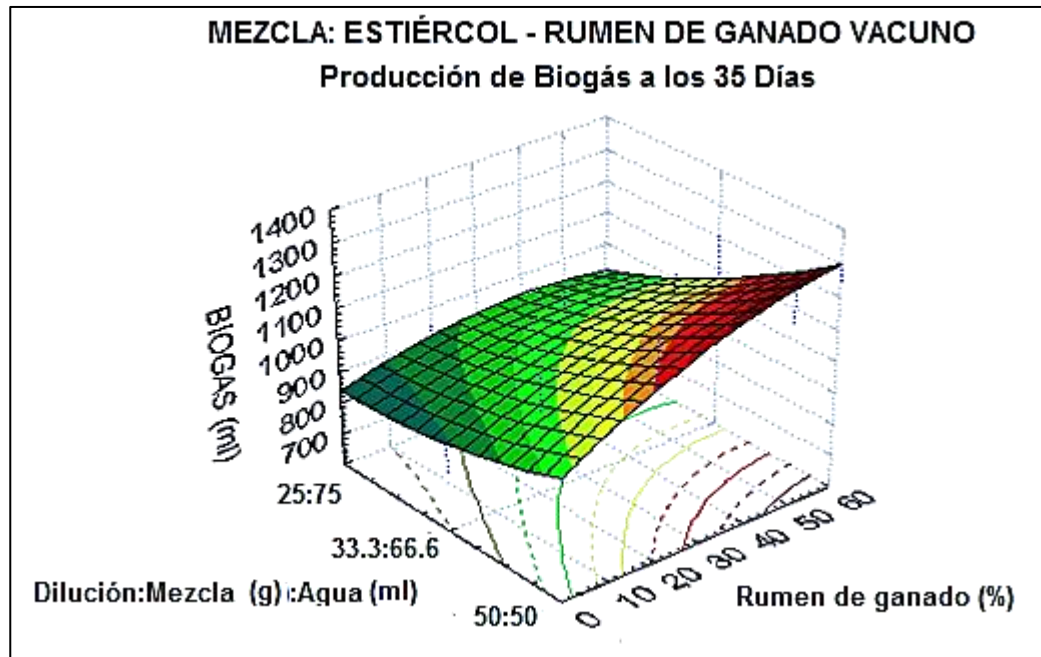


Figura 16: Análisis de superficie de respuesta de producción de biogás con la adición de rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

Con las mezclas (estiércol-torta de piñón-agua), se obtuvo la mayor producción de biogás, obteniéndose un rendimiento de 5650 ml/kg seguido de la mezclas con (estiércol-cascarilla de arroz-agua) con un valor de generación de biogás 4271 ml/kg y en ultimo lugar la mezcla (estiércol-rumen de ganado vacuno-agua) con 1269 ml/kg siendo las mezcla con cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno menores a lo obtenido por la mezcla de torta de piñón, esta diferencia, posiblemente se debió a que las grasas y aceites presentes en la torta de piñón tendrían un potencial altamente energético, según **(Lübken et al., 2007)** en un estudio realizado con aceite de colza (en proporción de 2 %) utilizando como co-sustrato con el estiércol de vaca, señaló mostrar una influencia positiva en la producción de biogás, lo que significa que las bacterias son fuertemente beneficiados de un influente con alta proporción de lípidos.

4.1.4.5 Influencia de la adición del rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida en la producción de metano a los 35 días

En el cuadro 15 se muestra los valores máximos de porcentajes de metano en el biogás, obtenido del día 35, en los biodigestores con las mezclas, estiércol de ganado : rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p), 50:50; 33.3:66.6 y 25:75.

Cuadro 15: Promedio de producción de metano (%), obtenido en 35 días, en los Biodigestores con estiércol de ganado, rumen de ganado vacuno y agua.

Mezcla \ Dilución	Mezcla : Agua (50:50)	Mezcla : Agua (33.3:66.6)	Mezcla : Agua (25:75)
Estiércol : Rumen (100:0)	40	34	38.7
Estiércol : Rumen (20:80)	31	30	35
Estiércol : Rumen (50:50)	47.2	29	40
Estiércol : Rumen (60:40)	44.6	37	39

Con los resultados obtenidos en el cuadro 15 se realizó el análisis de superficie de respuesta de producción de Metano en la Figura 17, correspondiente a la producción de biogás total producidos durante 35 días, utilizando las mezclas: kg estiércol de ganado : kg rumen de ganado vacuno (100:0; 80:20; 50:50 y 40:60), con las diluciones, % de mezcla : % agua (p/p) 50.50; 33.3:66.6 y 25:75 respectivamente.

En la Figura 17 se observa que la producción de biogás se incrementó con la adición del rumen de ganado vacuno en la mezcla, notándose producciones máximas entre 0 y 60 % de adición de rumen de ganado.

En el Anexo 6 muestra los resultados del análisis de varianza, en él se muestra que existió influencia significativa ($P < 0,05$) del porcentaje de adición de agua.

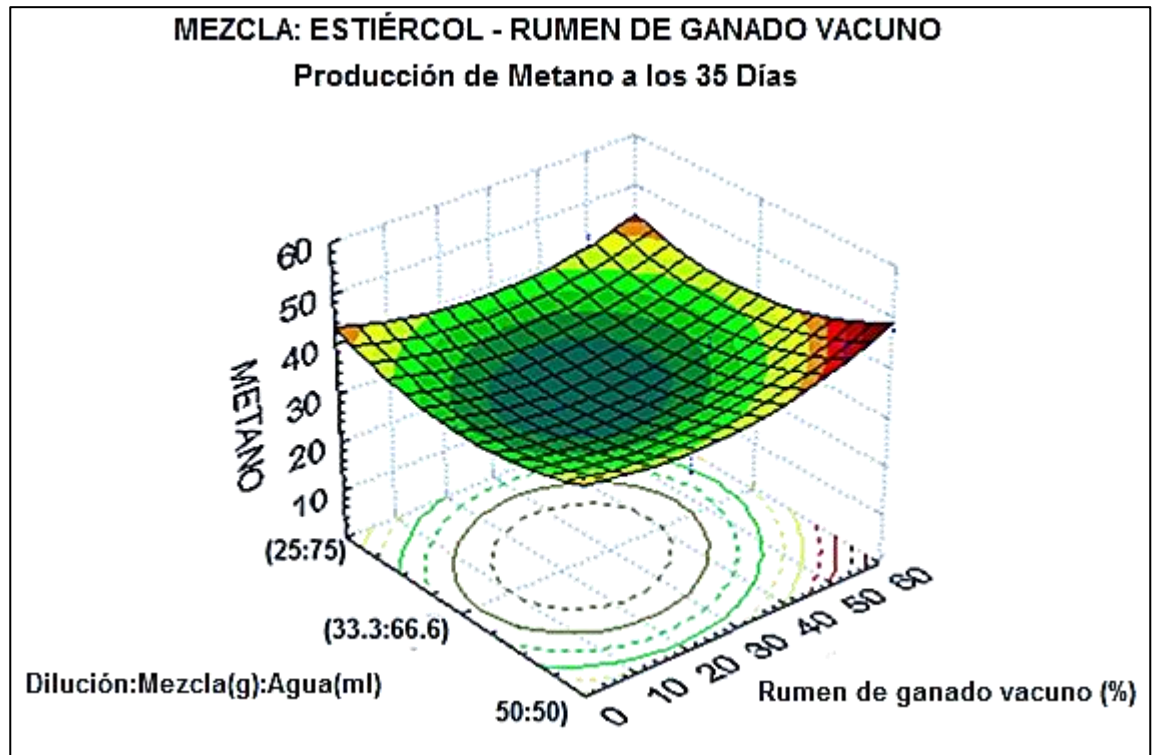


Figura 17: Análisis de superficie de respuesta de producción de metano con la adición de rumen de ganado vacuno en la mezcla con estiércol y de la cantidad de agua añadida, a los 35 días.

Los resultados mostraron un contenido máximo de metano 47.2% con la mezcla de rumen de ganado vacuno, el cual supera el rango mínimo de metano, reportado en la literatura de 45% para ser inflamable (**Deublein y Steinhauer, 2008**). Pero por lo contrario no se encuentra en el rango mínimo que reporta **Castelar (2010)** señalando con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

Por otro lado, los resultados mostraron un contenido de metano de 47.2% utilizando rumen de ganado, el cual no se aproxima con lo reportado en la literatura de 65.03% con rumen de ganado vacuno (**Laines et al., 2001**).

V. CONCLUSIONES

- Se determinó que se da un proceso de digestión y que la producción de biogás es mas alta con la mezcla, estiércol: torta de piñón (50:50) y la relación de dilución, mezcla : agua (50:50), debido al alto contenido de materia orgánica, superando los niveles de producción de biogás de las otras mezclas experimentales, generando biogás mucho más rápido que los convencionales, pero presentando un contenido de metano del 5.5%.
- La mayor producción de metano (20.7%), fue obtenido con la mezcla, estiércol : torta de piñón (20:80) y la relación de dilución, mezcla : agua (25:75), con una producción 1248 ml de biogás/ kg de mezcla, resultando un biogás de baja calidad, no siendo factible para la combustión y/o producción de energía.
- La cascarilla de arroz brinda favorables condiciones para la producción de biogás generando una producción de 2735 ml de biogás/ kg de mezcla, con la mezcla, estiércol : cascarilla de arroz (50:50), con la relación de dilución, mezcla : agua (33.3:66.6), presentando un contenido de metano del (48.9%).
- El rumen de ganado vacuno brinda favorables condiciones para la producción de biogás generando una producción de 1128 ml de biogás/ kg de mezcla con la mezcla, estiércol : rumen de ganado vacuno (50:50), con la relación de dilución, mezcla : agua (50:50), presentando un contenido de metano del (47.2%).

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar análisis de pre-tratamiento para ver si se logran reducir los contenidos de contaminantes presentes en la torta de piñón.
- Llevar a cabo a nivel de planta piloto los resultados obtenidos a nivel laboratorio con mayores rendimientos, con el fin de verificar hasta que porcentaje podrían ser digeridos eficientemente dentro del biodigestor.
- Para estudios futuros se recomienda utilizar tiempos de retención más altos que los utilizados en este estudio, para evaluar si de esta manera se podría mejorar aún más la calidad del biogás y/o el rendimiento del biogás producido.
- Realizar análisis de la calidad del biogás para reafirmar los resultados de esta investigación, ya que estos análisis no fueron realizados con muestreos que permitieran resultados estadísticamente significativos.
- Realizar con las mismas concentraciones de mezclas la prueba de combustión del metano para poder determinar a que cantidad podría dejar de ser inflamable.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. **Agarwal, D. y Agarwal, A. K. (2007).** Rendimiento y características de las emisiones de aceite de *Jatropha* (precalentado y mezclas) en un motor de encendido por compresión de inyección directa. *Ingeniería Aplicada térmica* 27, 2314-2323.
2. **Aliaga, L. (2006).** Evaluación de producción de biogás utilizando desechos porcícolas de Zamorano. Tesis Lic. Ing. Agr. Tegucigalpa, Honduras, Zamorano. 64p.
3. **Alvarez, R.; Riera, V y Villca, S. (2004).** Producción Anaeróbica de Biogás Aprovechamiento de los Residuos del Proceso Anaeróbico. La Paz – Bolivia.
4. **Angelidaki, I. (1997).** Anaerobic Digestion in Denmark past, present and future. *Aprovechamiento Energéticos de Residuos Orgánicos*, Nov. Berlín (Alemania), pp 214-215.
5. **Arbelaez, J. (2001).** Cascarrilla de arroz: Insumo carbonado en el compostaje aeróbico de gallinaza para fertilizante edáfico. *Revista Induarroz Federación Nacional de Industriales del Arroz*. 65-70 p.
6. **Ardón, L. (1992).** Diseño y construcción de un sistema para la obtención y utilización de biogás, a través de desechos orgánicos diversos, para uso del campo experimental de la facultad de ciencias agronómicas de la U.E.S. , Universidad de El Salvador, tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico.
7. **Atlas, R. y Bartha, R. (2002).** *Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental*. Madrid. Addison Wesley.
8. **Barrena, M; Gamarra, O y Maicelo, J. (2010).** Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento. Chachapoyas-Perú.
9. **Barrena, M.; Maicelo, J.; Gamarra O.; Murga M. (2009).** Parámetros para producir biogás en laboratorio con estiércol de bovino, agua de desagüe y cascara de papa. Florianópolis – Brasil.

10. **Brinkman J. (1999).** Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries. Proceedings of the II International symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste. Barcelona, Junio de 1999, 190-191.
11. **Bohn I.; Björnsson L.; Matiasson B. (2007).** The energy balance in farm scale anaerobic digestion of crop residues at 11-37°C. Process Biochemistry. 42, 57-64.
12. **Botero, R; Preston TR. (1987).** Biodigestores de Bajos Costos para la Producción de Combustibles y Fertilizantes a partir de Excretas. Manual Para su Instalación, Operación y Utilización. Edición 1987. 20p.
13. **Castelar, F. (2010).** Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, I.N.T.A.
14. **CONAMA (1998).** Guía para el control de prevención de la contaminación (Industria procesadora de carne) Comisión Nacional del Medio Ambiente-región Metropolitana Santiago.
15. **Coto, J.; Maldonado, J. (2005).** Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en EARTH. Tesis Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 62 p.
16. **Chamy, R. y Pizarro, C. (2004).** Biogás: energía limpia a partir de la basura. Valparaíso. Laboratorio de Biotecnología Ambiental, Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
17. **Chiriboga, O. (2010).** Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas, Quito-Ecuador.
18. **Church, D. (1993).** Fisiología digestiva y nutrición: Zaragoza.
19. **Deublein, D.; Steinhauser, A. (2008).** Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
20. **Domínguez; C. Flores; L. y Obregón F. (2002).** Uso del contenido ruminal. www.uasnet.mex./centro/profesinal/emvz/ovino.

21. **Fernández, M. (2006).** Elaboración de una metodología para el estudio experimental de la digestión anaerobia de agroresiduos, en particular residuos cañeros-Cuba.
22. **Flotats, X.; Campos, E.; Bonmati, A. (1997).** Aprovechamiento energético de residuos ganaderos. Cursd' Enginyeria Ambiental: Aprofitament enegétic de residus orgànics (3º.1997: Lleida). Memorias. 1-21.
23. **Gómez, A. y Gutiérrez, M. (2002).** Estudio de la prevalencia de Rotavirus del Grupo C en muestras de material fecal diarreica y no diarreica en ganado bovino de 0 a 1 mes de edad en el municipio de Facatativa Cundinamarca. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. Microbiología Agrícola y Veterinaria. Departamento de microbiología. 19 -22.
24. **Guevara, M. (1995).** Caracterización y evaluación de la cascarilla de arroz como combustible. Trabajo de grado Ingeniero Agroindustrial. Santa Fe de Bogotá: Universidad Nacional. Facultad de Ingeniería, 350 p.
25. **Henríquez L.; Mantilla J y Niño, M. (2006).** Influencia de la temperatura interna en digestores tipo batch cargados con pollinaza. Livestock Research for Rural Development. Volúmen 18, el artículo # 112 de agosto: <http://www.lrrd.org/lrrd18/8/henr18112.htm>.
26. **Karaj, Sh.; Rehl, T.; Muller, J. (2009).** Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albaniall; Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 14; pág. 493 – 499
27. **Karim, K.; Hoffmann, R.; Klasson, T.; Al-Dahhan, M. (2005).** Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. En: Water Research 39, p. 3597–3606
28. **Kossmann, W. Y Pönitz, U. (2000).** Biogas Digest, Biogas Basics. Information and Advisory Service on Appropriate Technology. Federal Republic of Germany. p. 4-14, 26-30.
29. **Laines, J. (2001).** Obtención de biogás a partir de la excreta de ganado bovino usando un biodigestor ecológico”, Juarez- México.

30. **Liu, H.; Zhou, Y.; Yang, M.; Chen, B. (2009).** Computers and Chemical Engineering, 33, 1091.
31. **Lubken, M.; Wichern, M.; Schlattmann, M.; Gronauer, A.; Horn, H. (2007).** Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops. En: Water Research 41, p. 4085–4096.
32. **Macias-Corral M.; Samani Z.; Hanson A.; Smith G.; Funk P.; Yu H. y Longworth J. (2008).** Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. Bioresource Technology 99, 8288–8293.
33. **Makkar H.; Becker K. (1997).** Potential of *J. curcus* seed meal as protein supplement to livestock feed, constraints to its utilization and possible strategies to overcome constraints, Biofuels and Industrial products from *Jatropha curcus*. Symposium “*Jatropha 97*” Managua, Nicaragua. Feb pp. 23-27.
34. **Mendez, D. (1997).** Toxicidad y biodegradación anaerobia de formaldehído. Tesis en opción al título académico de Doctor en Ciencia. Santiago de Compostela.
35. **Middlebrooks, E. J.; Middlebrooks, C. H.; Reynolds, J. H.; Watters, G. Z.; Reed, S. C. y George, D. B. (1982).** Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading. Macmillan Pub. Co., Nueva York.
36. **Monnet, F. (2004).** An introduction to anaerobic digestion of organic waste, Final.Report, Remade Scotlan, November.
37. **Montes, JM.; Rodríguez Aliciardi, M.; Vaca Chavez, J.; Guzmán C, y Calandri, E. (2011).** Caracterización de *Jatropha Curcas* L. SEED y su aceite.
38. **Moreno, M. D. (1991).** Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de Operadores. MOPT. Madrid.
39. **Nafisa Ali, Kurchania AK y Babel Swati (2010).** Biometanización de la *Jatropha curcas* desgrasada, Rajasthan, India.

40. **Ostrem, K. (2004).** Greening Waste: Anaerobic Digestion For Treating The Organic Fraction Of Municipal Solid Wastes. Earth Engineering Center Columbia University.
41. **Oyuela, F. (2010).** Evaluación de la producción de biogás y biol a partir de la torta de *Jatropha curcas* L. Tegucigalpa, Honduras.
42. **Pino, C. (2005).** Determinación de la mejor dosis de biol en el cultivo de banano como alternativa a la fertilización foliar química. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
43. **Quiceno, D y Mosquera A. (2010).** Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible Santiago de Cali.
44. **Rodríguez, F. (2010).** Puesta en marcha de un Laboratorio para la producción de Biogás-Nicaragua.
45. **Soria, M.J.; Ferrera Cerrato R.; Barra J.E.; González, G.A.; Santos, J.T; Gómez, L.B.; Pérez, G.P. (2001).** Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo.
46. **Santolugo, J. (2007).** Potencialidades Energéticas y Medioambientales del Arbol de *Jatropha curcas* L. en las Condiciones Edafológicas de la Región Semiarida de la Provincia de Guantánamo (en línea). Autores: José Ángel Sotolongo, Pedro A. Beatón Delgado, Armando Díaz García, Sofía Montes de Oca López, Yadiris del Valle Atala, Soraya García Pavón. Consultado el 8 de Junio de 2010. Disponible en:
<http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2426/1957>.
47. **Schanbacher, F.L.; Willett, L.B.; Borger, D.C.; Neiswander, R.L.; Gratz, M. (2005).** Bioprocesses associated with anaerobic digestion of manures and food wastes for the production of biogas.
48. **Stroot, P.; McMahon, K.; Mackie, R.; Raskin, L. (2001).** Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing condition: I. Digester performance. En: *Water Research* 24, p. 1804–1816.
49. **Shuler, M.; Kargi, F. (2002).** *Bioprocess Engineering*. Prentice Hall, 2da Edición. Estados Unidos, págs. 120-133.

50. **Staubmann, R.; Foidl, G.; Foidl, N.; Gübitz, GM.; Lafferty, RM.; Arbizu, VMV. (1981).** Steiner W. Biogas production from *Jatropha curcas* press-cake, Applied biochemistry and biotechnology Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals No18, Gatlinburg, Tennessee, vol. 63-65 (910 p.) (28 ref.), pp. 457-467.
51. **Sociedad de Agricultores de Colombia S.A.C. (2002).** Guía ambiental para el subsector porcícola. Colombia. 102 p.
52. **Uicab-Brito, C.A; Sandoval Castro. (2003).** Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2: 45 – 63.
53. **Valencia, E.; Valenzuela, E.; González, S y Vargas, C. (2011).** Digestión anaeróbica de rúmen bovino en laboratorio y determinación química pre y post tratamiento Osorno, Chile.
54. **Van Lier, J. Zeeman, G. Current (2008).** Trends in Anaerobic Digestion. Lettinga Associates Foundation & Wageningen University. The Netherlands.
55. **Veeken, A., Sanders, W. (2002).** Analysis and optimization of the Anaerobic Digestion Of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. USA.
56. **Visser, J; Adriaans, T. (2007).** “Anaerobic digestion of *Jatropha curcas* Press” Cake. 18 de enero del 2007. 21 P. sitio web:
<http://www.ingenia.nl/Flex/Site/Page.aspx?SectionID=1470&Lang=NL>
57. **Von Munch, E.; Keller, J.; Lant, P.; Newell, R. (1994).** Mathematical modelling of prefermenters-I; model development and verification. En: Water Resource 33, p. 2757–2768.
58. **Watanabe, T.; Kimura, K.; Asakawa, S. (2009).** Distinct members of a stable methanogenic archaeal community transcribe genes under flooded and drained conditions in Japanese paddy field soil. En: Soil Biology and Biochemistry 41, p. 276–285.

59. **Weiland, P. (2003).** Production and energetic use of biogás from energy crops and wastes in Germany. *Appl. Biochemical Biotechnology*, 109, 263-274.
60. **WERNER, U.; STÖHR, U.; HEES, N. (2010).** Biogas Plants in Animal Husbandry. Deutsche Zentrum für Entwicklungs technologien (GATE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
61. **ZHANG, R.H. Y Z. ZHANG. (1999).** Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology* 68, p.235-245.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Análisis de varianza de la producción de biogás con torta de piñón a los 35 días.

ANOVA; Var.: BIOGÁS; R-sqr=.97027; Adj:.94549 (noname.sta)
2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=181825.
DV: BIOGAS.

	SS	df	MS	F	p	
(1)Porcentaje(L)	28408249.	1	28408249.	156.2395	.000016	*
Porcentaje (Q)	14025.	1	14025.	.0771	.790542	
(2)Dilución (L)	4721957.	1	4721957.	25.9698	.002230	*
Dilución (Q)	1373.	1	1373.	.0075	.933590	
1L by 2L	1780467.	1	1780467.	9.7922	.020344	*
Error	1090950.	6	181825.			
Total SS	36693073.	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

ANEXO 2: Análisis de varianza de la producción de biogás con cascarilla de arroz a los 35 días.

ANOVA; Var.: BIOGÁS; R-sqr=.96473; Adj:.93533 (noname.sta)
2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=80907.03
DV: BIOGAS

	SS	df	MS	F	p	
(1)Porcentaje(L)	3482701.	1	3482701.	43.04572	.000600	*
Porcentaje (Q)	1888135.	1	1888135.	23.33709	.002908	*
(2)Dilución (L)	6120976.	1	6120976.	75.65443	.000128	*
Dilución (Q)	446083.	1	446083.	5.51352	.057208	
1L by 2L	943200.	1	943200.	11.65782	.014242	*
Error	485442.	6	80907.			
Total SS	13761719.	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

ANEXO 3: Análisis de varianza de la producción de biogás con rumen de ganado vacuno a los 35 días.

ANOVA; Var.: BIOGÁS; R-sqr=.72556; Adj:.49687 (noname.sta)
 2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=22329.37
 DV: BIOGAS

	SS	df	MS	F	p	
(1)PORCEN (L)	99382.4	1	99382.4	4.450746	.079408	
PORCEN (Q)	6760.5	1	6760.5	.302764	.602022	
(2)Dilución (L)	201171.1	1	201171.1	9.009261	.023960	*
Dilución (Q)	4802.5	1	4802.5	.215076	.659165	
1L by 2L	26142.0	1	26142.0	1.170747	.320805	
Error	133976.2	6	22329.4			
Total SS	488186.4	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

ANEXO 4: Análisis de varianza de la producción de Metano con Torta de Piñón a los 35 días.

ANOVA; Var.: METANO; R-sqr=.98351; Adj:.96977 (noname.sta)
 2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=4.296016
 DV: METANO

	SS	df	MS	F	p	
(1)Porcentaje(L)	1388.361	1	1388.361	323.1741	.000002	*
Porcentaje (Q)	40.854	1	40.854	9.5097	.021558	*
(2)Dilución (L)	61.625	1	61.625	14.3447	.009101	*
Dilución (Q)	62.404	1	62.404	14.5260	.008850	*
1L by 2L	.007	1	.007	.0017	.968529	
Error	25.776	6	4.296			
Total SS	1563.383	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

ANEXO 5: Análisis de varianza de la producción de Metano con Cascarilla de Arroz a los 35 días.

ANOVA; Var.: METANO; R-sqr=.45405; Adj:0. (noname.sta)

2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=32.21292

DV: METANO

	SS	df	MS	F	p	
(1)Porcentaje (L)	31.8879	1	31.88795	.989912	.358180	
Porcentaje (Q)	4.0702	1	4.07017	.126352	.734407	
(2)Dilución (L)	68.3767	1	68.37673	2.122649	.195396	
Dilución (Q)	50.4600	1	50.46000	1.566452	.257306	
1L by 2L	9.5543	1	9.55434	.296600	.605656	
Error	193.2775	6	32.21292			
Total SS	354.0225	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

ANEXO 6: Análisis de varianza de la producción de Metano con Rumen de Ganado Vacuno a los 35 días.

ANOVA; Var.: METANO; R-sqr=.7465; Adj:.53525 (noname.sta)

2 factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Residual=14.7241

DV: METANO

	SS	df	MS	F	p	
(1)Porcentaje (L)	31.1591	1	31.1591	2.116198	.195985	
Porcentaje (Q)	66.0794	1	66.0794	4.487839	.078451	
(2)Dilución (L)	9.6515	1	9.6515	.655487	.449066	
Dilución (Q)	128.3438	1	128.3438	8.716578	.025534	*
1L by 2L	18.1978	1	18.1978	1.235921	.308809	
Error	88.3446	6	14.7241			
Total SS	348.5025	11				

Los datos de color rojo (*) muestran influencia entre ellos.

Anexo 7: Imágenes referente al desarrollo de la investigación:



Sustratos utilizados en la producción de biogás.



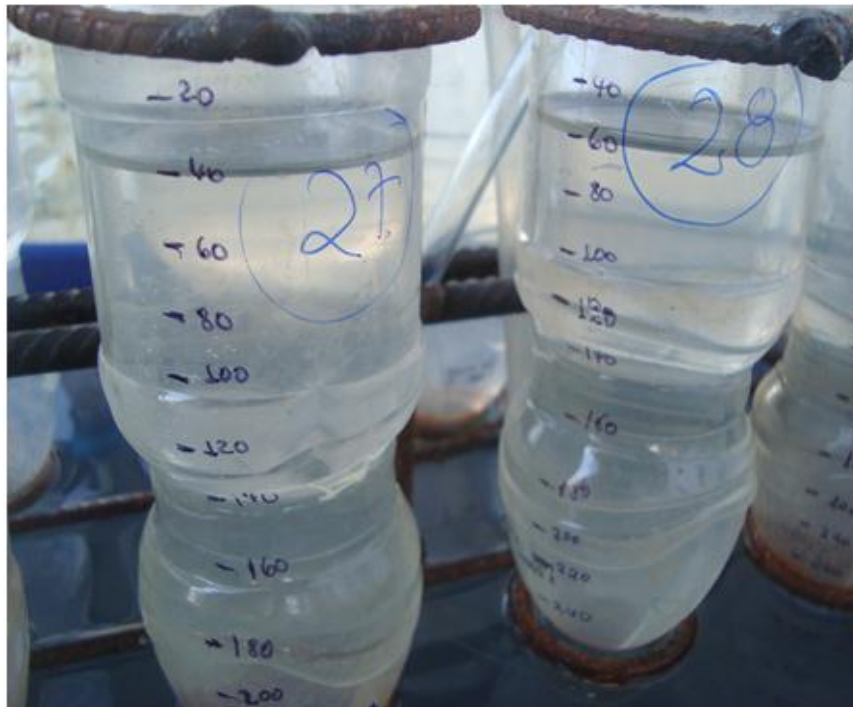
Colocación de los colectores (botellas descartables de 260ml) en los soportes de fierro.



Colector de biogás debidamente calibrado produciendo burbujas de aire el cual es el biogás producido por el biodigestor.



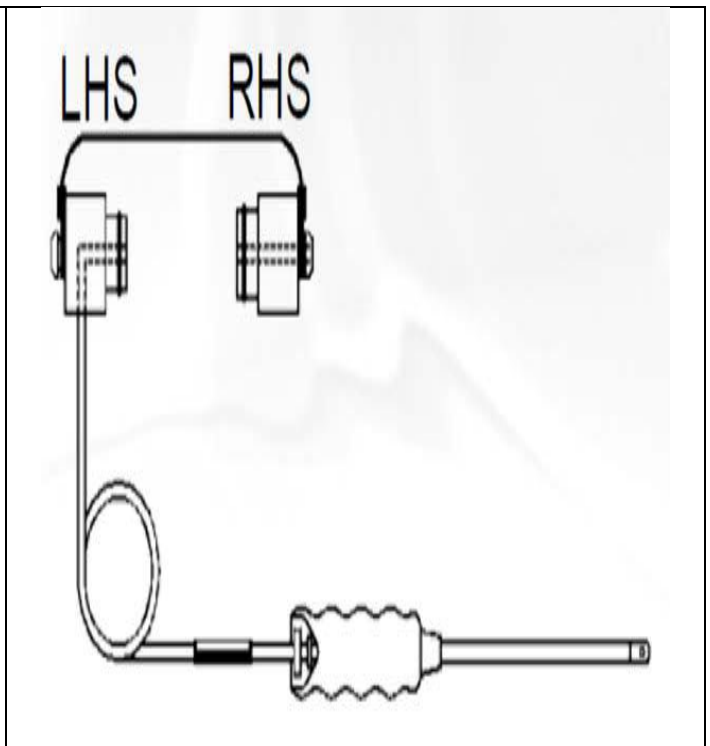
Monitoreo de la producción de biogás.



Colectores con menor cantidad de agua producto de la presión que ejerce el gas que se produce en los biodigestores.



Equipo Analizador de biogás



Kit de muestreo de biogás (sonda)

Equipo portátil de detección de gases (metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y oxígeno).