

# Universidad Católica Santa María

## Escuela de Postgrado

### Doctorado en Ciencias Ambientales



**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS EN UNA PLANTA TIPO *HIGH PERFORMANCE TEMPERATURE CONTROLLED - HPTC* DE DOBLE CÁMARA HIDROLÍTICA A PARTIR DE DESECHOS DE CAMAL Y ESTIÉRCOL DE VACUNOS EN EL FUNDO LA CATÓLICA DE MAJES – AREQUIPA 2016**

Tesis presentada por el Magister:

**Ponce Mallea Marco Adrián**

para optar el Grado Académico de

**Doctor en Ciencias Ambientales.**

Asesor:

**Professor Ponce Soto Luis Alberto Ph.D.**

**Arequipa – Perú**

**2018**

**DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR  
EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Sr. Dr.:

Hugo Tejada Pradell

Director de la Escuela de Postgrado de la UCSM

Presente-

De mi mayor consideración:

En atención al nombramiento como Dictaminador del Borrador de Tesis presentado por el Magister Marco Adrián Ponce Mallea, con el que pretende optar el grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales, debo informar que el trabajo ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos trazados y se han hecho las correcciones de forma y fondo correspondientes, encontrándose apto para su sustentación, por lo que doy mi dictamen aprobatorio.

Atentamente

Arequipa 30 de Noviembre del 2017

  
Dr. Gonzalo Dávila del Carpio



**DICTAMEN BORRADOR DE TESIS**

Arequipa, 28 de Noviembre del 2017

**Sr. Dr.**

**HUGO TEJADA PRADELL**

**Director de la Escuela de Postgrado de la UCSM**

**Presente.-**

Tengo el agrado de dirigirme a usted para saludarlo y a su vez poner en conocimiento que el doctorando PONCE MALLEA MARCO ADRIAN ha presentado su proyecto de tesis titulado **ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN UNA PLANTA TIPO HIGH PERFORMANCE TEMPERATURE CONTROLLED -HPTC DE DOBLE CÁMARA HIDRO LÍTICA A PARTIR DE DESECHOS DE CAMAL Y ESTIÉRCOL DE VACUNO EN EL FUNDO LA CATÓLICA DE MAJES - AREQUIPA 2016** el cual soy de la opinión debe pasar a exposición.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterar los sentimientos de mi mayor consideración.

Atentamente,



Dr. Edwin Bocardo Delgado

INFORME No. 0010-2017-LAPS

A : **Dr. Hugo Tejada Pradell**  
Director de la Escuela de Post Grado  
Universidad Católica de Santa María de Arequipa.

DE : Prof. Luis Alberto Ponce Soto Ph.D.

ASUNTO : Informe de Dictamen de Borrador de Tesis “Estudio para la optimización de parámetros para la generación de biogás en una planta tipo High Performance Temperature Controlled – HPTC de doble cámara hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el fundo La Católica de Majes – Arequipa – 2016”, presentado por el Magister Marco Adrián Ponce Mallea, para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales.

FECHA : Arequipa, 28 de Noviembre del 2017.

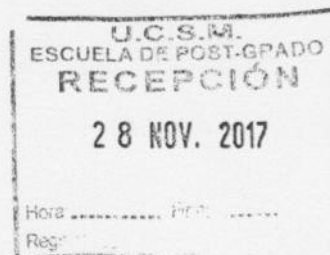
Tengo a bien dirigirme a usted, con la finalidad de informarle sobre el asunto, lo siguiente; después de haber revisado y evaluado el mencionado borrador de tesis intitolado “Estudio para la optimización de parámetros para la generación de biogás en una planta tipo High Performance Temperature Controlled – HPTC de doble cámara hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el fundo La Católica de Majes – Arequipa – 2016”, soy de la opinión de APROBAR en el formado actual.

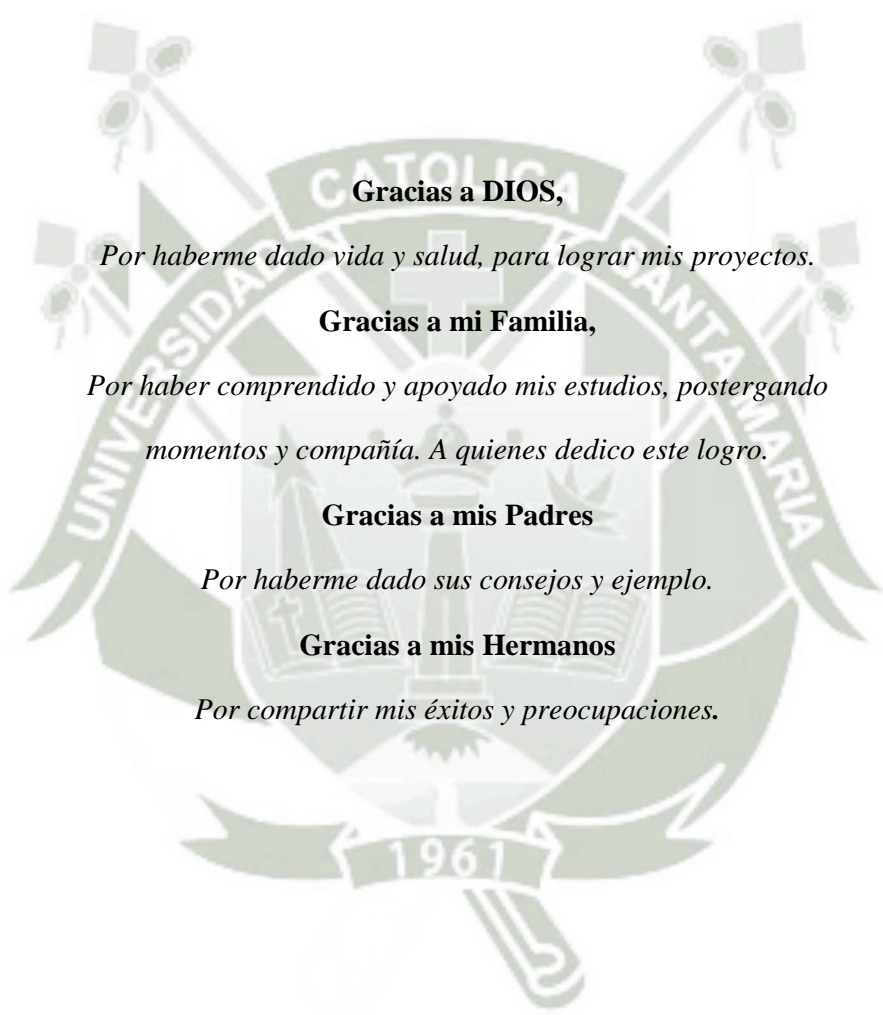
Es todo cuanto tengo que informar sobre el particular quedando en espera para cualquier esclarecimiento.

Atentamente,



Prof. Luis Alberto Ponce Soto Ph.D.  
DNI 29546298  
Asesor





**Gracias a DIOS,**

*Por haberme dado vida y salud, para lograr mis proyectos.*

**Gracias a mi Familia,**

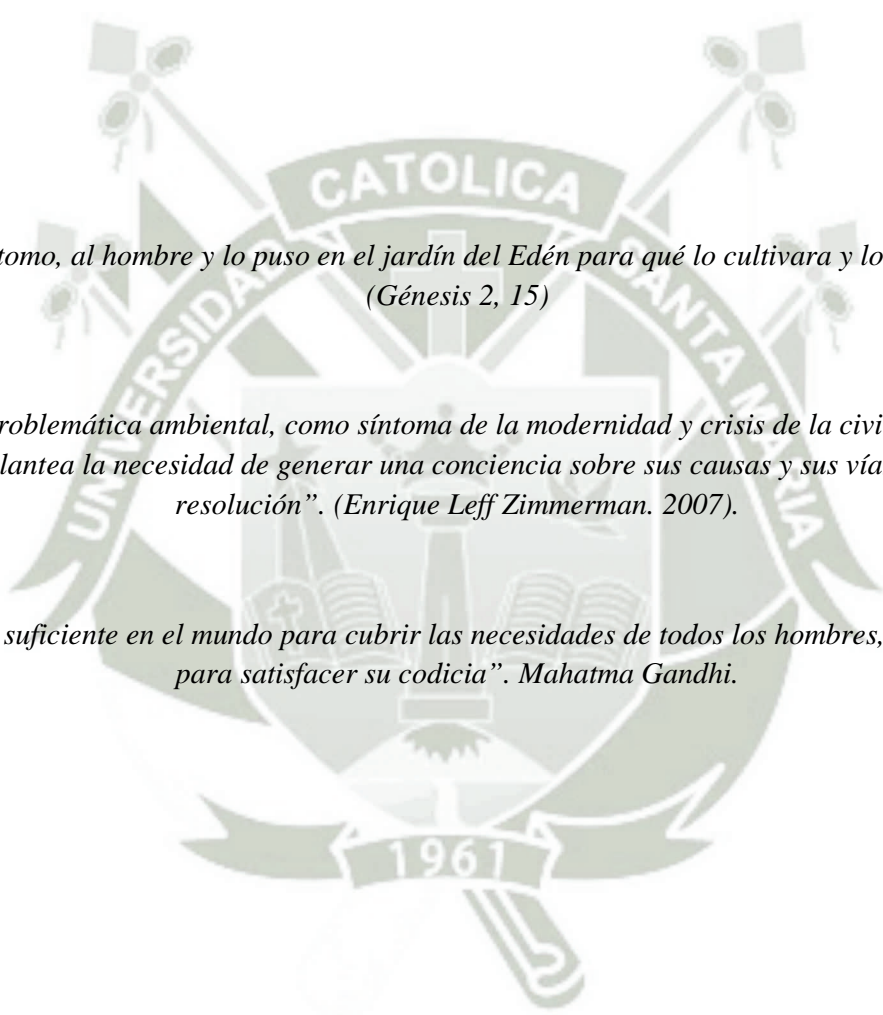
*Por haber comprendido y apoyado mis estudios, postergando momentos y compañía. A quienes dedico este logro.*

**Gracias a mis Padres**

*Por haberme dado sus consejos y ejemplo.*

**Gracias a mis Hermanos**

*Por compartir mis éxitos y preocupaciones.*



*“Yave tomo, al hombre y lo puso en el jardín del Edén para qué lo cultivara y lo cuidara”  
(Génesis 2, 15)*

*“La problemática ambiental, como síntoma de la modernidad y crisis de la civilización;  
plantea la necesidad de generar una conciencia sobre sus causas y sus vías de  
resolución”. (Enrique Leff Zimmerman. 2007).*

*“Hay suficiente en el mundo para cubrir las necesidades de todos los hombres, pero no  
para satisfacer su codicia”. Mahatma Gandhi.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María

A la Escuela de Post Grado

A los asesores Professor Luis Alberto Ponce Soto, Ph. y Dr. Gonzalo Dávila del Carpio

A los profesores

A los Condiscípulos y Alumnos

Por compartir sus conocimientos y enseñanzas, tantas horas de análisis y buscar soluciones a problemas, por la generosidad y obsequio de su tiempo, gracias por vuestra amistad y respeto.

### Expresión de Gratitud

Esta investigación fue parcialmente apoyada por una subvención del Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú; financiado por Proyectos de Investigación Estratégica Agraria Fondo Concursable PNIA, contrato N° 026-2015-IE: **“Producción y Uso de Biometano presurizado como sustituto de Combustibles Fósiles en el Sector Agrícola”**; conducido a través del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa Perú.

## INTRODUCCIÓN

En relación al deterioro, contaminación ambiental y al cuidado ambiental se dice que «El cambio climático es un problema global con graves dimensiones ambientales, sociales, económicas, distributivas y políticas, y plantea uno de los principales desafíos actuales para la humanidad». Si «el clima es un bien común, de todos y para todos» «el ambiente es un bien colectivo, patrimonio de toda la humanidad y responsabilidad de todos». Francisco, P. (2015)

“La problemática ambiental, como síntoma de la crisis de civilización de la modernidad, plantea la necesidad de generar una conciencia sobre sus causas y sus vías de resolución”. Leff, Enrique. (2007b). Y aun más...la sociedad y hasta la economía de los países se ven afectadas como consecuencia del daño causado por el hombre, generado en gran parte por la modernización en el mundo entero. Soler, S., Johanna (2017).

Entonces “el compromiso con el desarrollo sustentable incluye el aprovechamiento de las energías renovables, debido a que presentan un bajo impacto ambiental, contribuyen a mitigar el cambio climático y reducen la dependencia hacia los combustibles fósiles”. Alpírez et al, 2017.

Así como los estudios demográficos actuales muestran como significativo “El crecimiento acelerado de la población en los países menos industrializados, y ello se traduce en una mayor presión sobre los recursos” Labandeira et al, 2007.

“Para 2050, la población humana crecerá a más de 9 mil millones de personas, y en el mismo período de tiempo, se prevé que el consumo mundial de carne aumentará en un 73%. Sin embargo, la producción intensiva de alimentos pone en peligro el medio ambiente, y es necesario producir más alimentos de manera ética y de una manera que no perjudique al medio ambiente”. Roehle, R., et al (2016).

Como se postula “En este sentido, el cambio climático es consecuencia esencialmente de los actuales patrones de producción y consumo globales basados en el uso de combustibles fósiles y en procesos derivados de este estilo de desarrollo que originan.” Soler, S., Johanna (2017).

## RESUMEN

La presente investigación plantea como objetivo la optimización de parámetros para la generación de biogas en una planta tipo HPTC de doble cámara hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016. Se probaron en bacht tres Cosustratos 1, 2 y 3; compuestos por estiércol de ganado vacuno, sangre del beneficio de bovinos y contenido ruminal en diferentes porcentajes; estos fueron sometidos a digestión anaerobia en reactores de 500 ml a temperaturas (39, 45 y 50°C) y Tiempos de Residencia Hidráulica 2, 4 y 6 días, para indagar cuál de ellos produce el mayor volumen de biogás. Encontrando que el S3+TRH6días+T39°C obtuvo 507.10 ml de biogás en promedio por cada 500 ml de muestra. Luego este fue escalado matemáticamente al biodigestor HPTC de 3m<sup>3</sup> donde se obtuvo una composición máxima de 73.10% CH<sub>4</sub>; 18.00% CO<sub>2</sub>, 4.00% O<sub>2</sub> y 0.14% H<sub>2</sub>S y un promedio de 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>, 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S y una generación media de 5.1983 m<sup>3</sup> biogás/día. Del cual se estima 3.7035 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / día o también 1.2345 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> de Cosustrato 3; y con la ayuda de los análisis físico químicos se obtiene 27.435 ml Biometano/g MOV o igual a 27.435 cm<sup>3</sup> Biometano/g MOV. O también 1.7327 m<sup>3</sup> de biogás por 1m<sup>3</sup> de Sustrato3. La energía estimada producida es igual a 37.035 kWh/día / m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.

**Palabras claves:** Optimización, Parámetros, Biogás, Biometano, Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolíticas, Desechos de camal y Estiércol de vacunos.

## ABSTRACT

The present research aims to optimize parameters for the generation of biogas in an HPTC type hydrolytic double chamber plant from slaughterhouse waste and cattle manure in the Catholic area of Arequipa 2016. They were tested in batch three Costs 1, 2 and 3; composed of cattle manure, bovine benefit blood and ruminal content in different percentages; these were subjected to anaerobic digestion in 500 ml reactors at temperatures (39, 45 and 50°C) and Hydraulic Residual Time 2, 4 and 6 days to investigate which one produces the largest volume of biogas. Finding that S3 + TRH6dias + T39 ° C obtained 507.10 ml of biogas on average per 500 ml of sample. This was then mathematically scaled to the 3m<sup>3</sup> HPTC biodigester where a maximum composition of 73.10% CH<sub>4</sub> was obtained; 18.00% CO<sub>2</sub>, 4.00% O<sub>2</sub> and 0.14% H<sub>2</sub>S and an average of 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>, 2.275% O<sub>2</sub> and 0.175% H<sub>2</sub>S and an average generation of 5.1983 m<sup>3</sup> biogas / day. Of which an estimated 3.7035 m<sup>3</sup> of CH<sub>4</sub>/day or also 1.2345 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> of Cosstrate 3; and with the help of the physical chemical analysis, we obtain 27.435 ml Biomethane/g MOV/day or equal to 27.435 cm<sup>3</sup> Biomethane/g MOV/day. Or also 1.7327 m<sup>3</sup> of biogas per 1m<sup>3</sup> of Substrate<sub>3</sub>. The estimated energy produced is equal to 37,035 kWh/day m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.

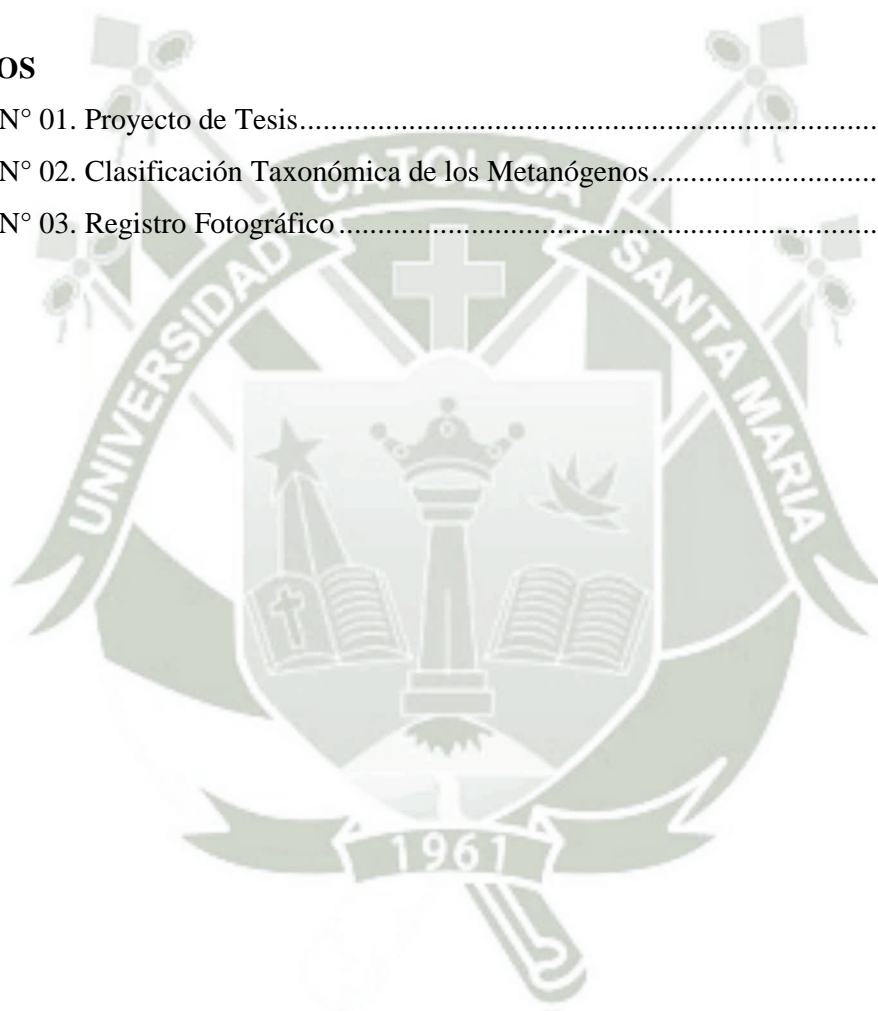
**Key words:** Optimization, Parameters, Biogas, Plant Type Dual Camera hydrolytic CTPH, Slaughterhouse waste and Manure of cattle.

## ÍNDICE GENERAL

Introducción	
Resumen	
Abstract	
<b>I. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
Crecimiento y Desarrollo Global incrementan la Problemática Ambiental .....	1
Energías Renovables alternativa para Combustibles Fósiles.....	2
<b>1.1. Uso de residuos y Optimización.....</b>	<b>3</b>
Relación Carbono/Nitrógeno. ....	4
1.2 Digestion Anaerobia - DA, Biogás y Biometano.....	8
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Análisis Físico Químicos.....</b>	<b>16</b>
a. Demanda Química de Oxígeno.....	16
b. Materia Seca Total (MST), Humedad (H), Cenizas (CZS), Materia Orgánica Volátil (MOV), y pH.....	16
c. Relación Carbono/Nitrógeno o C/N .....	16
<b>2.2. Co-sustratos (S1, S2 y S3), Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y         Temperatura (T°C), para Pruebas en Bacht .....</b>	<b>17</b>
a. Co-sustratos .....	17
b. Análisis Estadístico.....	19
<b>2.3. Prueba del Co-sustrato 3, en Biodigestor <i>High Performance Temperature         Controlled</i> – HPTC para evaluar volumen de Biogás y Biometano         producidos.....</b>	<b>19</b>
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Análisis Físico Químicos .....</b>	<b>22</b>
a. Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L) .....	22
b. Materia Seca Total (MST); Humedad (H); Cenizas (CZS) y Materia Orgánica Volátil (MOV) y pH .....	23
c. Relación Carbono/Nitrógeno.....	23

<b>3.2. Co-sustratos (S1, S2 y S3), Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y Temperatura (T°C) para Pruebas en Bacht.</b> .....	24
a. Volumen de biogás obtenido por Co-sustrato 1, 2 y 3.....	24
b. Análisis Estadístico .....	25
c. Mayor Performance de Biogás / Sustrato = ml o m <sup>3</sup> de S <sub>n</sub> + TRH <sub>n</sub> + T <sup>o</sup> <sub>n</sub> en Bacht. ....	30
<b>3.3. Prueba Co-sustrato 3, en Biodigestor High Performance Temperature Controlled - HTPC para Evaluar volumen de Biogás y Biometano producidos.</b> .....	31
a. Determinación del Volumen de Producción de Biogás en el Biodigestor High Performance Temperature Controlled – HPTC .....	31
b. Calidad de Biogás = % CH <sub>4</sub> , % CO <sub>2</sub> , %O <sub>2</sub> y %H <sub>2</sub> S / S <sub>3</sub> + TRH <sub>6</sub> + T <sup>o</sup> <sub>39</sub> en Biodigestor HPTC .....	32
c. Evaluación energética del biometano = kWh / ml o m <sup>3</sup> sustrato en Biodigestor HPTC.....	32
<b>IV. DISCUSIÓN</b> .....	33
<b>4.1. Análisis Físico Químicos</b> .....	33
a. Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L) .....	33
b. Determinación de Materia Seca Total (MST); Humedad (H); Cenizas (CZS) y Materia Orgánica Volátil (MOV) y pH.....	33
c. Relación Carbono/Nitrógeno del Sustrato 3 .....	34
<b>4.2. Co-sustratos (S1, S2 y S3), Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y Temperatura (T°C) y Biogás obtenido en Bacht</b> .....	34
a. Volumen de Biogás por Sustrato = ml o m <sup>3</sup> / S <sub>n</sub> + TRH <sub>n</sub> + T <sup>o</sup> <sub>n</sub> en Bacht .....	34
b. Análisis Estadístico.....	35
c. Mayor Performance de Biogás por Sustrato = ml o m <sup>3</sup> / S <sub>n</sub> + TRH <sub>n</sub> + T <sup>o</sup> <sub>n</sub> en Bacht.....	36
<b>4.3. Prueba Co-sustrato 3, en Biodigestor High Performance Temperature Controlled - HPTC para evaluar volumen de Biogás y Biometano producidos.</b> .....	37
a. Determinación del Volumen de producción de Biogás en el Biodigestor High Performance Temperature Controlled - HPTC.....	37

b. Calidad de Biogás = % CH <sub>4</sub> , % CO <sub>2</sub> , %O <sub>2</sub> y %H <sub>2</sub> S / S <sub>3</sub> + TRH <sub>6</sub> + T°39 en Biodigestor HPTC .....	41
c. Evaluación energética / biogás y biometano = kWh / ml o m <sup>3</sup> sustrato en Biodigestor HPTC. ....	44
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	46
<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	47
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	48
<b>ANEXOS</b>	
Anexo N° 01. Proyecto de Tesis.....	54
Anexo N° 02. Clasificación Taxonómica de los Metanógenos.....	131
Anexo N° 03. Registro Fotográfico .....	132



## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA N° 01.</b>	RANGOS DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE FERMENTACIÓN ANAEROBICA Y/O TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA – TRH. ....	4
<b>TABLA N° 02.</b>	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR ESPECIE / UNITARIO.....	13
<b>TABLA N° 03.</b>	ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACION DE PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS EN UNA PLANTA TIPO <i>HIGH PERFORMANCE TEMPERATURE CONTROLLED - HPTC</i> DE DOBLE CÁMARA HIDROLITICA A PARTIR DE DESECHOS DE CAMAL Y ESTIÉRCOL DE VACUNOS EN EL FUNDO LA CATÓLICA DE MAJES – AREQUIPA 2016.....	15
<b>TABLA N° 04.</b>	DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO.....	23
<b>TABLA N° 05.</b>	DETERMINACIÓN DE MATERIA SECA TOTAL (MST); HUMEDAD (H); CENIZAS (CZS) Y MATERIA ORGÁNICA VOLÁTIL (MOV) Y PH.....	23
<b>TABLA N° 06.</b>	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ML POR CO-SUSTRATOS, TIEMPOS DE RESIDENCIA HIDRÁULICA – TRH Y TEMPERATURAS EN GRADOS CENTÍGRADOS.....	24
<b>TABLA N° 07.</b>	FACTORES INTERSUJETOS COMO SUSTRATO, TRH Y TEMPERATURAS A EVALUAR Y EL NÚMERO DE CADA UNO DE ELLOS. ....	26
<b>TABLA N° 08.</b>	ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETO QUE PRESENTA LAS PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER- SUJETOS; PARA LA VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	26
<b>TABLA N° 09.</b>	PRUEBAS POST HOC PARA SUSTRATO SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS.....	28
<b>TABLA N° 10.</b>	PRUEBAS POST HOC PARA TRH SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS. ..	29
<b>TABLA N° 11.</b>	PRUEBAS POST HOC PARA TEMPERATURA SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS.....	30
<b>TABLA N° 12.</b>	EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE GASES EN EL BIOGÁS OBTENIDO CON EL SUSTRATO 3: S3 + TRH6 + T39°C EN BIODIGESTOR HPTC....	31

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA N° 01.</b> MONTAJE AME. A LA IZQUIERDA Y A LA DERECHA MONTAJE DE RAMÍRE (2016).....	18
<b>FIGURA N° 02.</b> IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA LOS SUSTRATOS INGESTA O CONTEN: RUMINAL, SANGRE Y ESTIÉRCOL DE VACUNO. EN SUPERIOR DERECHA PESANDO INGESTA EN BALANZA DE PRECISIÓN. DEBAJO IZQUIERDA PESADO DE LA SANGRE Y A LA DERECHA PESADO DEL ESTIÉRCOL, PARA LAS PRUEBAS EN BACHT.....	17
<b>FIGURA N° 03.</b> IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA COSUSTRATOS DILUIDOS Y HOMOGENIZADOS, CON SU REPLICA, ENVASADOS EN REACTORES DE 500 ML. SUPERIOR DERECHA EN TERMOSTATO O BAÑO MARÍA A 50°C. ABAJO IZQUIERDA EN TERMOSTATO A 39°C Y DEBAJO DERECHA EN TERMOSTATO A 45°C.....	18
<b>FIGURA N° 04.</b> REACTORES UNA VEZ CONCLUIDAS LAS PRUEBAS TRASLADAN EL BIOGÁS PRODUCIDO POR EL MÉTODO VOLUMÉTRICO A MATRACES KITASATO GRADUADOS CONTENIENDO UNA CANTIDAD DEFINIDA DE AGUA, LA MISMA QUE ES TRASLADADA A SU VEZ A PROBETAS GRADUADAS PARA SU LECTURA.....	18
<b>FIGURA N° 05.</b> IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA CONTAINER COLOR NEGRO EN SU INTERIOR CONTIENE BOLSA DEL BIODIGESTOR PROPIAMENTE DICHO. DERECHA SUPERIOR CONTAINER BEIGE CONTIENE EN SU INTERIOR TANQUES DE HIDRÓLISIS, MANDOS, BOMBAS Y CALDERO. AL CENTRO UBICACIÓN DE LOS CONTAINER, UNO AL COSTADO DEL OTRO. ABAJO IZQUIERDA MANDOS AUTOMATIZADOS PARA BOMBEO PROGRAMADO Y CALDERO. ABAJO DERECHA ESTANQUE CON GEOMEMBRANA PARA RECEPCIONAR EL BIOL.....	20
<b>FIGURA N° 06.</b> IMÁGENES A LA IZQUIERDA DENTRO DEL CONTAINER BEIGE SE MUESTRAN LOS DOS TANQUES DE HIDRÓLISIS; AL CENTRO SE MUESTRA EN PRIMER PLANO EL SEGUNDO TANQUE DE HIDROLISIS Y AL FONDO EL CALDERO DE AGUA. A LA DERECHA EL TABLERO DE MANDO, EN EL PISO BOMBA Y AL COSTADO EL CALDERO DE AGUA.....	20
<b>FIGURA N° 07.</b> IMÁGENES A LA IZQUIERDA CONTADOR DE GAS MODELO GCZ BK-G4M MARCA KROMS CHROEDER DE FABRICACIÓN EN BARCELONA – ESPAÑA. A LA DERECHA GASÓMETRO CON CAPACIDAD DE 60 M3.....	21
<b>FIGURA N° 08.</b> EQUIPO MULTITEC545/540, MARCA SEWERIN, MODELO 20.02.2015 A – 105834 – DE FABRICACIÓN ALEMANA; PARA OBTENER LOS PORCENTAJES DE CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> Y H <sub>2</sub> S (METANO, BIÓXIDO DE CARBONO, OXIGENO Y SULFURO DE HIDROGENO), NÓTESE MEDIDAS EFECTUADAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN EN DIGESTOR HPTC.....	22
<b>FIGURA N° 09.</b> LLAMA AZUL PRODUCIDA AL QUEMAR EL BIOGÁS.....	22
<b>FIGURA N° 10.</b> GRÁFICOS DE PERFIL. MEDIDAS MARGINALES ESTIMADAS DE BIOGÁS CUANDO INTERACTÚAN LOS FACTORES TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA - TRH VS TEMPERATURA - T°C.....	27
<b>FIGURA N° 11.</b> GRÁFICOS DE PERFIL. MEDIDAS MARGINALES ESTIMADAS DE BIOGÁS CUANDO INTERACTÚAN LOS FACTORES SUSTRATO VS TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA - TRH.....	28

## I. INTRODUCCIÓN

### **Crecimiento y Desarrollo Global incrementan la Problemática Ambiental.**

En relación al deterioro, contaminación ambiental y al cuidado ambiental se dice que «El cambio climático es un problema global con graves dimensiones ambientales, sociales, económicas, distributivas y políticas, y plantea uno de los principales desafíos actuales para la humanidad». Si «el clima es un bien común, de todos y para todos» «el ambiente es un bien colectivo, patrimonio de toda la humanidad y responsabilidad de todos». Francisco, P. (2015)

“La problemática ambiental, como síntoma de la crisis de civilización de la modernidad, plantea la necesidad de generar una conciencia sobre sus causas y sus vías de resolución”. Leff, Enrique. (2007b). Y aun más...la sociedad y hasta la economía de los países se ven afectadas como consecuencia del daño causado por el hombre, generado en gran parte por la modernización en el mundo entero. Soler, S., Johanna (2017).

Entonces “el compromiso con el desarrollo sustentable incluye el aprovechamiento de las energías renovables, debido a que presentan un bajo impacto ambiental, contribuyen a mitigar el cambio climático y reducen la dependencia hacia los combustibles fósiles”. Alpírez et al, 2017.

Así como los estudios demográficos actuales muestran como significativo “El crecimiento acelerado de la población en los países menos industrializados, y ello se traduce en una mayor presión sobre los recursos...” Labandeira et al, 2007.

“Para 2050, la población humana crecerá a más de 9 mil millones de personas, y en el mismo período de tiempo, se prevé que el consumo mundial de carne aumentará en un 73%. Sin embargo, la producción intensiva de alimentos pone en peligro el medio ambiente, y es necesario producir más alimentos de manera ética y de una manera que no perjudique al medio ambiente”. Roehle, R., et al (2016).

Como se postula “En este sentido, el cambio climático es consecuencia esencialmente de los actuales patrones de producción y consumo globales basados en el uso de combustibles fósiles y en procesos derivados de este estilo de desarrollo que originan....” Soler, S., Johanna (2017).

Y en la misma dirección se precisa que “la digestión anaerobia tiene varios beneficios ambientales, los que incluyen: la producción de energía renovable en forma de biogás, la posibilidad de recirculación de nutrientes y la reducción de la contaminación (Aiyuk et al., 2006; Demirbas et al., 2011; Rao y Baral, 2011; T. Zhang et al., 2013; Y. Zhang et al., 2012)”. Guardia-Puebla, Y., et al (2017)

### **Energías Renovables alternativa para Combustibles Fósiles.**

En 2015, el 86% del consumo mundial de energía primaria se originó de los combustibles fósiles y, específicamente, el petróleo, el carbón y el gas natural representaron el 32,9%, 29,2% y 23,8%, respectivamente. British Petroleum, (2016)

“Cuando nos referimos a la gestión de la calidad del ambiente, contaminantes del aire, agua, suelos y *la disposición inadecuada de residuos sólidos y otros se han ido incrementando*, con la utilización de combustibles fósiles y con ellos los Gases de Efecto Invernadero– GEI”. Leff Z., Enrique. (2007).

Por ejemplo, como dicen los expertos del CEPLAN, 2011; los efectos de los gases contaminantes se dejan sentir en el aumento del número de infecciones respiratorias agudas, particularmente en niños menores de 5 años, grupo de población en el que se ha registrado en el Perú, más de 3,7 millones de casos en 2007. Sin embargo, frente a esta realidad es importante también considerar la opción de utilizar cada vez más, los llamados biocombustibles, siempre que se desarrollen de manera que no provoquen un cambio de uso de la tierra, ni demande agua de riego necesaria para garantizar la seguridad alimentaria del país.

La *energía renovable también ofrece buenas perspectivas* como complemento de las redes eléctricas en los países en desarrollo, pues les permite reducir las consecuencias para el medio ambiente y la dependencia de fuentes de energía del exterior. FAO (2011) y BM (2001).

Bioenergía es el término que define los sistemas de generación de energía a partir de biomasa. Y esta representa una fuente de energía renovable, siendo las más importantes y adecuadas las de origen agropecuario y forestal: residuos agrícolas, paja, orujos, podas de frutales, residuos forestales, restos de las industrias de la madera, astillas, aserrín y cultivos energéticos: cardo, girasol, paulonia, residuos del beneficio de animales, o ingesta, sangre, estiércol de bovinos, porcinos, gallinaza, entre otras materias, llamados también sustratos.

El uso en mayor escala de los biocombustibles sólidos y líquidos y el desarrollo de la energía eólica, geotérmica y solar, entre otras, pueden diversificar nuestra matriz energética de manera tal que garantice la sostenibilidad del suministro de energía a nivel nacional.

En un futuro cercano, cuando las fuentes fósiles se agoten, el biometano como energía renovable, garantizará abasteciendo la red de gas natural por una producción local y descentralizada. Huguen, P., & Le Saux, G. (2010).

### **1.1. Uso de residuos y Optimización.**

Los investigadores hoy en día están buscando de optimizar el uso de residuos y/o sustratos que permitan la formación de biometano en calidad y cantidad cada vez mayor; a través del manejo racional y eficiente de factores y/o parámetros. En esta perspectiva la FNR. 2010, indica que “Muchos son los factores y/o parámetros que lo permitirán entre ellas variables como el porcentaje de sólidos totales, la tasa de carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica, el grado de degradación y la tasa de producción de biogás estarán por lo tanto, determinados por la magnitud de la planta y el sustrato elegido”; los cuales pueden optimizarse utilizando equipos (biodigestores) y sustratos diferentes y propios de la región, incrementando su eficiencia y beneficio. “Existe una amplia variedad de sustratos sólidos con potencial para la producción de biogás, por ejemplo, residuos agrícolas, estiércol, residuos domésticos, entre otros. Adicionalmente, algunos cultivos pueden destinarse directamente para la producción del biocombustible (Lettinga, 2001)”; mencionado por Bustamante, C. A. G., & Cerutti, O. M. (2016).

Algunas industrias, como los mataderos y la industria láctea y bioetanol, se destacan por su contribución y la posibilidad de implementar sistemas de tratamiento para la generación de biogás en fábricas. Moreda, I. L. (2016).

“Se presenta una revisión exhaustiva del avance en las características de las aguas residuales de los mataderos (slaughter water waste - SWW), tratamiento y manejo en la industria procesadora de carne. Este estudio también proporciona una revisión general de los impactos ambientales, los efectos en la salud y los marcos regulatorios relevantes para el manejo del SWW. Se destaca un avance significativo en el tratamiento anaeróbico de alta velocidad, la eliminación de nutrientes, los procesos de oxidación avanzada (AOPs) y la combinación de tratamiento biológico y AOPs para el tratamiento de SWW”. Bustillo-Lecompte, C. F., et al (2015).

Considerando los rangos de temperatura y tiempo de fermentación y/o tiempo de residencia hidráulica – TRH, como se aprecian en la Tabla N 01

**TABLA N 01. RANGOS DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE FERMENTACIÓN ANAEROBICA Y/O TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA – TRH**

FERMENTACION	MINIMO	OPTIMO	MAXIMO	TIEMPO DE FERMENTACION
Psycrophilica	4 – 10°C	15 – 18°C	20 – 25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15 – 20°C	25 – 35°C	35 – 45°C	30 – 60 días
Thermophilica	25 – 45°C	50 – 60°C	75 – 80°C	10 – 15 días

Fuente: MINENERGIA/ PNUD / FAO / GEF. (2011). Manual de biogás. ISBN 978953068920

“El pH y la temperatura tienen efecto directo en la velocidad de generación de metano (González y Longoria, 2005; Amon *et al.*, 2006). Por lo que el intervalo de pH idóneo es 6.0 a 7.8 (Safley, 1992)” mencionado por Cano-Hernández, M., et al (2016).

### **Relación Carbono/Nitrógeno.**

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

Estimación de la Relación C/N:

$$C1*Q1 + C2*Q2 + \dots Cn*Qn$$

$$K = \frac{\dots}{N1*Q1 + N2*Q2 + \dots Nn*Qn}$$

$$N1*Q1 + N2*Q2 + \dots Nn*Qn$$

Donde:

- K = C/N de la mezcla de materias primas.
- C = % de Carbono orgánico contenido en cada materia prima.
- N = % de Nitrógeno orgánico contenido en c / materia prima.
- Q = Peso fresco de c / materia prima, expresado en K o TN

Manejar con medidas volumétricas y determinar los parámetros: Densidad (D), Masa (M) y Volumen (V).  $D = M / V$ . expresando la masa en K o TN y el volumen en L o m<sup>3</sup>.

Fuente: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). Manual de biogás. ISBN 978-95-306892-0.

La cantidad de gas producido por kg de material también varía con el tipo de material utilizado. La calidad del biogás producido depende del carbono a nitrógeno (C / N) de los materiales utilizados. Okonkwo, U. C., et al (2016).

Algunas industrias, como “los mataderos y las industrias lácteas y bioetanol, se destacan por su contribución y la posibilidad de implementar sistemas de tratamiento para la generación de biogás en fábricas”.Moreda, I. L. (2016). Otros utilizan los “lodos de flotación de aire disuelto, panza, despojos blandos y una corriente de desechos mixtos (combinación de flujos de desechos individuales; tomando como alternativa tecnológica, ladigestión anaerobia, y la conversión biológica de material orgánico degradable en metano”. Ware, A., & Power, N. (2016).

Es importante el manejo y disposición final de los residuos y/o subproductos del beneficio de animales en los camales como sangre, rastros de pieles, huesos, despojos blandos, estiércol, contenido ruminal y otros que representan aproximadamente un 20% del peso vivo de animal; representando un foco infeccioso y peligroso para la salud pública.

La optimización evalúa sustratos y parámetros como cuando se investiga sobre: “Los efectos de los pretratamientos térmicos sobre el potencial de producción de biogás de dos

tipos de residuos sólidos de mataderos (subproductos de mataderos de aves de corral y porcicultura) se evaluaron mediante experimentos por lotes. Ambos subproductos animales se caracterizaron en términos de concentraciones de grasas, proteínas y carbohidratos. Los pretratamientos térmicos seleccionados, pasteurización (70 ° C durante 60 min) y esterilización (133 ° C y 3 bares durante 20 min) se incluyen en la normativa europea vigente para la eliminación o utilización de subproductos animales.”Rodríguez-Abalde, A., et al (2011). En cambio Wall, D. M. et al (2015) examinan la digestión del ensilado de pasto de crecimiento avanzado. Se investigaron dos variables: tamaño de partícula (mayor de 3 cm y menos de 1 cm) y adición de líquido ruminal. Los estudios en lotes indicaron que el tamaño de partícula y la adición de fluido ruminal tenían poco efecto sobre los rendimientos específicos de metano (SMYs).

Por otro lado Zhang, H. et al (2016) “Investigan sustratos difíciles y uso de estimulantes como: La paja de arroz se pre trató con el fluido ruminal a 39 ° C durante 120 h en condiciones anaeróbicas. Se produjeron varios ácidos grasos volátiles, especialmente ácido acético y ácido propiónico, mediante el pre tratamiento del fluido ruminal. El proceso metanogénico se llevó a cabo durante una digestión anaeróbica de 30 días”.

Entonces es una tecnología probada la producción de metano, utilizando residuos de la biomasa como agrícolas, pecuarios, domésticos entre otros, como por ejemplo. “Este estudio se centró en la recolección de datos sobre el flujo de nutrientes y el rendimiento de biogás en un digestor anaeróbico comercial administrado con estiércol lechero de una lechería de 1000 vacas y la co-digestión de materias primas adicionales. Las materias primas incluían: sangre, pescado, pulpa de papel, bebidas desechadas y residuos de la trampa de grasa. Se obtuvo el flujo masivo de insumos y productos, la concentración de nutrientes de insumos y productos y el rendimiento de biogás. Se determinó que el estiércol era la principal fuente de nutrientes para el digestor anaeróbico cuando se co-digiere con materias primas. El porcentaje de aporte de estiércol a los insumos totales de nitrógeno total, amoníaco-nitrógeno, fósforo y sólidos totales fue de 46,3%, 67,7%, 32,8% y 23,4%, respectivamente”. Ma, G., Neibergs, J. S., et al.(2017)

El sustrato contenido ruminal obtenido en el proceso del sacrificio animal, representa el alimento ingerido por los animales poligástricos que es desechado al momento del

sacrificio, de olor ácido intenso y elevado contenido microbiano; además de productos de la fermentación ruminal.

“(DM) Materia Seca y el contenido de materia seca orgánica (ODM) se midieron mediante secado en horno a 105°C y calcinación de la muestra seca a 550°C de acuerdo con procedimientos estándar (VDLUFA, 2006). El valor de pH de los ensilajes se determinó usando un electrodo de medición Sen Tix 41 (WTW, Weilheim, Alemania)”. Herrmann, C., et al (2016).

Algunas investigaciones en relación a los microorganismos metanogénicos y su ecosistema nos indican que: “los resultados de DGGE basados en el gen rRNA 16S mostraron un enriquecimiento de poblaciones microbianas especializadas, tales como bacterias oxidantes / proteolíticas (*Syntrophomonas sp.*, *Coprothermobacter sp.* Y *Anaerobaculum sp.*) Y metanógenos sintróficos (*Methanosarcina sp.*). En consecuencia, la concentración de lípidos del sustrato y la estructura de la comunidad microbiana son los principales factores limitantes para un tratamiento anaeróbico exitoso de los residuos de mataderos frescos”. Palatsi, J., et al (2011).

Los datos recogidos después de la separación líquido-sólido confirmaron que la mayoría (> 75%) de nutrientes permanece con la parte de efluente líquido de la corriente de estiércol. Estos datos confirman que el rendimiento de biogás o metano podría medirse con precisión desde la proporción de % de sólidos volátiles hasta % de sólidos totales. Ma, G., et al (2017).

“Este estudio utilizó reactores semi-continuos de biogás a escala de laboratorio para simular los efectos de la adición de elementos traza en diferentes combinaciones, mientras que degradaba la fracción orgánica de residuos sólidos municipales y residuos de mataderos. Los resultados muestran que la adición combinada de Fe, Co y Ni fue superior a la adición de Fe, Fe y Co o Fe y Ni. Sin embargo, la adición de sólo Fe dio como resultado un proceso más estable que la adición combinada de Fe y Co, indicando quizá una acidogénesis y / o homoacetogénesis demasiado eficientes en relación con una población metanogénica privada de Ni”. Moestedt, J., et al (2016).

“La lignina no es degradable y, por tanto, disminuye la producción de metano y controla la degradación del ODM durante el proceso de digestión anaerobia (Triolo et al., 2011).) La

lignina es el componente de biomasa más importante que determina los rendimientos específicos de metano. La producción de metano disminuye con el aumento del contenido de lignina y las fracciones de fibra. Además de las características de producción de metano, los rendimientos de la biomasa, los efectos de la rotación de cultivos, los requisitos y costos específicos del sitio y los efectos ambientales del suministro de biomasa deben ser tenidos en cuenta para el diseño de rotaciones sostenibles de cultivos”. Herrmann, C., et al (2016).

## 1.2 Digestion Anaerobia - DA, Biogás y Biometano.

Como su nombre lo indica, “el biogás se produce en un proceso biológico; en ausencia de oxígeno (anaeróbico que significa sin oxígeno), la materia orgánica se descompone formando una mezcla de gases conocida como biogás” FNR 2012; que concuerda con *Germán Buitrón, Julián Carrillo, Felipe Alatríste y Elías Razo* mencionados por Bustamante, C. A. G., & Cerutti, O. M. (2016).

“El biogás es el gas obtenido cuando la materia orgánica se descompone en la ausencia de oxígeno. Según Hendriks y Zeeman (2009), se denomina biogás porque se obtiene a partir de biomasa (restos vegetales y animales). Se produce por la acción de microorganismos anaeróbicos sobre materia orgánica. Ellos metabolizan la materia orgánica con la ayuda de enzimas que reducen los grandes moléculas, p. carbohidratos, proteínas y grasas a moléculas más pequeñas p.ej.  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ . El proceso requiere la ausencia de oxígeno”. Okonkwo, U. C., et al (2016).

“El biogás se produce a través de la degradación biológica del material orgánico en ausencia de oxígeno. En las plantas comerciales de biogás, las corrientes de desechos de uso común incluyen lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos de mataderos, residuos de alimentos, estiércol u otros flujos de residuos industriales, cultivos y residuos de cultivos”. Moestedt, J., et al (2013).

La producción de biogás a través de la digestión anaeróbica se ha convertido en una tecnología bien establecida para la producción de energía renovable en Europa. Varios beneficios de este proceso, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la inactivación de patógenos, el reciclaje de nutrientes y el potencial de

suministro de energía flexible y orientado a la demanda, lo convierten en un medio valioso que contribuye al conjunto de energías renovables y facilita las estructuras económicas regionales y empleo en las zonas rurales (Fröschle et al., 2015, Molinuevo-Salces et al., 2014, Zegada-Lizarazu y Monti, 2011) ; y que procura el desarrollo o se convierte en agente promotor del desarrollo cuando integramos a este recurso el biosol y biol. Herrmann, C., et al (2016).

“El proceso de digestión anaeróbica es capaz de convertir materias primas orgánicas complejas en metano, incluyendo subproductos agrícolas, desechos orgánicos, así como estiércol animal y cultivos energéticos. Sin embargo, la producción de cultivos energéticos es discutible, ya que requiere tierras agrícolas y puede competir con el suministro de alimentos y piensos. (Herrmann, 2013)” ; mencionado por Herrmann, C., et al (2016).

Existen varios procesos para convertir el material orgánico en energía la tecnología de interés en este estudio fue la digestión anaerobia es decir la conversión biológica de material orgánico degradable en metano Ware, A., & Power, N. (2016).

Los microorganismos de hidrolización y fermentación son responsables del ataque inicial a los polímeros y monómeros y producen principalmente acetato e hidrógeno y cantidades variables de ácidos grasos volátiles tales como propionato y butirato. Los microorganismos hidrolíticos excretan enzimas hidrolíticas, por ejemplo, celulasa, celobiasa, xilanasa, amilasa, lipasa y proteasa. Un complejo consorcio de microorganismos participa en la hidrólisis y fermentación de material orgánico. La mayoría de las bacterias son estrictos anaerobios como Bacteriocides, Weiland, P. (2010).

Los ácidos grasos volátiles más altos se convierten en Acetato y el hidrógeno por la producción obligada de hidrógeno Bacterias acetogénicas. Solo unas pocas especies son capaces de degradar el acetato a  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , por ejemplo *Methanosarcina barkeri*, *Metanococcus Mazei* y *Methanotrix soehngenii*, mientras que todas las bacterias metanogénicas son capaces de usar hidrogeno para formar metano. La toxicidad del amoníaco aumenta con el aumento de la temperatura y el lavado de la población microbiana puede ocurrir (Angelidaki et al., 2003; Dornack 2009). Especialmente el no disociado. El proceso de digestión tiene lugar en condiciones mesofílicas (35- 42 ° C) o termofílicas (45-60 ° C). Weiland, P. (2010).

“El gas producido es un mezcla de gases tales como metano, óxido de carbono (IV), y sulfuro de hidrógeno. Contiene metano (45-80%), óxido de carbono (IV) (27-45%), nitrógeno (0,5-3%), hidrógeno (1- 10%), monóxido de carbono (0,1%), oxígeno (0,1%) y sulfuro de hidrógeno presente en trazas cantidades”. Okonkwo, U. C., et al (2016).

“Los resultados indicaron que el tiempo de pre tratamiento óptimo para la digestión anaerobia fue de 24 horas, lo que resultó en un aumento de la producción de biogás del 66,5%, un aumento del rendimiento del metano de 82,6% y una disminución del tiempo de digestión técnica del 40,0% comparado con el control. La producción de metano podría ser bien explicada por el modelo de Gompertz modificado en lugar del modelo de primer orden, y una mayor tasa de producción de metano de 29.31 ml / (gVS · d), una velocidad de hidrólisis rápida de 0.09 l / dy una menor lag de 1.62 d se obtuvieron después de 24 h de pre tratamiento”. Zhang, H. et al (2016)

El objetivo de este estudio fue evaluar la cantidad y calidad del biogás producido por la co-digestión de estiércol lácteo enjuagado (FDM) y aguas residuales de procesamiento de pavo (TPW). Se utilizó un digestor de crecimiento unido con un volumen de trabajo de 15 l y un espacio de cabeza de 3 l con un tiempo de retención hidráulica de 5 d usando cinco mezclas de alimentación que contenían 100, 67, 50, 33 y 0 % FDM por volumen. El rendimiento de biogás varió de 0,072 a 0,8 m<sup>3</sup> [g VS-1] y el contenido de metano (calidad) del gas oscila entre 56% y 70%. Ogejo, J. A., & Li, L. (2010).

En este escenario, la digestión anaeróbica muestra cómo los productos generados (por ejemplo, hidrógeno, metano) procedentes de diferentes etapas metabólicas pueden utilizarse como fuentes energéticas, motores de combustión interna, pilas de combustible o materias astraes para otras opciones de transformación (por ejemplo, la producción de bio polímeros u otras sustancias orgánicas). Moreda, I. L. (2016).

“Tiene un valor calorífico de 5.5-7.5 kwh / m<sup>3</sup>. La importancia atribuida al biogás se debe enteramente a la presencia de metano en el gas. Es el principal constituyente de la (45-80%) del biogás producido”. Okonkwo, U. C., et al (2016).

“El metano producido en el proceso de digestión anaerobia de los estiércoles presenta entre 4800 – 6700 kcal m<sup>-3</sup>, el cual es cercano a los 8900 kcal m<sup>-3</sup> obtenida con la energía del metano puro (Rasi et al., 2007)”; mencionado por Guardia-Puebla, Y., et al (2017).

Al mismo tiempo, la digestión anaerobia tiene varios beneficios ambientales, los que incluyen: la producción de energía renovable en forma de biogás, la posibilidad de recirculación de nutrientes y la reducción de la contaminación (Aiyuk et al., 2006; Demirbas et al., 2011; Rao y Baral, 2011; T. Zhang et al., 2013; Y. Zhang et al., 2012); mencionados por Guardia-Puebla, Y., et al (2017).

“La producción de electricidad a partir de biomasa presenta varias ventajas:

1. Es una fuente renovable de energía que no contribuye al calentamiento global.
2. Mitiga el efecto invernadero mediante la captura de gas metano de vertederos y residuos agrícolas.
3. Su combustión produce menos cenizas en comparación con la combustión de carbón natural, bajos niveles de sulfuros y se puede utilizar, así como un fertilizante orgánico en los suelos.
4. Su generación de energía reduce significativamente los problemas de gestión de residuos en la silvicultura, la agricultura y las zonas urbanas.
5. Es un recurso local que no está sujeto a fluctuaciones de precios en los mercados internacionales de combustibles, reduciendo así la dependencia y la presión sobre el precio del petróleo.
6. Su uso puede estimular las economías rurales, crear nuevos puestos de trabajo y opciones de ingreso, así como reducir las presiones económicas sobre la producción agrícola y la silvicultura.” mencionado por Rodríguez-Monroy, C., et al (2018).

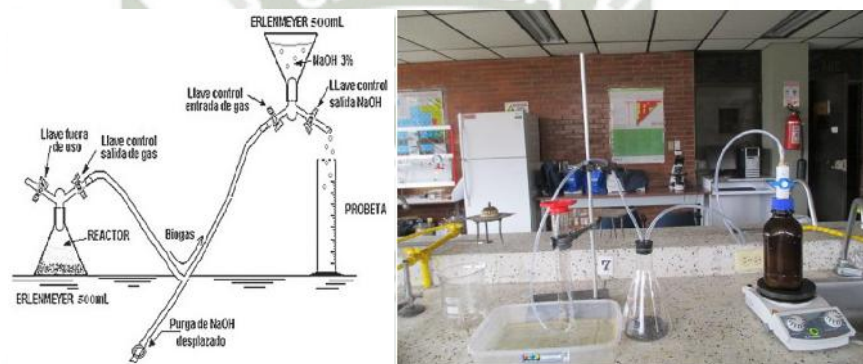
Por otro lado, la generación de energía a partir de biomasa presenta también algunas desventajas:

1. Presenta una baja densidad de energía, requiriendo altos volúmenes de combustible para generar niveles de potencia comparables a los producidos por los combustibles fósiles.
2. Una combustión incompleta produce materia orgánica, CO y otros gases nocivos.
3. La combustión a altas temperaturas produce NO<sub>x</sub>, que contribuye a la producción de lluvia ácida.

4. Su potencial calórico depende del clima, el nivel de humedad y la densidad de la materia prima.

5. Es menos eficiente que la energía producida a partir de combustibles fósiles, ya que presenta menores capacidades térmicas. Mencionado por Rodríguez-Monroy, C., et al (2018).

Como es utilizado “para desarrollar la AME (actividad metanogénicas específica), es necesario un montaje sencillo, sin mayores requerimientos, como se observa en la Figura 1. Teniendo en cuenta la facilidad de implementar mediciones de AME por el método volumétrico, se enfatizó en este tipo de medición, por su potencialidad de aplicación en el contexto del medio”. Hidalgo, A. M. E., & Erasmo, M. A. J. (2017).



**FIGURA N° 01. MONTAJE AME A LA IZQUIERDA Y A LA DERECHA MONTAJE DE RAMÍREZ S. (2016)**

Fuente: adaptado de Field (1987), Pérez y Cajigas (2002) y Chernicharo (2007). Mencionado por Hidalgo, A. M. E., & Erasmo, M. A. J. (2017).

El biogás puede ser utilizado como combustible para los motores de combustión interna, las turbinas de gas, las celdas de combustible, los calentadores de agua, calentadores industriales, entre otros muchos procesos. También, el biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de electricidad, donde la eficiencia de conversión global está alrededor de 10 - 16 % (Demirbas et al., 2011). Guardia-Puebla, Y. et al (2017).

El biogás estimado se obtuvo con los valores de la Tabla N° 02, entre el estiércol producido por día de cada uno de los tamaños y especies estudiadas, afectado por el total de estiércol. Iván, V. R.,(2014) e Ivan Vera-Romero, (2014).

**TABLA N° 02 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR ESPECIE / UNITARIO**

Bovinos	Producción m <sup>3</sup> /animal día
Grande	0.6
Mediano	0.4
Pequeño	0.32
Ternero	0.16
Cerdos	Producción m <sup>3</sup> /animal día
Grande	0.14
Mediano	0.1
Pequeño	0.07

Fuente: (Martínez, 2007)

Métodos utilizados para el tratamiento incluyen el compostaje, estanques de estabilización, digestión aeróbica, digestión anaeróbica e incineración. Ahí es un uso creciente de la ingestión anaerobia para el tratamiento de residuos. Esto se debe a la capacidad de obtener energía. Okonkwo, U. C., et al (2016).

Del biogás, “se obtiene el Biometano mediante procesos de filtrado y/o enriquecido de otros gases elevando su potencial combustible. La producción de biometano a partir de residuos líquidos, sólidos y biomasa, es una tecnología que ha alcanzado la madurez”. Bustamante, C. A. G., & Cerutti, O. M. (2016).

La presente investigación permitirá estudiar la Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa.

De ese modo se contribuirá con la gestión del medio ambiente y más aun con el “mandato imperativo de la Constitución Política del Perú estableciendo que la defensa de la persona humana y el respeto de su dignidad son el fin supremo de la sociedad y el Estado”. Gamio, Pedro / García, Henry. (2011). “Del mismo modo, toda persona tiene derecho a la paz y la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”.

## II. MATERIALES Y METODOS.

La presente investigación se ha realizado en el Fundo La Católica de la Universidad Católica Santa María de Arequipa; y tiene como objetivo central la optimización de parámetros para la generación de biogás en una planta (*High Performance Temperature Controlled*) - HPTC de doble cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos, efectuado en los laboratorios de la Escuela Profesional de Medicina Veterinaria y Zootecnia acondicionados para realizar las pruebas piloto en bacht y el biodigestor HPTC instalado en su Campus en la Irrigación Majes.

Los residuos son abundantes en el medio y de fácil disposición, el estiércol de vacunos del Centro de Producción de Bienes y Servicios (CEPROBIS – UCSM); la Ingesta ruminal y Sangre de vacunos beneficiados y/o sacrificados en el Camal Municipal del Consejo Municipal Menor de La Colina del Distrito del Pedregal, Provincia de Caylloma de la Región Arequipa.

Una vez los sustratos en laboratorio, para su preparación se utilizó balanza electrónica de precisión, y la homogenización se realizó en un balde limpio y estéril de primer uso. La dilución para las pruebas fue en todos los casos 3 partes de agua y 1 de Co-sustrato. Estableciéndose los siguientes Co-sustratos:

S1 – Co-sustratos mezcla 1: Estiércol de vacuno (80%) + Ingesta de vacuno o contenido ruminal (20%) + Sangre de vacunos (00%).

S2 – Co-sustratos mezcla 2: Estiércol de vacuno (20%) + Ingesta de vacuno o contenido ruminal (30%) + Sangre de vacunos (50%).

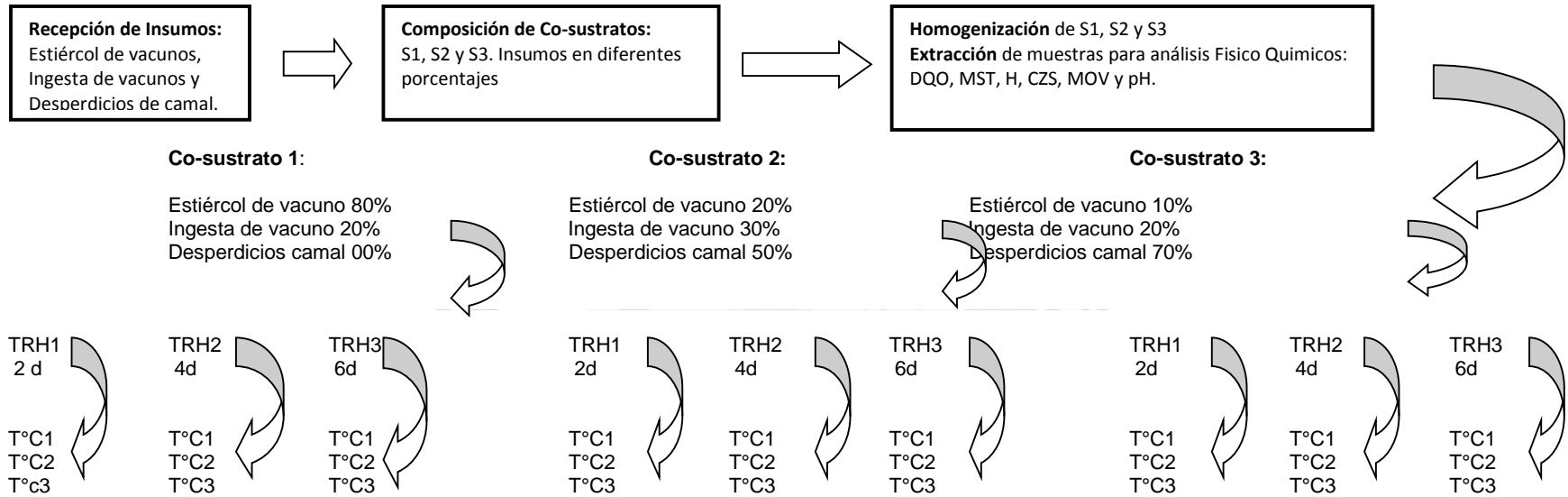
S3 – Co-sustratos mezcla 3: Estiércol de vacuno (10%) + Ingesta de vacuno o contenido ruminal (20%) + Sangre de vacunos (70%).

Los procesos de Campo en la investigación se muestran en la Tabla N° 3.

**Tabla 3**

“Estudio para la Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo *High Performance Temperature Controlled - HPTC* de Doble Cámara Hidrolítica a partir de Desechos de Camal y Estiércol de vacunos en el Fundo La Católica de Majes – Arequipa 2016”

PROCESOS DE CAMPO EN LA INVESTIGACION: I FASE EN BACHT



**LEYENDA1: Pruebas en batch - Lab. Área de Investigación en Energías Renovables – Fundo Católica.**

TRH1 = 2 días de Tiempo de Residencia Hidráulica.  
TRH2 = 4 días de Tiempo de Residencia Hidráulica.  
TRH3 = 6 días de Tiempo de Residencia Hidráulica.

T°C1= Temperatura a 39°C.  
T°C2= Temperatura a 45°C.  
T°C3= Temperatura a 50°C.

Se identifica el mayor volumen de biogás.

**II FASE EN BIODIGESTOR EN HPTC**

**LEYENDA 2: Pruebas en Biodigestor***High Performance Temperature Controlled - HPTC*, escalado matemático con el sustrato de mas alto performance a partir de la mejor respuesta en la combinación de los parámetros. **Equipo Contador de Volumen de Gas; Equipo Lector de Gases (Lab. Área de Investigación en Energías Renovables – Fundo Católica). 27 % CH<sub>4</sub>, 27 % CO<sub>2</sub>, 27 % H<sub>2</sub>O y 27 %H<sub>2</sub>S.**

Se identifica Volumen y Calidad del Biogás producido.

## 2.1. Análisis Físico Químicos.

- a. En este momento se toman muestras para enviar al Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad – UCSM; laboratorio acreditado por el Instituto de Control de la Calidad del Perú – INACAL, para determinar la **Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L)** aplicando la norma NMX-AA-030-SCFI-2001 o Water Analysis – Determination for Chemical Oxygen Demand in Natural, Wastewaters and Wastewaters Treated – Test Method.
- b. Y otro tanto al Laboratorio de Nutrición y Alimentación Animal para determinar las Características Físicoquímicas obteniendo los resultados en base seca de los siguientes parámetros: **Materia Seca Total (MST)** obtenida en estufa a 105°C x 3hs; Humedad (H); Cenizas (CZS) y Materia Orgánica Volátil (MOV) según MS,PC.EE,CZS según AOAC, (1990) y FDN, FDA, LDA, PIDN y PIDA según Van Soest y Roberston, (1991), modificado por ANKOM, (2005). El pH obtenido por el método potenciométrico.

- c. Estimación de la **Relación C/N**:

$$C1*Q1 + C2*Q2 + \dots Cn*Qn$$

$$K = \frac{\dots}{N1*Q1 + N2*Q2 + \dots Nn*Qn}$$

Donde:

K	=	C/N de la mezcla de materias primas.
C	=	% de Carbono orgánico contenido en cada materia prima.
N	=	% de Nitrógeno orgánico contenido en c / materia prima.
Q	=	Peso fresco de c / materia prima, expresado en K o TN

Manejar con medidas volumétricas y determinar los parámetros: Densidad (D), Masa (M) y Volumen (V).  $D = M / V$ . expresando la masa en K o TN y el volumen en L o M3.

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). Manual de biogás. ISBN 978-95-306892-0.

**2.2.Co-sustratos (S1,S2 y S3),Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y Temperatura (T°C), para Pruebas en Bacht.**

- a. Estos 3 **Co-sustratos** han sido sometidos a digestión anaerobia (DA), en reactores de 500 ml de material vidrio pyrex, de marca BOECO fabricación alemana con el objetivo de lograr la generación del mayor volumen de biogás. Figura N°02



**FIGURA N° 02. IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA LOS SUSTRATOS INGESTA O CONTENIDO RUMINAL, SANGRE Y ESTIÉRCOL DE VACUNO. EN SUPERIOR DERECHA PESANDO INGESTA EN BALANZA DE PRECISIÓN. DEBAJO IZQUIERDA PESADO DE LA SANGRE Y A LA DERECHA PESADO DEL ESTIÉRCOL, PARA LAS PRUEBAS EN BACHT.**Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

Para lograr la optimización de las condiciones operacionales se sometió a **3 Tiempos de Residencia Hidráulica TRH de 2, 4 y 6 días**; como también a **3 Temperaturas Meso y Termofílicas de 39, 45 y 50 grados Centígrados** para lo cual los reactores y sus respectivas replicas, fueron introducidos en diferentes termostatos (Baño María). Figura N° 03





**FIGURA N° 03. IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA COSUSTRATOS DILUIDOS Y HOMOGENIZADOS, CON SU REPLICA, ENVASADOS EN REACTORES DE 500 ML. SUPERIOR DERECHA EN TERMOSTATO O BAÑO MARÍA A 50°C. ABAJO IZQUIERDA EN TERMOSTATO A 39°C Y DEBAJO DERECHA EN TERMOSTATO A 45°C.**

Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

Con agitación manual cada 4 horas por 15 segundos, cada reactor. Las pruebas se han realizado a temperatura mesofílica para lograr una mejor performance de los microorganismos metanogénicos.

La muestra de mayor producción de biogás en volumen ml, resultado: S3 + TRH6 días + T39°C; es decir el Co-sustrato 3 sometido a condiciones y/o factores como Tiempo de Residencia Hidráulica de 6 días y Temperatura de 39° Centígrados.

La medición se efectuó volumétricamente por desplazamiento de agua por presión ejercida por el biogás generado en el reactor y trasladado hacia un matraz kitasato graduado con tapón de jebes gris (marca KIMAX de fabricación alemana y tapón marca D&N), con una cantidad de agua definida hacia una probeta de vidrio graduada en ml. (marca NORMAX de fabricación alemana), como se aprecia en la Fig. N°04.



**FIGURA N° 04. REACTORES UNA VEZ CONCLUIDAS LAS PRUEBAS TRASLADAN EL BIOGÁS PRODUCIDO POR EL MÉTODO VOLUMÉTRICO A MATRACES KITASATO GRADUADOS CONTENIENDO UNA CANTIDAD DEFINIDA DE AGUA, LA MISMA QUE ES TRASLADADA A SU VEZ A PROBETAS GRADUADAS PARA SU LECTURA.**Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

- b. El **análisis estadístico** se realizará con el programa SPSS v.24; para el análisis de varianza univariante y análisis de varianza completo, tomando en consideración los efectos de los factores y sus interacciones dobles y triple, para su variable dependiente producción de biogas. El diseño corresponde a un diseño en factorial que corresponde a tres Cosustratos, sometidos a tres Tiempos de Residencia Hidráulica – TRH y tres Temperaturas.

### **2.3. Prueba del Co-sustrato 3, en Biodigestor *High Performance Temperature Controlled*– HPTC para evaluar volumen de Biogás y Biometano producidos.**

Luego fue escalado matemáticamente para un volumen de 3 metros cúbicos, que tiene el tanque de hidrólisis 1 del Biodigestor *High Performance Temperature Controlled*– HPTC (se observa en las figuras N° 5 y 6 a detalle), la dilución y preparación se realizó en el estanque de cemento exterior, los sustratos fueron pesados en una balanza de pie, homogenizados y una bomba impelente condujo mediante manguera al tanque de hidrólisis 1 del biodigestor HPTC, donde se realiza la fase de hidrólisis y fermentativa o acidogénica, luego es bombeado hacia un segundo Tanque de Hidrólisis 2 en periodo de 48 horas, donde concluye el proceso de hidrólisis, fermentación y se realiza la acetogénesis de la Digestion Anaerobia DA del Cosustrato 3; este tanque automáticamente es vaciado hacia el biodigestor propiamente dicho (bolsa hermética – container negro) en un lapso de 24 horas, cada cuatro horas volúmenes aproximados de 400 a 500 litros.

La temperatura a 39°C programado y generado en un caldero de agua caliente, es enviada a la base del biodigestor en mangueras plásticas, dispuestas concéntricamente en la base. En tanto el contenido dentro del biodigestor es agitado y homogenizado por una motobomba eléctrica para lograr una temperatura uniforme en el contenido en biodigestion y evitar los depósitos de Cosustrato o costras en la base.



**FIGURA N° 05. IMAGENES SUPERIOR IZQUIERDA CONTEINER COLOR NEGRO EN SU INTERIOR CONTIENE BOLSA DEL BIODIGESTOR PROPIAMENTE DICHO. DERECHA SUPERIOR CONTEINER BEIGE CONTIENE EN SU INTERIOR TANQUES DE HIDRÓLISIS, MANDOS, BOMBAS Y CALDERO. AL CENTRO UBICACIÓN DE LOS CONTEINER, UNO AL COSTADO DEL OTRO. ABAJO IZQUIERDA MANDOS AUTOMATIZADOS PARA BOMBEO PROGRAMADO Y CALDERO. ABAJO DERECHA ESTANQUE CON GEOMEMBRANA PARA RECEPCIONAR EL BIOL.**

Fuente: Fotografías Marco Ponce M.



**FIGURA N° 06. IMÁGENES A LA IZQUIERDA DENTRO DEL CONTEINER BEIGE SE MUESTRAN LOS DOS TANQUES DE HIDRÓLISIS; AL CENTRO SE MUESTRA EN PRIMER PLANO EL SEGUNDO TANQUE DE HIDROLISIS Y AL FONDO EL CALDERO DE AGUA. A LA DERECHA EL TABLERO DE MANDO, EN EL PISO BOMBA Y AL COSTADO EL CALDERO DE AGUA.**

Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

En la bolsa de Digestion anaerobia - DA (container negro), se realiza la fase de metanogénesis, el biogás generado es conducido por un sistema de cañerías y mangueras hasta un Contador de Gas modelo GCZ BK-G4M marca KROMS CHROEDER de fabricación en Barcelona – España, donde es medido el volumen continuo que pasa por él; luego es conducido y depositado en un recipiente de hule y hermético llamado gasómetro con capacidad para 60 metros cúbicos. Figura N° 07.



**FIGURA N° 07. A LA IZQUIERDA CONTADOR DE GAS MODELO GCZ BK-G4M MARCA KROMS CHROEDER DE FABRICACIÓN EN BARCELONA – ESPAÑA. A LA DERECHA GASÓMETRO CON CAPACIDAD DE 60 M3.**

Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

Para medir y obtener los volúmenes de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  (metano, bióxido de carbono, oxígeno y sulfuro de hidrogeno respectivamente), se utilizo un equipo Multitec<sup>®</sup> 545/540, marca SEWERIN, modelo 20.02.2015 a – 105834 – de fabricación alemana. Utilizando sensores infrarrojos para la identificación de metano y dióxido de carbono; sensores electroquímicos para oxígeno y sulfuro de hidrogeno; evaluándose tres veces al día tanto en el biodigestor y en el gasómetro, (con tres repeticiones por cada una). Ver Figura N° 08 y observándose la llama azul al quemar el biogas en un quemador (Ver Figura N° 09).



FIGURA N° 08. EQUIPO MULTITEC® 545/540, MARCA SEWERIN, MODELO 20.02.2015 A - 105834 - DE FABRICACIÓN ALEMANA; PARA OBTENER LOS PORCENTAJES DE CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>S (METANO, BIÓXIDO DE CARBONO, OXIGENO Y SULFURO DE HIDROGENO), NÓTESE MEDIDAS EFECTUADAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN EN DIGESTOR HPTC. Fuente: Fotografías Marco Ponce M.



FIGURA N° 09. LLAMA AZUL PRODUCIDA AL QUEMAR EL BIOGÁS.

Fuente: Fotografías Marco Ponce M.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis Físico Químicos

- a. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad – UCSM, laboratorio acreditado por el Instituto de Control de la Calidad del Perú – INACAL para determinar la **Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L)**, ver Tabla N° 04 y presentan los siguientes resultados:

**TABLA N° 04. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE  
OXIGENO.**

Informe de Ensayos: N° de Informes NA29K16.002480A,B Y C.

ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:

ANÁLISIS	MUESTRA - S1	MUESTRA - S2	MUESTRA - S3
DETERMINACION DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO mg/L). NMX-AA-030-SCFI-2001.	16 570	14 907	14 322

Fuente: Marco Ponce M.

- b. Las muestras enviadas al Laboratorio de Nutrición y Alimentación Animal para determinar **Materia Seca Total (MST)**; **Humedad (H)**; **Cenizas (CZS)** y **Materia Orgánica Volátil (MOV)** y **pH** obtenido por el método potencio métrico, ver Tabla N° 05; presentan los siguientes resultados:

**TABLA N° 05. DETERMINACIÓN DE MATERIA SECA TOTAL (MST);  
HUMEDAD (H); CENIZAS (CZS) Y MATERIA ORGÁNICA VOLÁTIL  
(MOV) Y PH.**

Informe de Ensayos: N° de Informe LNAA/059/060/061/2016.

I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICO:

Todos los resultados en base seca:

Parámetros	Muestra Código	Sustrato 1 059-16	Sustrato 2 060-16	Sustrato 3 061-16
Materia Seca Total (MST)	(%)	2.50	3.53	4.78
Humedad (H)	(%)	97.50	96.47	95.22
Cenizas (CZS)	(%MS)	0.48	0.30	0.28
Materia Orgánica Volátil (MOV)	(%MS)	99.52	99.70	99.72
pH		7.09	6.93	7.15

Fuente: Marco Ponce M.

c. **Relación Carbono/Nitrogeno**

Estimación de la Relación C/N del Sustrato3 – S3:

$$K_{S3} = \frac{30\% * 75K + 30\% * 150K + 30\% * 525K}{1.3\% * 75K + 1.3\% * 150K + 1.3\% * 525K}$$

Donde:

K = C/N de la mezcla de materias primas.  
C = % de Carbono orgánico contenido en cada materia prima.  
N = % de Nitrógeno orgánico contenido en c / materia prima.  
Q = Peso fresco de c / materia prima, expresado en K o TN

$$K_{S3} = \frac{2250 + 4500 + 15750}{97.5 + 195 + 682.5} = \frac{22500}{975}$$

**K S3 = 23.07 o C/N = 23.07:1**

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.(2011). Manual de biogás. ISBN 978-95-306892-0.

### 3.2. Co-sustratos (S1, S2 y S3), Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y Temperatura (T°C) para Pruebas en Bacht.

- a. Una vez concluidas las pruebas en bacht y/o piloto; se presentan los resultados en la Tabla N° 06; el **volumen de biogás obtenido por Co-sustrato 1, 2 y 3;** sometidos a Tiempos de Residencia Hidráulica (TRH) de 2, 4 y 6 días de DA y a Temperaturas de 39, 45 y 50°C.

TABLA N° 06 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ML POR CO-SUSTRATOS, TIEMPOS DE RESIDENCIA HIDRÁULICA – TRH Y TEMPERATURAS EN GRADOS CENTÍGRADOS											
PRODUCCION DE BIOGÁS OBTENIDO EN 500 ML DE MUESTRA Y REPLICADE ACUERDO A : S <sub>n</sub> + TRH <sub>n</sub> + T° <sub>n</sub>											
S <sub>n</sub> + TRH <sub>2</sub> + T° <sub>Cn</sub>				S <sub>n</sub> + TRH <sub>4</sub> + T° <sub>Cn</sub>				S <sub>n</sub> + TRH <sub>6</sub> + T° <sub>Cn</sub>			
Orden N°	Vol. Biogás ml	Vol. Muestra ml	MUESTRA	Orden N°	Vol. Biogás ml	Vol. Muestra ml	MUESTRA	Orden N°	Vol. Biogás ml	Vol. Muestra ml	MUESTRA
01 - A	103.26	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	10 - A	217.78	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	19 - A	300.22	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
01 - B	176.09	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	10 - B	237.78	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	19 - B	284.93	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
04 - A	272.83	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	13 - A	205.56	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	22 - A	319.87	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
04 - B	183.70	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	13 - B	188.89	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	22 - B	312.23	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
07 - A	155.44	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	16 - A	445.56	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	25 - A	<b>578.60</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
07 - B	216.30	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>39</sub>	16 - B	383.33	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>39</sub>	25 - B	<b>435.59</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>39</sub>
02 - A	169.57	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	11 - A	214.13	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	20 - A	205.38	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>
02 - B	205.44	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	11 - B	193.79	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	20 - B	191.40	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>
05 - A	218.48	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	14 - A	315.85	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	23 - A	220.43	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>
05 - B	342.39	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	14 - B	256.96	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	23 - B	233.33	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>
08 - A	198.91	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	17 - A	358.67	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	26 - A	241.94	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>
08 - B	218.48	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>45</sub>	17 - B	294.43	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>45</sub>	26 - B	315.05	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>45</sub>

03 - A	301.63	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	12 - A	220.43	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	21 - A	219.78	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>
03 - B	203.91	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	12 - B	282.80	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	21 - B	216.48	500	S <sub>1</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>
06 - A	327.17	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	15 - A	231.18	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	24 - A	330.77	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>
06 - B	182.61	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	15 - B	310.75	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	24 - B	390.11	500	S <sub>2</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>
09 - A	<b>226.09</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	18 - A	<b>446.24</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	27 - A	401.10	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>
09 - B	<b>364.13</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>2</sub> T° <sub>50</sub>	18 - B	<b>422.58</b>	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>4</sub> T° <sub>50</sub>	27 - B	450.55	500	S <sub>3</sub> TRH <sub>6</sub> T° <sub>50</sub>

Se puede inferir de la Tabla N° 06; que cuando los Cosustratos son sometidos a Digestion Anaerobia – DA, a 2 días de Tiempo de Residencia Hidráulica – TRH los mejores volúmenes de biogás se obtienen con el Co-sustrato tres - S<sub>3</sub> a 50°C (promedio 295.1085 ml de biogás); seguido del Co-sustrato dos – S<sub>2</sub> a 45°C (promedio 280.4345 ml de biogás).

Cuando la DA es 4 días de TRH el mejor volumen se obtiene con el S<sub>3</sub> a 50°C (promedio 434.409 ml de biogás); seguido del S<sub>3</sub> a 39°C (promedio 414.4445 ml de biogás).

Cuando la DA es a 6 días de TRH el mejor volumen se obtiene con el S<sub>3</sub> a 39°C (promedio 507.0965 ml de biogás); seguido del S<sub>3</sub> a 50°C (promedio 425.824 ml de biogás).

El mejor volumen obtenido de todas las pruebas en bacht efectuadas se obtiene en promedio con la muestra S<sub>3</sub>+ TRH<sub>6</sub>días + T°C<sub>39</sub> = 507.0965ml de biogás por cada 500 ml de Co-sustrato y este será escalado matemáticamente al biodigestor HPTL de doble cámara hidrolítica.

#### b. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS v.24; para el análisis de varianza univariante (Tabla N° 07), y el análisis de varianza completo (Tabla N° 08), tomando en consideración los efectos de los factores y sus interacciones dobles y triple de los valores contenidos en la Tabla N° 06, para su variable dependiente producción de biogás.

**TABLA N° 07. FACTORES INTERSUJETOS COMO SUSTRATO, TRH Y TEMPERATURAS A EVALUAR Y EL NÚMERO DE CADA UNO DE ELLOS.**

**Factores inter-sujetos**

		N
Sustrato	s1	18
	s2	18
	s3	18
TRH	t2	18
	t4	18
	t6	18
Temperatura	39	18
	45	18
	50	18

**TABLA N° 08. ANÁLISIS DE VARIANZA COMPLETO QUE PRESENTA LAS PRUEBAS DE LOS EFECTOS INTER- SUJETOS; PARA LA VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN DE BIOGAS**

**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

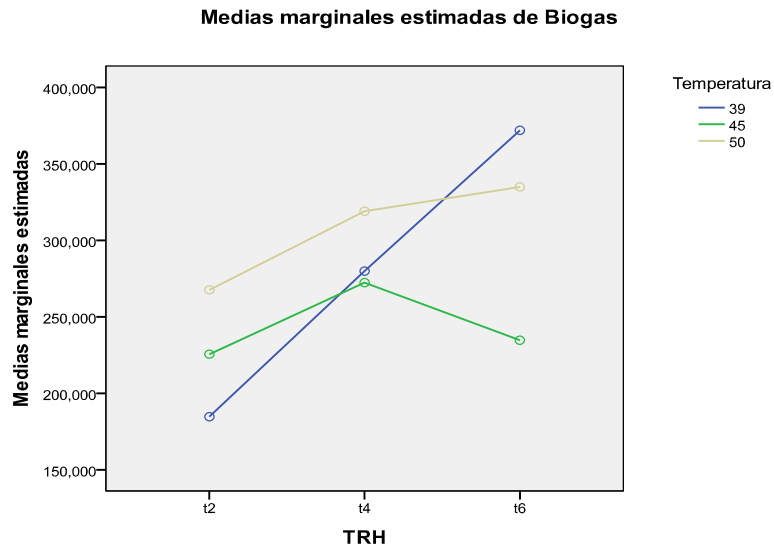
Variable dependiente: Biogás

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	401248,966 <sup>a</sup>	26	15432,653	5,985	,000
Intersección	4133883,074	1	4133883,074	1603,099	,000
Sustrato	137017,396	2	68508,698	26,567	,000
TRH	74522,550	2	37261,275	14,450	,000
Temperatura	35819,908	2	17909,954	6,945	,004
Sustrato * TRH	54196,645	4	13549,161	5,254	,003
Sustrato * Temperatura	22827,022	4	5706,756	2,213	,094
TRH * Temperatura	52937,743	4	13234,436	5,132	,003
Sustrato * TRH * Temperatura	23927,702	8	2990,963	1,160	,358
Error	69624,441	27	2578,683		
Total	4604756,481	54			
Total corregida	470873,407	53			

a. R cuadrado = .852 (R cuadrado corregida = .710)

De lo cual se interpreta que no existe significación para los factores Sustrato, TRH y Temperatura. Sin embargo, en la interacción doble entre los factores Sustrato x Temperatura y la interacción triple Sustrato x TRH x Temperatura si existe significancia.

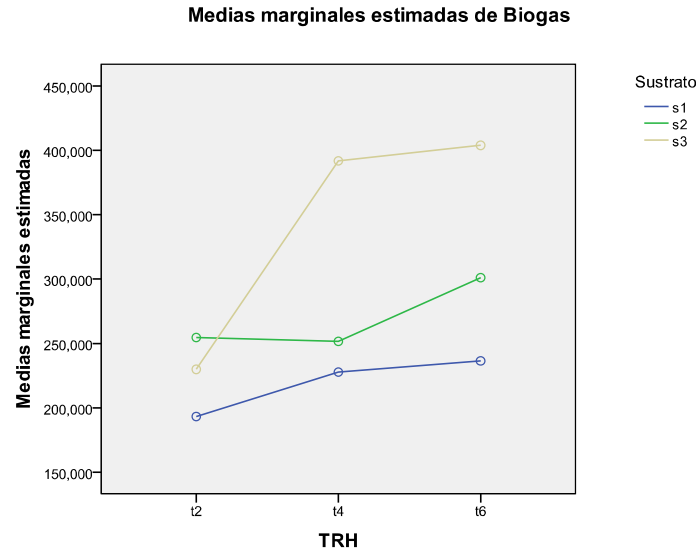
Tienen significancia aquellos valores ( $< 0.05$ ), menores que 0.05; y no los otros. Estoy considerando también la fuente de variación FV sustrato por temperatura porque en gran medida tienen que ver con la producción de biogás.



**FIGURA N° 10. GRÁFICOS DE PERFIL. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS DE BIOGÁS CUANDO INTERACTÚAN LOS FACTORES TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA - TRH VS TEMPERATURA - T°C.**

Fuente Marco Ponce M y el Programa SPSS v. 24

Esta Figura N° 10, quiere decir que la mayor producción de biogás se logro a temperatura de 39°C y un Tiempo de Residencia Hidráulica de 6 días – TRH6, esta es la mejor interacción de estos dos factores en bacht.



**FIGURA N° 11. GRÁFICOS DE PERFIL. MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS DE BIOGÁS CUANDO INTERACTÚAN LOS FACTORES SUSTRATO VS TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA - TRH.**

Fuente Marco Ponce M y el Programa SPSS v. 24

En esta Figura N° 11 se muestra que la mayor producción de biogás se logró con el sustrato 3 y con un TRH 6 días y que esta es la mejor interacción de estos dos factores en batch. Y se podría decir que los sustratos tendrían mejor performance de respuesta en la producción de biogás cuando se someten a DA con los parámetros 39°C y TRH 6 días.

**TABLA N° 09. PRUEBAS POST HOC PARA SUSTRATO SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS**

**Biogas**

Tukey B<sup>a,b</sup>

Sustrato	N	Subconjunto		
		1	2	3
s1	18	219,15478		
s2	18		269,06100a	
s3	18			341,83272b

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2578.683.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18.000

b. Alfa = 0.05.

Fuente Marco Ponce M y el Programa SPSS v. 24

En relación a la Tabla N° 09; las pruebas unifactoriales – TUKEY diremos que para el factor sustrato es el más importante o más significativo, y dentro de ellos el S3

**TABLA N° 10. PRUEBAS POST HOC PARA TRH SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS.**

**Biogas**

Tukey B<sup>a,b</sup>

TRH	N	Subconjunto	
		1	2
t2	18	225,91178	
t4	18		290,37239a
t6	18		313,76433b

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 2578.683.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18.000

b. Alfa = 0.05.

Fuente Marco Ponce M y el Programa SPSS v. 24

En relación a la Tabla N° 10; las pruebas unifactoriales – TUKEY diremos que para el factor TRH es significativo, y dentro de ellos el TRH6, porque tiene una mejor media

**TABLA N° 11. PRUEBAS POST HOC PARA TEMPERATURA SUBCONJUNTOS  
HOMOGÉNEOS**

**Biogas**

Tukey B<sup>a,b</sup>

Temperatura	N	Subconjunto	
		1	2
45	18	244,14550	
39	18	278,77444a	278,77444a
50	18		307,12856b

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 2578.683.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18.000

b. Alfa = 0.05.

Fuente Marco Ponce M y el Programa SPSS v. 24

En relación a la Tabla N° 11; las pruebas unifactoriales – TUKEY diremos que para el factor Temperatura es significativo y dentro de ellos la Temperatura de 39 dos veces mejor y luego 50°C siempre en relación a nuestra variable dependiente producción de biogás.

**c. Mayor Performance de Biogás / Sustrato = ml o m<sup>3</sup>de Sn + TRHn + T°n en Bacht.**

El sustrato 3 (S3), con un Tiempo de Residencia Hidráulica de seis días (TRH6días) y a una Temperatura de 39°C (T39°C) o sea la variable independiente S<sub>3</sub>TRH<sub>6</sub>T<sub>39</sub>°C; tuvo la más alta performance en la producción de biogás con 578.603 ml por reactor de 500 ml.; expresado también como 578.603 ml de biogás / 500 ml S<sub>3</sub>TRH<sub>6</sub>T<sub>39</sub>°C sometido a Digestion Anaerobia – DA.

### 3.3. Prueba Co-sustrato 3, en Biodigestor *High Performance Temperature Controlled* - HTPC para Evaluar volumen de Biogás y Biometano producidos.

#### a. Determinación del Volumen de Producción de Biogás en el Biodigestor *High Performance Temperature Controlled* - HTPC.

En la Tabla N° 12 se presenta la evolución de la **producción y contenido de gases generados en el biodigestor HTPC** con el sustrato 3:  $S_3 + TRH_6 + T_{39}^{\circ}C$ , escalado matemáticamente de acuerdo a la fórmula para tres metros cúbicos de capacidad del tanque de hidrólisis 1.

**TABLA N° 12. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE GASES EN EL BIOGÁS OBTENIDO CON EL SUSTRATO 3:  $S_3 + TRH_6 + T_{39}^{\circ}C$  EN BIODIGESTOR HTPC.**

N°	Día	Fecha	Vol. Prod. Biogás M3	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> S %	Comentarios
00	Viernes	16-dic-16	5.103	62.30	31.00	6.50	0.20	Medido Ings. Peña y Castro. 1° día medido - antes no hay referencia
0	Martes	27-dic-16	4.850	64.80	33.00	0.20	0.20	SIEMBRA
1	Miércoles	28-dic-16	6.040	73.10	18.00	4.00	0.14	INICIO – DA – CH <sub>4</sub>
2	Jueves	29-dic-16	5.141	70.90	24.00	1.80	0.20	Atoro en HTPC
3	Viernes	30-dic-16	3.548	70.20	27.00	0.50	0.20	Regurgitado digerido
4	Sábado	31-dic-16	5.487					3 días =5.487 M3/día
5	Domingo	01-ene-17	5.487					3 días =5.487 M3/día
6	Lunes	02-ene-17	5.487	70.80	18.00	2.80	0.16	16.461 M3/3días

**Fuente:** Elaboración personal.

Una vez escalado matemáticamente el Co-sustrato 3 al Biodigestor HTPC de Doble Cámara Hidrolíticas con capacidad de Tres m<sup>3</sup> y sometido a los parámetros de TRH y T°C (probados en bacht), se obtuvo un volumen de biogás producido de 6.040 m<sup>3</sup> / primer día y una media de 5.1983 m<sup>3</sup> biogás / día en seis repeticiones; el volumen de gas es obtenido con el Contador de Gas modelo GCZ BK-G4, de fabricación en Barcelona - España.

Expresado en biogás/m<sup>3</sup>de Cosustrato3; entonces se ha obtenido 1.7327m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> Cosustrato 3. El posible efecto de la doble Cámara Hidrolíticas (mejor proceso y resultado hidrolítico y ácido génico en la primera cámara o tanque y acetogénicas y metanogénicas en la segunda cámara o tanque y biodigestor).

**b. Calidad de Biogás = % CH<sub>4</sub>, % CO<sub>2</sub>, %O<sub>2</sub> y %H<sub>2</sub>S / S3 + TRH6 + T°39 en Biodigestor HPTC**

Encontrando el primer día evaluado en el Sensor de gases para CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S; equipo Multitec<sup>®</sup> 545/540, marca SEWERIN, modelo 20.02.2015 a – 105834 – de fabricación alemana los siguientes resultados:

Biometano	CH <sub>4</sub> %	73.10 %
Bióxido de Carbono	CO <sub>2</sub> %	18.00 %
Oxígeno	O <sub>2</sub> %	04.00 %
Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S %	0.14 %

Los promedios obtenidos durante 6 días o 6 repeticiones, corresponden a 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>; 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S. El análisis del laboratorio del Cosustrato 3 indica 4.5% de MOV del Sustrato 3, equivalente a 45 g por litro de S3 o 135 k de MOV en 3000 litros o tres m<sup>3</sup>o también equivalente a 27.435 ml Biometano/g MOV o igual a 27.435 cm<sup>3</sup> Biometano/gr MOV.De aquí se obtiene que el promedio Biometano/día es de 3.7038 m<sup>3</sup> en seis repeticiones. Despejando, 3.7038m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/3m<sup>3</sup> Cosustrato 3/día; se obtiene 1.2345 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> Cosustrato 3.

**c. Evaluación energética del biometano = kWh / ml o m<sup>3</sup> sustrato en Biodigestor HPTC**

Los promedios obtenidos durante 6 días o 6 repeticiones, corresponden a 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>; 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S. Con un volumen de biogás producido de 6.040 M<sup>3</sup> / primer día y una media de 5.1983 m<sup>3</sup> biogás / día en seis repeticiones. El promedio Biometano/día es de 3.7038 m<sup>3</sup> en seis repeticiones.

Tomando en consideración “Para la determinación del potencial de energía a partir del metano producido por los tratamientos, se consideró que 1 m<sup>3</sup> de metano equivale a 10 kWh, acorde a los valores utilizados por (Belle *et al.* 2014). Además, se consideró una eficiencia de transformación de energía del 33% para sistemas de producción eléctrica a partir del metano”. (Belle *et al.* 2014). Por lo que en nuestro caso es igual a: 12.345 kWh/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> y/o m<sup>3</sup> Cosustrato 3; y por día: 37.035kWh/día m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>y/o 3m<sup>3</sup> Cosustrato 3.

## IV. DISCUSION

### 4.1. Análisis Físico Químicos:

a. **Demanda Química de Oxígeno** (DQO mg/L), para el Cosustrato 1, Cosustrato2 y Cosustrato 3 respectivamente: 16570 mg/L, 14907 mg/L y 14322 mg/L. Siendo menor el Cosustrato 3 a los otros dos por la menor cantidad de sólidos disueltos; los cuales son similares con lo encontrado por Del Real, Jorge et al (2009); “Para darle validez a los resultados derivados de la solución analítica, estos se comparan con los resultados experimentalmente obtenidos a nivel laboratorio para un digestor metanogénico en el régimen mesofílico de temperatura y en donde se trataron los vertidos residuales provenientes de una industria alcoholera bajo diferentes condiciones de operación, empleando como consorcio microbiano fluido ruminal vacuno. Los resultados del modelo concuerdan favorablemente bien con la producción de biogás y la disminución de la carga orgánica (expresada como DQO)”.

Pero difieren con lo encontrado por Guardia-Puebla, Y., et al (2017) cuando mencionan que “Las aguas residuales generadas por el Establecimiento Cárnico de Bayamo se caracterizan por presentar altas concentraciones de materia orgánica, expresada en función de los aceites y grasas, DBO5 y DQO. (GEOCUBA, 2013). Los cuales tienen otro destino en el Camal de La Colina – El Pedregal – Majes

### b. **Determinación de Materia Seca Total (MST); Humedad (H); Cenizas (CZS) y Materia Orgánica Volátil (MOV) y pH.**

Los resultados de los Análisis Físico químicos de los sustratos, nos muestran que la Materia Seca Total – MST del Sustrato3 (4.78%) fue mayor que de los Sustrato2 y 1 (3.53 % y 2.50% respectivamente). Lo cual es indirectamente proporcional a la Humedad – H, como es obtenido para el Sustrato 1 (97.50%), que es mayor que el de los Sustratos 2 y 3 (96.47% y 95.22% respectivamente).

En tanto que el contenido de Cenizas (CNZ), es mayor en el Sustrato 1 (0.48% MS), que los Sustratos 2 y 3 (0.30%MS y 0.28% MS respectivamente). En relación a la Materia Orgánica Volátil el Sustrato 3 es mayor (99.72%MS), que el Sustrato 2 y 1 (99.70 %MS y

99.52% MS); Y el pH para el sustrato 3 fue de (7.15), Sustrato 2 (6.93) y el Sustrato1 (7.09 %). Como se puede ver en el Cuadro N° 12.

**c. Relación Carbono/Nitrógeno del Sustrato 3:**

$K_{S3} = 23.07$  o  $C/N = 23.07: 1$  el cual se encuentra dentro el rango adecuado del Cosustrato y concuerda con “La relación C / N debe estar en el rango entre 15 y 30 (Braun 1982, Zubr 1986). La adición de enzimas, reduce la viscosidad de la mezcla de sustrato en el digestor significativamente y evita la formación de capas flotantes”. Weiland, P. (2010)

**4.2.Co-sustratos (S1, S2 y S3), Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y Temperatura (T°C) y Biogás obtenido en Bacht.**

**a. Volumen de Biogás por Sustrato =  $ml$  o  $m^3 / S_n + TRH_n + T^n$  en Bacht**

Se puede inferir de la Tabla N° 01; que cuando los Cosustratos son sometidos a Digestion Anaerobia – DA y diferentes parámetros TRH y T°C; se obtiene que: a 2 días de Tiempo de Residencia Hidráulica – TRH y 50°C el mayor volumen promedio corresponde al Co-sustrato tres - S3 (promedio 295.1085 ml de biogás); seguido del Co-sustrato dos – S2 a 45°C (promedio 280.4345 ml de biogás).

Cuando la DA es a 4 días de TRH el volumen mayor se obtiene con el S3 a 50°C (promedio 434.409 ml de biogás); seguido del S3 a 39°C (promedio 414.4445 ml de biogás).

Cuando la DA es a 6 días de TRH el mejor volumen se obtiene con el S3 a 39°C (promedio 507.0965 ml de biogás); seguido del S3 a 50°C (promedio 425.824 ml de biogás).

El más alto volumen obtenido de todas las pruebas en bacht efectuadas se obtiene en promedio con la muestra  $S_3 + TRH_{6días} + T^{39} = 507.0965ml$  de biogás por cada 500 ml de Co-sustrato y este será escalado matemáticamente al biodigestor HPTL de doble cámara hidrolítica.

Cuando se manejan los parámetros como los sustratos semisólidos, la mejor opción es manejar reactores o biodigestores en bacht como en nuestro caso y que concuerda con lo

mencionado: “Actualmente existen varios tipos de biodigestores anaerobios para la producción de biogás, y su diseño está determinado por el tipo de residuo a tratar. Para los residuos sólidos o semi-sólidos, tales como los estiércoles y el rumen, el tipo de reactor que más se utiliza es el biodigestor en “batch” o por lotes. Este diseño se basa en colocar el sustrato en un biodigestor, con un tiempo de retención hidráulico fijo (entre 20 – 30 días), y pasado ese período se extrae el sustrato digerido (Abbasi et al., 2012)” mencionado por Guardia-Puebla, Y., et al (2017)

Y cuando se usan otros sustratos las pruebas en batch son utilizadas como se refiere: “En este trabajo se determinó el tiempo de retención hidráulica en un reactor anaeróbico para optimizar la generación de biogás durante la digestión de barros activados residuales. Se realizaron mediciones en reactores a escala de laboratorio para seguir la evolución del pH, DQO, sólidos, y biogás, manteniendo controlada la temperatura en un rango de 20 a 25°C. Los reactores se cargaron por única vez con 21,83 gSV/l equivalentes a 0,14 gSV/l.d.”H. Campaña, et al (2011).

“El tiempo de retención hidráulica óptimo fue de 50 días obteniendo una tasa de producción de biogás de 70 ml/l.d (0,085 l/gSV). Luego de 80 días de retención hidráulica las remociones de DQO total y soluble y sólidos volátiles fueron del 25%, 45% y 21% respectivamente. H. Campaña, et al (2011). Por lo tanto, la tasa de carga típica de materia seca orgánica (ODM) para procesos de fermentación húmeda es sólo entre 2 y 4 kg de ODM / (m<sup>3</sup> \* d). Weiland, P. (2010).

### **b. Análisis Estadístico**

El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS v.24; para el análisis de varianza univariante (Cuadro N° 06), dando a conocer los factores inter - sujetos tomados en consideración en el estudio; es decir 3 Sustratos diferentes por su composición (S1, S2 y S3), 3 Tiempos de Residencia Hidráulica – TRH diferentes ( t2días, t4días y t6 días) y 3 Temperaturas diferentes en ° Centígrados (39°C, 45°C y 50°C) y el numero datos tomados en consideración 18.

El Análisis de Varianza que presenta el resultado de las Pruebas de los efectos inter – sujetos para la variable dependiente: Biogás en el Cuadro N° 7; muestra que para los

efectos de los factores y sus interacciones dobles y triple no existe significación para los factores Sustrato, TRH y Temperatura. Sin embargo, en la interacción doble entre los factores Sustrato x Temperatura y la interacción triple Sustrato x TRH x Temperatura si existe significancia; partiendo de que tienen significancia aquellos valores ( $< 0.05$ ), menores que 0.05; considerando también la fuente de variación FV sustrato por temperatura porque en gran medida tienen que ver con la producción de biogás.

La Figura N° 10, quiere decir que la mayor producción de biogás se logró a temperatura de 39°C y un Tiempo de Residencia Hidráulica de 6 días – TRH6, esta es la mejor interacción de estos dos factores en bacht. La Figura 11 quiere decir que la mayor producción de biogás se logró con el sustrato 3 y con un TRH6 días y que esta es la mejor interacción de estos dos factores.

Entonces en nuestro estudio se encuentra que el sustrato 3 tiene la mejor respuesta y/o performance (variable dependiente: producción de biogás), cuando se someten a DA con los parámetros 39°C y TRH6 días en bacht.

En el Cuadro N° 8; se muestra el resultado de las pruebas post hoc (medias de los grupos de subconjuntos homogéneos), basadas en las medias observadas, para un tamaño de muestra de la media armónica de 18 y alfa de 0.05; concluyendo que esta prueba unifactorial – TUKEY que el factor sustrato es el más importante o significativo y dentro de ellos el sustrato 3 – S3 en la producción de biogás. Cuando nos referimos al Tiempo de Residencia Hidráulica – TRH (Cuadro N° 9), resulta que este factor es significativo y dentro de ellos el TRH6 días y para el factor Temperatura (Cuadro N° 10), es significativo y dentro de ellos la T39° Centígrados.

### **c. Mayor Performance de Biogás por Sustrato = ml o m<sup>3</sup> / Sn + TRHn + T°n en Bacht.**

Se puede inferir de la Tabla N° 01; que cuando los Cosustratos son sometidos a Digestion Anaerobia – DA y diferentes parámetros TRH y T°C; se obtiene que: a 2 días de Tiempo de Residencia Hidráulica – TRH y 50°C el mayor volumen promedio corresponde al Co-sustrato tres - S3 (promedio 295.1085 ml de biogás); seguido del Co-sustrato dos – S2 a 45°C (promedio 280.4345 ml de biogás).

Cuando la DA es a 4 días de TRH el volumen mayor se obtiene con el S3 a 50°C (promedio 434.409 ml de biogás); seguido del S3 a 39°C (promedio 414.4445 ml de biogás).

Cuando la DA es a 6 días de TRH el mejor volumen se obtiene con el S3 a 39°C (promedio 507.0965 ml de biogás); seguido del S3 a 50°C (promedio 425.824 ml de biogás).

El más alto volumen obtenido de todas las pruebas en bacht efectuadas se obtiene en promedio con la muestra  $S_3 + TRH_6 + T^{\circ}C_{39} = 507.0965$ ml de biogás por cada 500 ml de Co-sustrato y este será escalado matemáticamente al biodigestor HPTL de doble cámara hidrolítica.

#### **4.3. Prueba Co-sustrato 3, en Biodigestor *High Performance Temperature Controlled-HPTC* para evaluar volumen de Biogás y Biometano producidos.**

##### **a. Determinación del Volumen de producción de Biogás en el Biodigestor *High Performance Temperature Controlled- HPTC*.**

Las evaluaciones efectuadas cada dos días y en tres repeticiones en total; como lo investigado por Okonkwo, U. C., et al (2016) indica que “Un recién digerido tomó sólo dos días para comenzar la producción de gas y produjo un mayor volumen del total, por lo que se sugiere que la suspensión digerida del lote previo de fermentación no debe vaciarse por completo, pero una cierta cantidad debe mezclarse con la nueva materia prima para mejorar la producción del biogás”.

Esta consideración similar como el nuestro, también tiene que ver con los sustratos utilizados como en nuestra investigación y el proceso de hidrólisis en el primer tanque por 24 horas en el cual “Los microorganismos de hidrolización y fermentación son responsables del ataque inicial a los polímeros y monómeros y producen principalmente acetato e hidrógeno y cantidades variables de ácidos grasos volátiles tales como propionato y butirato. Los microorganismos hidrolíticos excretan enzimas hidrolíticas, por ejemplo, celulasa, celobiasa, xilanasa, amilasa, lipasa y proteasa. Un complejo

consorcio de microorganismos participa en la hidrólisis y fermentación de material orgánico. La mayoría de las bacterias son estrictos anaerobios” Weiland, P. (2010).

Para el digester reiniciado, la producción de gas comenzó el 2º día frente al 7º día sin digester reiniciado y la producción de gas alcanzó su máximo antes. Okonkwo, U. C., et al (2016).

En esta inteligencia los promedios obtenidos durante 6 días y en 3 repeticiones de dos días, corresponden a 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>; 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S con equipo sensor de gases (equipo Multitec<sup>®</sup> 545/540, marca SEWERIN). Con un volumen de biogás producido de 6.040 m<sup>3</sup> / primer día y una media de 5.1983 m<sup>3</sup> biogás / día en 6 repeticiones (Contador de Gas modelo GCZ BK-G4M).

De aquí se obtiene que el promedio Biometano/día es de 3.7038 m<sup>3</sup> en seis repeticiones. De los cuales se estima, tomando en consideración los resultados del análisis de laboratorio que indica 4.5% de Materia Orgánica Volátil - MOV del Sustrato 3, equivalente a 45 gr por litro de S3 o 135 k de MOV en 3000 litros o igual en tres m<sup>3</sup> o también equivalente a 27.435 ml Biometano/gr MOV/ día o igual a 27.435 cm<sup>3</sup> Biometano/gr MOV/día.

Estos resultan menores a los obtenidos por Okonkwo, U. C., et al (2016) “El volumen máximo de gas de 809 cm<sup>3</sup> fue producido por la muestra que contenía 50% de excrementos de aves y 50% de desechos domésticos”; en 22 días de experimentación. Navarro, S. L. B., et al (2014) “La formulación de mejores resultados fue estiércol vacuno y suero lácteo en partes, para la producción de gas fue utilizada para cargar el biodigestor a escala, en el cual se produjo un volumen de 31.1 L de gas durante 31 días de funcionamiento.” En los dos casos no especifican si se trata de Biometano o solo biogás.

En cambio, Ware, A., & Power, N. (2016) estudian “evaluar el potencial de recuperación de energía de los subproductos industriales orgánicos de una instalación de sacrificio de ganado en Irlanda. Determinando el potencial de metano de los lodos de flotación de aire disuelto, panza, despojos blandos y una corriente de desechos mixtos (combinación de

flujos de desechos individuales); mediante una serie de ensayos bioquímicos de potencial de metano en condiciones mesófilas. El potencial de metano de los flujos de residuos caracterizados osciló entre 49,5 y 650,9 mLCH<sub>4</sub> gVS<sup>-1</sup>”.

La temperatura del proceso de DA fue en el rango mesófilo (39°C) en el Biodigestor *High Performance Temperature Controlled*–HPTC y que concuerda con Weiland, P. (2010) cuando explica que “La mayoría de los fermentadores húmedos funcionan a temperaturas mesófilas con optima entre 38 y 42 °C, y sólo unas pocas Plantas de biogás utilizan condiciones termofílicas entre 50 y 55°C. A temperaturas más altas, la velocidad de degradación es más rápida, y por lo tanto, HRTs más cortos y volúmenes de reactor más pequeños son pero el rendimiento final de metano a partir de materia orgánica no es influenciado”.

Aun así, hay opiniones en contrario como “Las condiciones psicrófilas tienen la ventaja con respecto a condiciones mesófilas o termófilas, esto se debe a la alta estabilización del sistema en el proceso de digestión anaerobia. Hidalgo, A. M. E., & Erasmo, M. A. J. (2017).

El pH cuando ingreso el sustrato<sup>3</sup>, al primer tanque de hidrólisis tenía 6.8 a 7.0; luego de 24 horas paso al segundo tanque y luego de 6 horas empezó a descargarse cantidades de 400 a 500 litros; cada 4 a 5 horas automáticamente, hacia el tanque de metanogénesis el mismo que se encontraba a 39°C. A las 48 horas en el tanque de metanogénesis el pH fue de 7.9 – 8.1 y que concuerda con otros investigadores.

“Durante la digestión anaerobia es posible apreciar la fluctuación del pH, principalmente debido a la alta producción de AGV; sin embargo, la codigestión de estiércol de vacuno con residuos sólidos municipales, especialmente lodo industrial, permite la estabilidad y mejora de la eficiencia del proceso junto con un aumento en la reducción de SV y de producción de metano (Capela et al., 2008)”. Mencionado por Plaza, F. S. (2010).

Y otros investigadores tienen opinión similar a los parámetros investigados y encontrados como “La formación de metano tiene lugar dentro de un PH, de aproximadamente 6,5 a 8,5 con un intervalo óptimo entre 7,0 y 8,0. El proceso se inhibe severamente si el pH disminuye por debajo de 6,0 o se eleva por encima de 8,5. El valor del pH aumento por la

acumulación de amoníaco durante la Digestion de Proteínas, mientras que la acumulación de AGV disminuye el valor del pH. La acumulación de AGV a menudo no siempre dan una caída del pH, debido a la capacidad tampón del Sustrato”. Weiland, P. (2010)

“El estiércol animal tiene un excedente de alcalinidad que estabiliza el valor del pH en la acumulación de VFA. VFA son un Intermedio clave en el proceso y son capaces de Inhibir la metanogénesis en altas concentraciones (Nielsen y Agelidaki 2008)” mencionados por Weiland, P. (2010).

“El proceso de digestión tiene lugar en condiciones mesofílicas (35- 42 ° C) o termofílicas (45-60 ° C). Las bacterias mesofílicas toleran fluctuaciones de temperatura de +/- 3 ° C sin cambios o reducciones en la producción de metano. Cuando el proceso es inhibido por el amoníaco, un aumento Concentración de ácidos grasos volátiles (VFA) conducirá a una Disminución del pH que contrarrestará parcialmente el efecto amoníaco (Nielsen y Agelidaki 2008)” mencionados por Weiland, P. (2010).

Una observación y preocupación en el futuro es el tamaño o grosor de los sustratos y/o residuos que entran al proceso de digestión porque en más de una vez obstruyen las cañerías y mangueras por las cuales se trasladan de un tanque a otros y finalmente al biodigestor propiamente dicho.

“En la digestión continua de 3 cm de ensilado, los rendimientos específicos de metano SMY fue de 342 y 343 L CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> VS, respectivamente, con y sin adición de fluido ruminal. Sin embargo, la operación del digestor fue afectada significativamente por el ensilaje flotando sobre la superficie del licor y su enredo en el sistema de mezcla. El mejor caso fue de 1 cm de ensilaje con adición de líquido ruminal, ofreciendo rendimientos específicos de metano SMYs más altos de 371 L CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> VS y funcionamiento estable en todas partes”. Wall, D. M., et al (2015).

Ninguno de los sub productos animales o sustratos utilizados en el estudio fueron esterilizados o higienizados como se describe a continuación “Los subproductos animales (SPA’s) constituyen un riesgo biológico que hace que se les deba aplicar un tratamiento y seguimiento diferenciado en una planta de biogás. El efecto sobre el rendimiento de metano (YCH<sub>4</sub>) de una etapa de higienización en un proceso de digestión anaerobia, no

fue estudiado para los residuales evaluados en la Empresa Pecuaria Genética Camilo Cienfuegos (EPG C.C.)” García, O. D. V., et al (2015). Lo cual constituirá en el futuro una recomendación.

“Los resultados se observaron en términos de mayor producción de biogás (+ 9%), tasas de producción de biogás (+ 35%) y reducción de la concentración de AGV para la adición combinada en comparación con sólo Fe y Ni. La mayor estabilidad fue apoyada por observaciones de las diferencias en viscosidad, VFA intradiario y cinética de biogás, así como por el gen 16S rRNA y 16S rRNA de los metanógenos”. Moestedt, J., et al (2016).

**b. Calidad de Biogás = % CH<sub>4</sub>, % CO<sub>2</sub>, %O<sub>2</sub> y %H<sub>2</sub>S / S3 + TRH6 + T°39 en Biodigestor HPTC**

Los promedios obtenidos durante 6 días o 6 repeticiones, corresponden a 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>; 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S. Entonces despejando se obtiene 1.2345 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> Cosustrato 3 y/o 3.7035 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/3m<sup>3</sup> Cosustrato 3/ día.

La concentración de metano con el sustrato<sup>3</sup> en el biodigestor HTPC, luego de tres repeticiones, durante seis días, es en promedio de 71.25%; el mismo que resulta superior y/o mayor al obtenido en “Un estudio de la tasa de carga orgánica (OLR) y el efecto de la concentración de NaOH en la etapa de pre tratamiento de la cáscara de maíz (CH) fue llevado a cabo, para mejorar la producción de biogás. La producción óptima de biogás a 67,6 mL · min<sup>-1</sup> con una concentración de metano del 63,4% se ha obtenido con la aplicación de OLR a 43,6 g de VS · L<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup> y Concentración de NaOH al 33% (w/w)” Mel, M., Ihsan, S. I., & Setyobudi, R. H. (2015). Sin censar o referirse a otros gases como Bióxido de carbono, Oxígeno y Sulfuro de hidrógeno.

El biogás que hemos obtenido mediante el sensor de gases a identificado y también las concentraciones en 71.25% CH<sub>4</sub>; 21.75% CO<sub>2</sub>; 2.275% O<sub>2</sub> y 0.175% H<sub>2</sub>S. Entonces se obtiene una media de 5.1983 m<sup>3</sup> biogás/día en 6 repeticiones (Contador de Gas modelo GCZ BK-G4M) cuyo volumen estimado por m<sup>3</sup> de sustrato es de 1.7327 m<sup>3</sup> de biogás/día y de Biometano 3.7035 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/3m<sup>3</sup> Cosustrato3/día. O también 1.2345 m<sup>3</sup> biometano/m<sup>3</sup> sustrato<sup>3</sup>

“El biogás producido en los digestores industriales de biogás se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también pequeñas cantidades de otros gases como el sulfuro de hidrógeno”. Moestedt, J., et al (2013).

Algunos investigadores han alcanzado concentraciones mayores como “El análisis cromatográficos arrojó resultados de un 79% de metano del total de biogás producido en el sistema, lo cual indica que el sistema adecuó condiciones óptimas para llevar a cabo la digestión anaerobia en sus cuatro fases. Hidalgo, A. M. E., & Eraso, M. A. J. (2017)

Otros lograron volúmenes considerables de biogás pero concentraciones de Biometano menores como “El objetivo de este estudio fue evaluar la cantidad y calidad del biogás producido por la co-digestión de estiércol lácteo enjuagado (FDM) y aguas residuales de procesamiento de pavo (TPW). Se utilizó un digestor de crecimiento unido con un volumen de trabajo de 15 l y un espacio de cabeza de 3 l con un tiempo de retención hidráulica de 5 d usando cinco mezclas de alimentación que contenían 100, 67, 50, 33 y 0% FDM por volumen. El rendimiento de biogás varió de 0,072 a 0,8 m<sup>3</sup> [g VS-1] y el contenido de metano (calidad) del gas oscila entre 56% y 70%”. Ogejo, J. A., & Li, L. (2010).

“Se caracterizaron mezclas de residuos de mataderos de cerdos / ganado fresco, con diferentes relaciones lípido-proteína, y se evaluó su biodegradabilidad anaeróbica en ensayos discontinuos. Los potenciales demetano resultantes fueron altos (270-300kg-1COD) lo que los convierte en sustratos interesantes para el proceso de digestión anaerobia”. Palatsi, J., et al (2011).

“Un estudio de la tasa de carga orgánica (OLR) y el efecto de la concentración de NaOH en la etapa de pretratamiento de la cáscara de maíz (CH) fue llevado a cabo para mejorar la producción de biogás. La producción óptima de biogás a 67,6 mL · min<sup>-1</sup> con una concentración de metano del 63,4% se ha obtenido con la aplicación de OLR a 43,6 g de VS · L<sup>-1</sup> · d<sup>-1</sup> y Concentración de NaOH al 33% (w/w)”. Mel, M., Ihsan, S. I., & Setyobudi, R. H. (2015).

Otros estudios dan a conocer el comportamiento de las bacterias como “Este estudio evaluó los efectos de los parámetros operacionales y el tipo de sustrato sobre la abundancia de bacterias reductoras de sulfato en 25 digestores de biogás industriales usando qPCR dirigido al gen dismutasa funcional sulfito reductasa. Sin embargo, los altos niveles de amoníaco y la concentración creciente de sulfato produjeron niveles significativamente más bajos y más altos de bacterias reductoras de sulfato, respectivamente”. Moestedt, J., et al (2013).

Otros investigadores estudian diferentes efectos sobre DA y producción de biogás y concentración de Biometano; como “Las tasas máximas de producción de metano, medidas como la pendiente máxima de la curva acumulada de producción de metano, por unidad de contenido inicial de biomasa, también fueron diferentes. Si bien esta tasa aumentó en un 52,6% y 211,6% para los residuos de porcicultura después de la pasteurización y la esterilización, respectivamente, disminuyó en un 43,8% para los desechos de aves después de la pasteurización con respecto a los residuos no tratados. Rodríguez-Abalde, A., et al (2011).

La concentración de sulfuro de hidrogeno es de 0.175%  $H_2S$ ; encontrado que mayores concentraciones son peligrosas por su alta propensión corrosiva sobre los metales. “La producción de sulfuros está influenciada por diferentes factores. Dos parámetros reguladores importantes son: (i) la cantidad de aminoácidos que contienen azufre en el material entrante, (ii) el nivel de sulfato en el material entrante (Dewil et al., 2008; Rabus et al., 2006). Estos estudios se han centrado principalmente en los cambios en la producción de sulfuro de hidrógeno o en los niveles de productos de fermentación. Los parámetros que se han investigado incluyen la relación DCO: sulfato en el sustrato (Hirasawa et al., 2008; Lopes et al., 2010b), la adición de diferentes inhibidores SRB (Isa y Anderson, 2005; Nemati et al., 2001), el pH (Visser et al., 1996, Chaiprapat et al., 2011) y temperatura (Pender et al., 2004). En general, estos estudios no proporcionan una solución concluyente para optimizar la gestión de un proceso de biogás hacia menores niveles de sulfuro en el biogás. Moestedt, J., et al (2013).

Otros Investigan los “Efectos de área geográfica, materia prima, temperatura y tiempo de operación en comunidades microbianas de seis plantas de biogás a gran escala. Concluyendo que: Las diferentes materias primas y temperaturas afectaron fuertemente a

los microbios. En las plantas de Parmigiano Reggiano se destaca una población más arcaica de biodiversidad, lo que sugiere una influencia de las diferentes alimentaciones de los animales. *Methanosarcina* y *Methanosaeta* mostraron una distribución opuesta entre las plantas anaerobias, encontrándose que la primera estaba relacionada con la concentración de amonio. El género *Methanoculleus* fue más abundante en el digestor termofílico, mientras que la representación del orden de los *Thermotogales* correlacionó con el tiempo de retención hidráulica”. (Campanaro et al., 2016, Li et al., 2014). mencionados por Fontana, et al (2016).

“Respecto a la comunidad arqueológica, los methanogenes metoclásicos *Methanosarcina* y los *Methanosaeta* se consideran los géneros más predominantes en los digestores mesófilos, mientras que *Methanoculleus* y *Methanothermobacter* están más presentes en los termófilos (Campanaro et al., 2016, Li et al., 2014). AD es la conversión biológica de material orgánico en diferentes productos finales, incluido el biogás, que está constituido por metano (55-70%) y dióxido de carbono. Fontana, A., et al (2016).

**c. Evaluación energética / biogás y biometano = kWh / ml o m<sup>3</sup> sustrato en Biodigestor HPTC.**

Por lo que en nuestro caso es igual a: 12.345 kWh/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> y/o m<sup>3</sup> Cosustrato 3. Y por día: 37.035 kWh/día m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> y/o 3m<sup>3</sup> Cosustrato 3.

Si 1 m<sup>3</sup> de biometano equivale a 10 kW h (Belle *et al.* 2014); entonces podemos inferir que se obtiene en promedio 37.038 kWh/día, con el Biometano obtenido en nuestro estudio.

Tomando en consideración “Para la determinación del potencial de energía a partir del metano producido por los tratamientos, se consideró que 1 m<sup>3</sup> de metano equivale a 10 kWh, acorde a los valores utilizados por (Belle *et al.* 2014). Además, se consideró una eficiencia de transformación de energía del 33% para sistemas de producción eléctrica a partir del metano”. (Belle *et al.* 2014)

Hay diferentes maneras de estimar la energía que contiene el biogás encontrando los siguientes “Para la estimación de la energía que contiene el biogás, se empleó la información que contiene el *software* del Modelo de Biogás Mexicano v.2.0 (LMOP,

2009), empleando un poder calorífico de 18,852 kJ/m<sup>3</sup> de biogás. La eficiencia de los motores de combustión interna que se utilizan para la generación de energía eléctrica a través de biogás (Jenbacher de GE Tipo 2), con potencia eléctrica de 335 kW es de 36.3% (ISO) (General Electric, 2013. Vera-Romero et al., 2014. “Un metro cubico de biogás es energía equivalente a 4.70 kWh (Cetin and Kus, 2009; Shaw, 2011)” mencionado por Boysan, F., et al (2015).

Otros indicadores energéticos del biogás y/o biometano relacionados con la eficiencia eléctrica y poder calorífico se describen a continuación: “El volumen de CH<sub>4</sub> se calculó a partir de la energía eléctrica producida por las plantas de biogás, considerando la eficiencia eléctrica teórica igual a la unidad de cogeneración de calor y electricidad (CHP) al 38% y el poder calorífico del metano de 9,88 kWh / m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>”. Fontana, A., et al (2016).

En esta etapa, la combustión del biogás se produce fácilmente. “La llama se observó que era azul y sin humo, lo que es una característica de gas metano. No hubo tampoco deposición apreciable de hollín o tiznado en el quemador”. Okonkwo, U. C., (2016). “El biometano puede sustituir el gas natural en todos sus usos” Carnevale, E., & Lombardi, L. (2015).

El biogás puede ser utilizado como combustible para los motores de combustión interna, las turbinas de gas, las celdas de combustible, los calentadores de agua, calentadores industriales, entre otros muchos procesos. También, el biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de electricidad, donde la eficiencia de conversión global está alrededor de 10 - 16 % (Demirbas et al., 2011). Guardia-Puebla, Y., et al (2017)

## V. CONCLUSIONES

1. La DQO para el Co-sustrato 3 es de 14 322 (DQO mg/L); cuya fórmula es  $S_3TRH_6diasT_{39}^{\circ}C$  y es menor que los otros dos.
2. El más alto volumen de biogás en bacht se obtiene con la muestra  $S_3+ TRH_6 + T^{\circ}C_{39} = Sustrato3 + Tiempo de Residencia Hidráulica 6 días + Temperatura 39^{\circ}C = 507.0965ml$  de biogás por cada 500 ml de Co-sustrato.
3. Una vez escalado matemáticamente el Co-sustrato 3 escalado al Biodigestor *High Performance Temperature Controlled* - HPTC de Doble Cámara Hidrolíticas con capacidad de tres  $m^3$  y sometido a los parámetros de TRH y  $T^{\circ}C$ , obtuvo en promedio  $5.1983 m^3$  biogás/día en promedio y equivalente a  $1.7327 m^3$  biogás/ $m^3$  de sustrato3.
4. La calidad del Biogás obtenido en el biodigestor *High Performance Temperature Controlled* - HPTC en promedio es 71.25%  $CH_4$ ; 21.75%  $CO_2$ ; 2.275%  $O_2$  y 0.175%  $H_2S$ .
5. Entonces se obtiene  $3.7035 m^3$  de  $CH_4$ /día o también  $1.2345 m^3 CH_4/m^3$  de Cosustrato 3.
6. También se obtiene 27.435 ml Biometano/g MOV/día o igual a  $27.435 cm^3$  Biometano/g MOV/día. O también  $1.7327 m^3$  de biogás por  $1m^3$  de Sustrato3.
7. La energía estimada producida es igual a  $37.035 kWh/día m^3 CH_4$ .

## VI. RECOMENDACIONES

1. El Biometano obtenido y enriquecido puede servir de combustible para generar energía eléctrica (energía renovable), sustituyendo significativamente el gasto por energía del servicio público, en el Fundo La Católica de Majes.
2. Los bienes y servicios ambientales producidos evitan contaminar el medio ambiente y el efecto invernadero, con 166.02 m<sup>3</sup> en un mes y en un año 1992.24 m<sup>3</sup> de Biogás y en ellos 121.360 m<sup>3</sup> de Metano cada mes y 1456.327 m<sup>3</sup> de Biometano al año, que pueden servir como energía renovable.
3. La utilización de los insumos del co-sustrato en cantidades de 50K de estiércol bovino + 100 K de ingesta ruminal + 350 K de residuos de camal (sangre esencialmente); interdiario hacen un volumen de 750 K de estiércol + 1500 K ingesta ruminal y 5250 K de residuos de camal, al mes que serian evitados contaminantes de suelos, aguas y aire.
4. Es conveniente investigar la calidad de los efluentes producidos luego de su paso en el biodigestor (biosol = fase sólida y biol = fase líquida producidos).
5. El Biometano puede servir de combustible a un generador de energía eléctrica para los procesos productivos y equipos del Fundo La Católica reduciendo sus costos, por lo que se recomienda su estudio.
6. Es necesario caracterizar los microorganismos y bacterias que intervienen en la DA determinando la eficiencia del proceso y su comportamiento frente a sustratos, residuos y otros.
7. Es conveniente investigar los usos del pretratamiento de sustratos e insumos con fluido ruminal por su contenido en microorganismos y bacterias
8. Es recomendable investigar los beneficios económicos del Biodigestor *High Performance Temperature Controlled* - HPTC si los beneficios del digestor se basan sólo en el valor de la electricidad que se producirá o deberían considerarse otros posibles ingresos como el crédito de carbono, los créditos de energía renovable, las etiquetas verdes para la electricidad, el valor de los beneficios ambientales de la DA o los subsidios de subvenciones u otros programas de incentivos para hacer económicamente viable el sistema.

## VII. BIBLIOGRAFIA

Alpírez, G. M., Colorado, B. E. J., Espinoza, A. M. V., Ortega, M. A. C., González, C. G., & Palomar, L. T. (2017). EXPERIENCIAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA Y MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 77-90.

Banco Mundial.BM. 2001. FMAM - Fondo para el Medio Ambiente Mundial - Nuevo Sector productivo. 2001. March 2001. Banco Mundial. BM – 3398110 spanish.pdf – Adobe Reader.

Belle, A., Lansing, S., Mulbry, W., Weil, R. 2014. Anaerobic co-digestion of forage radish and dairy manure in complete mix digesters. *Bioresource Technology* 178 (2015) 230-237.

Boysan, F., Özer, Ç., Bakkalo lu, K., & Börekçi, M. T. (2015). Biogas Production from Animal Manure. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 908-911.

British Petroleum, 2016. BP Statistical Review of World Energy, June 2016. London, England.

Bustamante, C. A. G., & Cerutti, O. M. (2016). ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO.

Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of environmental management*, 161, 287-302.

Cano-Hernández, M., Bennet-Eaton, A., Silva-Guerrero, E., Robles-González, S., Sainos-Aguirre, U., & Castorena-García, H. (2016). CARACTERIZACIÓN DE BIOLES DE LA FERMENTACIÓN ANAERÓBICA DE EXCRETAS BOVINAS Y PORCINAS. *Agrociencia*, 50(4).

Carnevale, E., & Lombardi, L. (2015). Comparison of different possibilities for biogas use by Life Cycle Assessment. *Energy Procedia*, 81, 215-226.

Centro de Energías Renovables. 2013. Ficha Informativa Biogás en el Sector Agropecuario Ministerio de Energía. Gobierno de Chile.

CEPLAN 2011. Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Plan Bicentenario. 2011. El Perú hacia el 2021. DS N° 054-2011-PCM. Plan del Bicentenario. Eje Estratégico 6. Recursos Naturales y Ambiente. CambioClimático.

Del Real Olvera, Jorge; Prieto García, Francisco; Santos López, Eva Maria; Román Gutiérrez, Alma Delia y Gordillo Martínez, Alberto José. 2009. *Simulación Matemática de un Digestor Anaerobio Tipo Tanque Agitado para el Tratamiento de Vertidos Residuales*. Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (1) 33-41, 2009. México.

FAO - Food and Agriculture Organization. 2011. Manual de Biogás, Santiago, Chile, 118p.

FNR. 2010. Guía sobre el Biogás. 2010. Desde la producción hasta el uso. Publicado por FachagenturNachwachsendeRohstoffe e. V. (FNR) con el apoyo del Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor en base a una decisión del Parlamento de la República Federal Alemana. Editorial: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Quinta edición completamente revisada, Gülzow, 2010.

FNR 2012. FachagenturNachwachsendeRohstoffee.V. (FNR). 2012. Bioenergy in Germany: Facts and Figures January 2012. Solid fuels Biofuels Biogás. www.fnr.de. OT Gülzow · Hofplatz 1· 18276 Gülzow-Prüzen · Germany.

Fontana, A., Patrone, V., Puglisi, E., Morelli, L., Bassi, D., Garuti, M., ...& Cappa, F. (2016). Effects of geographic area, feedstock, temperature, and operating time on microbial communities of six full-scale biogas plants. *Bioresource technology*, 218, 980-990.

Francisco, P. (2015). Carta Encíclica Laudato Si': Sobre el cuidado de la casa común. Vaticano: Tipografía Vaticana.

Gamio, Pedro / García, Henry. 2011. Energías Renovables en el Planeamiento Estratégico del Mediano y Largo Plazo. Documentos de Trabajo # 10. CEPLAN. © Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Primera edición: diciembre de 2011. Correo electrónico: [planperu@ceplan.gob.pe](mailto:planperu@ceplan.gob.pe) Dirección URL: [www.ceplan.gob.pe](http://www.ceplan.gob.pe)

García, O. D. V., Reyes, I. P., & Galindo, D. G. 2015. Variación del rendimiento de metano y rediseño de la alternativa mesofílica para la planta de biogás en la EPG “Camilo Cienfuegos”. Recibido 28 de septiembre/2015. - Aceptado 27 de noviembre/2015 Publicado como artículo científico. Revista Ingeniería Química y Desarrollo 2015 Vol.1 N°2 Julio – Diciembre 2015 pp. 41 – 48. ISSN 1390 – 9428.

Guardia-Puebla, Y., Rodríguez-Ponce, Y., & Benítez-Quintero, O. (2017). Diseño de un biodigestor anaerobio para el tratamiento de los residuales sólidos del procesamiento cárnico (original). *Revista Granmense de Desarrollo Local*, 1(2), 174-186.

H. Campaña, P. Benedetti, A. Airasca, S. Fiotto. 2011. *Determinación del Tiempo de Retención en un Reactor Anaeróbico para Optimizar la Generación de Biogás a partir de la Digestión de Barros Activados Residuales. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.*

Herrmann, C., Idler, C., & Heiermann, M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource technology*, 206, 23-35.

Hidalgo, A. M. E., & Erasmo, M. A. J. (2017). Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia). *Revista UNIMAR*, 34(1).

Huguen, P., & Le Saux, G. (2010). Perspectives for a European standard on biomethane: a Biogasmax proposal. *European Biogasmax project*. <http://www.>

*biogasmx.eu/media/d3\_8\_new\_lmcu\_bgx\_eu\_standard\_14dec10\_vf\_\_077238500\_0948\_26012011.pdf (accessed 10 October 2014).*

Iván Vera-Romero, José Martínez-Reyes, Melitón Estrada-Jaramillo, Agustina Ortiz-Soriano. Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV (03) (2014), pp. 429-436

Iván, V. R., José, M. R., Melitón, E. J., & Agustina, O. S. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(3), 429-436.

Kepler. 2014. Planta Experimental de Biogás de Altas Prestaciones. SNOWLEOPARD, KEPLER, Responsabilidad, Ciencia y Tecnología al Servicio de la Sostenibilidad. 2014. KUVIER, ECOATIA, SEQUO, BMZ, IIDS, UCSM. Separata.

Labandeira et al, 2007. *Economía Ambiental*, Ed. Pearson educación, S. A. México.

Leff Z., Enrique. 2007. Prologo. *Las Ciencias Ambientales: Una Nueva Área del Conocimiento – Red Colombiana de Formación Ambiental*. Red de Formación Ambiental para América Latina y El Caribe. PNUMA. © RCFA. Compilador: Orlando Sáenz.

Leff, Enrique. 2007b. *Saber Ambiental. Sustentabilidad Racionalidad Complejidad Poder*. Libro electrónico. Siglo XXI Editores. Buenos Aires.

Ma, G., Neibergs, J. S., Harrison, J. H., & Whitefield, E. M. (2017). Nutrient contributions and biogas potential of co-digestion of feedstocks and dairy manure. *Waste Management*, 64, 88-95.

Mel, M., Ihsan, S. I., & Setyobudi, R. H. (2015). Process improvement of biogas production from anaerobic co-digestion of cow dung and corn husk. *Procedia Chemistry*, 14, 91-100.

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.(2011). *Manual de biogás*. ISBN 978-95-306892-0.

Moestedt, J., Nordell, E., Yekta, S. S., Lundgren, J., Marti, M., Sundberg, C., ...& Björn, A. (2016). Effects of trace element addition on process stability during anaerobic co-digestion of OFMSW and slaughterhouse waste. *Waste Management*, 47, 11-20.

Moestedt, J., Pålédal, S. N., & Schnürer, A. (2013). The effect of substrate and operational parameters on the abundance of sulphate-reducing bacteria in industrial anaerobic biogas digesters. *Bioresource technology*, 132, 327-332

Moreda, I. L. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1580-1591.

Navarro, S. L. B., Lanuza, D. S. Z., Ramírez, J. C. A., & Calero, J. A. Z. (2014). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE SUERO LÁCTEO A ESCALA DE LABORATORIO. *Revista El Higo*, 4, 29-35.

Okonkwo, U. C., Onokpite, E., & Onokwai, A. O. (2016). Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.

Ogejo, J. A., & Li, L. (2010). Enhancing biomethane production from flush dairy manure with turkey processing wastewater. *Applied Energy*, 87(10), 3171-3177.

Palatsi, J., Viñas, M., Guivernau, M., Fernandez, B., & Flotats, X. (2011). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: main process limitations and microbial community interactions. *Bioresource Technology*, 102(3), 2219-2227.

Plaza, F. S. (2010). Biometanización de estiércol. *La Técnica*, (3), 34-35.

Rodríguez-Abalde, A., Fernández, B., Silvestre, G., & Flotats, X. (2011). Effects of thermal pre-treatments on solid slaughterhouse waste methane potential. *Waste management*, 31(7), 1488-1493.

Rodríguez-Monroy, C., Mármol-Acitores, G., & Nilsson-Cifuentes, G. (2018). Electricity generation in Chile using non-conventional renewable energy sources—A focus on biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 937-945.

Roehe, R., Dewhurst, R. J., Duthie, C. A., Rooke, J. A., McKain, N., Ross, D. W., ... & Wallace, R. J. (2016). Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance. *PLoS genetics*, *12*(2), e1005846.

Soler, S., Johanna, K., & Morales Galindo, A. J. (2017). El mercado de carbono bajo el protocolo de Kioto en Colombia.

Wall, D. M., Straccialini, B., Allen, E., Nolan, P., Herrmann, C., O'Kiely, P., & Murphy, J. D. (2015). Investigation of effect of particle size and rumen fluid addition on specific methane yields of high lignocellulose grass silage. *Bioresource technology*, *192*, 266-271.

Ware, A., & Power, N. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, *97*, 541-549.

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, *85*(4), 849-860.

Zhang, H., Zhang, P., Ye, J., Wu, Y., Fang, W., Gou, X., & Zeng, G. (2016). Improvement of methane production from rice straw with rumen fluid pretreatment: A feasibility study. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *113*, 9-16.

## ANEXO N°01 PROYECTO DE TESIS



# Universidad Católica Santa María

## Escuela de Postgrado

### Doctorado en Ciencias Ambientales



**ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS EN UNA PLANTA TIPO *HIGH PERFORMANCE TEMPERATURE CONTROLLED - HPTC* DE DOBLE CÁMARA HIDROLÍTICA A PARTIR DE DESECHOS DE CAMAL Y ESTIÉRCOL DE VACUNOS EN EL FUNDO LA CATÓLICA DE MAJES – AREQUIPA 2016**

Proyecto de Tesis presentada por el Magister:

**Ponce Mallea Marco Adrián**

para optar el Grado Académico de

**Doctor en Ciencias Ambientales.**

Asesor:

**Professor Ponce Soto. Luis Alberto Ph.D.**

**Arequipa – Perú**

**2016**

## “Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”

### 3. Preámbulo.

En relación al deterioro, contaminación ambiental y al cuidado ambiental se dice que **«El cambio climático es un problema global con graves dimensiones ambientales, sociales, económicas, distributivas y políticas, y plantea uno de los principales desafíos actuales para la humanidad»**. Si **«el clima es un bien común, de todos y para todos»** **«el ambiente es un bien colectivo, patrimonio de toda la humanidad y responsabilidad de todos»**<sup>25</sup>.

“La problemática ambiental, como síntoma de la crisis de civilización de la modernidad, **plantea la necesidad de generar una conciencia sobre sus causas y sus vías de resolución**”<sup>26</sup>. Así como los estudios demográficos actuales muestran como significativo **“El crecimiento acelerado de la población en los países menos industrializados, y ello se traduce en una mayor presión sobre los recursos ...”**<sup>27</sup>.

“Cuando nos referimos a la **gestión de la calidad del ambiente**, contaminantes del aire, agua, suelos y **la disposición inadecuada de residuos sólidos y otros se han ido incrementando**, con la utilización de combustibles fósiles y con ellos los Gases de Efecto Invernadero– GEI”<sup>28</sup>.

Y tenemos que sumarle otros eventos como en la actualidad se manifiestan diversos problemas de orden mundial “como **el cambio climático global, la pérdida de biodiversidad, la reducción de la capa de ozono, la deforestación y desertificación de grandes áreas**, entre otros. Al mismo tiempo se expresa a nivel local, como sucede en los centros urbanos y pequeños poblados con la contaminación del aire, del agua y del suelo, la degradación de ecosistemas estratégicos, la pérdida de recursos naturales, los desastres de origen no antrópico y en general, **el deterioro de las condiciones de vida de la población determinadas por su medio biofísico inmediato**”<sup>28</sup>.

---

<sup>25</sup>Francisco, P. (2015). Carta Encíclica Laudato Si': Sobre el cuidado de la casa común. Vaticano: Tipografía Vaticana.

<sup>26</sup> Leff, Enrique. 2007b. Saber Ambiental. Sustentabilidad Racionalidad Complejidad Poder. Libro electrónico. Siglo XXI Editores. Buenos Aires.

<sup>27</sup> Labandeira et al, 2007. Economía Ambiental, Ed. Pearson educación, S. A. México.

<sup>28</sup>Leff Z., Enrique. 2007. Prologo. Las Ciencias Ambientales: Una Nueva Área del Conocimiento – Red Colombiana de Formación Ambiental. Red de Formación Ambiental para América Latina y El Caribe. PNUMA. © RCFA. Compilador: Orlando Sáenz.

Por ejemplo, como dicen los expertos del CEPLAN, 2011<sup>29</sup> los efectos de los gases contaminantes se dejan sentir en el **aumento del número de infecciones respiratorias agudas, particularmente en niños menores de 5 años**, grupo de

población en el que se ha registrado en el Perú, más de 3,7 millones de casos en 2007. Sin embargo, frente a esta realidad es importante también considerar la **opción de utilizar cada vez más, los llamados biocombustibles**, siempre que se desarrollen de manera que no provoquen un cambio de uso de la tierra, ni demande agua de riego necesaria para garantizar la seguridad alimentaria del país.

Estos biocombustibles **luego de un proceso biológico utilizarán como materia prima desperdicios, rastrojos y/o desechos agroindustriales y forestales**<sup>30</sup> (Kirchmayr & Coautores, 2007) mencionado por Jiménez, D. 2007. los cuales suponen abaratar costos y lograr incrementar eficiencias en la generación energética no contaminante y limpia.

La **energía renovable también ofrece buenas perspectivas** como complemento de las redes eléctricas en los países en desarrollo, pues les permite reducir las consecuencias para el medio ambiente y la dependencia de fuentes de energía del exterior<sup>31</sup>.

En ambos casos, <sup>32</sup>**las fuentes renovables suministran** energía no contaminante que protege el medio ambiente local, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, y brinda importantes beneficios sociales y económicos.

**Bioenergía es el término que define los sistemas de generación de energía a partir de biomasa.** Y esta representa una **fuentes de energía renovable**, siendo las más importantes y **adecuadas las de origen agropecuario y forestal**: residuos agrícolas, paja, orujos, podas de frutales, residuos forestales, restos de las industrias de la madera, astillas, aserrín y cultivos energéticos: cardo, girasol, paulonia, residuos del beneficio de animales, o ingesta, sangre, estiércol de bovinos, porcinos, gallinaza, entre otras materias, llamados también sustratos.

El uso en mayor escala de los **biocombustibles sólidos y líquidos y el desarrollo de la energía eólica, geotérmica y solar, entre otras, pueden diversificar nuestra matriz energética** de manera tal que garantice la sostenibilidad del suministro de energía a nivel nacional.

---

29 **CEPLAN** 2011. Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Plan Bicentenario. 2011. El Perú hacia el 2021. DS N° 054-2011-PCM. Plan del Bicentenario. Eje Estratégico 6. Recursos Naturales y Ambiente. Cambio Climático.

30 **Jiménez, Diego**. 2012. "Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio Tipo Continuo". Tesis Maestro en Ingeniería Energética. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Maestría en Ingeniería Energética. Universidad Veracruzana. México. Xalapa, Veracruz. Noviembre de 2012. 66pp.

31 **(FAO)**. 2011. Manual de Biogás, Santiago, Chile, 118p.

32 **Banco Mundial. BM**. 2001. FMAM - Fondo para el Medio Ambiente Mundial - Nuevo Sector productivo. 2001. March 2001. Banco Mundial. BM – 3398110 spanish.pdf – Adobe Reader.

Como el nombre lo indica, <sup>33</sup>**el biogás se produce en un proceso biológico**; en ausencia de oxígeno (anaeróbico significa sin oxígeno), **la materia orgánica se descompone formando una mezcla de gases conocida como biogás**. Ese proceso se encuentra ampliamente en la naturaleza y ocurre, por ejemplo, en los

**páramos o en el fondo de los lagos, en pozos de lodo líquido y en el rumen de los rumiantes.** La materia orgánica se convierte casi enteramente en biogás gracias a la acción de una gama de distintos microorganismos. También **se genera energía (calor y nueva biomasa).**

En esta perspectiva <sup>34</sup>**muchos son los factores y/o parámetros que lo permitirán entre ellas variables como el porcentaje de sólidos totales, la tasa de carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica, el grado de degradación y la tasa de producción de biogás estarán por lo tanto, determinados por la magnitud de la planta y el sustrato elegido;** los cuales pueden optimizarse utilizando equipos (biodigestores) y sustratos diferentes y propios de la región, incrementando su eficiencia y beneficio.

La presente investigación permitirá la **Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos** en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa.

De ese modo se contribuirá con la gestión del medio ambiente y más aun con el mandato imperativo de la Constitución Política del Perú estableciendo que la defensa de la persona humana y el respeto de su dignidad son el fin supremo de la sociedad y el Estado. <sup>35</sup>“Del mismo modo, toda persona tiene derecho a la paz y la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”.

---

<sup>33</sup>**FNR 2012.** Fachagentur Nachwachsen de Rohstoffe e.V. (FNR). 2012. Bioenergy in Germany: Facts and Figures January 2012. Solid fuels Biofuels Biogás. [www.fnr.de](http://www.fnr.de). OT Gülzow · Hofplatz 1· 18276 Gülzow-Prüzen · Germany.

<sup>34</sup>**FNR. 2010.** Guía sobre el Biogás. 2010. Desde la producción hasta el uso. Publicado por Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) con el apoyo del Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor en base a una decisión del Parlamento de la República Federal Alemana. Editorial: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Quinta edición completamente revisada, Gülzow, 2010.

<sup>35</sup>**Gamio, Pedro / García, Henry. 2011.** Energías Renovables en el Planeamiento Estratégico del Mediano y Largo Plazo. Documentos de Trabajo # 10. CEPLAN. © Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Primera edición: diciembre de 2011. Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º: 2011-15765. ISBN: 978-612-46106-7-7. Imprenta: Ramos Martel y Asociados S.A.C. Tiraje: 2 000 ejemplares. Diseño de carátula e interiores: Alberto Contreras Martínez. Correo electrónico: [planperu@ceplan.gob.pe](mailto:planperu@ceplan.gob.pe) Dirección URL: [www.ceplan.gob.pe](http://www.ceplan.gob.pe)

## II.- Planteamiento Teórico

### 1.- Problema de investigación

#### 1.1. Enunciado del problema

“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”

#### 1.2. Descripción del problema

Los residuos orgánicos procedentes de las cosechas agrícolas como “rastrojos”, “pajas” y/o “jipis” **son amontonados, secados al sol y finalmente quemados en grandes piras, por los agricultores a menudo; generando inmensas cantidades de gases de efecto invernadero – GEI;** los residuos orgánicos secundarios, que también se generan paralelamente en el campo, por los animales como el estiércol, purines y los desechos de camales, conforman la biomasa que **se puede usar convenientemente en codigestión (digestión simultánea de dos o más sustratos) para obtener biogás o combustible y/o generar energía renovable.** Disminuyendo el uso de combustibles fósiles y el consiguiente daño al ambiente y las consecuencias que de ellos se deriven (Cambio climático).

Los **parámetros para su generación en reactores anaerobios o biodigestores dependen del tipo de sustratos que se utilicen** y de múltiples consideraciones relacionados con estos últimos como el tiempo de residencia hidráulica, temperatura del proceso, composición bioquímica de los sustratos, cantidades de materia orgánica volátil entre las principales. **El estudio del mejor uso de los sustratos o las alternativas de uso, como la utilización mejor de los reactores mejorando sus parámetros para obtener la mayor cantidad de metano como combustible,** permitirá disminuir su volumen en el ambiente y sus consecuencias para la humanidad.

Ahora bien, existe la posibilidad de utilizar los residuos orgánicos e inorgánicos en la **generación de biogás.** En esta inteligencia, y contribuyendo a la gestión de la calidad del ambiente; tomamos la iniciativa de **investigar y revisar** parte de la información interminable en materia de las llamadas **energías renovables, y en ellas el biogás generado a partir de la biomasa** como una alternativa de bajo costo y significativa eficiencia como combustible renovable; (Red Mexicana de Bioenergía.2012).

### 1.2.1 Área de Conocimiento.

Área Principal: Ciencias Ambientales.  
 Área Específica: Energías Renovables.  
 Campo: Biocombustibles  
 Línea: Biogás.

### 1.2.2 Operacionalización y Análisis de Variables.

VARIABLES DE ESTUDIO	PARAMETROS	INDICADORES
<b>V. INDEPENDIENTE</b>	<b>Por cada repetición:</b>	
<b>SUSTRATOS:</b>	<b>Sn+TRHn+T°n</b>	Nitrógeno, amoniaco,
S-1	Tiempo de residencia hidráulica	
S-2	Temperatura	
S-3	Composición Bioquímica del sustrato.	% Lignina, % Carbohidratos,
	Sólidos totales.	% Proteína y
	Materia Orgánica Volátil.	% Grasas
	Tamaño partículas.	
	Nivel de Ph	Conductibilidad
	DBQ.	
	DQO.	
<b>V. DEPENDIENTE</b>		
<b>Producción de Biogás</b>	Cantidad de Biogás/sustrato	
	Biogás por unidad / sustrato	
	Biogás por unidad MOV	
	Evaluación energética / biogás	CH <sub>4</sub> ; CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O y H <sub>2</sub> S
	Calidad de biogás	
	CH <sub>4</sub> por unidad MOV	

S1 – Co-sustratos mezcla 1: Estiércol de vacuno (80%)  
 Ingesta de vacuno (20%)  
 Desperdicios de camal (00%)

S2 – Co-sustratos mezcla 2: Estiércol de vacuno (20%)  
 Ingesta de vacuno (30%)  
 Desperdicios de camal (50%)

S3 – Co-sustratos mezcla 3: Estiércol de vacuno (10%)  
 Ingesta de vacuno (20%)  
 Desperdicios de camal (70%)

### 1.2.3 Interrogantes básicas.

¿Cuál es el sustrato que ofrece mejores perspectivas para la generación de biogás / metano?

¿Cuál es el volumen de producción de biogás / metano por unidad de sustrato?

¿Cuál es la calidad del biogás por unidad de sustrato?

¿Cuál es el potencial energético por unidad de sustrato?

¿Cuáles el tiempo de residencia hidráulica y la temperatura, más adecuada por cada sustrato?

¿Cuáles son los parámetros óptimos para la producción de biogás / metano?

### 1.2.4 Tipo y Nivel de Investigación.

Tipo: Experimental, prospectivo, longitudinal y analítico.

Nivel: Predictivo y aplicativo.

### 1.3. Justificación del Problema

El análisis y evaluación de parámetros para la generación de biogás con el uso de co-sustratos como estiércol de vacunos y desechos de camal (ingesta, sangre y residuos); que tienen diferentes estructuras bioquímicas en su conformación; **respondiendo de diferente modo a los parámetros como el tiempo de residencia hidráulica y la temperatura, cuando son sometidos a hidrólisis y sucesivamente para obtener el mayor volumen y calidad de biogás.** Estando 27 repeticiones diferentes a probarse por los tratamientos a recibir, buscando cuál de ellos genera el mayor porcentaje de CH<sub>4</sub> y de esta manera incrementar su potencial energético, como biocombustibles y/o energías renovables.

El uso masivo de reactores (biodigestores), y la composición y proporción de co-sustratos, sometidos a diferentes parámetros como los tiempos de residencia hidráulica, temperatura y otros como los sólidos totales y la materia orgánica volátil **permitirán incrementar este beneficio que se traslada a un beneficio de tipo ambiental porque evitara las emanaciones de CH<sub>4</sub> a la atmosfera en su proceso de descomposición y sus consecuencias del efecto invernadero que afectan a la población y sociedad y lo que es peor las pérdidas económicas que se generan (cambio climático mundial).**

Como mencionan Gamio P. yGarcía H. 2011; lo central de la propuesta es mantener una economía próspera y sostenible, diversificando la matriz energética y construyendo capacidades, con una amplia gama de tecnologías energéticas limpias y eficientes, de baja emisión de carbono renovables.

## 2. Marco Conceptual.

### 2.1 Energías Alternativas y/o Renovables

Como anteriormente se ha mencionado, se consideran energías renovables la energía hidráulica, eólica, solar y biomasa. **La energía hidráulica** es el aprovechamiento de la energía potencial y cinética del agua, que mediante máquinas se transforma en energía mecánica para ser utilizada en otro dispositivo. **La energía solar** es la energía radiante emitida por el sol, la cual la captamos por medio de concentradores solares y paneles fotovoltaicos, para poderla aprovechar en sistemas térmicos o eléctricos. **La energía eólica** es el aprovechamiento de la energía cinética del viento, ocasionado por la diferencia de temperatura en la atmósfera. Se ha aprovechado para navegación, bombeo, molienda y electricidad (Pongutá Hurtado, J.J.; 2005).

Las **energías renovables**, son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables. El sol está en el origen de la mayoría de ellas porque su energía provoca en la Tierra las diferencias de presión que generan los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua que da origen a la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en dos formas térmica y fotovoltaica, como lo publica el Fondo Nacional del Ambiente Perú 2014, disponible en: <http://www.fonamperu.org>

Para el caso de **la biomasa**, se pueden considerar la leña, los residuos agrícolas y animales, carbón vegetal y otros combustibles derivados de fuentes biológicas; a partir de ésta se puede producir biocombustibles como: biodiesel, bioetanol y biogás (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, & ECOFYS, 2005).

**El biodiesel** se produce a partir de la transesterificación de los ácidos grasos de los aceites vegetales. **Se estima que con una tonelada de este bioenergético** se evitaría tener que producir 2.5 Ton de anhídrido carbónico, ya que éste se puede obtener a partir de cultivos oleaginosos, de grasas animales y de aceites vegetales, incluso reciclados (Fernandez-Linare, Luis Carlos y otros. 2012). Dentro de los cultivos oleaginosos se encuentran: la canola, el girasol, Jatropha, palma, semilla de colza, semilla de *Moringa oleífera* y la soya, principalmente.

**El bioetanol** se obtiene por la fermentación de los carbohidratos presentes en los granos y plantas vegetales; estos carbohidratos se pueden encontrar en forma de sacarosa, almidón, celulosa y hemicelulosa. **El bioetanol** se produce a partir de residuos agroindustriales o de cultivos de maíz, caña de azúcar, cebada, trigo, centeno, sorgo, papa, yuca, algarrobo negro, eucalipto, pino, pastos, álamo, etc.

**Biogás** es un producto gaseoso de la fermentación que **consiste principalmente de metano y dióxido de carbono** y el cual también puede contener, **dependiendo del sustrato**; amoníaco, sulfuro de hidrógeno, vapor de agua y otros componentes gaseosos o evaporables. (Banco Mundial. 2001). Otros investigadores como Jiménez, D. 2012; indican que “El biogás es una mezcla de gases, tales como: metano (CH<sub>4</sub>), anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), agua (H<sub>2</sub>O), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), oxígeno (O<sub>2</sub>), mercaptanos, ácidos orgánicos, sulfuros orgánicos, aminas, aldehídos y acetonas”.

## 2.2 Sustratos y/o Materia Prima para Producir Biogás - biometano

El término '**biomasa**' se refiere a materia de origen orgánico que se puede utilizar para suministrar energía. La biomasa **incluye la fitomasa y la zoomasa** (plantas y animales, respectivamente) que viven en la naturaleza y los productos residuales que generan (por ejemplo, excremento). Otra materia y desperdicios orgánicos residuales, como la paja y los residuos de los camales, también se clasifican como biomasa. (FNR. 2012).

Como materia prima, para producir biogás, se puede considerar la gallinaza, el estiércol de vaca y de puerco; aunque hoy en día se le puede adicionar sustratos como: desechos vegetales, sub-productos del ensilaje de maíz y de pasto. Massi, 2012; menciona que la materia prima debe contener una alta carga orgánica, como por ejemplo: aguas residuales de la industria alimentaria, residuos agrícolas, de algas y de los rastrojos, la fracción orgánica de los RSM's, biomasa de agua dulce, mala hierbas, etc. Como los de la **Figura 1** y expuestos por Green Watt.



Fuente: Green Watt.

**Figura 1.** Algunos sustratos estudiados por Green Watt.

Se consideran fuentes de bioenergía los cultivos energéticos, residuos post-cosecha, subproductos y desechos orgánicos; y éstos se pueden transformar en **biocombustibles** en estado sólido, **líquido o gaseoso** (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, & ECOFYS, 2005).

Hoy en día, se está estudiando el **rendimiento de las mezclas de co-substratos con estiércol**, como, por ejemplo: **con digestores de 9.5 L, que la co-digestión de switchgrass (20 %) y de estiércol (80 %) se incrementó un 86 % en la producción de metano**, comparado con digestores que solamente fueron alimentados con estiércol y bajo las mismas condiciones de operación (Frigon & Coautores, 2012).

Estos sistemas de codigestión se han incrementado debido a que los residuos de la industria alimentaria es por temporadas y el proceso de biodigestión necesita una alimentación continua y homogénea (Massi, 2012). El **Cuadro 1** muestra la **composición y rendimiento de biogás de algunas materias primas**.

**Cuadro 1.** Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas.

Materia Prima	Materia Seca (%)	Materia Orgánica (% de MS)	Rendimiento de Biogás (m <sup>3</sup> /Ton MOS)	Rendimiento Biogás (m <sup>3</sup> /Ton Húmeda)
Cultivos energéticos (c)	-	-	550 a 750	-
Desechos agroindustriales (b)	-	-	400 a 800	-
Estiércol de vaca	7 a 15	65 a 85	200 a 400	9 a 51
Estiércol de puerco	3 a 13	65 a 85	350 a 550	7 a 61
Fracción orgánica de los RSM's	-	-	400 a 600	-
Gallinaza	10 a 20	70 a 80	350 a 550	24 a 88
Lodos de las aguas residuales	-	-	250 a 350	-
Residuos de cultivos	-	-	300 a 400	-
Residuos del procesamiento de la carne	-	-	550 a 1,110	-
Desechos vegetales (a)	10 a 20	65 a 85	400 a 700	25 a 120
Ensilaje de maíz (a)	15 a 40	75 a 95	500 a 900	55 a 340
Ensilaje de pasto (a)	8 a 50	70 a 90	600 a 1,300	30 a 585

(a) Puede variar de acuerdo al lugar, tratamiento, proceso y almacenaje

(b) Como aguas residuales de la industria láctea y de la molinera de los aceites, residuos de la cerveza y de destilerías

(c) Como maíz, sorgo, etc.

Fuente: Massi, 2012 y Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, & ECOFYS, 2005

Como se verá, **los residuos del procesamiento de la carne tienen mayor contenido de carga orgánica en cuanto a materia prima; y como aditivo del proceso de biodigestión es el ensilaje de pasto**.

Una de las ventajas de tratar el estiércol, ya sea adicionando sustrato o no, es que se reduce el tiempo de diezmado de las bacterias patógenas.

En el **Cuadro 2**, se observa un resumen de las características de los sustratos agroindustriales más habituales. Estas materias primas pueden ser estiércol de otros animales, residuos de producción agrícola o ganadera, plantas locales, frutos, etc. (Martí, H. J. 2008); similares a los que se encuentran en el Fundo La Católica de Majes.

**Cuadro 2.** Resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más habituales.

Residuo	ST (%)	SV (% ST)	C:N	Producción de biogás (m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> de SV)	Tiempo de Retención (días)	CH <sub>4</sub> (%)	Sustancias NO deseables	Sustancias Inhibidoras	Problemas Frecuentes
Purín de cerdo	3-8	70-80	3-10	0,25-0,50	20-40	70-80	Virutas de madera, arena, cerdas, cuerdas	Antibióticos, desinfectantes	Espumas, sedimentos
Estiércol	5-12	75-85	6-20	0,20-0,30	20-30	55-75	Cerdas, tierra, paja, madera	Antibióticos, desinfectantes	Espumas
Gallinaza	10-30	70-80	3-10	0,35-0,60	> 30	60-80	Piedras, arena, plumas	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Antibióticos, desinfectantes	Inhibición por NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> y espumas
Residuos de frutas	15-20	75	35	0,25-0,50	8-20	ND	Partes poco biodegradables	AGV, Pesticidas	Acidificación
Restos de alimentos	10	80	8-10	0,50-0,60	10-20	70-80	Huesos, metales, plásticos	AGV, desinfectantes	Acidificación, sedimentos mecánicos
Vinazas	1-5	80-95	4-10	0,35-0,55	3-10	55-75	Partes poco biodegradables	AGV	Acidificación
Paja	70	90	90	0,35-0,45	10-50	ND	arena	---	Espumas, biodegradabilidad

Fuente: (Martí, H. J. 2008) Adaptación de Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. (1998). Feedstocks for Anaerobic Digestion.

Disponible en [www.magrama.gob.es/.../docbiogasversion21-09-2010\\_tcm7-5925.pdf](http://www.magrama.gob.es/.../docbiogasversion21-09-2010_tcm7-5925.pdf)

El potencial de biogás a partir de las excretas de diferentes tipo de especies animales se muestran en el **Cuadro 3**; todos los valores que se indica son aproximados y deben ser tomados sólo como indicativos para un primer cálculo. Han sido obtenidos empíricamente en instalaciones realizadas.

**Cuadro 3.** Excretas de diferentes tipos de especies animales y su potencial.

Origen	kg de excreta por día/ animal	biogás /día m <sup>3</sup>
Vacas	15	0,60
Terneros	4	0,16
Caballos	15	0,60
Niños	0,20	0,014
Adultos	0,40	0,028
Carneros	2,0	0,10
Cerdos	1,5	0,10
Gallinas	0,15	0,009

Fuente: Danner W. y Kilian D. 2012

**Asi tenemos a Kepler 2014, encuentra que el mejor potencial de biogás lo tiene el sustrato grasa de freidora con 36.800 Nm<sup>3</sup>/año y luego el pan viejo con 29.503 Nm<sup>3</sup>/año y el ultimo la gallinaza; como se muestran en los Cuadros 4 y 5.**

**Cuadro 4.** Potencial de producción de biogás de algunos sustratos.

Sustrato	Consumo de sustrato por carga [kg/carga]	Consumo de sustrato anual [t/año]	Fertilizante líquido [m <sup>3</sup> /año]	Biogás [Nm <sup>3</sup> /año]	Metano [Nm <sup>3</sup> /año]	Equivalente de gasoleo [l/año]
Grasa de freidora	253	42	2	36.800	25.024	23.215
Pan Viejo	369	62	22	29.503	15.636	14.506
Rechazo de patata	800	133	93	27.007	13.913	12.907
Restos de comida	800	133	93	25.840	15.504	14.383
Cáscara de café	253	42	2	25.480	15.288	14.183
Ensilado de maíz	727	121	81	24.115	12.672	11.756
Harina de sangre	267	44	4	20.006	14.208	13.181
Ensilado de hierba	686	114	74	19.677	10.630	9.862
Estiércol de oveja	800	133	93	14.546	8.000	7.422
Vínazas	387	65	25	14.220	8.532	7.915
Restos vegetales	1.600	267	227	13.380	8.300	7.700
Estiércol de cerdo	960	160	120	12.907	7.744	7.184
Restos de pescado	2.400	400	360	12.600	6.944	6.442
Paja de trigo	267	44	4	9.274	5.115	4.745
Gallinaza	923	154	114	7.344	4.406	4.088

\*) Valores KTBL; 1 carga cada 2 días; MS: Materia Seca; Mso: Materia Seca orgánica

Fuente: Fuente: Kepler, 2014.

**Gracias a la batch-hidrólisis se puede cambiar de sustrato sin ningún problema de un día para otro.** De esta manera, los sustratos pueden ser suministrados fácilmente uno detrás del otro. También puede ser utilizada una determinada proporción de materia en mal estado con facilidad, sin poner en peligro la biología de fermentación. Las temperaturas termófilas en la batch-hidrólisis aseguran la destrucción de las robustas semillas de las malas hierbas como la acedera y armuelles. *Danner Walter. David Kilian. 2012*

**Cuadro 5.** Cogeneración electricidad calor - Contenido de nutrientes en el digerido.

Cogeneración electricidad calor				Contenido de nutrientes en el digerido		
Producción térmica [kWh/año]	Producción eléctrica [kWh/año]	Potencia eléctrica [kW <sub>e</sub> ]	Potencia térmica [kW <sub>th</sub> ]	N/a [kg/a]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [kg/a]	K <sub>2</sub> O [kg/a]
112.158	99.696	16,6	18,7	-	-	-
70.082	62.295	10,4	11,7	708	129	529
62.357	55.429	9,2	10,4	467	173	800
69.489	61.768	10,3	11,6	-	-	-
68.521	60.907	10,2	11,4	-	-	-
56.796	50.485	8,4	9,5	-	-	-
63.880	56.805	9,4	10,8	4.222	133	-
47.645	42.352	7,1	7,9	-	-	-
35.856	31.872	5,3	6,0	1.000	400	1.800
38.240	33.991	5,7	6,4	2.000	65	3.290
37.201	33.067	5,5	6,2	-	-	-
34.709	30.852	5,1	5,8	1.072	384	816
31.123	27.665	4,6	5,2	-	-	-
22.926	20.379	3,4	3,8	289	267	2.222
19.749	17.555	2,9	3,3	3.292	666	1.072

Fuente: Kepler, 2014.

Entre estos tipos de materias primas agroindustriales merece mencionar por su potencial en la producción de biogás las siguientes:

**De origen animal:** estiércoles, purines, gallinaza. De origen vegetal: hierba, hoja de remolacha, paja, trigo, cultivos energéticos (con una elevada producción de biogás). **De la Industria Alimentaria de origen vegetal:** bagazo de la industria cervecera o deshechos hortícolas. Otros residuos de la Cadena alimentaria: residuos y aceites de gastronomía. **De la Industria Alimentaria de origen animal:** subproductos de origen animal no destinados al consumo humano (**SANDACH**) (Fernández, G., Lago, N., & Prieto, A. 2010).

En los **Cuadros 4 y 5** se recogen un resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más representativos, aunque conviene destacar que únicamente deben utilizarse como referencia general pues la variabilidad de los mismos es muy acusada. **Por tanto, a la hora de efectuar un estudio real para la construcción de una planta de biogás, es imprescindible hacer previamente una valoración precisa de los subproductos que se van utilizar en el proceso de biodigestión.**

### 2.3 Caracterización de los sustratos

Los principales parámetros que deberán evaluarse para la caracterización de las materias primas agroindustriales utilizables en las plantas de biogás son los siguientes:

**Sólidos totales (ST):** porcentaje de sólidos que forman la materia fresca.

**Sólidos Volátiles (SV):** porcentaje de sólidos totales (ST) que se volatilizan mediante calcinación a 550°C. Representa la medida de la materia orgánica que se transforma en biogás mediante la digestión anaerobia mesófila o termófila de los compuestos orgánicos. La producción de biogás de un sustrato suele referirse a los sólidos volátiles, y una manera de expresar la biodegradabilidad es como porcentaje de sólidos volátiles eliminados.

**Nutrientes:** una adecuada proporción de nutrientes en las materias primas tiene un efecto fundamental sobre la producción de biogás, la formación de la biomasa microbiana, la concentración de enzimas y coenzimas necesarias en el proceso y la creación de las denominadas sustancias buffer.

Las **sustancias buffer** son aquellas que favorecen las condiciones del proceso, aportando capacidad tampón o reguladora a la mezcla, estabilizando el pH.

Se puede resumir que, de todos estos parámetros, **el carbono y el nitrógeno** son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; **siendo el carbono la fuente de energía de los microorganismos, mientras que el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células.**

Si no existe suficiente **cantidad de nitrógeno** en el medio para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada; **si por el contrario hay exceso de nitrógeno en el medio, se produce amoníaco**, el cual, en grandes cantidades, es tóxico e inhibe el proceso, elevando los valores de pH. En **el caso del carbono**, si éste se encuentra en exceso, el proceso se hace más lento y **tiende a acidificar el medio, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV)**, los cuales como ya se dijo anteriormente, en exceso inhiben la fermentación anaerobia.

En general, los desechos animales **presentan una relación C/N** por debajo del óptimo de mecanización, debido a sus elevadas concentraciones de nitrógeno y por ello, el rendimiento en producción de biogás se mejora significativamente cuando se codigiere con residuos agrícolas u otros sustratos orgánicos con elevada relación C/N.

Las bacterias metanogénicas requieren otros nutrientes para su desarrollo, adicionales a la materia orgánica degradada. Se debe procurar mantener la relación de los elementos C:N:P:S alrededor de 600:15:5:1 dentro del reactor, de modo de proveer a los microorganismos las condiciones adecuadas para la actividad microbiana. (Centro de Energías Renovables. 2013).

En el **Cuadro 6**, se presentan las relaciones C/N de algunos sustratos, observando el mejor parámetro en el purín de cerdo y vacuno y mejor aun en el caso de cebada, arroz, trigo; y en la **Figura 2** coincidentemente igual sin embargo se agrega a la paja de maíz y a los desperdicios de verdura.

**Cuadro 6.** Relaciones C/N de algunos sustratos.

SUSTRATO	RELACIÓN C:N
Purín de cerdo	18-20
Purín de vacuno	15-24
Gallinaza	15
Residuos de matadero	2-8
Residuos de cocina	25
Residuos de frutas	35
Fangos de depuración	16
Pieles de patata	25
Cebada, arroz, trigo	60-90

Fuente: Flotats, X.

La aplicación al tratamiento de purines de cerdo está limitada por su baja relación C/N, bajo contenido en materia orgánica, alto contenido en nitrógeno amoniacal y agua. Estas limitaciones pueden ser superadas mediante la digestión conjunta

(co-digestión) con residuos de la industria agroalimentaria, con composiciones complementarias. Flotats Ripoll, X.2010.

**Aunque en los subproductos agroindustriales pueden existir sustancias inhibidoras como pesticidas, herbicidas, aceites esenciales, polifenoles, etc. en los residuos vegetales o desinfectantes y antibióticos en los estiércoles ganaderos**, la realidad es que no existen referencias claras de instalaciones de biodigestión en las que la concentración de dichos inhibidores haya producido un efecto negativo sobre el proceso.

**Así mismo, también puede haber casos en los que las sustancias inhibidoras se forman durante la digestión anaerobia, como la aparición de concentraciones altas de ácidos grasos de cadena larga, amoníaco e hidrógeno y ácido sulfhídrico.**

Importancia de la Relación carbono Nitrógeno en los sustratos:

**RELACION CARBONO NITRÓGENO (C/N) DE DIVERSOS SUSTRATOS**

SUBSTRATO	RELACION C/N
Orina	0.8
Excreta de vacuno	10 - 20
Excreta de Porcino	9 - 13
Excreta de Gallina	5 - 8
Excreta de caprino / ovino	30
Excreta de Humanos	8
Paja de cereales	80 - 140
Paja de maíz	30 - 65
Gras fresco	12
Desperdicios de verduras	35

Fuente: BARNETT

Fuente: Infantes, Pablo. 2014

**Figura 2.** Importancia de la relación Carbono/Nitrógeno en los sustratos.

En el **Cuadro 7** se muestran valores orientativos de las concentraciones inhibidoras más habituales; como cuando se refieren a inhibidores pueden mencionarse algunos elementos como S, Cu, Cr, Zn, Ni, y otros.

**Cuadro 7.** Valores de las concentraciones de los inhibidores más comunes.

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA (mg/ml)
Sulfuro (como azufre)	200
Cu	10-250
Cr	200-2000
Zn	350-1000
Ni	100-1000
CN	2
Na	8000
Ca	8000
Mg	3000

Fuente: GTZ GmbH, 1999

Fuente: tomado por Flotats Ripoll, X.2010

En el **Cuadro 8**; se indican las características relativas para la co-digestión de diferentes tipologías de residuos orgánicos. **Flechas con sentidos diferentes indican un posible interés en la mezcla, al compensarse una carencia relativa de uno de los dos residuos.** La alcalinidad de lodos de planta depuradora presenta tal variabilidad que es difícil la generalización. Flotats Ripoll, X.2010

**Cuadro 8.** Caracterización relativa para la co-digestion de diferentes residuos orgánicos.

	Residuos Ganaderos	Lodos de depuración	Fracción orgánica res.mun.	Residuos industria alimentaria
Micro y macronutrientes				
Relación C/N				
Capacidad tampón (alcalinidad)				
Materia orgánica bio degradable				

Fuente: Flotats Ripoll, X.2010

**El lodo SS se caracteriza por una relativamente baja relación C/N, el glicerol balancea dicha relación con su alta carga orgánica.** El lodo, ofrece además una elevada alcalinidad que mejora la capacidad buffer de la mezcla para la temporal acumulación de ácidos grasos volátiles (VFA) que se forma de la rápida degradación del glicerol. **Por último, el lodo SS aporta su contenido de agua que actúa como solvente; y de macro y micro nutrientes que se combina con materia orgánica fácilmente biodegradable (GLY).** Todo esto, hace que la mezcla considerada permita alcanzar resultados favorables. Vicentin, Rocío. 2014.

Con el tiempo se comprobó que el efecto inhibitor del nitrógeno amoniacal de estos residuos, en las instalaciones termofílica, era superable mediante la mezcla con residuos de la industria alimentaria. La experiencia positiva llevó a popularizar el sistema de co-digestión, habiendo en la actualidad más de 20 plantas, tratando mezclas de diferentes tipos de residuos orgánicos, con una proporción mayoritaria de residuos ganaderos. En 1998, la producción de energía eléctrica de éstas fue de 0,26 TW·h (Flotats Ripoll, X.2010)

En términos generales se observa en el **Cuadro 9**, la producción y composición teórica del biogás, a partir de los carbohidratos, proteínas y grasas que contienen los sustratos, y en él se estima que las grasas tienen mayor aptitud para la producción de gas (1200 l/kg MS), el contenido de metano es de 67% que es apreciable y el contenido de CO<sub>2</sub> mínimo (33%).

**Cuadro 9.** Producción y Composición Teórica del Biogás

SUBSTRATO	PRODUCCION DE GAS (L/Kg MS)	CONTENIDO DE METANO (CH <sub>4</sub> ) %	CONTENIDO DE CO <sub>2</sub> %
Carbohidratos	800	50	50
Proteínas	700	70	30
Grasas	1,200	67	33

Fuente: Kepler 2014

Kepler 2014, encuentra en sus investigaciones en una planta Experimental de Biogás de Altas Prestaciones con doble cámara hidrolítica, valores medios en la composición de biogás, los cuales se muestran en el **Cuadro 10**, no se mencionan los insumos utilizados.

**Cuadro 10.** Valores medios de la composición de biogás.

		Contenido [Vol.-%]
Metano	CH <sub>4</sub>	50-75%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	24-45%
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	2 (20°C) – 7 (40°C)
Oxígeno	O <sub>2</sub>	< 2
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	< 2
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	< 1
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	< 1
Acidosulfhidrico	H <sub>2</sub> S	< 1

Fuente: Kepler. 2014

En la industria alimentaria se generan efluentes orgánicos secundarios de gran variedad con elevados flujos másicos y diferente contenido de agua (en los casos donde éste es elevado, se les puede considerar aguas residuales). **Es muy común el uso de digestores anaerobios para el tratamiento de estos residuos secundarios, por ejemplo, en el procesamiento de jugos de frutas, en rastrojos y en las centrales lecheras.** Sin embargo, esta tecnología se ha

extendido incluso a distintas industrias como la biotecnológica y de procesamiento.

Debido a la **contaminación microbiológica, orgánica e inorgánica característica de los desechos municipales y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, estos residuos requieren un trato especial** y no se recomienda su uso en codigestión con sustratos libres de contaminación.

## 2. 4 Microbiología del Proceso

**Los metanógenos son estrictamente anaerobios, organismos unicelulares que originalmente se pensó que eran bacterias, pero ahora son reconocidos como pertenecientes a un dominio filogenético independiente, las arqueobacterias** (ver Woese et al., 1990 para una nueva nomenclatura). - la *Archaeobacteria*, ahora conocida como el *Archaea*. El trabajo que define las propiedades del *Archaeobacteria* es una de las mayores contribuciones en la microbiología, en las últimas dos décadas el Dr. Wolfe es la figura central de este descubrimiento. (King-Thom Chung and Vincent Varel. 1998).

Ellos **son más numerosos en ambientes anaeróbicos de agua dulce, tales como los sedimentos de lagos y el tracto digestivo de animales**. En estos hábitats, los metanógenos juegan un importante papel en la degradación de compuestos orgánicos complejos por consorcios de microorganismos anaerobios. (David S. Weiss and Rudolf K. Thauer. 1993).

Los metanógenos son exclusivos para el reino Euryarchaeota del dominio *Archaea* que comprende cinco órdenes: Metanobacteriales, Metanococales, Metanomicrobiales, Metanosarcinales y Metanopirales. Una sexta orden, Metanocelulales, se propuso recientemente sobre la base de un único aislado de un suelo con cáscara de arroz que sólo obtiene energía para su crecimiento por la vía de reducción del  $\text{CO}_2$  utilizando  $\text{H}_2$  o formiato (Sakai et al., 2008). Dos familias comprenden las Metanosarcinales de las cuales la *Metanosarcinaceae* es la más metabólicamente versátil.

**La Metanosarcina y la Metanosaeta son los únicos géneros que crecen y producen  $\text{CH}_4$  desde el acetato, aunque una parte importante del  $\text{CH}_4$  en la biosfera de la Tierra se deriva de este sustrato.** (Ferry James G. 2010)

Todas las especies de la familia *Metanosarcinaceae* obtienen energía para el crecimiento mediante la producción de  $\text{CH}_4$  desde el grupo metilo de metanol y metilaminas. Los miembros del género *Metanosarcina* también obtienen energía por la reducción del  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2$  o  $\text{CO}$  como donador de electrones. **La única otra familia en los Metanosarcinales, la de los Metanosaetaceae, se compone de tres especies dentro del mismo género**

**Metanosaeta** que sólo convierte el acetato a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> para el crecimiento. (Ferry James G. 2010)

Los metanógenos producen alrededor de 10<sup>9</sup> toneladas de CH<sub>4</sub> por año. Aproximadamente **la mitad se vuelve a oxidar por bacterias metanotróficas, pero la mayoría del resto se escapan a la atmósfera, donde es un potente gas de efecto invernadero. Aproximadamente el 70% de CH<sub>4</sub> que entra en la atmósfera se produce por metanógenos. El CH<sub>4</sub> atmosférico ha aumentado dramáticamente durante los últimos 300 años, debido en gran parte al cultivo expandido de arroz y el ganado rumiante** (Hogan et al., 1991). (David S. Weiss and Rudolf K. Thauer. 1993).

Metanogénesis es la única manera de que las arqueobacterias metanogénicas puedan obtener energía para el crecimiento y estos son los únicos organismos conocidos que producen CH<sub>4</sub> como producto catabólico final. **Una de las vías mejores estudiadas es la reducción del CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> + 4H<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O.** (David S. Weiss and Rudolf K. Thauer. 1993).

Sin embargo, en entornos naturales como el compost, estiércol de ganado y el suelo; las producciones de bacterias anaerobias coexisten con los metanógenos que consumen productos metabólicos de fermentación a oscuras de hidrógeno incluyendo hidrógeno y producen su propio producto final - el metano. (Kvesitadze, G. y otros. 2012).

**Cuadro 11.** Especies de bacterias encontradas en dos tipos de estiércol a diferentes temperaturas.

Bacteria	Estiércol sin Tratar		Estiércol Digerido	
	18 a 21 °C (semanas)	6 a 15 °C (semanas)	53 °C (horas)	35 °C (días)
Bacterias Coliformes	2.1	9.3	-	3.1
<i>Escherichia coli</i>	2.0	8.8	0.4	1.8
Grupo de Estreptococos	5.7	21.4	-	7.1
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	-	-	0.7	6.0
<i>Salmonella dublin</i>	-	-	0.6	2.1
<i>Salmonella typhimurium</i>	2.0	5.9	0.7	2.4
<i>Staphylococcus aureus</i>	0.9	7.1	0.5	0.9
<i>Streptococcus faecalis</i>	-	-	1.0	2.0

Fuente: Adaptada (Deutsche Gesellschaft Sonnenenergie & ECOFYS, 2005)

En la investigación de campo encontramos por ejemplo en el **Cuadro 11**; se presentan especies de bacterias encontradas en dos tipos de estiércol a diferentes temperaturas; se aprecia que en estiércol digerido a 53°C han disminuido su presencia en gran magnitud.

El proceso de producción del biogás es por medio de una biodegradación anaeróbica de la materia orgánica, la cual llevan a cabo microorganismos que coexisten en el biodigestor, **estos microorganismos son bacterias hidrolíticas-acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas** (Massi, 2012).

En esta fase, las bacterias hidrolíticas, hidrolizan la celulosa, los lípidos y las proteínas por medio de enzimas hidrolíticas (Massi, 2012). El resultado del hidrólisis de cada compuesto resulta en el monómero de cada una. Como se aprecia en el **Cuadro 12**.

**Cuadro 12.** Resumen del catabolismo de los polímeros orgánicos

POLIMERO	MONOMERO	CATABOLISMO	ACIDIFICACION
Celulosa	Glucosa	Piruvato	Acido acético
Lípidos	Glicerol	Piruvato	Acido acético
Proteínas	Aminoácidos	Propionato 2-Alquil-Acetato Butirato	Acidopropiónico Acido acético Acidobutírico

Fuente: Adaptado de Mathews & van Holde, 2001; por Jiménez D. 2012.

Los ácidos orgánicos y aminoácidos se catabolizan como por ejemplo purinas y pirimidinas, ácidos orgánicos y aminoácidos; por acción de fosfoencipiruvato sobre las moléculas de piruvato y **por acción de la acetil coenzima A se degrada hacia Acetilfosfato y finalmente a Acetato**.

Los productos del catabolismo se **acidifican por medio de las bacterias acidogénicas**, tales como: Clostridium, Bifidobacterium, Desulphovibrio, Actinomyces y Staphylococcus. Produciendo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> (Massi, 2012) y ácidos grasos volátiles, a mencionar: ácido propiónico, ácido acético y ácido butírico (Jiménez, D. 2012).



**Figura 3.** Factores determinantes para obtener cantidad y calidad de biogás.

Fuente: Infantes, Pablo. 2014

En la **Figura 3** se observan los factores determinantes que concurren a su **generación**, observando de una parte el sustrato y de otra parte el digestor, la acción de las bacterias en el proceso de fermentación, dependiendo de ella la cantidad y calidad del biogás obtenido.

**Los ácidos grasos volátiles son convertidos a acetato, anhídrido carbónico e hidrógeno por bacterias**, pero principalmente por dos familias, a mencionar: bacterias acetogénicas obligadas que producen hidrógeno y bacterias homoacetogénicas (Massi, 2012) y (Jiménez, D. 2012).

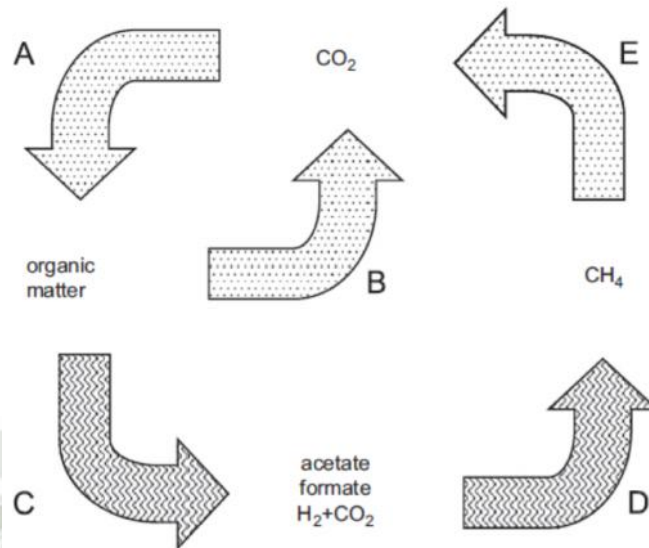
## 2.5 Bioquímica de la Metanogénesis.

Dos vías distintas representan **la mayor parte del CH<sub>4</sub> producido en la mayoría de los diversos y extensos ambientes anaeróbicos de la biosfera de la Tierra por los microbios que se clasifican en el dominio *Archaea* de la vida: la conversión del grupo metilo del acetato a CH<sub>4</sub> en la vía acetoclástica** y la reducción del CO<sub>2</sub> con los electrones derivados de H<sub>2</sub>, formiato o CO en la vía de la reducción de CO<sub>2</sub>. Como se aprecia en la **Figura 3**. (Ferry James G. 2010)

**Menor aún, pero de importancia ecológica, las cantidades de CH<sub>4</sub> son producidas por la conversión de sustratos metilotróficos de metanol, metilaminas y sulfuros de metilo.** Aunque todos los caminos tienen pasos terminales en común, se desviarán en los pasos iniciales que conducen a CH<sub>4</sub> y en los mecanismos para sintetizar ATP para el crecimiento. El gas hidrógeno es el principal agente reductor para los metanógenos que reducen CO<sub>2</sub> en el subsuelo profundo, aunque el H<sub>2</sub> también es utilizado por los microbios que reducen CO<sub>2</sub> desde el dominio *Bacteria* que produce acetato para los metanógenos acetoclásticos. (Ferry James G. 2010).

El grupo que produce metano (metanógenos) del dominio *Archaea* obtiene energía para el crecimiento por una de las tres vías. En la **vía de la reducción del CO<sub>2</sub>, se oxidan el formiato o H<sub>2</sub> y se reduce el CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. El grupo metilo del acetato se convierte en metano** y se convierte el grupo carboxilo a dióxido de carbono en la vía acetoclástica. **La vía metilotrófica convierte los grupos metilo del metanol, metilaminas y sulfuros de metilo a metano y dióxido de carbono.** En la mayoría de los ambientes anaeróbicos de agua dulce, la reducción del CO<sub>2</sub> y las vías acetoclásticas representan la mayor parte de los aproximadamente 1 gigatón de la biosfera de la Tierra que produce cada año (Thauer, 1998); mencionados por Ferry James G. 2010.

La contribución relativa de estas dos vías es dependiente de la presencia de cualquiera de los anaerobios acetato – oxidantes que producen H<sub>2</sub> (Zinder y Koch, 1984) o especies acetogénicas reductoras de CO<sub>2</sub> y productoras de H<sub>2</sub> (Kotelnikova y Pederson, 1998).



**Figura 4.** El ciclo global del carbono en la naturaleza. (A) Fijación del  $CO_2$  en la materia orgánica, (B) Descomposición aeróbica de la materia orgánica a  $CO_2$ , (C) Composición anaeróbica del material orgánico a productos finales fermentativos, (D) Conversión anaeróbica de productos finales fermentativos para escape de metano a ambientes aeróbicos, (E) Oxidación aeróbica y anaeróbica del metano a  $CO_2$ . (Fuente: Ferry James G. 2010).

El  $CH_4$  de ambientes anaeróbicos se difunde en zonas a aeróbicas donde microbios metanotróficos que requieren  $O_2$  lo oxidan a  $CO_2$  (Figura 3), Más recientemente los consorcios de microbios anaeróbicos han descrito que convierten el  $CH_4$  al  $CO_2$  mientras reducen cualquier sulfato, nitrato, manganeso o hierro (Beal et al, 2009; Boetius et al., 2000; Raghoebarsing et al., 2006). (Ferry James G. 2010).

Las aguas subterráneas del profundo subsuelo granítico en Suecia, mostraron estar dominadas por anaerobios que convierten  $H_2$  y  $CO_2$  a acetato con metanógenos acetilclásticos que convierten el acetato a  $CH_4$  y  $CO_2$  sugiriendo una vibrante biosfera autotrófica del subsuelo basada en  $H_2$  (Kotelnikova y Pederson, 1998). Por último, los análisis filogenéticos de las aguas de las rocas ígneas profundamente enterradas en Idaho revelan la gran mayoría de las especies pertenecientes a metanógenos que utilizan  $H_2$  y reducen  $CO_2$  de acuerdo con la producción del  $H_2$  geotermal en este entorno (Chapelle et al., 2002).

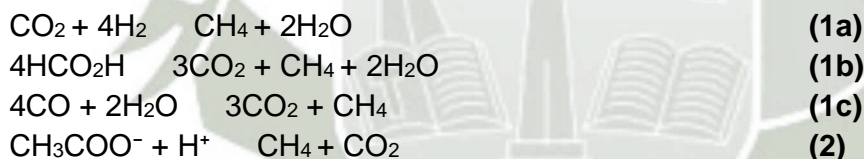
**Dentro de la Microbiología del proceso** se puede mencionar que: Los metanógenos son exclusivos para el reino Euryarchaeota del dominio *Archaea* que comprende cinco órdenes: Metanobacteriales, Metanococales, Metanomicrobiales, Metanosarcinales y Metanopirales. Una sexta orden, Metanocelulales, se propuso recientemente sobre la base de un único aislado de un suelo con cáscara de arroz que sólo obtiene energía para su crecimiento por la vía de reducción del  $CO_2$  utilizando  $H_2$  o formiato (Sakai et al., 2008).

Dos familias comprenden las Metanosarcinales de las cuales la Metanosarcinaceae es la más metabólicamente versátil. La Metanosarcina y la Metanosaeta son los únicos géneros que crecen y producen CH<sub>4</sub> desde el acetato, aunque una parte importante del CH<sub>4</sub> en la biosfera de la Tierra se deriva de este sustrato. Todas las especies de la familia Metanosarcinaceae obtienen energía para el crecimiento mediante la producción de CH<sub>4</sub> desde el grupo metilo de metanol y metilaminas.

Los miembros del género *Metanosarcina* también obtienen energía por la reducción del CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> o CO como donador de electrones. La única otra familia en los Metanosarcinales, la de los Metanosaetaceae, se compone de tres especies dentro del mismo género *Metanosaeta* que sólo convierte el acetato a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> para el crecimiento. Todas las otras cuatro órdenes obtienen energía para el crecimiento sólo por la reducción del CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> refiriéndose como especies obligadas que reducen CO<sub>2</sub>. Una excepción es el género *Metanosfera* que reduce el grupo metilo del metanol a CH<sub>4</sub> con H<sub>2</sub> (Fricke et al., 2006).

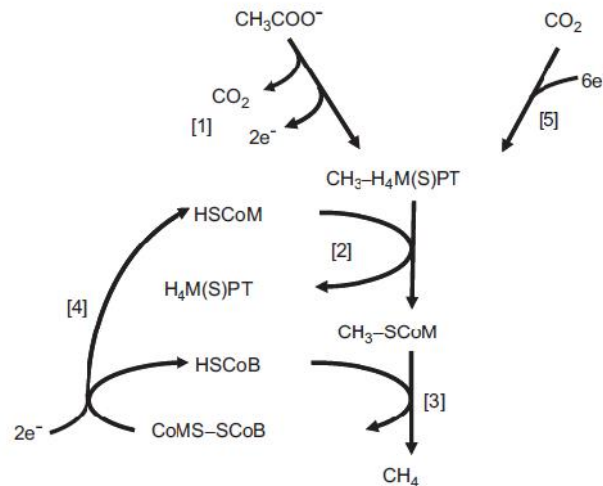
### 2.5.1 Reacciones comunes a la reducción del CO<sub>2</sub> y las vías acetoclástica

El panorama de las vías de reducción del CO<sub>2</sub> y las vías acetoclástica se muestra en la **Fig. 5** y las ecuaciones (1(a)-(c) y (2), respectivamente.



Las **reacciones 2, 3 y 4** involucran a la coenzima M (HS-CoM) y a la coenzima B (HS-CoB) (**Fig. 5**) son comunes a las dos vías que difieren en las reacciones que generan ya sea metil-tetrahidrosarcinapterin (CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>SPT) en la vía acetoclástica o metil-tetrahidrometanopterin (CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>MPT) en la vía de reducción del CO<sub>2</sub> (**Fig. 5**).

Los intermediarios CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>M(S)PT se forman en las vías acetoclásticas y en las vías de reducción del CO<sub>2</sub> por una serie de reacciones representadas en los **pasos 1 y 5**, respectivamente. El grupo metilo de CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>M(S)PT se transfiere a HS-CoM (**reacción 2**), con la consiguiente desmetilación reductora del CH<sub>3</sub>-S-CoM a CH<sub>4</sub> con electrones donados por HS-CoB (**reacción 3**). Un producto de la reacción de desmetilación, CoM-S-S-CoB, se reduce a las formas activas sulfhidrilo HS-CoB y HS-CoM en la **reacción 4**.



**Figura 5.** Información general de la reducción del  $\text{CO}_2$  y de las vías acetilclásticas productoras de metano

Todas las vías metanogénicas requieren **reacciones 3 y 4** que se acoplan a las vías de transporte de electrones que generan un gradiente de protones que conducen la síntesis del ATP. Sin embargo, las vías difieren por la fuente de electrones reduciendo la  $\text{CoM-S-S-CoBa HS-CoB}$  y la  $\text{HS-CoM}$  en la **reacción 4**. En la vía acetilclástica, el par de electrones se originan a partir de la oxidación del grupo carbonilo del acetato mientras que, en la vía de reducción del  $\text{CO}_2$  los electrones se derivan de la oxidación de cualquier  $\text{H}_2$  o formiato (ecuaciones 1(a) y (b)).

La **reacción 2** es catalizada por la  $\text{CH}_3\text{-H}_4\text{M(S)PT}$ : coenzima M metiltransferasa (Mtr), un complejo de ocho subunidades enlazado a la membrana que en la dirección de la síntesis de la  $\text{CH}_3\text{-S-CoM}$ , acopla la transferencia exergónica del metilo a la generación de un gradiente iónico de sodio (alto exterior) en todas las vías metanogénicas excepto la vía metilotrófica donde se propone para conducir diversas reacciones que requieren energía (Harms et al., 1995). La subunidad MtrA contiene el cofactor factor III (**Fig. 5**) a la que el átomo de carbono del grupo metilo está unido al átomo de cobalto. Se pronostica la alternancia de la metilación y la desmetilación del factor III para efectuar un cambio conformacional en el polipéptido que impulsa la translocación del sodio (Gottschalk and Thauer, 2001).

## La vía de reducción del CO<sub>2</sub>

### 2.5.2 Síntesis de CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>M(S)PT

Las reacciones de reducción del CO<sub>2</sub> a CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>MPT en especies obligadas que reducen CO<sub>2</sub> se muestran en la **Fig. 4 (reacciones 5-9)**. Las reacciones son similares para las especies de agua dulce *Methanosarcina* excepto H<sub>4</sub>SPT se utiliza en lugar de H<sub>4</sub>MPT y el mecanismo para la **reacción 5** es distinto. Los tres pares de electrones necesarios para las **reacciones 5, 8 y 9** se derivan de la oxidación de cualquiera del H<sub>2</sub>, CO o formiato. El CO se oxida primero a H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en especies *Methanosarcina* de agua dulce (O'Brien et al., 1984) mientras que, la aislada *M. acetivorans* marina desarrolló una vía única de reducción del CO<sub>2</sub> evitando el H<sub>2</sub> como un intermediario (Lessner et al., 2006).

La utilización del formiato se limita a obligar a las especies que reducen CO<sub>2</sub> para el cual los sistemas enzimáticos se han descrito compuestos de la coenzima formiato deshidrogenasa dependiente de F<sub>420</sub> y la hidrogenasa que convierte formiato a H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>; sin embargo, que el formiato se oxide primero a H<sub>2</sub> durante el crecimiento en formiato, no se ha resuelto por completo (Barón y Ferry, 1989b; Hendrickson y Leigh, 2008; Lupa et al., 2008). La coenzima F<sub>420</sub> es un vehículo obligado de dos electrones (**figura 3**). El formiato deshidrogenasa desde la *Methanobacterium formicicum* contiene un cofactor molibdopterina (**Fig.3**) en el sitio activo (Johnson et al., 1991; May et al., 1986) que también se requiere para la **reacción 5** (Acharya et al., 2006; **Fig. 4**).

En la **reacción 5**, el CO<sub>2</sub> se une a MF y se reduce a formil-MF catalizado por formil-MF deshidrogenasa con ferredoxina (Fd) como el donador de electrones. La reacción es endergónica en el entorno nativo donde las presiones parciales del H<sub>2</sub> son bajas y requieren un aporte de energía (Thauer et al., 2008).

En las especies de agua dulce *Methanosarcina*, la ferredoxina se reduce por la ferredoxina dependiente de hidrogenasa conducida por un gradiente de protones (alto exterior) generado por el transporte de electrones desde el H<sub>2</sub> a CoM-S-S-CoB (Hedderich, 2004). El mecanismo de **reacción 5** en especies obligadas que reducen CO<sub>2</sub> no ha sido establecido, aunque una hipótesis ha sido avanzada en donde la reducción exergónica dependiente del H<sub>2</sub> de CoM-S-S-CoB impulsa la reducción de la ferredoxina ( $2\text{H}_2 + \text{CoM-S-S-CoB} + \text{Fd}_{\text{ox}} = \text{HS-CoM} + \text{HS-CoB} + \text{Fd}_{\text{red}^{2-}} + 2\text{H}^+$ ,  $G^{\circ} = -39 \text{ kJ/mol}$ ) a través de la bifurcación de electrones dependiente de flavina (Thauer et al., 2008).

El apoyo a esta hipótesis proviene de la identificación de un complejo de proteínas desde la *Methanococcus maripaludis* que contiene la reductasa heterodisulfuro, la deshidrogenasa formil-MF, una hidrogenasa independiente de F<sub>420</sub> y el formiato deshidrogenasa (Costa et al.,

2010). La composición del complejo sugiere además que ya sea el formiato o el  $H_2$  es el que dona electrones a CoM-S-S-CoB a través de la hidrogenasa que no reduce  $F_{420}$  o el formiato a través del formiato deshidrogenasa. El grupo formil de formil-MF se transfiere entonces a  $H_4M(S)PT$  seguido por dos etapas de reducción en donde la coenzima  $F_{420}$  dona los pares de electrones. La coenzima  $F_{420}$  se reduce con una hidrogenasa dependiente de  $F_{420}$  que contiene níquel (Baron y Ferry, 1989a; Fiebig y Friedrich, 1989; Lindahl et al., 1984).

### 2.5.3 La síntesis de ATP en *Methanosarcina* de agua dulce y en especies obligadas que reducen $CO_2$

Las reacciones que producen la mayor energía para la síntesis de ATP en especies de agua dulce son los sistemas oxidorreductasa  $H_2$ : CoM-S-S-CoB enlazados a la membrana (-39 kJ/mol) que son diferentes entre la *Methanosarcina* y las especies obligadas que reducen  $CO_2$ . En la *Methanosarcina mazei*, el sistema oxidorreductasa  $H_2$ : CoM-S-S-CoB es idéntico a la porción de transporte de electrones en la vía acetilclástica que implica la  $V_h$  hidrogenasa, la metanofenazina y la reductasa Hdr de heterodisulfuro, en donde los protones son bombeados fuera de la membrana en el sitio de  $V_h$  y la metanofenazina genera un gradiente de protones que impulsa la síntesis de ATP para el crecimiento a través de la translocación de protones de la sintasa ATP tipo  $A_1A_0$ .

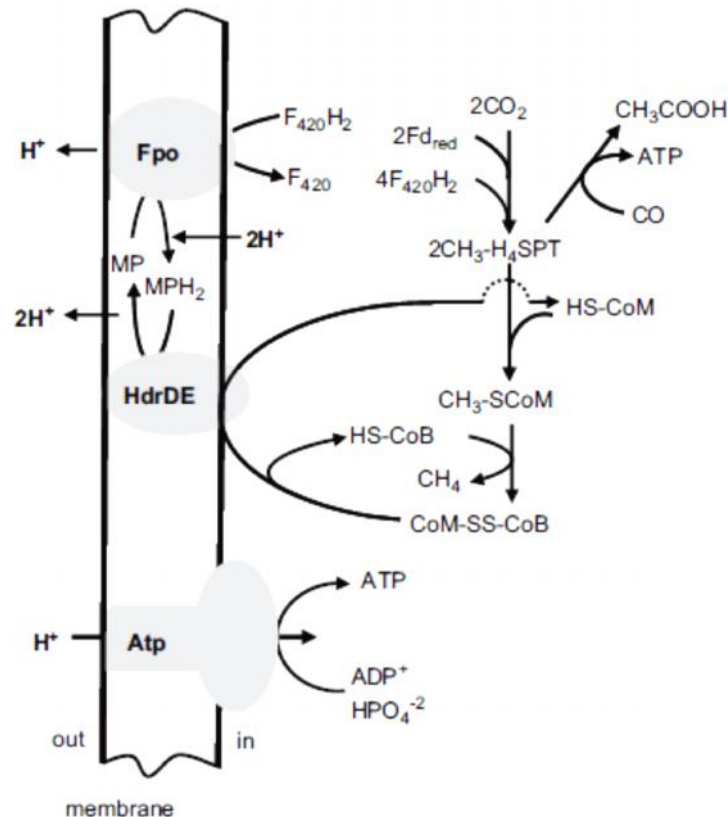
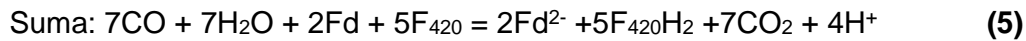
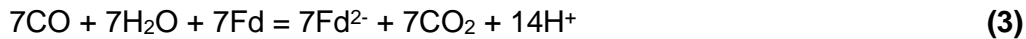
Por otro lado, las especies obligadas que reducen  $CO_2$  no contienen metanofenazina con ningún mecanismo aparente para generar un gradiente iónico. El sistema oxidorreductasa  $H_2$ : CoM-S-S-CoB en su lugar se compone de la hidrogenasa citoplasmática independiente de la  $F_{420}$  ( $M_vhAGD$ ) fuertemente enlazada a la de tipo HdrABC de la reductasa heterodisulfuro (Stojanowic et al., 2003) sin ningún mecanismo determinado experimentalmente para la conservación de energía por este complejo.

El único potencial para la síntesis de ATP es el gradiente de sodio generado por el complejo metil- $H_4MPT$ : coenzima M metiltransferasa enlazado a la membrana (**Fig. 3, reacción 2 y la figura 4**) que conduce a una sintasa de sodio que transloca  $A_1A_0$ -ATP (Thauer et al., 2008).

### 2.5.4 Síntesis de ATP en *M. acetivorans*

El transporte de electrones acoplado a la síntesis de ATP en la aislada *M. acetivorans* marina (**Fig. 6**) difiere de la *Methanosarcina* de agua dulce y de las especies obligadas reductoras de  $CO_2$  (Lessner et al., 2006). El monóxido de carbono es el único donador de electrones para la reducción del  $CO_2$ - $CH_4$  que se oxida por el complejo Cdh reduciendo la ferredoxina. Una porción de la ferredoxina

reducida se re-oxida con transferencia de electrones a la coenzima  $F_{420}$ (**ecuaciones (3) y (4)**).



**Figura. 6.** Transporte de electrones y conservación de energía durante el crecimiento de CO dependiente de *M. acetivorans*. Fd, ferredoxina; Fpo, F<sub>420</sub>deshidrogenasa; F<sub>420</sub>, coenzima F<sub>420</sub>; H<sub>4</sub>SPT, tetrahidrosarcinapterina; HS-CoM, coenzima M; Mtr, CH<sub>3</sub>-H<sub>4</sub>SPT: coenzima M metiltransferasa; metiltransferasa MP, metanofenazina; HS-CoB, coenzima B; HdrDE, reductasa heterodisulfuro; Atp, translocación de protones A1 A0 ATP sintasa

La reducción del  $2CO_2 \rightarrow 2CH_3-H_4SPT$  con  $2Fd^{2-}$  y  $4F_{420}H_2$  (**Fig. 6**) implica enzimas y coenzimas idénticas a la vía de metanógenos de agua dulce a excepción de la primera etapa (**Fig. 6, reacción 5**) donde los electrones para la reducción de la ferredoxina derivan directamente de CO catalizado por Cdh. A diferencia de todas las demás vías de reducción de  $CO_2$ , el complejo  $F_{420}H_2$  deshidrogenasa (Fpo) funciona para suministrar electrones a la reductasa HdrDE heterodisulfuro en *M. acetivorans* con crecimiento de CO (**Fig. 6**). El complejo  $F_{420}H_2$  deshidrogenasa también funciona en el transporte de electrones de las vías metilotróficas para la

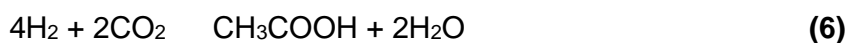
*M. acetivorans* y las especies *Methanosarcina* de agua dulce en el que la Methanophenazine hace de mediadora para la transferencia de electrones entre la deshidrogenasa  $F_{420}H_2$  y la HdrDE contribuyendo a la gradiente de protones (Baumer et al., 1998).

La deshidrogenasa  $F_{420}H_2$  también bombea protones que contribuyen aún más a la gradiente de protones que impulsa la síntesis de ATP en la *M. acetivorans* con crecimiento de CO (**Fig. 6**). El acetato como producto final (**Fig.6**) es otra característica novedosa de la vía de reducción de  $CO_2$  dependiente de CO de la *M. acetivorans* (Lessner et al., 2006; Oelgeschlager y Rother, 2009; Rother y Metcalf, 2004).

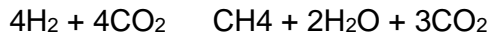
La producción de acetato es esencialmente una inversión de pasos para la activación del acetato en la vía acetilclástica que comienzan con la síntesis de la acetil-CoA a partir del grupo metilo del  $CH_3-H_4SPT$ , del CO y del CoA-SH catalizados por el complejo Cdh que se convierte además en acetato por la fosfotransacetilasa y en acetato quinasa, los que catalizan la síntesis de ATP. Por lo tanto, el ATP se sintetiza a través tanto a nivel de sustrato y mecanismos quimiosmóticos en la vía dependiente de CO de la reducción de  $CO_2$  de la *M. acetivorans*.

**Esta ruta es posible sea la más frecuente la de la reducción del  $CO_2$  a  $CH_4$  a través del acetato.** En ricos ambientes orgánicos anaeróbicos, el acetato es producida por especies fermentativas que actúan sobre polímeros complejos como los polisacáridos. En pobres ambientes orgánicos sub-superficiales, el  $H_2$  aparece como el reductor predominante para los metanógenos que reducen  $CO_2$ .

Sin embargo, los metanógenos acetilclásticos parecen jugar un papel importante a través de la interacción con los microbios homoacetogénicos que oxidan  $H_2$  y que reducen el  $CO_2$  a acetato de acuerdo con la **reacción 6** (Drake et al., 2008). El monóxido de carbono puede reemplazar el  $H_2$  como un reductor en homoacetógenos de acuerdo con la **reacción 7**. Alternativamente, el CO puede ser oxidado a  $H_2$  por especies carboxidotróficas que residen en el subsuelo profundo según la **reacción 8** que se metaboliza adicionalmente a  $CH_4$  por metanógenos que reducen  $CO_2$  (Techtmann et al., 2009). (Ferry James G. 2010).



Por reducción e interpretación del resultado en la reacción 8 se estima que



**La vía para la síntesis de acetato por los homoacetógenos desde el dominio *Bacteria* es similar a la vía en *M. acetivorans* excepto que el tetrahidrofolato reemplaza al tetrahidrosarcinapterin y el primer paso implica la síntesis de formiato, la que es catalizada por el formiato deshidrogenasa que es transferida al tetrahidrofolato; por lo tanto, el metanofuran no está involucrado** (Drake et al., 2008). El ATP para el crecimiento se sintetiza por la acetato quinasa en el último paso de la vía, aunque una gradiente iónica generada durante el transporte de electrones tiene el potencial de conducir la síntesis de ATP por una ATP sintasa (Schmidt et al., 2009). (Ferry James G. 2010).

**En condiciones termófilas, el bloqueo de la metanogénesis en la primera etapa de la fermentación anaeróbica se logró a un pH de 9.0.** La producción de hidrógeno acumulado hizo 82.5 L/kg de sólidos volátiles. El pre tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y la explotación de cultivos mixtos de celulolítica anaerobia termofílica y de bacterias sacarolíticas de *Clostridiasp* resultó en el aumento de la producción acumulativa de hidrógeno de hasta 104 L/kg de sólidos volátiles. El contenido de metano en bio-hidrógeno no excedió de 0.1%. La producción de bio-metano acumulado hizo 520 L/kg de sólidos volátiles. **El porcentaje de metano en biogás producido fue del 78.6%.** Reportado por Kvesitadze, G. y otros. 2012.

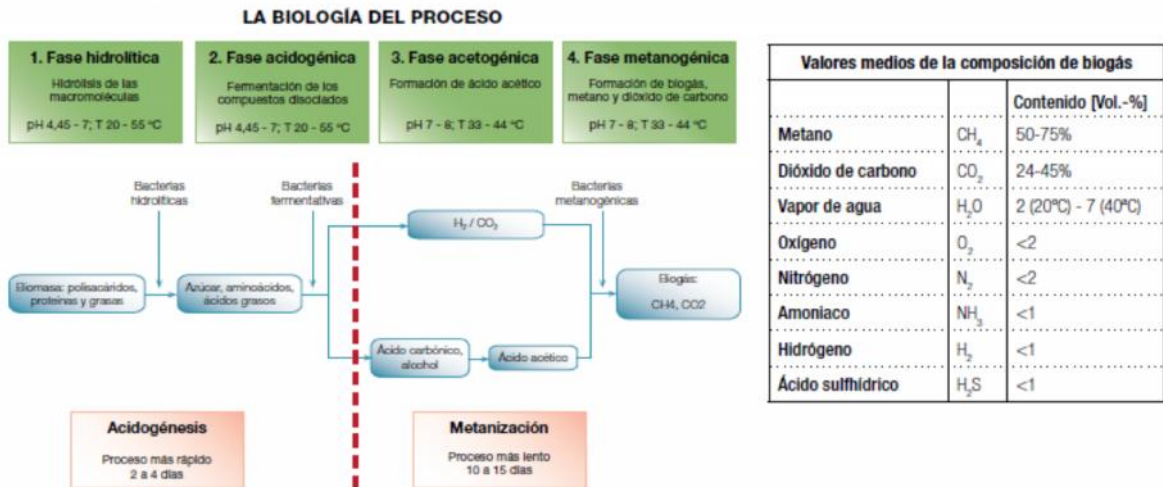
El uso de co-cultivos de cepas de bacterias de celulolítica anaeróbica GCD7 y sacarolítica GSC2, ofrece el 97-99% de conversión de la celulosa y la hemicelulosa que figuran en el material celulósico pre-tratado y aseguran la utilización de los azúcares hexosa y pentosa. Como resultado, el rendimiento de hidrógeno y la velocidad de producción aumentan de manera significativa.

En términos de calor y electricidad de co-generación, el proceso de dos etapas con producción combinada de hidrógeno y metano apoya el aumento de la producción de calor y electricidad en un 23% y 26%, respectivamente, en comparación con el proceso de una sola etapa con sólo la producción de metano. (Kvesitadze, G. y otros. 2012).

La digestión en condiciones termofílicas lleva a cabo una higienización del sustrato que puede ser utilizada para reducir la contaminación microbiológica en estos residuos. (Red Mexicana de Bioenergía. 2012) y concordante con la biología del proceso mostrada en la **Figura 7**.



Responsabilidad, Ciencia y Tecnología al Servicio de la Sostenibilidad



Fuente: Kepler, 2014

**Figura 7. Biología del Proceso**

Otros investigadores como Madigan, Martinko, & Parker, 2001; mencionados por Jiménez D. 2012; concuerdan con la producción biológica de metano CH<sub>4</sub> afirmando que se produce por la descarboxilación del acetato y la metanización del anhídrido carbónico e hidrógeno por medio de las bacterias metanogénicas, tales como: Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanothermus, Methanococcus, Methanomicrobium, Methanogenium, Methanosarcina, Methanobolus, Methanotherix, Methanopyrus, Methanocorpusculum y Methanobacillus. (King-ThomChung and VincentVarel. 1998)

**El metano es un componente básico del gas natural - un biocombustible. Sin embargo, cómo los metanógenos reducen el CO<sub>2</sub> para formar metano, ha desconcertado a los bioquímicos y microbiólogos durante mucho tiempo.** (King-ThomChung and VincentVarel. 1998).

La clasificación taxonómica de los metanógenos se muestra en el Anexo A. **Se han aislado e identificado 84 especies de metanógenos y las principales especies son:** Thiobacillusthiooxidans y Thiobacillusferrooxidans (Wang & Coautores, 2011), **aunque dos familias son las responsables de producir CH<sub>4</sub>, a mencionar acetoclástica (es la responsable de producirlo en un 70 %) y la hidrogenotrófica** (Massi, 2012). La formación de metano está limitada a los hábitats anóxicos.

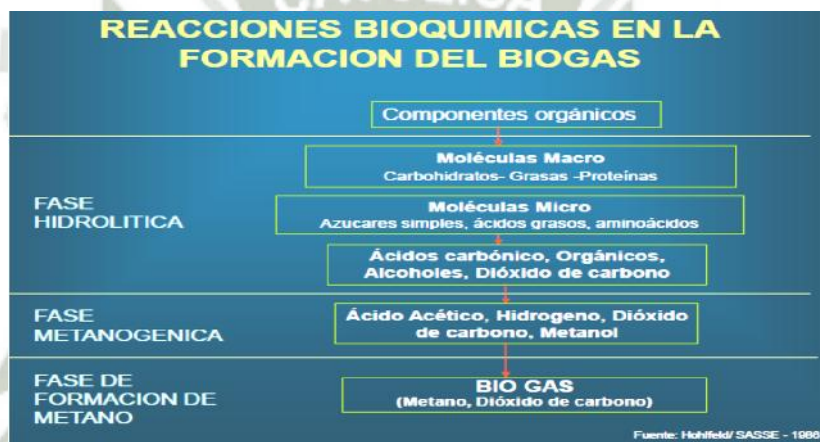
**El amoniaco favorece el crecimiento de las bacterias metanogénicas, por otro lado, en concentraciones altas puede ser tóxico para las mismas (convirtiéndose en un inhibidor).** El amoniaco puede estar presente de dos formas en el bioreactor, como amoniaco libre o ión amonio. Se ha reportado que el amoniaco libre inhibe más que el ión amonio; Sin embargo, la población

microbiana, tanto metanogénicas y no metanogénicas, coexiste en el biodigestor manteniendo un apropiado pH durante la fermentación. (Jiménez, D. 2012)

La población no metanogénicas beneficia a los metanógenos de la siguiente manera: **provee de sustratos para el crecimiento de los metanógenos y la producción de metano, mantienen un apropiado potencial de óxido-reducción, elimina sustancias tóxicas que inhiben el crecimiento y suprime la inhibición por retroalimentación** (Wang & Coautores, 2011).

El uso de co-cultivos de cepas de bacterias de celulolítica anaeróbica GCD7 y sacarolítica GSC2, ofrece el 97-99% de conversión de la celulosa y la hemicelulosa que figuran en el material celulósico pre-tratado y aseguran la utilización de los azúcares hexosa y pentosa. (Kvesitadze, G. y otros. 2012)

Como resultado, el rendimiento de hidrógeno y la velocidad de producción aumentan de manera significativa. (Kvesitadze, G. y otros. 2012).



**Figura8.** Reacciones Bioquímicas en la Formación del Biogás

Fuente: Infantes, Pablo. 2014

En términos de calor y electricidad de co-generación, el proceso de dos etapas con producción combinada de hidrógeno y metano apoya el aumento de la producción de calor y electricidad en un 23% y 26%, respectivamente, en comparación con el proceso de una sola etapa con sólo la producción de metano. (Kvesitadze, G. y otros. 2012).

La metanogénesis es una fase muy sensible para la producción de metano, dado que se deben tener las condiciones ambientales para el crecimiento específico de las bacterias metanogénicas. Ver **Figura8.**

### 2.6 Producción de biogás como opción para generar energía de la biomasa

Más adelante se mencionarán los parámetros del biodigestor como temperatura del biodigestor, pH, el potencial de óxido-reducción (Wang & Coautores, 2011), el sustrato, la relación Carbono/Nitrógeno o C/N, velocidad de carga de la materia prima, toxicidad, dilución, tiempo de retención hidráulica, mezclado, sólidos volátiles, relación de

alcalinidad (Chattopadhyay& Coautores, 2009), demanda química de oxígeno o DQO, la población microbiana, la cantidad y calidad del biogás.

**La digestión anaeróbica que resulta en la producción de biogás y fertilizantes es un método biotecnológico bien establecido** utilizado en la práctica desde hace más de un siglo para el tratamiento de las aguas residuales y los desechos orgánicos sólidos. **En los sistemas de biogás a gran escala, el bio-metano se utiliza para la producción de calor y electricidad.** (Kvesitadze, G. y otros. 2012)

En la actualidad, más de 1300 proveedores suministran sistemas que operan en todo el mundo haciendo el tratamiento de lodos de depuradora en sistemas digestores anaerobios. **Catorce plantas de aguas residuales en la ciudad de Nueva York generan 10.2 billones de metros cúbicos de metano al año. En Europa más de 125 plantas de biogás reprocessan el estiércol de ganado y la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales** (por separado o en combinación) producen anualmente billones de metros cúbicos de bio-metano que se utiliza para la cogeneración de calor y electricidad. (Kvesitadze, G. y otros. 2012)

Este combustible de alto volumen permite satisfacer las necesidades energéticas de la planta y deja un excedente de energía que puede ser vendido posteriormente. **El residuo estabilizado se distribuye a los agricultores, vinculado a las plantas de biogás centralizadas como el acondicionamiento del suelo y la fertilización.**(Kvesitadze, G. y otros. 2012).

A partir de biomasa **se puede obtener calor, energía (electricidad) y/o combustible.** El rendimiento del biogás, así como la proporción de cada compuesto, depende de diversos factores, como: la composición y biodegradabilidad de la materia orgánica, población microbiana, temperatura y pH; cuya composición se muestra en el **Cuadro 13**; mencionado por Jiménez, D.2012.

**Cuadro 13.** Composición del biogás

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 80
Anhidro carbónico (CO <sub>2</sub> )	20 a 50
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	< 1
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	< 1
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	< 1
Sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S)	< 1

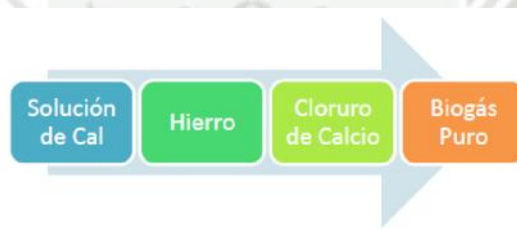
Fuente: Jiménez D. 2012

El contenido de energía de 1m<sup>3</sup> de biogás (60% de CH<sub>4</sub> y 40% de CO<sub>2</sub>) es aproximadamente 6 kWh. Esta energía puede ser almacenada en diferentes formas: gas a baja presión, media o alta, agua caliente o energía eléctrica. Sarria, C. A. (2014)

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. **El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión**, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido. Sarria, C. A. (2014)

El **biogás impuro** contiene: metano (50 a 70%) y anhídrido carbónico (25 a 50%). **Para poder emplearlo en un motor de combustión interna es necesario que se tenga una concentración de metano de 97 a 99 %** y de anhídrido carbónico de 1 a 3 %, por lo que resulta necesario purificarlo. **El biogás es conducido a un tanque donde tendrá contacto con una solución de cal, con el fin de remover el anhídrido carbónico. Posteriormente, se conduce a otro tanque donde tiene contacto con limadura de hierro, con el propósito de eliminar el sulfuro de hidrógeno.**

**Por último, pasa a través de cloruro de calcio para reducir el contenido de agua.** Teniendo el biogás puro se puede utilizar en donde se tengan necesidades energéticas, ya sean de índole térmica, eléctrica o mecánica. (Jiménez, D. 2012); como se aprecia en la **Figura 9**



**Figura 9.** Proceso de purificación del biogás

Fuente: Hossain& Islam, 2008 mencionados por Jiménez., D. 2012

## 2.7 Estimación de Producción de Biogás

Para estimar la producción de biogás se tiene la siguiente fórmula (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, & ECOFYS, 2005), mencionado por (Jiménez, D. 2012):

$$E_{PB} = S \times MS \times MOS \times Max_R$$

Donde:

- $E_{PB}$  = Estimación de la producción de biogás (m<sup>3</sup>)
- $S$  = Es la cantidad de materia prima (Ton)
- $MS$  = Materia seca en la materia prima (%)
- $MOS$  = Materia orgánica seca en la materia prima (%)
- $Max_R$  = Producción máxima específica de biogás (m<sup>3</sup>/Ton de MOS)

El biogás producido se puede utilizar en forma: **calor, motores de ignición de gas, electricidad, turbinas de gas y combustible de un automóvil. Países como Bangladesh, China, India, Nepal, Ruanda, Sri Lanka y Vietnam, lo utilizan para la cocción de sus alimentos. Para el 2020, se predice que el mayor volumen de producción de biogás será a partir de granjas y de los sistemas de co-generación, entre el sector agrícola y el procesamiento de alimentos (Abbasi& Colaboradores, 2012).**

La problemática de no utilizar el biogás es que el **potencial global de calentamiento del CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O es 21 y 310**, respectivamente, veces más alto que el de CO<sub>2</sub>, respectivamente. La eficiencia de conversión de biomasa a electricidad es del 8 al 16 %. (Jiménez, D. 2012).

## 2.8 El Biodigestor

Una definición sencilla puede ser la enunciada por Jiménez, D. 2012; cuando dice que **el biodigestor es un tanque cerrado - que depende de la tecnología - donde se lleva a cabo la fermentación anaeróbica de la materia orgánica**, como, por ejemplo: desechos agrícolas, agroindustriales y forestales, aguas residuales urbanas e industriales, residuos sólidos urbanos y el estiércol de animales; **y como consecuencia posteriormente, se produce el biogás.**

El biodigestor anaerobio se empezó a conocer a finales del siglo XIX; como se observa en el **Cuadro 14** sobre la Cronología del desarrollo del biodigestor anaerobio.

**Cuadro 14.** Cronología del desarrollo del biodigestor anaerobio

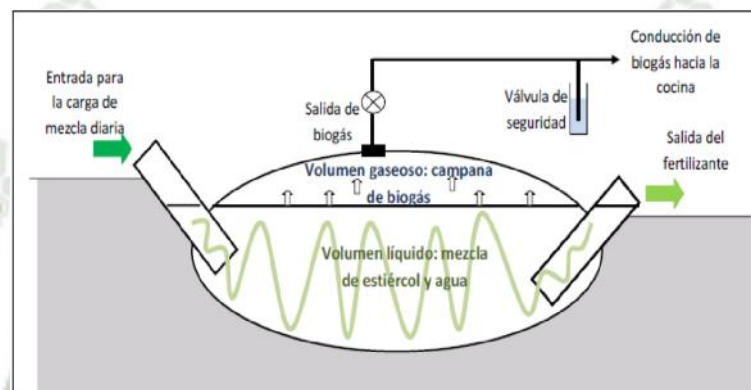
Año	Investigador / País	Aportación
1881	Mouras	Aplicó el biodigestor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, lo denominó "Automatic Scavenger"
1895	Cameron	Construyó un tanque similar al de Mouras pero con mejor eficiencia de tratamiento. Una parte del biogás se utilizaba para calor e iluminación.
1895-1969	Varios	Se desarrollo de tecnología para la estabilización de los lodos de las aguas residuales domésticas, como calentadores y mezcladores. Diseño de biodigestores para utilizar estiércol.
1944-1945	Alemania del Oeste	Surge la idea de utilizar desechos agrícolas como materia prima, así como desarrollar diferentes tipos de biodigestores
1950's	Francia	Instala más de 1,000 biodigestores anaerobios, desde tanques cubiertos hasta sistemas complejos
1960's	Canadá, EUA y Europa del Oeste	La principal materia prima para el biodigestor es el estiércol de animales
1967	¿?	Se introduce el concepto de Filtro Anaeróbico
1970's	Varios	Se aplica sistemas de biodigestión en tratamiento de aguas industriales, propiciado por el incremento del precio del petróleo

Fuente: Adaptada de Abbasi& Colaboradores, 2012.

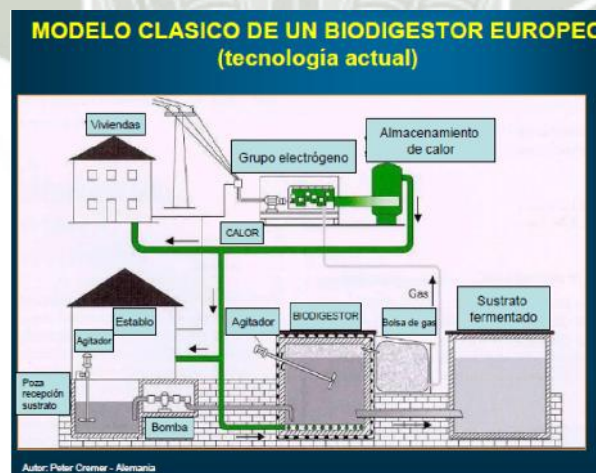
**Sus componentes básicos son: área de premezclado, digestor, sistema de captación de biogás y de distribución del efluente.** Este es considerado como la parte medular en un sistema de producción de biogás, (Wang & Coautores, 2011)

Las utilidades de los biodigestores presentan los siguientes beneficios: es una inversión económicamente atractiva, de fácil operación, su instalación es segura, se produce energía renovable, mejora las cualidades fertilizantes proveniente del estiércol y disminuye las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . (Jiménez, D.2012).

Apreciamos entonces en la **Figura 10**, el **esquema básico de un biodigestor** y el inicio de la conducción de biogás hacia la cocina extraídos de Martí, H. J. 2008; donde se muestra la entrada para la carga de la mezcla diaria del sustrato o materia a digerir, un volumen dentro de líquido (mezcla de estiércol y agua), encima un volumen gaseoso en la campana de biogás, salida del biogás, válvula de seguridad, y conducción del biogás hacia la cocina y/o quemador y finalmente una salida para los efluentes o fertilizante como se indica. Este proceso y uso de la bioenergía es utilizada comúnmente en Europa y especialmente en España y Alemania.



**Figura 10.** Esquema básico de un biodigestor y conducción de biogás hacia la cocina. Fuente: Martí, H. J. (2008). Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. *GTZ PROAGRO. CreativeCommons, Bolivia.*



**Figura. 11.** Modelo Clásico de un Biodigestor Europeo. (Tecnología actual). Fuente: Infantes, Pablo. 2014

Sin embargo, en la **Figura 11** un modelo clásico de un biodigestor europeo, (Tecnología actual); muestra la ubicación del establo y en él la poza de recepción del sustrato, luego con una bomba es enviado al biodigestor en el cual se

mantiene para el proceso con un agitador, de allí es llevada el biogás formado hacia una bolsa o contenedor de gas y por otra salida el sustrato fermentado o digerido hacia otro compartimiento.

El biogás logrado es llevado hacia un grupo electrógeno como combustible para generar energía eléctrica y calor del proceso; la energía es incorporada al sistema y/o redes de energía eléctrica de la ciudad y por otro lado el calor es almacenado para ser distribuido en viviendas, el establo y el biodigestor.

## 2.9. Tipos de Biodigestores.

Hay varios criterios para clasificar a los **biodigestores anaerobios**, una de ellas es **por su tecnología**. Por su tecnología se clasifican como: primera, segunda y tercera generación.



**Figura12.** Reactor Automático de 3.0 l (Cole-Parmer)  
Fuente: (Jiménez, D.2012)

En la **primera generación** comprende aquellos procesos en donde la biomasa se encuentra en suspensión, en la **segunda** los microorganismos son retenidos en el reactor o por las propiedades de sedimentación que posee y en la **tercera**, al igual que en la segunda, los microorganismos se encuentran en forma de biopelícula.

El **proceso continuo es el que se utiliza normalmente a nivel mundial**, dada las ventajas que se tiene de operarlo. Investigadores, han utilizado diferentes sistemas de fermentación experimentalmente para obtener biogás como el **reactor con control automático el (Cole Parmer Fermentation Systems KH-29207-00 110VAC)** de 3 litros, que se muestra en la **Figura 12**.

Otros **Reactores de botellón de 2.6 litros** mostrados en funcionamiento en la **Figura 13**. En tanto que Jiménez, D. 2012; **realizo su investigación probando la eficiencia de biodigestores en México e indica que un biodigestor anaerobio que utilizo, está compuesto de un tinaco con una capacidad de 1,100 litros con un diámetro de 1.10 m, una altura de 1.39 m.**



**Figura13.** Reactores de botellón de 2.6 litros en funcionamiento  
Fuente: (Jiménez, D.2012)

Todos los aditamentos se realizaron en PVC; cómo se observa en la **Figura 14**. Se estima que el tiempo de vida del biodigestor sea de 20 años. Actualmente, se está utilizando en las comunidades rurales del estado de Chiapas para la cocción de sus alimentos. El **sistema de captación del biogás** lo compone la bolsa de captación y el filtro de H<sub>2</sub>S. Para la bolsa de captación se utilizó una de cámara de llanta perfectamente sellada.



**Figura. 14**Biodigestor anaerobio

**Nota:** Entrada de materia fecal (1), Salida de lodos digeridos (2), Salida de biogás (3), Válvula para toma de muestra (4), Ducto del Termopar (5) y Agitador de seis aletas (6)

Fuente: (Jiménez, D. 2012)



**Figura 15.** Bolsa de captación de biogás

Fuente: (Jiménez, D. 2012)

En la **figura 15** se muestra la bolsa utilizada. El filtro de  $H_2S$  está hecho de PVC y es un lecho empacado de rebaba de hierro; el mismo que en la **Figura 16** se muestra.



**Figura. 16** Filtro de  $H_2S$

Fuente: (Jiménez, D. 2012)

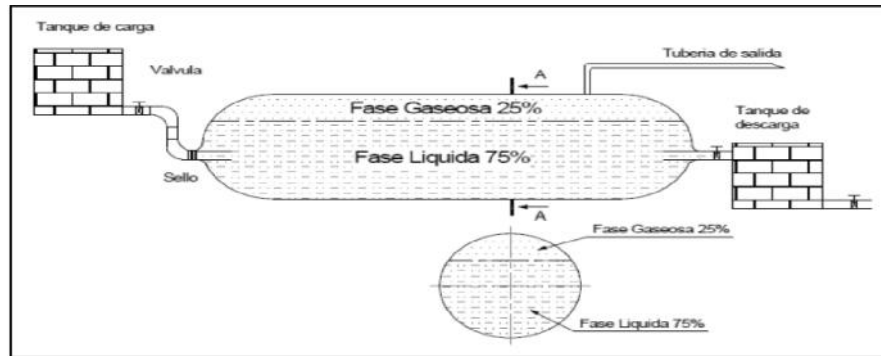
En la **Figura 17** se muestra el biodigestor utilizado por Infantes, Pablo. 2014, **nótese las paredes con sistema de calefacción y homogenizadores y/o agitadores; facilitando la expresión de las bacterias metanogénicas.**



**Figura17.** Biodigestor, interior con sistema de calefacción y homogenizadores.

Fuente: Infantes, Pablo. 2014

En la Comunidad de Tembo, Chimborazo, Ecuador, Criollo Q., Carmen y Guzmán G., Adriana C. 2014, estudiaron y elaboraron un **biodigestor piloto tubular** para la producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno, en una vivienda de la comunidad de Tembo, como se puede apreciar el esquema general en la **Figura 18**.



**Figura 18.** Esquema general de un biodigestor tubular en Ecuador.

Fuente: Criollo Q., Carmen y Guzmán G., Adriana C. 2014

Este **biodigestor piloto tubular** se construyó para tratar las aguas residuales eliminadas durante el lavado del establo en la granja Juan Lunardi de la **Universidad Politécnica Salesiana** localizada a 2100msnm a una temperatura de **19°C**, otro proyecto de construcción del biodigestor tubular lo realizaron estudiantes de la ESPE en la hacienda San Antonio del IASA II ubicada en la vía aQuevedo en Sto. Domingo, en ambos trabajos se utilizó desechos de animales presentes en las granjas y el agua residual generada; **dentro de sus componentes podemos mencionar los siguientes: tanque de digestión, tanque de biogás, tubería de entrada y salida del sustrato, tubería de salida del biogás, válvula de seguridad, purificador del biogás y zanja para el biodigestor;** como se puede ver en diferentes fases de su implementación en la **Figura 19**.



FOTOGRAFIA 8 ACOLCHONAMIENTO CON PAJA DE LA ZANJA FOTOGRAFIA 7 ACOLCHONAMIENTO CON ASERRIN DE LA ZANJA



FOTOGRAFIA 11 UBICACIÓN CORRECTA DE LA TUBERÍA DE SALIDA DEL BIODIGESTOR.



FOTOGRAFÍA 23 BIODIGESTOR DÍA 16

FOTOGRAFÍA 24 BIODIGESTOR DÍA 19

**Figura 19.** Diferentes fases de su implementación - biodigester tubular en Ecuador

Fuente: Criollo Q., Carmen y Guzmán G., Adriana C. 2014

En tanto que Hansen Fernández, F. y otros. 2015, realizaron su investigación en un **digestor anaerobio de flujo continuo para la metanización de la materia orgánica y la producción de fertilizantes** da entender las condiciones y el rendimiento del proceso de digestión anaeróbica, a través de homogenización de la temperatura y el proceso de lodos, el digestor es de **forma tubular** y comprende una válvula de escape del biogás en la parte superior del digestor. Un extremo del digestor tiene una conexión de salida de lodos, agua y una llave que estanca al gas, es resistente a los elementos corrosivos de la digestión. El extremo opuesto del digestor tiene una entrada de fango, y una cremallera de agua y al gas, es resistente a los elementos corrosivos de la digestión. Dicho digestor comprende además en su base un sistema de gas-irrigación para el biogás de recirculación compuesto por un material polimérico resistentes a los elementos corrosivos de la digestión anaerobia.

### 2.9.1. Biodigester familiar.

Martí-Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymla, B. & Gamarra, A. (2014); presentan los resultados y las lecciones aprendidas de cuatro años y medio de **la implementación de biodigestores tubulares de bajo coste en Bolivia**. Los cuales son publicados con el nombre Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías apropiadas: Biodigestores en Bolivia: Lecciones aprendidas del proyecto EnDev -Bolivia 2007-2012. De esta mencionamos por ejemplo “Un biodigestor se **construye con plástico (polietileno tubular, geomembrana de PVC o de polietileno)**. Por lo demás, se utilizan tuberías de 6” para la entrada de estiércol y agua, como para la salida de biol. La conducción de biogás se hace con tubería de riego de ½” o ¾” y se utilizan accesorios comunes como llaves de esfera, codos, tees, etc.

**Todos los materiales suelen estar disponibles en el mercado interno de cada país.** El biodigester, al ser de plástico flexible, debe estar semi-enterrado en una zanja abierta en el suelo. En el altiplano, el biodigester debe estar bajo una

carpa solar para protegerlo del frío, e instalarlo con orientación de este a oeste. Herrero, J. M., y otros. 2014.

**“Los biodigestores familiares producen cerca de 700 litros de gas al día, suficientes para cocinar tres horas por jornada. Este gas, llamado biogás, se produce de forma natural dentro del biodigestor al fermentar el estiércol mezclado con agua. El biogás es muy parecido al gas que se encuentra en la garrafa y se puede emplear para cocinar, iluminar con lámparas, en campanas para calentar lechones, etc. Al cocinar con biogás se evita el humo que se desprende de los fogones y daña a la salud”.** Herrero, J. M., y otros. 2014.

**“Para utilizar un biodigestor es necesario tener suficientes animales como para recoger un balde diario de estiércol fresco (los grandes de pintura de 20 litros). Para facilitar la recogida de la bosta, es mejor que los animales duerman en el corral o establo cerca de la casa. Si los animales están sueltos y no se recogen a la noche, representa mayor trabajo reunir el estiércol. Es necesario también tener acceso al agua, de río, pozo, o naciente. Lo ideal es disponer de agua de pila, que funcione todo el año, porque diariamente se necesitan 60 litros para la carga. Si falta agua durante unas semanas, se puede mantener el biodigestor recirculando el biol, pero llevará más trabajo hacerlo funcionar”.** Herrero, J. M., y otros. 2014.

**“Se mejora la calidad de vida de las comunidades, primeramente, por cuestión de salud en mujeres y niños al poder cocinar sin humo. La producción y uso de fertilizante natural añade el valor agregado de ecológico a los productos, permitiendo incrementar los ingresos y aumentando la producción agropecuaria entre 30% a 50%, lo que repercute directamente en la economía obtenida por las familias. También el biol puede ser vendido por los campesinos como fertilizante orgánico generando otra forma de ingreso. Se pueden implementar biodigestores también en procesos industriales como lecherías, café, industrias de refrescos, mataderos y otros”.** Herrero, J. M. y otros. 2014.

**En muchos países en desarrollo, los digestores de biogás simples se utilizan para producir energía para uso doméstico de la digestión anaeróbica de estiércol animal. Desarrollamos un simple, unidimensional (1-D), el modelo térmico con los datos de entrada, de fácil acceso, para digestores no aislados, no agitadas, sin calefacción, de cúpula fija, enterrados en el suelo para estudiar la transferencia de calor entre el digestor de biogás y su entorno. Las temperaturas previstas en la cúpula, el biogás, y los purines en el interior del digestor y la producción de biogás resultante son presentados y validados. El modelo era muy capaz de estimar la temperatura del digestor (pendiente lineal casi 1,  $R^2 = 0,96$ ).**

El modelo se desempeñó satisfactoriamente a la luz de las incertidumbres que se le atribuye. **Desde digestores sin calefacción sufren producción críticamente bajo metano durante el invierno, el modelo podría ser particularmente útil para evaluar la producción de metano y para mejorar la capacidad de los digestores sin calefacción para proporcionar la energía suficiente durante los períodos fríos.** Terradas-III, G., Pham, C. H., Triolo, J. M., Martí-Herrero, J., & Sommer, S. G. (2014).

### 2.9.2. Biodigestor HPTC.

Dentro de los reactores y/o plantas de última generación se puede mencionar la **Planta experimental de Biogás de altas prestaciones y/o alta eficiencia y/o alto rendimiento**; Ver **Figuras 20, 21 y 22**; la cual llega al Perú, dentro del marco del Proyecto “develop PPP –PublicPrivatePartnerships” del Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung” (BMZ; Ministerio Alemán para Colaboraciones y Desarrollo Económico), cuyos fondos correspondientes gestiona la sociedad SequaGgmbh, Kepler, Ingeniería y Ecogestion ha desarrollado en las Instalaciones de la empresa Ecoalia/Biogasnalía ubicada en el P.I. de Villonquejar una Planta Experimental de Biogás de tamaño pequeño y de altas prestaciones y/o alto rendimiento. **Una vez finalizados los ensayos la planta será destinada para la formación de los estudiantes de la Universidad Católica Santa María de Arequipa/Perú. Kepler. 2014**

Diseñado en un sistema modular, Construido en 2 contenedores marítimos de 20' más una bolsa de biogás. Volumen del digestor de 30 m<sup>3</sup>. Reactores de hidrólisis de 3 m<sup>3</sup> cada uno sistema SONW LEOPARD. Autoconsumo inferior al 20% de la energía producida. Caldera de gas de 6 kW. y Almacén de biogás de 60 m<sup>3</sup>.

La Planta de Biogás de Altas Prestaciones (Alta Performance), **se ha diseñado para el procesamiento de residuos orgánicos con alto valor energético como son generalmente los residuos de cocina agroindustriales, ricos en grasas, proteínas y azúcares.** El óptimo procesamiento de estos residuos es posible gracias al proceso biológico desarrollada por la empresa alemana SNOW LEOPARD PROJECTS en el que **se separa la hidrolización y la metanización en dos unidades físicas distintas**



**Figura 20.** Equipamiento e instalación del biodigestor Empresa Ecoalia en Burgos – España donde se presentó el biodigestor que vino hacia Arequipa. (Instalando en dos contenedores).

Fuente: Kepler 2014



**Figura 21.** Fabrica Ecoalia en Burgos – España donde se presentó el biodigestor que vino hacia Arequipa. (Planta concluida en los contenedores)

Fuente: Kepler 2014



**Figura 22.** Bolsa para metano en la Planta de Biodigestion.

Fuente: Kepler 2014

Dentro de las características de su utilidad se mencionan: **Eliminación de casi todos los residuos orgánicos ahorrando costos de gestión. Reducción del tonelaje de los residuos orgánicos de hasta un 95%. Producción de gas metano. Producción de fertilizantes (sin olores, baja DQOt, etc.). Generación de energía eléctrica. Generación de energía térmica. Protección del medio ambiente y ahorro de CO<sub>2</sub>.**

Tiene como ventajas: Los cambios en la alimentación no producen problemas. **Hasta un 95 % de la Materia Orgánica se convierte en Biogás.** Producción variable según la disponibilidad de residuos. Producción variable según la demanda energética. **Bajo contenido de azufre en el Biogás.** Planta prefabricada.- Alto nivel de automatización. **Sistema modular que permite una fácil ampliación. Fertilizantes con bajo contenido de sólidos volátiles** (sin olor). Adaptable a las necesidades del cliente.

## 2.10. Los Parámetros del Biodigestor.

Se consideran **parámetros**: la temperatura del biodigestor, pH, el potencial de óxido-reducción (Wang & Coautores, 2011), el sustrato, la relación Carbono/Nitrógeno o C/N, velocidad de carga de la materia prima, toxicidad, dilución, tiempo de retención hidráulica, mezclado, sólidos volátiles, relación de alcalinidad (Chattopadhyay & Coautores, 2009), demanda química de oxígeno o DQO, la población microbiana, la cantidad y calidad del biogás, etc.

### 2.10.1. Tiempo de Residencia Hidráulico (HRT)

Es el tiempo que una fracción diferencial (indivisible) de fluido está dentro del volumen de reacción. Es el tiempo en el que el sustrato o reactivo está disponible en el reactor. En el caso de que únicamente haya reacción en el reactor, es el tiempo de la misma. (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009).

#### **Se ve afectado por: Volúmenes muertos y Cortocircuitos hidráulicos**

En la realidad se deben realizar estudios de TRH. Todo reactor real en el que este parámetro sea clave debe haber sido sometido a un estudio de Función de Distribución de Tiempo de Residencia. Mediante el cual se modifica el modelo de flujo ideal para acercarlo al real. (Chattopadhyay & Coautores, 2009)

El tiempo de retención hidráulica (HRT); Un importante parámetro para dimensionar el digestor de biogás es el tiempo de retención hidráulica (HTR), el HRT es el intervalo de tiempo promedio cuando el sustrato es puesto fuera del

tanque digester. El HRT es correlacionado al volumen del digester y al volumen del sustrato alimentado por unidad de tiempo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{HRT} = V_R / V$$

<b>HRT</b>	Tiempo de retención hidráulica (días)
<b>V<sub>R</sub></b>	Volumen del digester (m <sup>3</sup> )
<b>V</b>	Volumen del sustrato alimentado por unidad de tiempo (m <sup>3</sup> /d)

$$\text{TRH} = \frac{V_R}{Q_e}$$

De acuerdo a la heurística se recomiendan el siguiente tiempo de residencia en función del sustrato:

- Ensilado de maíz: 22-25 días.
- Estiércol: 10-12 días
- Paja: 40-60 días
- Cereales: 20-24 días
- Glicerina: 8-9 días

Depende de la calidad del sustrato y de la cantidad de materia biodegradable. Han de tenerse en cuenta también factores de proceso. (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009). En plantas de producción energéticaviene condicionado por la cinética de producción de biogás:

### 2.10.2. Tiempo de retención de sólidos

#### Edad de Lodos. Tiempo de retención de sólidos (TRS)

Es una medida de la edad del lodo. De difícil medición, se entiende como el tiempo que el lodo anaerobio activo está en el reactor. Tiene gran importancia en reactores donde hay problemas de lavado del mismo. (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009)

Considerando que la concentración de lodos en el interior del reactor es constante y que no entra biomasa anaerobia activa en la corriente de entrada, la ecuación se define de la siguiente manera. En el caso teórico de un grado de mezcla perfecta –modelo de flujo ideal-, el TRS es equivalente al TRH

$$\text{SRT} = \frac{V \cdot X}{Q \cdot X_e} = \text{HRT} \frac{X}{X_e}$$

### 2.10.3. Carga Orgánica Volumétrica

Carga Orgánica Volumétrica (COV,  $B_v$ , OLR) [ $\text{kgMSO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ]. It is expressed as  $\text{kg substrate/m}^3 \text{ reactor day}$ , is the amount of substrate introduced into the digester volume in a given time:

$$VCO = \frac{Q_e \cdot C_s}{V_R} = \frac{C_s}{TRH}$$

### 2.10.4. Temperatura del proceso

La heurística confirma la importancia de la temperatura, aproximadamente un incremento de  $10^\circ\text{C}$  en el proceso aumenta al doble la velocidad de los procesos. Rangos principales de funcionamiento condicionada por las necesidades de las poblaciones metanogénicas:

Psicrófilo:  $< 20^\circ\text{C}$

Mesófilo:  $25-42^\circ\text{C}$

Termófilo:  $>50^\circ\text{C}$

Normalmente se trabaja en rango mesófilo. Ecuación de diseño para Reactor Mezcla Perfecta (control, automatización y diseño) (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009).

### 2.10.5. pH. Acidez del medio.

Cada familia de microorganismo tiene unas condiciones óptimas determinadas. En sistemas de una etapa el pH está determinado por los microorganismos más sensibles:

las metanogénicas

En teoría:  $6,8 - 7,8$

En la práctica:  $7,3 - 8,0$

No sirve como parámetro de seguimiento del proceso. Siempre avisa cuando ya es demasiado tarde, pues es un parámetro con mucha inercia. (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009).

### 2.10.6. Capacidad Tampón

Carbonato: tampona el medio entre valores de pH de  $6,2$  y  $8,6$ .

Fosfatos: mantiene el pH entre  $5,4$  y  $7,8$ .

Amonio: para valores de pH entre  $8,2$  y  $10,2$ .

Medición en términos de alcalinidad total.

Equivalentes de  $\text{CaCO}_3$ . (Wang & Coautores, 2011) y (Chattopadhyay & Coautores, 2009).

### 2.10.7. Diseño

En el diseño se han de dimensionar unos equipos que permitan:

1. Trabajar a un TRH aceptable.
2. Someter al reactor a una OLR que pueda aguantar
  - Evitar acidificación
  - Estudio de alcalinidad
3. Obtener una producción y rendimiento de biogás óptimo.
  - Condiciones ambientales del proceso dentro de rango: temperatura, pH, etc.
4. Balance de materia y energía deben conllevar un balance económico positivo.
  - TIR, VAN y Periodo de retorno aceptables.

#### Consecuencias de un mal diseño.

Ejemplo: dimensionar unos equipos con un TRH demasiado corto.

- No se obtiene todo el biogás posible del sustrato –pérdida de rentabilidad.
- El digestato aún contiene materia orgánica y patógenos. Contaminación y olor.
- Lavado de biomasa.
- Carga orgánica muy elevada –acidificación del proceso. Inhibición parcial o total.
- Perturbaciones externas tienen gran efecto en el proceso.
- Coste de calefacción –necesidad de mayor potencia con un menor rendimiento energético.
- Otros.

El intervalo de **temperatura óptimo** para el crecimiento de los metanógenos y la producción de biogás es de 25 a 30 °C. El intervalo **de pH óptimo** para el crecimiento de los metanógenos es de 6.8 a 7.5, **el cual tiene influencia en la actividad enzimática**. El intervalo **óptimo del potencial de óxido-reducción** es inferior de 350 mV.

Para el caso del **sustrato** se debe tener en cuenta la disponibilidad de él. La **C/N** que se recomienda es de 25 a 30:1, aunque ha habido una gran contradicción por los diferentes sustratos que se pueden utilizar (Chattopadhyay & Coautores,

2009). El contenido **máximo de sólidos volátiles** es de 8 % y el **TRH**, para el caso de biodigestores tipo discontinuo, de 8 semanas.

Con algunas diferencias, pero en otro contexto Regalado Y., Diego R. 2009; utiliza el reactor para tratamiento convencional ya que permite **analizar una serie de parámetros** de control de operación, como son: temperatura, agitación, pH, tiempo de residencia hidráulico, volumen de alimentación, carga orgánica, consumo de solución amortiguadora, sólidos totales, sólidos orgánicos totales, generación de biogás y volumen de líquido digerido (biol) extraído del reactor.

Nosotros **proponemos como parámetros a evaluar** en consideración a optimizar la generación de biogás los siguientes: **tiempo de residencia hidráulica - TRH, sólidos orgánicos, sólidos totales, materia seca y temperatura; En relación al biogás y efluentes obtenidos determinar: contenido de Biogás por unidad de sustrato. (m<sup>3</sup> biogás / k de sustrato), evaluación de sustratos y el volumen de producción de Biogás y energéticos, calidad del Biogás. (contenido de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.), evaluación energética del Biogás, características de los efluentes, sólidos (Biosol – NPK) y líquidos (Biol – Giberelinas, Ac. Giberelico, Auxinas, etc.).**

Otros investigadores indican que para saber lo que está ocurriendo en el biodigestor, **es necesario medir sus parámetros**. La elección de los parámetros a medir por Jiménez, D. 2012, se debió, en gran medida, al equipo que se tuvo en ese momento para realizar y la implementación de los equipos en el biodigestor; eligiendo los siguientes parámetros: composición del biogás, DQO, pH, radiación solar y temperatura del biodigestor y del medio ambiente. El **Cuadro 15** muestra los criterios de la selección de los parámetros.

**Los resultados cromatográficos de la composición del biogás reportan un 59.34 % en volumen de gas metano y un 30.95 % de bióxido de carbono.** En base a los resultados obtenidos se concluye que el uso de biodigestores anaerobios a diferentes escalas **tiene resultados benéficos como el aprovechamiento del poder calorífico del biogás, el uso del efluente líquido como fertilizante foliar y la parte mineral como mejorador de suelos.** Olivier, J. A. S., & Canepa, J. R. L. (2014)

Se recomienda la difusión técnica del biodigestor, para que sea conocida y comprendida por toda la población, en especial la rural. Telenchano, P., & Indalicia, F. (2014)

**Cuadro 15** Criterios de la selección de los parámetros

Parámetro	Criterios
DQO	Mostrará el oxígeno equivalente al contenido de la materia orgánica
pH	Se notará si el biodigestor se encuentra dentro de las condiciones óptimas de crecimiento de las bacterias metanogénicas, además de que éste tiene influencia en la actividad enzimática
Radiación solar	Dado que el biodigestor, en su parte externa, es de color negro se le puede considerar como un cuerpo negro y absorber la radiación, lo que conlleva a que puede aumentar la temperatura en el biodigestor
Temperatura del medio ambiente	Dado que la temperatura del medio ambiente es consecuencia de la radiación solar, se notará si existe relación con la temperatura del biodigestor
Temperatura del Biodigestor	Denotará si la temperatura se encontrará dentro de los intervalos de crecimiento de las bacterias metanogénicas

Fuente: Jiménez, D. 2012

Con estos resultados es factible plantear la implementación de tecnologías de manejo de residuos sólidos en centros pecuarios para la generación de energías renovables. (Fernández-Romero, V., Rodríguez-Achata, L., & Aquino-Acharte, N.2014)

### 2.11. Potencialidades

Si bien, los potenciales también son grandes en otros sectores. En las instalaciones depuradoras de agua se generan grandes cantidades de lodos deshidratados que no se utilizan, los cuales también son un recurso para las plantas de biogás. Aun cuando en estas instalaciones se produce, en parte, una fermentación, el gas generado o bien se quema incontroladamente o se deriva a la atmósfera como gas nocivo. El **sector agrario brasileño también deja sustratos sin utilizar**. Por lo tanto, la densidad de plantas de biogás también es aquí muy baja. En los años 80, en la región porcina del sur había unas 2.500 lagunas cubiertas de lámina para la fermentación de estiércol, de las que actualmente sólo quedan unas 20 plantas. Si esto se extiende a la superficie del país, el potencial total es enormemente grande. Reportaje. 2014

Al mismo tiempo, **con la planta de biogás se mejora la gestión del nitrógeno**, que normalmente condiciona la producción en la agricultura ecológica. También en las explotaciones no ganaderas, la cantidad de nitrógeno, que procede de las leguminosas y los cultivos intercalados, resulta suficiente. Sin embargo, la disponibilidad del nitrógeno no coincide ni en lugar ni en tiempo con su demanda. Para que el nitrógeno sea utilizado de forma efectiva, debe ser repartido entre los diferentes cultivos utilizados en la rotación de cultivos [5]. **Con la explotación de una planta de biogás se consigue una acumulación de fertilizantes**. Con la utilización del digestato se abre la posibilidad de abonar cuando se requieren

nutrientes. El nitrógeno puede ser aportado cuando sea necesario para el crecimiento de las plantas. Danner Walter. David Kilian. 2012

La integración de plantas de biogás en explotaciones agropecuarias, industriales alimentarias y de gestión de residuos orgánicos **permite crear una economía de ciclo cerrado, neutro en cuanto al balance de las emisiones de CO<sub>2</sub>, en la que se recuperan y reutilizan los fertilizantes nitrogenados, fosfatados, potásicos y los micronutrientes, además se genera un exceso de energía renovable que puede ser vendida a otros consumidores.** Se aumenta la viabilidad económica de las zonas rurales. Se generan puestos de trabajo y riqueza a nivel local. En lugar de simplemente gestionar residuos orgánicos, se produce energía y se utilizan los nutrientes en concordancia con una economía de ciclo cerrado. Kepler. 2014.

Buschmann, Jeannette und Prof. Dr. Busch Günter. 2011; estudian en Alemania en relación a la Eficiencia Energética. Mejoras en la eficiencia de la fermentación de doble etapa. Procesos por disminución de las pérdidas de energía en hidrólisis. El **objetivo de este artículo es el proceso de fermentación de dos etapas, que a menudo tienen al lado a su mayor rendimiento en los procesos convencionales para el déficit de producción de biogás en las economías emergentes, las pérdidas de energía. Además, un método para la inactivación de microorganismos metanogénicas se determinó en la hidrólisis y probado para el sistema de dos etapas.**

Sin embargo una opinión discordante también existe, como la de Contreras, L. (2006) en la provincia de Sancti Spíritus - Cuba, en su artículo sobre la producción de biogás con fines energéticos – de lo histórico a lo estratégico; deja entrever que fueron en su experiencia **numerosos los factores que incidieron en el fracaso de estas plantas en la provincia y de forma general en el fracaso de las tecnologías de producción de biogás en el país**, los cuales pudieron ser recopilados a partir de las entrevistas realizadas y del análisis y discusión de las diferentes ponencias presentadas en el X Taller Nacional de Biogás, realizado en el año 2006 en la provincia de Sancti Spíritus - Cuba, encontrándose dentro de los fundamentales los siguientes: Los conceptos energéticos prevalecieron por encima de las posibilidades de tratar un residual y de la posibilidad de obtener un biofertilizante de alta calidad. No se realizó un análisis en sistema de las plantas por los usuarios y promotores; **no se tuvieron en cuenta las ventajas del tratamiento del residual y el alto valor agregado del fertilizante.** Contreras, L. (2006)

En un último reporte y en contraposición a lo opinado por Contreras, L. (2006); también en Cuba Sosa, R., Díaz, Y. M., Cruz, T., & de la Fuente, J. L. (2014);

presentan los avances más recientes del Centro de Promoción y Desarrollo del Biogás (CPDB) acerca del uso, diversificación y perspectivas de la digestión anaerobia en la porcicultura cubana. **Entre los resultados alcanzados se muestra la generación de electricidad a partir del biogás, el desarrollo de biodigestores de cúpula fija y los tubulares, el sistema biodigestor/lecho de secado y la caracterización del biogás producido en Cuba, no solo con aguas residuales sino con residuos que contienen alto contenido de grasa animal.**

Ante la problemática del manejo y gestión de los estiércoles y lixiviados, las medidas de mitigación y adaptación que tienen coherencia con el contexto estatal y deben anticiparse a los costos ambientales, y estos son: **En los sistemas de pastoreo libre y controlado, fortalecer la rotación de los potreros, regular la población animal de acuerdo con la disponibilidad de tierras, regular la actividad en áreas con sobrepastoreo y pendiente pronunciada,** capacitar a los productores en la producción de abonos orgánicos y control del fuego. Pellat, F. P., y otros. 2013

En los sistemas de manejo intensivo y extensivo **se requiere apoyar la adquisición de tecnología para la gestión de los estiércoles y los lixiviados, y dado que la fermentación entérica es la fuente de emisión más importante de metano,** es necesario supervisar los contenidos y los efectos de los alimentos balanceados, hormonas y otras tecnologías, promover alimentos de rápida digestibilidad y contenido energético moderado, así como generar la normatividad específica que refuerce el desempeño ambiental del sector pecuario. Pellat, F. P., y otros. 2013

En Nicaragua, para contribuir a la difusión de las características y ventajas del programa se lanzó una campaña de información con el eslogan **“Biogás: energía para prosperar”** en los cinco departamentos, utilizando un spot televisivo y cuatro cuñas radiales. **Los anuncios presentan a agricultores locales que explican los productos y servicios de biogás y cómo estos permiten convertir los residuos agrícolas en gas metano que pueden utilizar para satisfacer sus necesidades energéticas”.** Solidaridad, A. (2014)

### 3. Análisis de Antecedentes de Investigación.

#### 3.1. Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaeróbico Tipo Continuo. Jiménez, Diego de la Merced. México - 2012. Universidad Veracruzana. México

En México – Veracruz; El ***biodigestor anaerobio*** es un sistema de producción de biogás a partir de materia orgánica. Este biodigestor se diseñó para instalarse en

las comunidades rurales, con el fin de producir biogás para la cocción de sus alimentos; por lo que no existen datos de los parámetros y variables. Se realizó la evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo, alimentado con estiércol de vaca y agua. **Se realizaron tres corridas de experimentación.** En la primera, segunda y tercera corrida se midió la temperatura del biodigestor y la temperatura del medio ambiente. En la tercera corrida, además, se midió el pH, DQO y la radiación solar. La dilución de la materia orgánica en la primera y segunda corrida fue de 2:1 y en la tercera 3:1. La temperatura de operación del biodigestor (21 – 40 °C), el pH (7.06 – 7.22) y la DQO (290 ppm) estuvieron dentro de las condiciones óptimas de crecimiento de las bacterias metanogénicas. Se observó que la radiación solar y la temperatura del medio ambiente no influyen en las condiciones de operación del biodigestor.

### **3.2. Estudio de la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico Utilizando Desechos Orgánicos. Regalado Yepes, Diego Andrés. Ecuador Quito - 2009.**

Este estudio de generación de biogás y fertilizante orgánico utilizando desechos orgánicos **utiliza la tecnología de la descomposición anaeróbica de compuestos orgánicos a baja concentración** en el tratamiento de desechos orgánicos sólidos generados en el sector agrícola. Para realizar este tratamiento **se diluye los desechos orgánicos en agua y se opera el reactor en fase líquida bajo condiciones anaeróbicas.** En la primera parte del estudio se analiza los parámetros de control **en un reactor automático de escala laboratorio.** Este reactor se opera por el lapso de cuatro meses con el fin de describir el comportamiento de un reactor anaeróbico convencional en sus fases de llenado, arranque, estabilización y optimización. En la segunda parte del estudio se compara la capacidad de generación de biogás y la capacidad de estabilización de desechos orgánicos, **en reactores tipo botellón**, para diferentes mezclas de desechos. **En las mezclas se utiliza una proporción definida de desechos orgánicos con estiércol vacuno.** En estos reactores se compara la capacidad de generación de biogás y estabilización de desechos orgánicos entre reactores que se alimentan con estiércol de aves versus un reactor que se alimenta con estiércol vacuno. En el reactor automático se consiguió generar 120 l de biogás para una carga total de 0.24 kg de DQO en la alimentación. Lo que equivale a una generación de 0.30 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg DQO alimentado por día. Para los reactores de botellón, el desecho de codorniz y el de gallina generaron 735 atm (50 psi) y el desecho de vaca generó únicamente 220 atm (15 psi).

### **3.3. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Cendales Ladino, Edwin Darío. Colombia – Bogotá - 2011.**

En esta investigación se llevó a cabo el montaje de los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica de la **mezcla homogeneizada de estiércol bovino y residuos cítricos**. Durante el desarrollo de la etapa experimental se realizaron mediciones periódicas de las **variables de control tales como pH, alcalinidad, demanda química de oxígeno (total y soluble)**, entre otras, con el fin **deestablecer los parámetros de desempeño del proceso**. Adicionalmente se realizó la simulación del proceso de digestión anaeróbica bajo condiciones similares a las establecidas durante los ensayos experimentales, mediante la implementación del modelo ADM-1. Con base en los resultados obtenidos mediante las mediciones experimentales y las simulaciones, se evaluó la precisión del modelo respecto a los valores de las mediciones experimentales. Finalmente se implementó un modelo simplificado para la evaluación de la energía producida por una instalación a escala piloto que realiza el tratamiento anaeróbico del residuo orgánico bajo estudio.

#### **3.4. Determinación del Tiempo de Retención en un Reactor Anaeróbico para Optimizar la Generación de Biogás a partir de la Digestión de Barros Activados Residuales. H. Campaña, P. Benedetti, A. Airasca, S. Fiotto. Argentina - 2011.**

En este trabajo se **determinó el tiempo de retención hidráulica en un reactor anaeróbico para optimizar la generación de biogás durante la digestión de barros activados residuales**. Se realizaron mediciones en reactores a escala de laboratorio para seguir la evolución del pH, DQO, sólidos, y biogás, manteniendo controlada la temperatura en un rango de 20 a 25°C. Los reactores se cargaron por única vez con 21,83 gSV/l equivalentes a 0,14 gSV/l.d. **El tiempo de retención hidráulica óptimo fue de 50 días obteniendo una tasa de producción de biogás de 70 ml/l.d (0,085 l/gSV)**. Luego de 80 días de retención hidráulica las remociones de DQO total y soluble y sólidos volátiles fueron del 25%, 45% y 21% respectivamente.

#### **3.5. Simulación Matemática de un Digestor Anaerobio Tipo Tanque Agitado para el Tratamiento de Vertidos Residuales. Del Real Olvera, Jorge; Prieto García, Francisco; Santos López, Eva María; Román Gutiérrez, Alma Delia y Gordillo Martínez, Alberto José. México - 2009.**

En los últimos años, el modelado matemático ha sido empleado para tratar de representar los cambios químicos que ocurren en el ambiente. Tradicionalmente los modelos se fundamentan en los balances de materia y la cinética química de los bioprocesos. **En este estudio se aplican y simulan las ecuaciones obtenidas para un reactor biológico isotérmico tipo tanque agitado mediante ecuaciones lineales a dimensionales en estado semi-estacionario.**

Para darle validez a los resultados derivados de la solución analítica, estos se comparan con los resultados experimentalmente obtenidos a nivel laboratorio para un digestor metanogénico en el régimen mesofílico de temperatura y en donde se trataron los vertidos residuales provenientes de una industria alcoholera bajo diferentes condiciones de operación, empleando como consorcio microbiano fluido ruminal vacuno. Los resultados del modelo concuerdan favorablemente bien con la producción de biogás y la disminución de la carga orgánica (expresada como DQO), teniendo un factor de ajuste promedio para ambos casos de  $R_2=0.9960$  y una variación del 0.01601, cuando se propone una cinética de reacción de primer orden y empleando en el medio células libres. Además, que dicho modelo es capaz de predecir cuándo el sistema alcanza el estado estacionario.

### **3.6. Estimación de las Emisiones de Metano producidas por la Gestión del estiércol proveniente de Sistemas de Producción de vacunos de leche. Irrigación Majes Arequipa – 2013. Reátegui Ordoñez, Juan Eduardo. 2014. Arequipa – Perú.**

Se diseñó un estudio para determinar la emisión de metano, originado por la gestión del estiércol en vacunos lecheros en dos sistemas de producción y alimentación en la Irrigación Majes – Arequipa. Para tal efecto se procesó y analizó información colectada de 24 establos de la Irrigación Majes diferenciados por sistema de producción; dicha información correspondió a las características de manejo, composición de la dieta e indicadores productivos de los animales bajo estudio. Se estimó la emisión de metano producida por la gestión de estiércol con las ecuaciones provistas por el IPCC mediante la metodología del Nivel 2 (Tier 2) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), entidad oficial que regula e informa periódicamente las metodologías a nivel mundial para estimar la emisión de gases de efecto invernadero.

Para el análisis de la información se aplicó un diseño completamente aleatorizado a una probabilidad del 95%, utilizando el programa SAS V 9.0 (SAS, 2002). Con relación a los resultados hallados, se encontró que la tasa de excreción, digestibilidad y energía bruta proveniente de la gestión del estiércol **por el sistema intensivo** fue de  $5.78 \pm 0.78$ ,  $70.45 \pm 2.30$  y  $361.41 \pm 42.05$  MJ/día, respectivamente, **indicadores principales que originaron una emisión de CH<sub>4</sub> de  $0.99 \pm 0.13$  kg CH<sub>4</sub>/animal/año**. La tasa de excreción, digestibilidad y energía bruta proveniente de la gestión del estiércol **por el sistema semi-intensivo** fue de  $6.78 \pm 0.89$ ,  $63.13 \pm 2.30$  y  $338.80 \pm 35.95$  MJ/día, respectivamente, **indicadores principales que originaron una emisión de CH<sub>4</sub> de  $1.16 \pm 0.15$  kg CH<sub>4</sub>/animal/año**.

Comparativamente la gestión del estiércol bajo condiciones de la Irrigación Majes, varía significativamente ( $P < 0.05$ ), influenciado por el sistema de producción,  $0.99 \pm 0.13$  kg  $\text{CH}_4$ /animal/año y  $1.16 \pm 0.15$  kg  $\text{CH}_4$ /animal/año; para el sistema intensivo y semi intensivo, respectivamente. Estos resultados habrían sido regulados por la calidad de la dieta, principalmente en términos de proteína cruda y la digestibilidad de la dieta que habría previsto la formación de bacterias metanogénicas en el estiércol, así como la disposición de las excretas en cada sistema, bajo condiciones de la Irrigación Majes.

**3.7. Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno. 2015. Carlin Santana, Ronnie Enrique. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Ingeniería en Ambiente y Desarrollo. Zamorano. Honduras. Noviembre, 2015.**

La generación de residuos de alimentos y su incorrecta disposición representa un problema de interés social debido a las afecciones ambientales que este tipo de desechos puede causar. La digestión anaerobia ha demostrado ser una alternativa efectiva de manejo de residuos de alimentos. Esta tecnología reduce la contaminación ambiental, genera compuestos que pueden mejorar la fertilidad del suelo y propicia la producción de energías renovables que pueden ser integradas en sistemas productivos. Este estudio evaluó el potencial de generación de energía eléctrica producida por mezclas de residuos de alimentos (RA) y estiércol vacuno (E), en comparación con la digestión individual de estos sustratos. Los resultados indicaron que los mayores rendimientos de metano se obtuvieron del tratamiento RA (100) produciendo  $0.47 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$  y del tratamiento E:RA (30:70) con  $0.43 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$ . A pesar de que E (100) fue el tratamiento de menor rendimiento ( $0.28 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ ), su producción de metano y potencial de generación de energía eléctrica es superior a los demás tratamientos, debido a que la disponibilidad de estiércol es 21 veces mayor a la disponibilidad de residuos de alimentos. Este escenario representa una alternativa viable de implementación y su producción de energía podría cubrir la demanda energética de la Unidad de Ganado Lechero de Zamorano. Además, este escenario evitaría la emisión mensual de 63 toneladas de  $\text{CO}_2$  producidas por la descomposición del estiércol.

**3.8. Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano. 2013. López González, Anneliese y De Arco Castillo, Francisco Emanuel. Escuela Agrícola Panamericana, Ingeniería en Ambiente y Desarrollo Zamorano. Zamorano, Honduras. Noviembre, 2013.**

En el presente estudio se evaluó el potencial energético de las aguas residuales en la sala de sacrificio de la planta de cárnicos de Zamorano, con el fin de proponer la instalación de un biodigestor en las nuevas instalaciones. Las aguas residuales de esta área en su gran mayoría están compuestas por sangre y

residuos orgánicos como piel, pequeños trozos de órganos y pelos. Para conocer el potencial energético de estas aguas se determinó el índice de producción de metano y el volumen de biogás producido por cada m<sup>3</sup> de reactor, ambos valores obtenidos mediante la operación de reactores anaerobios a escala de laboratorio, con la introducción una de carga orgánica proveniente de las aguas residuales muestreadas durante el proceso de cosecha de las reses y los cerdos. El índice de producción de metano obtenido fue de 0.49 m<sup>3</sup>/kg SV. Por otra parte, por cada m<sup>3</sup> de reactor se produjo 0.287 m<sup>3</sup> de biogás a una carga de 1.5 kg SV/m<sup>3</sup>. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, si se toma en cuenta la implementación de un biodigestor de 82.4 m<sup>3</sup>. Traducido en términos económicos de US \$4,506.28 al año en un escenario de tres días de cosecha por semana. Acompañado de un beneficio ambiental; los reactores alcanzaron una remoción de contaminación en términos de DQO de 83% en promedio. Finalmente, se estima que la implementación de un biodigestor podría suplir 13% del total de la energía consumida anualmente en la planta de cárnicos.

#### 4. Objetivos.

##### **Objetivo General:**

Optimizar parámetros para la generación de Biogás en una planta tipo HPTC de doble cámara hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016.

##### **Objetivos Específicos:**

- ✓ Evaluar los Co-sustratos con mejores perspectivas para la producción de biogás / metano a partir de estiércol de vacuno, ingesta de vacuno y desperdicios de camal en diferentes proporciones.
- ✓ Evaluar los parámetros operacionales Tiempo de Residencia Hidráulica y Temperatura en la generación de Biogás / metano por cada sustrato.
- ✓ Determinar el volumen de producción de biogás y su calidad.
- ✓ Determinar el volumen de producción de Biogás / metano por unidad de MOV.
- ✓ Determinar el potencial energético del biogás.
- ✓ Construcción de un modelo matemático mediante una ecuación para determinar otros valores considerando los factores TRH y T°C.

#### 5. Hipótesis.

Sera posible analizar y evaluar los parámetros operacionales: Tiempo de Residencia Hidráulica y Temperatura para la generación de biometano, encontrando la mejor alternativa por su performance productiva cuando se utilice en Co-sustratos desechos de camal y estiércol de vacunos en una planta Tipo HPTC (reactor de alto rendimiento), de doble cámara hidrolítica en el Fundo La

Católica; y será posible a partir del metano obtenido la generación de energía renovable y limpia.

### III. Planteamiento Operacional.

#### 1. Técnicas, Instrumentos y materiales de verificación

Para obtener el biogás y el biometano de diferentes muestras se someterán a las fases de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis del proceso; en las cámaras del equipo HPTC instaladas en el Fundo La Católica. **Previamente en Laboratorio se efectuarán pruebas piloto o en batch**, para luego extrapolar los mejores resultados a la planta.

En cada uno de los tres Co-sustratos (**variables independientes**), se encontrarán los ratios correspondientes a las **Sub variables**: tres diferentes Tiempos de Residencia Hidráulica – TRH y tres diferentes Temperaturas.

Y como **sub indicadores**: Sólidos totales y Materia orgánica volátil, pH, lignina, humedad, fibra, proteínas, carbohidratos, grasas, cenizas, DBO, DQO, Tamaño de partícula,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{S}_2\text{H}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , ( $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ).

Mientras como **Variables dependientes** se estimarán, Producción de Biogás y biometano, Cantidad de Biogás y biometano, Biogás y biometano por unidad / sustrato, Evaluación energética / biometano, Calidad de biogás por cada sustrato.

#### 2. Campo de verificación.

##### 2.1. Ubicación espacial

La investigación de campo se realizará en el Fundo La Católica de Majes, Área de Investigación en Energías Renovables – Biodigestor tipo HPTC; biodigestor de alto rendimiento y las Pruebas en batch en los laboratorios del programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia acondicionado para la experimentación.

##### 2.2. Ubicación temporal

La investigación de campo se efectuará durante el segundo semestre del año 2016; no siendo excluyente la estación porque los desechos orgánicos y vegetales se encuentran indistintamente todo el año; y los desechos de camal (sangre y rastros), como la ingesta de bovinos y el estiércol de bovinos de los corrales de ganado del Fundo La Católica.

### 2.3. Unidades de estudio

El **Universo** está compuesto por los sustratos como el **estiércol de vacunos** que se crían en el Fundo La Católica de los cuales se tomaran muestras completamente al azar de sus corrales. Luego la **ingesta de vacunos** (contenido ruminal extraído una vez sacrificado el animal en el camal de La Colina), por su alto contenido de consorcios de microorganismos metanogénicos, estas muestras también serán obtenidas al azar y finalmente los **desperdicios de camal** (compuesta por sangre mayoritariamente de animales sacrificados, algunos rastros de grasas y muy pequeñas porciones de carnes).

Sin embargo, las **unidades de estudio** para la investigación corresponderán a 3 mezclas de sustratos o Co – sustratos (Sn), la muestra a tomar de cada uno será completamente al azar, pero en un porcentaje definido y diferente unos de otros; los cuales son explicados a detalle en el diseño.

VARIABLES INDEPENDIENTES:

Co-sustratos mezcla 1:   Estiércol de vacuno (80%)  
                                  Ingesta de vacuno (20%)  
                                  Desperdicios de camal (00%)

Co-sustratos mezcla 2:   Estiércol de vacuno (30%)  
                                  Ingesta de vacuno (20%)  
                                  Desperdicios de camal (50%)

Co-sustratos mezcla 3:   Estiércol de vacuno (20%)  
                                  Ingesta de vacuno (10%)  
                                  Desperdicios de camal (70%)

Estos serán sometidos a diferentes Tiempos de Residencia Hidráulica – TRH (hidrólisis) y Temperaturas (desarrollo de consorcios bacteriales y volúmenes de metano producido). Las **pruebas se harán en piloto o bacht**, determinando cuales de ellas tiene el mayor contenido de metano (CH<sub>4</sub>), para ser **escalados al equipo o biodigestor HPTC** definitivo en planta. Ver Cuadro 17.

**Los Procesos para la Obtención y muestreo de Co-sustratos:**

- a. Una vez establecido el diseño de la investigación en un **experimento en factorial de 3x3x3** considerando los factores (3) Co-sustratos, (03) Tiempos de Residencia Hidráulica - TRH y (03) Temperaturas – T°C y los valores de Solidos Totales y Materia Orgánica Volátil por cada uno de los (03) Co-sustratos.

- b. A horas 6 am del establo de vacunos lecheros del Fundo La Católica se tomarán al azar 2 kilos de **estiércol fresco**, del acumulado total y será puesto en refrigeración hasta su utilización en el laboratorio.
- c. A horas 7 am del Camal de La Colina se tomarán 2 litros de **desperdicios del sacrificio de animales vacunos** (sangre, pedacitos de carne cortada por mal manipuleo y grasas), del cilindro donde se almacenan.
- d. Luego a la misma hora se tomará 2 kilos de **contenido ruminal de bovinos** sacrificados antes del lavado del rumen y/o contaminado, del total acumulado.
- e. Una vez en el laboratorio, utilizando una **balanza de precisión y de acuerdo a las diferentes fórmulas de los Co-sustratos** se obtendrán estos, homogenizándolos con agua en una proporción de 3 de agua y 1 de Co-sustrato.
- f. Se tomarán muestras una por cada Co-sustrato en botellas esterilizadas y en refrigeración, se trasladarán a los laboratorios para **analizar el contenido de Sólidos Totales y Materia Orgánica Volátil esencialmente y los contenidos bioquímicos** de cada Co-sustrato.
- g. Luego los reactores (frascos) de **500 ml serán llenados en  $\frac{3}{4}$  partes y colocados en termostatos (baño maría), a temperaturas** de 39, 45 y 50°C y a Residencias Hidráulicas de 2, 4 y 6 días de acuerdo al diseño factorial; con dos repeticiones cada una. Los mismos Co-sustratos serán
- h. Cada vez que se cumpla con las condiciones de los factores a evaluar, se procederá a la **lectura del contenido del biogás generado y sus componentes (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>H y NH<sub>4</sub>.)**, en un equipo marca SEWERIN y el lector de gases MULTITEC®540 de fabricación alemana.
- i. Una vez los resultados estos se trasladarán al FORMATO 2A – COLECCION DE RESULTADOS - ANALISIS BIOQUIMICO POR REPETICION Y LIGNINA: **S<sub>n</sub> + TRH<sub>n</sub> + T°<sub>n</sub>**

#### Procesos para la obtención de resultados para análisis:

- a. Con los resultados obtenidos en (h), se determinarán Biogás por Sustrato; Biogás por Unidad Sustrato; Biogás por Unidad MOV; Evaluación Energética / Biogás; Calidad de Biogás. % CH<sub>4</sub>, %CO<sub>2</sub> y %H<sub>2</sub>S y Metano por Unidad MOV, aplicando formulas internacionales.
- b. Estos resultados también se analizarán y evaluarán con un Programa de Computo STATISTICA v.8y/o SPSS v. 24 para establecer y/o **construir una ecuación en un modelo matemático lineal para responder a interrogantes y/o extrapolar resultados posibles**, no considerados en la investigación.
- c. Construcción de gráficos, para mejor entendimiento y observación.

## 2.4. Diseños

El diseño para la obtención de los 03 Co – sustratos serán tomados completamente al azar, pero en porcentajes o cantidades diferentes unos de otros. Estos a su vez serán **sometidos a 03 Tiempos diferentes de Residencia Hidráulica es decir a dos (2), cuatro (4) y seis (6) días de hidrólisis** y finalmente cada una de ellas **a 03 Temperaturas diferentes de 39°C, 45°C y 50°C**, acumulativa y sucesivamente.

Es decir, se realizarán 27 pruebas para determinar cuál de ellas genera la mayor producción de metano CH<sub>4</sub>, cada una con dos repeticiones; como se aprecia en el **Cuadro 16 y Cuadro 17**.

El diseño estadístico para la experimentación en bacht o piloto será una factorial 3 x 3 x 3 y la interpretación y el análisis de los resultados se realizarán utilizando el Programa SAS – SystemAnalysisStatistic 2015 y SPSS v. 24.

Con los datos obtenidos se obtendrá mediante un **modelamiento matemático una ecuación** que permita establecer cantidades de sustratos no experimentados por extrapolación de resultados obtenidos para los factores Tiempo de Residencia Hidráulica – TRH y Temperatura – T°C; calculando parámetros con mayor eficiencia para la obtención de Biometano y en otros casos tomando otras cantidades de sustratos cuales podrían ser los resultados aproximados matemáticamente. Para esto utilizaremos el Programa de Computo STATISTICA v.8

### **Sub variables:**

Los Co-sustratos mezclas 1, 2 y 3; serán sometidos en su proceso hidrolítico a tres diferentes Tiempos de Residencia Hidráulica (2días, 4 y 6) y cada uno de ellos se evaluarán a tres diferentes Temperaturas (39°C, 45 y 50).

En cada uno de los tres Co-sustratos (**variables independientes**), se encontrarán los ratios correspondientes a las **Sub variables**: tres diferentes Tiempos de Residencia Hidráulica – TRH y tres diferentes Temperaturas.

Y como **sub indicadores**: Sólidos totales y Materia orgánica volátil, pH, lignina, humedad, fibra, proteínas, carbohidratos, grasas, cenizas, DBO, DQO, Tamaño de partícula, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y Metano. (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>).

Mientras como **Variables dependientes** se estimarán, Producción de Biogás, Cantidad de Biogás, Biogás por unidad / sustrato, Evaluación energética / biogás, Calidad de biogás por cada sustrato.

**Variables dependientes:**

Se estimará por cada repetición  $S_n + TRH_n + T^n$

- Cantidad de Biogás y Biometano por repetición Sustrato = ml o  $m^3$  /  $S_n + TRH_n + T^n$
- Biogás y Biometano por Unidad Sustrato = ml o  $m^3$  / gr o k ( $S_n + TRH_n + T^n$ )
- Evaluación energética / biogás y biometano = W / ml o  $m^3$  por repetición sustrato.
- Calidad de Biogás = %  $CH_4$ , %  $CO_2$ ,  $H_2O$  y %  $H_2S$  /  $S_n + TRH_n + T^n$



**Cuadro 16**

**“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”**

Planteamiento de la Investigación		
<b>COSUSTRATOS:</b>		<b>HIDRÓLISIS:</b>
<b>S1</b>	<b>1</b>	<b>3</b> Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH): 2 días, 4 y 6.
	<b>(%)</b>	<b>3</b> Temperatura (T°): 39°C, 45°C y 50°C.
<b>a. Estiércol de Vacuno.</b>	<b>80</b>	<b>ANÁLISIS:</b>
<b>b. Ingesta de Vacuno.</b>	<b>20</b>	<b>27</b> Composición Bioquímica de Sustrato (% lignina, CHO,PT y G).
<b>c. Desperdicios de Camal.</b>	<b>00</b>	<b>27</b> Tamaño de partículas.
<b>S2</b>		<b>27</b> Nivel de Ph.
<b>a. Estiércol de Vacuno.</b>	<b>20</b>	<b>27</b> Concentración de NH <sub>4</sub> .
<b>b. Ingesta de Vacuno.</b>	<b>30</b>	<b>27</b> Concentración de Productos de Hidrolisis.
<b>c. Desperdicios de Camal.</b>	<b>50</b>	<b>27</b> Sólidos Totales.
<b>S3</b>		<b>27</b> Materia Orgánica Volátil.
<b>a. Estiércol de Vacuno.</b>	<b>10</b>	<b>27</b> DBO.
<b>b. Ingesta de Vacuno.</b>	<b>20</b>	<b>27</b> DQO.
<b>c. Desperdicios de Camal.</b>	<b>70</b>	<b>3</b> Co-sustratos en cada uno ST y MOV

**Cuadro 17**

**“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”**

COSUSTRATOS:		I (%)	DISEÑO DE LA EVALUACIÓN Y/O INVESTIGACION.			
S1	a. Estiércol de Vacuno.	80	Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH): TRH1 = 2 días, TRH2 = 4días y TRH3 = 6 días. Temperatura (T°): T°1 = 39°C, T°2 = 45°C y T°3 = 50°C.			
	b. Ingesta de Vacuno.	20				
	c. Desperdicios de Camal.	00				
S2	a. Estiércol de Vacuno.	20	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACION: FACTORIAL: 3 x 3 x 3 = Sn + TRHn + T°n</b>			
	b. Ingesta de Vacuno.	30				
	c. Desperdicios de Camal.	50				
S3	a. Estiércol de Vacuno.	10	S1	TRH1	T°1 T°2 T°3	S1 + TRH1 + T°1 S1 + TRH1 + T°2 S1 + TRH1 + T°3
	b. Ingesta de Vacuno.	20	S1	TRH2	T°1 T°2 T°3	S1 + TRH2 + T°1 S1 + TRH2 + T°2 S1 + TRH2 + T°3
	c. Desperdicios de Camal.	70	S1	TRH3	T°1 T°2 T°3	S1 + TRH3 + T°1 S1 + TRH3 + T°2 S1 + TRH3 + T°3
			S2	TRH1	T°1 T°2 T°3	S2 + TRH1 + T°1 S2 + TRH1 + T°2 S2 + TRH1 + T°3
			S2	TRH2	T°1 T°2 T°3	S2 + TRH2 + T°1 S2 + TRH2 + T°2 S2 + TRH2 + T°3
			S2	TRH3	T°1 T°2 T°3	S2 + TRH3 + T°1 S2 + TRH3 + T°2 S2 + TRH3 + T°3
			S3	TRH1	T°1 T°2 T°3	S3 + TRH1 + T°1 S3 + TRH1 + T°2 S3 + TRH1 + T°3
			S3	TRH2	T°1 T°2 T°3	S3 + TRH2 + T°1 S3 + TRH2 + T°2 S3 + TRH2 + T°3
			S3	TRH3	T°1 T°2 T°3	S3 + TRH3 + T°1 S3 + TRH3 + T°2 S3 + TRH3 + T°3

**POR CADA EVALUACIÓN:** Sn + TRHn + T°n

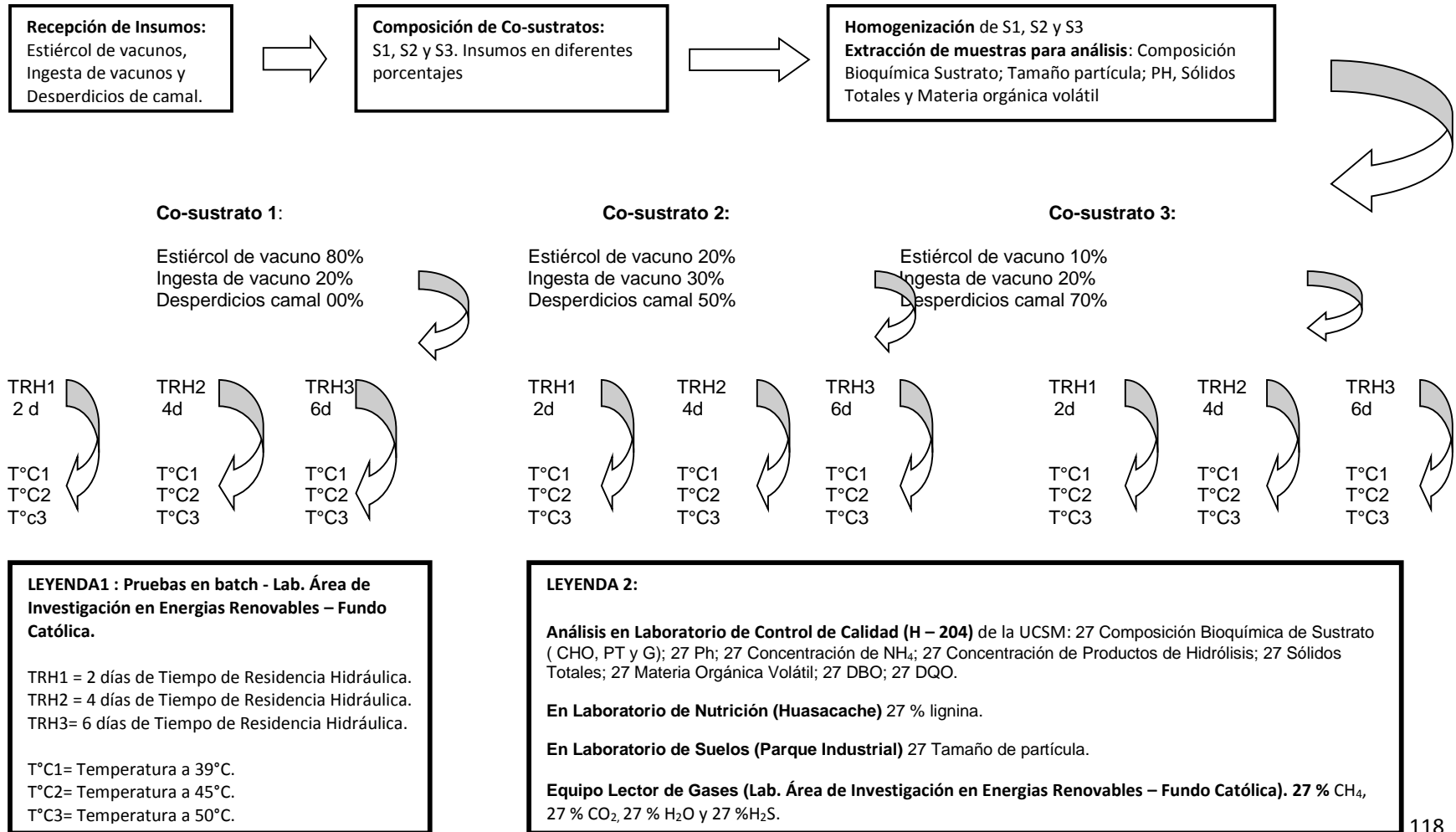
EL RESULTADO SE ANALIZARAPOR:

- 27 Cantidad de Biogás por Sustrato. = ml o m<sup>3</sup>/ Sn+TRHn+T°n
- 27 Biogás por Unidad Sustrato. = ml o m<sup>3</sup> / K (Sn+TRHn+T°n)
- 27 Biogás por Unidad MOV. = ml o m<sup>3</sup> / K MOV (Sn + TRHn + T°n)
- 27 Evaluación Energética / Biogás. = W/ ml o m<sup>3</sup>
- 27 Calidad de Biogás. % CH<sub>4</sub>, %CO<sub>2</sub> y %H<sub>2</sub>S / Sn+TRHn+T°n
- 27 CH<sub>4</sub> por Unidad MOV. = ml o m<sup>3</sup> / K MOV (Sn+TRHn+T°n)

**LOS MEJORES RESULTADOS SE EXTRAPOLARAN A LA PLANTA TIPO HPTC DE DOBLE CAMARA HIDROLITICA.**

**Cuadro 18**  
**“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”**

PROCESOS DE CAMPO EN LA INVESTIGACION



### 3. Estrategias de recolección de datos.

**3.1. Organización** una vez obtenido los mejores resultados en la generación de biogás a nivel de laboratorio o en bacht, estos serán extrapolados a la planta o Biodigestor tipo HPTC se contará con el apoyo del personal del Fundo La Católica, verificando en una libreta de campo y formato de alimentación, los volúmenes y procesos, como los resultados en relación a cada sustrato y a la mezcla ideal. **Cuadro 18.**

Los **datos obtenidos en las pruebas y análisis de laboratorio serán trasladados** a los: **FORMATO 1A** – Colección de resultados por cada repetición:  $S_n + TRH_n + T^\circ_n$ ; **FORMATO 2A** – Colección de resultados - análisis bioquímico por repetición y lignina:  $S_n + TRH_n + T^\circ_n$  y **FORMATO 3A** – Colección de resultados – calidad del biogás y potencial energético por repetición:  $S_n + TRH_n + T^\circ_n$ .

Antes se desarrollarán pruebas en vacío para comprobar los Volúmenes de digestión y/o procesamiento, Tiempo de residencia hidráulica, Temperatura de proceso, Sólidos Totales y Materia orgánica volátil

### 3.2. Los Recursos, materiales y equipos.

Los recursos estarán conformados por los materiales Tres Co-sustratos a utilizar de composiciones diferentes a base de estiércol de bovinos, Ingesta de bovinos y Desperdicios de Camal (sangre y otros). Cuadro 18

Los equipos serán el Biodigestor tipo HPTC y/o de alto rendimiento para las pruebas, **el equipo Lector de Gases (Lab. Área de Investigación en Energías Renovables – Fundo Católica)**, con la norma internacional para determinación de gases y de fabricación alemana (% CH<sub>4</sub>, % CO<sub>2</sub>, % H<sub>2</sub>O y %H<sub>2</sub>S). Para las pruebas en batch reactores graduados, matraz kitasato graduado, probeta de vidrio graduado, pipeta serológica, tubo látex, pinza morh, termostato (baño maría), balanza de precisión, cámara fotográfica, mesas y sillas.

Análisis en **Laboratorio de Control de Calidad (H – 204) de la UCSM**: cada proceso de acuerdo a norma internacional (protocolo nacional) y en otros casos utilizando kits para Análisis de Composición Bioquímica de Sustrato ( CHO, PT y G); Ph; Concentración de NH<sub>4</sub>; Concentración de Productos de Hidrólisis; Sólidos Totales; Materia Orgánica Volátil; DBO; DQO.

En **Laboratorio de Nutrición (Huasacache)** % lignina. En **Laboratorio de Suelos (Parque Industrial)** Tamaño de partícula; cada uno utilizando norma internacional para sus análisis, por ser laboratorios reconocidos.

3.3. **Validación del Instrumento**, el Biodigestor tipo HPTC será probado en vacío para conocer los parámetros. **Estando a tipificar como un factor de debilidad** del proyecto la instalación y acceso al Biodigestor tipo HPTC y la disponibilidad tanto de los sustratos, los laboratorios, recursos económicos del Proyecto “PRODUCCIÓN Y USO DE BIOMETANO PRESURIZADO COMO SUSTITUTO DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN EL SECTOR AGRÍCOLA” Contrato N° 026-2015-INIA-PNIA/UPMSI/IE, apoyos en permisos y procesos administrativos para efectuar el proyecto de investigación por la UCSM.

III. **Cronograma de trabajo.**

Tiempo/Actividades	Semestre II - 2016	Semestre I - 2017
1. Recolección de datos	OCT , NOV, DIC	ENE
2. Estructuración de Resultados		ENE y FEB
3. Informe final		FEB y MAR

Arequipa, 20 de octubre del 2016.



**ANEXO 2. . MATRICES DE SISTEMATIZACION.**

**“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”**

FORMATO 1A – COLECCION DE RESULTADOS POR CADA REPETICION: **Sn + TRHn + T°n**

N°	Día/Mes/Año	Sn + TRHn + T°n	Sólidos Totales	Materia Orgánica Volátil	Ph	Tamaño Partícula			
001		S1 + TRH1 + T°1							
002		S1 + TRH1 + T°2							
003		S1 + TRH1 + T°3							
004		S1 + TRH2 + T°1							
005		S1 + TRH2 + T°2							
006		S1 + TRH2 + T°3							
007		S1 + TRH3 + T°1							
008		S1 + TRH3 + T°2							
009		S1 + TRH3 + T°3							
010		S2 + TRH1 + T°1							
011		S2 + TRH1 + T°2							
012		S2 + TRH1 + T°3							
013		S2 + TRH2 + T°1							
014		S2 + TRH2 + T°2							
015		S2 + TRH2 + T°3							
016		S2 + TRH3 + T°1							
017		S2 + TRH3 + T°2							
018		S2 + TRH3 + T°3							
019		S3 + TRH1 + T°1							
020		S3 + TRH1 + T°2							
021		S3 + TRH1 + T°3							
022		S3 + TRH2 + T°1							
023		S3 + TRH2 + T°2							
024		S3 + TRH2 + T°3							
025		S3 + TRH3 + T°1							
026		S3 + TRH3 + T°2							
027		S3 + TRH3 + T°3							
028									
029									
030									

**“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”**

FORMATO 2A – COLECCION DE RESULTADOS - ANALISIS BIOQUIMICO POR REPETICION Y LIGNINA: **Sn + TRHn + T°n**

N°	Día/Mes/Año	Sn + TRHn + T°n	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> O	LIGNINA	DBO	DQO	NH <sub>4</sub>	OTROS
001		S1 + TRH1 + T°1									
002		S1 + TRH1 + T°2									
003		S1 + TRH1 + T°3									
004		S1 + TRH2 + T°1									
005		S1 + TRH2 + T°2									
006		S1 + TRH2 + T°3									
007		S1 + TRH3 + T°1									
008		S1 + TRH3 + T°2									
009		S1 + TRH3 + T°3									
010		S2 + TRH1 + T°1									
011		S2 + TRH1 + T°2									
012		S2 + TRH1 + T°3									
013		S2 + TRH2 + T°1									
014		S2 + TRH2 + T°2									
015		S2 + TRH2 + T°3									
016		S2 + TRH3 + T°1									
017		S2 + TRH3 + T°2									
018		S2 + TRH3 + T°3									
019		S3 + TRH1 + T°1									
020		S3 + TRH1 + T°2									
021		S3 + TRH1 + T°3									
022		S3 + TRH2 + T°1									
023		S3 + TRH2 + T°2									
024		S3 + TRH2 + T°3									
025		S3 + TRH3 + T°1									
026		S3 + TRH3 + T°2									
027		S3 + TRH3 + T°3									
028											
029											
030											

“Optimización de Parámetros para la Generación de Biogás en una Planta Tipo HPTC de Doble Cámara Hidrolítica a partir de desechos de camal y estiércol de vacunos en el Fundo la Católica de Majes – Arequipa 2016”

FORMATO 3A – COLECCION DE RESULTADOS – CALIDAD DEL BIOGÁS Y POTENCIAL ENERGETICO POR REPETICION: **Sn + TRHn + T°n**

N°	Día/Mes/Año	Sn + TRHn + T°n	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> O	BIOGÁS/SUSTRATO	BIOGÁS/GR o K	POTENCIAL ENERGETICO	ORDEN CALIDAD	OTROS
001		S1 + TRH1 + T°1									
002		S1 + TRH1 + T°2									
003		S1 + TRH1 + T°3									
004		S1 + TRH2 + T°1									
005		S1 + TRH2 + T°2									
006		S1 + TRH2 + T°3									
007		S1 + TRH3 + T°1									
008		S1 + TRH3 + T°2									
009		S1 + TRH3 + T°3									
010		S2 + TRH1 + T°1									
011		S2 + TRH1 + T°2									
012		S2 + TRH1 + T°3									
013		S2 + TRH2 + T°1									
014		S2 + TRH2 + T°2									
015		S2 + TRH2 + T°3									
016		S2 + TRH3 + T°1									
017		S2 + TRH3 + T°2									
018		S2 + TRH3 + T°3									
019		S3 + TRH1 + T°1									
020		S3 + TRH1 + T°2									
021		S3 + TRH1 + T°3									
022		S3 + TRH2 + T°1									
023		S3 + TRH2 + T°2									
024		S3 + TRH2 + T°3									
025		S3 + TRH3 + T°1									
026		S3 + TRH3 + T°2									
027		S3 + TRH3 + T°3									
028											
029											
030											

## BIBLIOGRAFIA

**Abbasi, T., & Colaboradores. (2012).** *Biogás Energy* (Primera ed., Vol. 2). Springer. Springer Briefs in Environmental Science 2, 11. DOI 10.1007/978-1-4614-1040-9\_2, © TasneemAbbasi 2012

**Banco Mundial.BM. 2001.** FMAM - Fondo para el Medio Ambiente Mundial - Nuevo Sector productivo. 2001. March 2001. Banco Mundial. BM – 3398110 spanish.pdf – Adobe Reader.

**Buschmann, Jeannette und Prof. Dr. Busch Günter. (2011).** Energieeffizienz. Verbesserte Effizienz der zweistufigen Fermentationsprozess durch eine Verringerung der Energieverluste bei der Hydrolyse. Deutschland. Residuos y Residuos. Edición 03/2012. Editor Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG. Müll und Abfall. Incrementar la eficiencia del proceso de fermentación de dos etapas mediante la reducción de las pérdidas de energía en la hidrólisis. <http://www.muellundabfall.de/MA.03.2012.135>

**Campaña, H., Benedetti, P., Airasca, A., & Fiotto, S. (2011).** Determinación del Tiempo de Retención en un Reactor Anaeróbico para Optimizar la Generación de Biogás a partir de la Digestión de Barros Activados Residuales. In *XXXIV Congreso de ASADES* (pp. 6.55-6.62), Río Hondo.

**Cendales Ladino, Edwin Dario. 2011.** Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis presentada como requisito parcial para optar el título de Magister en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Bogotá, D.C., Colombia.

**Centro de Energías Renovables. 2013.** Ficha Informativa Biogás en el Sector Agropecuario Ministerio de Energía. Gobierno de Chile.

**CEPLAN 2011.** Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Plan Bicentenario. 2011. El Perú hacia el 2021. DS N° 054-2011-PCM. Plan del Bicentenario. Eje Estratégico 6. Recursos Naturales y Ambiente. Cambio Climático.

**David S. Weiss and Rudolf K. Thauer. 1993.** Methanogenesis and the Unity of Biochemistry. Vol. 72, 819-822, March 26, 1993, Copyright 1993 by Cell Press. pp 819.

**Chattopadhyay, S., & Coautores. (2009).** Biofuels. En P. Singh, & A. Pandey (Edits.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilization* (págs. 61-76). Springer

**Contreras, L. (2006).** Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. *Revista futuros*, 6. Cuba.

**Criollo Q., Carmen y Guzmán G., Adriana C. 2014.** "Elaboración de un Biodigestor Piloto Tubular para la Producción de Biogás a partir de Estiércol de ganado vacuno, en una Vivienda de la Comunidad de Tembo". Tesis de Grado previo a la obtención del Título de Ingenieras en Biotecnología Ambiental. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Ciencias Químicas Riobamba - Ecuador . pp 107.

**Danner W. y Kilian D. 2012.** Biogás y cultivo ecológico: La combinación perfecta. Traducido del texto original alemán por Nicolás Nägele (oct. 2012) SNOW LEOPARD PROJECTS GMBH/Alemania.

**Del Real Olvera, Jorge; Prieto García, Francisco; Santos López, Eva Maria; Román Gutiérrez, Alma Delia y Gordillo Martínez, Alberto José. 2009.** *Simulación Matemática de un Digestor Anaerobio Tipo Tanque Agitado para el Tratamiento de Vertidos Residuales*. Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (1) 33-41, 2009. México.

**Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, & ECOFYS (Firm). (2005).** Planning and Installing Bioenergy Systems: A Guide for Installers, Architects, and Engineers (Vol. 1). Earthscan.

**Duque N Andrés A. 2007.** Ambiente como categoría y ciencia como conocimiento. Las Ciencias Ambientales: Una Nueva Área del Conocimiento – Red Colombiana de Formación Ambiental. Red de Formación Ambiental para América Latina y El Caribe. PNUMA. © RCFA. Compilador: ORLANDO SÁENZ.

**FNR. 2010.** Guía sobre el Biogás. 2010. Desde la producción hasta el uso. Publicado por Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) con el apoyo del Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor en base a una decisión del Parlamento de la República Federal Alemana. Editorial: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Quinta edición completamente revisada, Gülzow, 2010.

**Fernández, G., Lago, N., & Prieto, A. 2010.** Gestión de subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH). Departamento de Patología Animal. Facultad de Veterinaria. Campus universitario, 27002 Lugo. Universidade de Santiago de Compostela. E-mail: gonzalo.fernandez@usc.es. Tfno: 982 822131.

**Fernandez-Linare, Luis Carlos; Montiel Montoya, Jorge; Millán Oropeza, Aarón y Badillo-Corona, Agustín. 2012.** Producción de Biocombustibles a partir de Microalgas. Ra Ximhai, septiembre – diciembre, año/Vol. 8, Número 3. Universidad Autónoma Indígena de México. Mochichahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 101- 115. ISSN: 1665-0441. México.

**Fernández-Romero, V., Rodríguez-Achata, L., & Aquino-Achate, N. (2014).** Generación de energía renovable a partir del desarrollo de actividades pecuarias en el departamento de Madre de Dios. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 4(1), 67-77.

**Ferry, James G. 2010.** The chemical biology of methanogenesis. *Planetary and Space Science* 58 (2010) 1775 – 1783.

**Flotats Ripoll, X., Campos Pozuelo, E., Palatsi Civit, J., & Bonmatí Blasi, A. (2010).** Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *PORCI. Monografías de actualidad* 65 - pp 51-65. Universidad de Lleida. España.

**FNR 2012.** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe V. (FNR). 2012. Bioenergy in Germany: Facts and Figures January 2012. Solid fuels Biofuels Biogás. [www.fnr.de](http://www.fnr.de). OT Gülzow · Hofplatz 1· 18276 Gülzow-Prüzen · Germany.

**Francisco, P. (2015).** Carta Encíclica Laudato Si': Sobre o cuidado da casa comum. Vaticano: Tipografia Vaticana.

**Frigon, J. - C., & Coautores. (2012).** Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure with Mulched Switchgrass for Improvement of the Methane Yield. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 35, 341-349.

**Fondo Nacional del Ambiente, 2014.** Energías Renovables. Pagina web. <http://www.fonamperu.org>

**Food and Agriculture Organization (FAO). 2011.** Manual de Biogás, Santiago, Chile, 118p.

**Gamio, Pedro / García, Henry. 2011.** Energías Renovables en el Planeamiento Estratégico del Mediano y Largo Plazo. Documentos de Trabajo # 10. CEPLAN. © Centro Nacional de Planeamiento Estratégico. Primera edición: diciembre de 2011. Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º: 2011-15765. ISBN: 978-612-46106-7-7. Imprenta: Ramos Martel y Asociados S.A.C. Tiraje: 2 000

ejemplares. Diseño de carátula e interiores: Alberto Contreras Martínez. Correo electrónico: [planperu@ceplan.gob.pe](mailto:planperu@ceplan.gob.pe) Dirección URL: [www.ceplan.gob.pe](http://www.ceplan.gob.pe)

**García-Cascales, M. S., y otros. 2014.** Demonstrative Project for the use of local Renewable Resources in Industrial Processes: Enering Life.18th International Congress on Project Management and Engineering Alcañiz, 16-18th July 2014.Murcia – España.

**González Ladrón de Guevara, Francisco. 2007.** Aportes para una caracterización de las ciencias ambientales. Las Ciencias Ambientales: Una Nueva Área del Conocimiento – Red Colombiana de Formación Ambiental. Red de Formación Ambiental para América Latina y El Caribe. PNUMA. © RCFA. Compilador: Orlando Saenz.

**Green Watt. 2014.** Transformación de los Residuos Orgánicos en Energía Renovable. EncuentroEmpresarial Chile – Bélgica. BenoitBUNTINX..Green Biogás PlantsFittingYourWaste.Providencia – Santiago de Chile.  
[www.greenwatt.clb.buntinx@greenwatt.cl](http://www.greenwatt.clb.buntinx@greenwatt.cl)

**Hansen Fernández, F., Labbé, S. J. I., & Salas, P. P. A. (2015).** *U.S. Patent No. 20,150,000,357.* Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

**H. Campaña, P. Benedetti, A. Airasca, S. Fiotto. 2011.** *Determinación del Tiempo de Retención en un Reactor Anaeróbico para Optimizar la Generación de Biogás a partir de la Digestión de Barros Activados Residuales. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.*

**Herrero, J. M., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Llanos, E. P & Chávez, V. C. (2014).** Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías apropiadas: Biodigestores en Bolivia: Lecciones aprendidas del proyecto EnDev - Bolivia 2007-2012. GIZ y CIMNE. Bolivia. ISBN: 978 – 99974- 810 – 2 - 3

**Infantas, Pablo. 2014.** Diseño y Construcción de un Biodigestor Industrial para tratamiento de residuos orgánicos. Experiencia y análisis de caso del primer Biodigestor Industrial construido en el Perú por Tec. Mec. PABLO INFANTES. Representante en el Perú de FRANZ EISELE U. SÖHNE BIODIGESTORES (Alemania).

**Jiménez, Diego. 2012.** “Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio Tipo Continuo”. Tesis Maestro en Ingeniería Energética. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Maestría en Ingeniería Energética. Universidad Veracruzana. México. Xalapa, Veracruz. Noviembre de 2012. 66pp.

**Kvesitadze, G. y otros. 2012.** Two-stage anaerobic process for bio-hydrogen and bio-methane combined production from biodegradable solid wastes. *Energy* 37 (2012) 94 - 102

**Kepler. 2014.** Planta Experimental de Biogás de Altas Prestaciones. SNOWLEOPARD, KEPLER, Responsabilidad, Ciencia y Tecnología al Servicio de la Sostenibilidad. 2014. KUVIER, ECOATIA, SEQUO, BMZ, IIDS, UCSM. Separata.

**King-Thom Chung and Vincent Varel. 1998.** Ralph S. Wolfe (1921) Pioneer of Biochemistry of Methanogenesis. *Anaerobe* 1998. 4, 205 - 208. Article No. an980169

**Labandeira et al, 2007.** Economía Ambiental, Ed. Pearson educación, S. A. México

**Leff Zimmerman, Enrique. 2006.** La complejidad ambiental: del logos científico al diálogo de saberes. Texto presentado en el 3er. Seminario Bial Internacional Complejidad 2006, La Habana, Cuba, 9-12 de enero de 2006.

**LeffZimmerman, Enrique. 2006.** El saber ambiental. I Congreso internacional interdisciplinario de participación, animación e intervención socioeducativa, celebrado en Barcelona en noviembre de 2005.

**Leff Z., Enrique. 2007.** Prologo. Las Ciencias Ambientales: Una Nueva Área del Conocimiento – Red Colombiana de Formación Ambiental. Red de Formación Ambiental para América Latina y El Caribe. PNUMA. © RCFA. Compilador: Orlando Sáenz.

**Leff, Enrique. 2007b.** Saber Ambiental. Sustentabilidad Racionalidad Complejidad Poder. Libro electrónico. Siglo XXI Editores. Buenos Aires.

**Martí, H. J. (2008).** Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. *GTZ PROAGRO. CreativeCommons, Bolivia.*

**Martí-Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymla, B., ...&Gamarra, A. (2014).** Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*, 71, 156-165.

**Massi, E. (2012).** Anaerobic Digestion. En S. McPhail, & Coautores, *Fuel Cells in the Waste-to-Energy Chain* (págs. 47-63). Springer.

**Olivier, J. A. S., & Canepa, J. R. L. (2014).** Digestores Anaerobios: una alternativa para el Tratamiento de Residuos Orgánicos y Producción de Biogás. *Kuxulkab'*, 18(35). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

**Pellat, F. P., y otros. 2013.** Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. 3.13 Sistemas de producción pecuaria y gases de efecto invernadero en el estado de México. Orozco-Hernández María E.1; Míreles-Lezama Patricia; Valdés-Pérez María E.; Álvarez-Arteaga Gustavo y García-Fajardo Belina.

**Perales de la Cruz, Miguel A. 2014.** Validación de Sustratos Generados por Digestión de Nopal, para la Elaboración de Biofertilizantes. Informe Final 2013-2014. Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México.

**Ponguta Hurtado, J. J. (2005).** Guía para el manejo de energías alternativas. UPAR. Convenio Andrés Bello. CAB Ciencia y Tecnología (No. 123). Agosto 2005.

**Red Mexicana de Bioenergía. 2012.** A.C. *Producción de Biogás en México. 2012.* Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía.

[www.rembio.org.mxredmexbioen@gmail.com](http://www.rembio.org.mxredmexbioen@gmail.com)

**Regalado Y., Diego R. 2009.** Estudio de la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico Utilizando. Desechos Orgánicos. Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Tesis Ingeniería Ambiental. Quito.

**Reportaje. 2014.** Boletín TodoAgro.com.ar N° 461. Sitio argentino de Producción Animal. Oportunidades y Limitantes en Sudamérica para la Producción de Biogás y Energías Renovables [www.produccion-animal.com.ar](http://www.produccion-animal.com.ar)

**Sachs, I. (2011).** Ecodesarrollo: un aporte a la definición de estilos de desarrollo para América Latina. *Estudios Internacionales*, 7(25), p-57.

**Sarria, C. A. (2014).** *Simulación de sistemas híbridos fotovoltaico/biogás/propano para generación de energía eléctrica de una vivienda empleando la herramienta computacional Homer [recurso electrónico]* (Doctoral dissertation). Proyecto de Grado para optar el Título de Ingeniero Electricista. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Santiago de Cali.

**Severiche Sierra, C. A., & Acevedo Barrios, R. L. (2014).** Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. *INGENIUM*, 14(28), 6-15.

**Solidaridad, A. (2014).** Capacitación a distancia. *Agricultura campesina, respuestas para mejorar*, 32.

**Sosa, R., Díaz, Y. M., Cruz, T., & de la Fuente, J. L. (2014).** Diversificación y perspectivas de la digestión anaerobia en la porcicultura cubana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48(1).

**Souza, V. F. D. (2014).** Análise da Cadeia Produtiva do Etanol e do Biodiesel. Universidad Federal de Lavras. Brasil.  
<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/4540>

**Telenchano, P., & Indalicia, F. (2014).** Diseño de un biodigestor de bolsa flexible con desechos de ganadería, en las comunidades ShobolLLinLLin, 2013. Tesis Grado Ing. Biotecnología Ambiental. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba – Ecuador. 150 pp.

**Terradas-III, G., Pham, C. H., Triolo, J. M., Martí-Herrero, J., & Sommer, S. G. (2014).** Thermic model to predict biogas production in unheated fixed-dome digesters buried in the ground. *Environmental science & technology*, 48(6), 3253-3262.

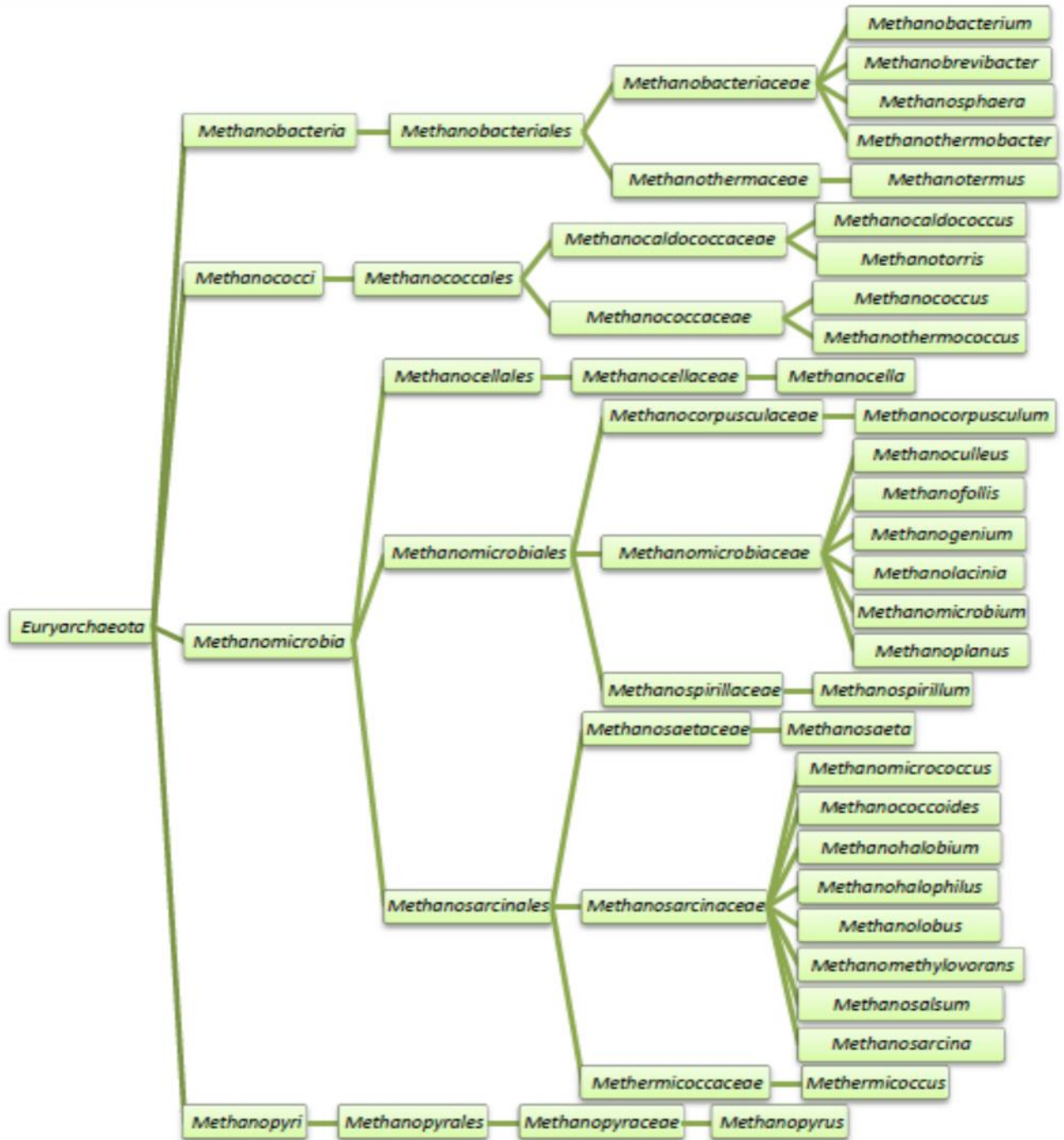
**Toro, M. R. (2012).** Producción de Abono Orgánico y Biogás mediante Biodigestión Anaeróbica de Lodos Activos. Título de Ingeniero Agrónomo y al Grado Académico de Licenciado en Agronomía. Facultad de Ciencias. Escuela de Agronomía. Universidad de la Serena. Chile.

**Vicentin, Rocío. 2014.** Co-digestión Anaeróbica de lodos de Depuradora con Glicerol en Condiciones Mesofílica: Producción de Biogás y Calidad del Digestato. XVIII Encuentro de Jóvenes Investigadores de la UNLI. 3 y 4 de septiembre de 2014, Santa Fe. Universidad Nacional del Litoral. Estación Belgrano – Bv. Gálvez y Avellaneda (Plana Alta), Santa Fe, Argentina

**Wang, A.J., & Coautores. (2011).** Advances in Biogas Technology. (T. Scheper, & Coeditores, Edits.) *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*, 1-23.

ANEXO 2

Clasificación Taxonómica de los Metanógenos



Fuente: (National Center for Biotechnology Information, 2011)

### ANEXO 3

#### REGISTRO FOTOGRAFICO



Fotografía N° 1 Biodigestor HPTC – High Performance Temperature Controlado instalado en el Campus del Fundo La Catolica en Irrigacion Majes – Pedregal.



Fotografía N° 2 Interior del Biodigestor HPTC – High Performance Temperature Controlado instalado en el Campus del Fundo La Catolica en Irrigacion Majes – Pedregal.



Fotografía N° 3 Interior del Camal o Matadero de Vacunos del Municipaio Distrital de La Colina en Majes.



Fotografía N° 4 Proceso de la Investigación. Desde la toma de muestras en matadero; pesado en balanza electrónica; Dilución; En bioreactores; En Termostatos o baño maría; determinación del volumen de biogás – método volumétrico. Científicos con BPI en Laboratorios.



Fotografía N° 5 Miscelánea fotografías del proceso; Visitantes al Proyecto.