

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS COMPARANDO EL ESTIÉRCOL DE VACUNO, DE CUY Y RESIDUOS DE LEGUMINOSAS EN UN BIODIGESTOR ANAEROBIO EN LA UAP- AREQUIPA 2016”

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

VELÁSQUEZ TAPIA MILAGROS STEFANY

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AREQUIPA – PERÚ

AÑO 2017

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado:

A mi futuro esposo Kelvin Aguirre Ortiz que con su apoyo constante y amor incondicional ha sido fuente de motivación y comprensión en todo momento.

A mi mamá que siempre me brindo consejos, su atención y comprensión siempre.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a mis maestros, por la orientación, sugerencia y consejos, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años. Especial reconocimiento merecen mis asesores por el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias realizadas. Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mi familia por la confianza depositada en mí. A todos ellos, muchas gracias

RESUMEN

En el presente trabajo el objetivo principal fue evaluar el rendimiento de producción de biogás comparando dos tipos de mezclas compuestas por: estiércol de vacuno (*Bos taurus*) con residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) y estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) con residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) previamente compostados a diferentes concentraciones en un biodigestor anaerobio Batch en condiciones ambientales, con los siguientes tratamientos:

1. (500 g de estiércol de cuy; 0 g de residuos de leguminosas; 0.5 L de agua)
2. (500 g de estiércol de cuy; 125g de residuos de leguminosas; 1.250 L de agua)
3. (500 g de estiércol de cuy; 250 g de residuos de leguminosas; 2.25 L de agua)
4. (500 g de estiércol de vacuno; 0 g de residuos de leguminosas; 0.5 L de agua)
5. (500 g de estiércol de vacuno; 125g de residuos de leguminosas; 1.250L de agua)
6. (500 g de estiércol de vacuno; 250 g de residuos de leguminosas; 2.25 L de agua)

Los biodigestores fueron recipientes de plástico de 4 L y 8 L. El biogás producido se recolectó en un gasómetro por desplazamiento volumétrico de agua, en recipientes calibrados de 100 ml, durante 80 días (60 días de fermentación y 20 días de medición) que fue el tiempo de retención. Al cabo de 62 días se comenzó a medir la producción de biogás que fue la siguiente:

- Con el tratamiento 1 hubo una producción total de 0.984 L.
- Con el tratamiento 2 hubo una producción total de 3.31 L.
- Con el tratamiento 3 hubo una producción total de 4.45 L.
- Con el tratamiento 4 hubo una producción total de 5.13 L.
- Con el tratamiento 5 hubo una producción total de 6.83 L.
- Con el tratamiento 6 hubo una producción total de 10.93 L.

En conclusión el mayor rendimiento de producción de biogás con estiércol de vacuno (tratamiento 6) fue de 4.45 L, en el caso de la producción de biogás basado en estiércol de cuy (tratamiento 3) fue de 10.93 L siendo la más eficiente de todo el proceso. En ambos casos la mayor producción de biogás fue con la relación de mezcla: agua (1:3).

Palabras Clave: Biogás, leguminosas producción, rendimiento, estiércol.

ABSTRACT

In the present work the main objective was to evaluate the yield of biogas production comparing two types of mixtures composed of: cow dung (*Bos taurus*) with leguminous residues: peas (*Pisum sativum*) and broad bean (*Vicia faba*) and guinea pig manure (*Cavia porcellus*) with legume residues: pea (*Pisum sativum*) and broad bean (*Vicia faba*) previously composted at different concentrations in an anaerobic batch biodigester in environmental conditions, with the following treatments:

1. (500 g of guinea pig manure, 0 g of leguminous waste, 0.5 L of water)
2. (500 g of guinea pig manure, 125 g of leguminous waste, 1,250 L of water)
3. (500 g of guinea pig manure, 250 g of leguminous waste, 2.25 L of water)
4. (500 g of cow dung, 0 g of leguminous waste, 0.5 L of water)
5. (500 g of cow dung, 125 g of leguminous waste, 1,250 L of water)
6. (500 g of cow dung, 250 g of leguminous waste, 2.25 L of water)

The biodigesters were plastic containers of 4 L and 8 L. The biogas produced was collected in a gasometer by volumetric displacement of water, in calibrated containers of 100 ml, during 80 days (60 days of fermentation and 20 days of measurement) that was the retention time. After 62 days, the production of biogas was measured, which was as follows:

- With treatment 1 there was a total production of 0.984 L.
- With treatment 2 there was a total production of 3.31 L.
- With treatment 3 there was a total production of 4.45 L.
- With treatment 4 there was a total production of 5.13 L.
- With treatment 5 there was a total production of 6.83 L.
- With treatment 6 there was a total production of 10.93 L.

In conclusion, the highest production yield of biogas with cow manure (treatment 6) was 4.45 L, in the case of production of biogas based on guinea pig manure (treatment 3) was 10.93 L being the most efficient of all the process. In both cases the highest biogas production was with the ratio of: mixture: water (1: 3).

Keywords: Biogas, legumes, production, yield, water, manure.

INTRODUCCIÓN

En el mundo, millones de toneladas de desechos orgánicos biodegradables son generados cada año por los sectores agropecuarios, municipales e industriales que por una inadecuada gestión causan graves problemas ambientales.

La actividad agropecuaria a través del manejo adecuado de residuos generados puede contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales (biomasa) en distintas formas de energía. Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás, el cual, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía (biogás), contribuyendo a cumplir tres necesidades básicas: Mejorar las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación, generación de energía renovable para actividades domésticas; y suministrar materiales estabilizados (bioabono) como un biofertilizante para los cultivos. Por lo tanto, la fermentación anaeróbica juega un importante papel en el control de la contaminación y para la obtención de valiosos recursos: energía y productos con valor agregado.

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

Es por eso que el presente trabajo de investigación tiene como principal objetivo evaluar el rendimiento de producción de biogás a partir de estiércol de cuy y vacuno utilizando un biodigestor anaerobio tipo Batch en condiciones ambientales, determinando cuál es la proporción adecuada de co-sustratos y agua para maximizar la producción de biogás.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2.1..DELIMITACIÓN ESPACIAL	2
1.2.2..DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	2
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	2
1.3.1..OBJETIVO GENERAL	2
1.3.2..OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.....	2
1.5. VARIABLES E INDICADORES	2
1.5.1..VARIABLE INDEPENDIENTE	3
A. INDICADORES.....	3
1.5.2..VARIABLE DEPENDIENTE	3
A. INDICADORES.....	3
1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.7.1..JUSTIFICACIÓN	3
1.7.2..IMPORTANCIA	4
1.8. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACION	4
1.8.1..TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.8.2..NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	4

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
2.2. MARCO TEÓRICO	6
2.2.1. RESIDUOS SÓLIDOS DE LA GESTIÓN DEL ÁMBITO MUNICIPAL EN EL PERÚ ...	6
A. Generación per cápita (GPC)	6
B. Composición de residuos peligrosos y no peligrosos según reaprovechamiento	6
2.2.2. RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS DE LA CRIANZA DE CUYES Y GANADO VACUNO	7
A. Población de ganado vacuno en el Perú	7
B. Generación de estiércol por vacuno.....	8
C. Población y producción de cuyes en el Perú	8
D. Generación de estiércol por cuy.....	9
2.2.3. BIODIGESTOR	9
A. Componentes de un biodigestor	9
B. Tipos de Biodigestor	10
1. Según el almacenamiento del gas	10
2. Según su forma geométrica	10
3. Por los materiales de construcción	11
4. Por su posición respecto a la superficie terrestre	11
5. Modelo Chino	11
6. Modelo Indio.....	11
7. Modelos Horizontales.....	11

8. Modelo Batch por lotes.....	12
2.2.4. FERMENTACIÓN ANAEROBIA	13
A. Reacciones de la Fermentación Anaerobia	13
B. Fases de Fermentación Anaerobia	13
1. Hidrólisis	13
2. Acidogénesis	15
3. Acetogénesis	15
4. Metanogénesis	16
C. Bacterias que intervienen en el Proceso de Fermentación Anaerobia	17
D. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica	18
E. Codigestión Anaerobia	20
2.2.5. BIOGÁS	22
A. Composición del Biogás	23
B. Características del biogás	23
C. Factores que afectan el proceso de producción de biogás	24
1. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.....	24
a) Estiércol.....	24
b) Fuentes de biomasa para producción de biogás	25
c) Acondicionamiento del sustrato previo a la producción de biogás	27
d) Relación carbono/nitrógeno	27
e) Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles	29
f) Temperatura.....	31
g) Tiempo de retención	33
h) pH.....	35
i) Potencial redox	35
D. Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis	35
E. Promotores de la metanogénesis.....	38
1. Inoculantes biológicos	38
2. Agitación – Mezclado.....	39
a).Mecánica	39
b). Hidráulica	39
c). Burbujeo de biogás	40
F. Usos del biogás	40
G. Acondicionamiento del biogás.....	41
1. Eliminación de partículas	42
2. Deshidratación. Condensadores.....	42
3. Eliminación del SH ₂	42
a) Desulfuración biológica	43
b) Adición cloruro hierro	43
c) Adición de Óxido de Hierro	43
d) Columnas de adsorción	43
e) Filtros moleculares	43
f) Métodos en medio líquidos.....	44
g).Métodos de concentración del biogás	44
H. Rendimiento del biogás	45
2.2.6. DIFERENCIAS ENTRE GAS NATURAL Y EL GLP	46
A. Diferencias Físico – Químicas del Gas Natural el GLP	46
2.2.7. RESIDUOS GENERADOS EN EL PROCESO DE BIODIGESTIÓN	48
A. Biol	48
1. Composición Química y Bioquímica del Biol.....	48
2. Propiedades del Biol	49
3. Tipos de Biol.....	49

A. Biol biocida	50
B. Biol tipo I para crecimiento de follaje	50
C. Aplicación del biol	50
B. Biosol	51
1. Características Generales del biosol	51
2. Propiedades del biosol	52
3. Aplicación del biosol	52
2.3. MARCO CONCEPTUAL	53

CAPITULO III
PLANTEAMIENTO OPERACIONAL

3.1. METODO Y DISEÑO	58
3.1.1. METODO DE LA INVESTIGACION	58
3.1.2. MÉTODO EXPERIMENTAL	58
3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	59
3.3. MATERIALES Y EQUIPOS	59
3.3.1. MATERIALES	59
A. .Construcción de Biodigestores	59
B. .Proceso de Biodigestión	59
C. .Recopilación de datos	59
D. .Procesamiento de datos	60
3.3.2. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS	60
3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	61
3.4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS BIODIGESTORES	62
A. Dimensiones de Los Biodigestores	62
3.4.2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	63
A. Estiércol de vacuno	63
B. Estiércol de cuy	64
C. Residuos de Leguminosas	64
3.4.3. OBTENCIÓN DE INOCULANTE	64
A. Características y cálculo de cantidad del inoculante	65
B. Cantidad de Inoculante	65
3.4.4. DETERMINACIÓN DE CANTIDAD DE RESIDUOS DE LEGUMINOSAS	66
A. Determinación de la relación C/N de la mezcla	66
3.4.5. PRETRATAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS	67
A. Reducción y chancado de residuos de Leguminosas	67
B. Compostaje de Estiércol y residuos de leguminosas	67
3.4.6. PREPARACIÓN DE LA CARGA DEL BIODIGESTOR	67
A. Pesado	67
B. Adición de agua	68
C. Adición de Inóculo	68
D. Mezclado	69
E. Carga del biodigestor	70
3.4.5. MONITOREO DE PARÁMETROS	71
A. pH	71
B. Temperatura Biodigestor	71
3.4.6. MEDICIÓN DEL VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS BIODIGESTORES TIPO BATCH	72

CAPITULO IV
ANÁLISIS Y EVALUACION DE RESULTADOS

4.1. GENERALIDADES.....	74
4.1.1. BIODIGESTORES CONSTRUIDOS.....	74
4.1.2. DETERMINACION DE pH	75
4.1.3. CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL BIODIGESTOR N° 1 Y N° 4	76
A. Durante el Tiempo de Retención	76
4.1.4. CONTROL DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL VS LA TEMPERATURA EN EL BIODIGESTOR N° 1 Y N° 4	77
4.1.5. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 1)	79
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 1	80
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N°1	81
4.1.6. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 2)	82
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 2	83
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 2	84
4.1.7. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 3)	85
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 3	86
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 3	87
4.1.8. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 4)	88
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 4	89
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 4	90
4.1.9. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 5)	91
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 5	92
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 5	93
4.1.10. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 6).....	94
A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 6	95
B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 6.....	96
4.1.11. RENDIMIENTO COMPARADO EN LA PRODUCCION DE BIOGÁS	97
4.2. DISCUSIÓN	98

CAPITULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO Y PRODUCCIÓN DE BIÓGAS A MAYOR ESCALA

5.1. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIÓGAS PROYECTADA A MAYOR ESCALA.....	99
5.2. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	101
5.2.1. Inversión fija	102
5.2.2. Costos de producción	102
5.2.3. Rendimiento de producción de biogás y subproductos	103
5.2.4. Comercialización del biol y biosol	104
5.2.5. Gastos de financiamiento	104
5.2.6. Punto de equilibrio	104
5.3. ASPECTOS DEL PROYECTO	106
5.3.1. SALUD	106
5.3.2. AMBIENTAL.....	107
5.3.3. SOCIOECONÓMICO	108
5.3.4. SOCIAL	109

5.4. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS - ESTIÉRCOL DE VACUNO	110
5.5. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS - ESTIÉRCOL DE CUY	114

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.....	119
5.2. RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Generación de residuos orgánicos per cápita</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Composición física de los residuos.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Población de ganado vacuno.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 4. Volumen de estiércol y metano producido por las distintas especies animales.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 5. Estiércol de cuy producido en 24 horas.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 6. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 7. Composición bioquímica del Biogás</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 8. Características del biogás.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 9. Producción teórica de biogás en compuestos orgánicos</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 10. Producción de biogás por tipo de estiércol.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 11. Composición química del estiércol</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 12. Producción de biogás a partir de residuos vegetales</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 13. Valores de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 14. Contenido de sólidos totales de diversos residuos.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 15. Resultados de análisis de materia prima</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 16. Contenido de sólidos totales en materiales de fermentación</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 17. Rangos de temperatura y Tiempo de retención</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 18. Inhibidores de la descomposición anaerobia y concentraciones perjudiciales</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 19. Tratamiento según el uso final del biogás</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 20. Consumo de biogás para la alimentación de artefactos.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 21. Propiedades comparadas</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 22. Diferencias físico - químicas entre el gas natural y el GLP</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 23. Composición química del biol</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 24. Composición bioquímica del biol</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 25. Dosis de biol recomendadas para su aplicación.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 26. Características del biosol de estiércol de vacuno.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 27. Dimensiones de los biodigestores.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 28. Características físicas del inoculante.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 29. Valores del inóculo.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 30. Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de vacuno.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 31. Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de cuy.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 32. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de cuy).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 33. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de vacuno).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 34. Parámetros para la construcción de los biodigestores</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 35. Determinación de pH</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 36. Temperatura del Biodigestor N° 1 y N° 4.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 37. Temperatura ambiental vs la temperatura en el biodigestor N° 1 y N° 4.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 38. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 1.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 39. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 1</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 40. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 1.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 41. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 2.....</i>	<i>82</i>

Tabla 42. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 2	83
Tabla 43. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 2	84
Tabla 44. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 3.....	85
Tabla 45. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 3	86
Tabla 46. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 3.....	87
Tabla 47. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 4.....	88
Tabla 48. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 4	89
Tabla 49. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 4.....	90
Tabla 50. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 5.....	91
Tabla 51. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 5	92
Tabla 52. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 5.....	93
Tabla 53. Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 6.....	94
Tabla 54. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 6	95
Tabla 55. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 6.....	96
Tabla 56. Rendimiento en la producción de biogás.....	97
Tabla 57. Contenido de materia orgánica de cada tipo de estiércol.....	99
Tabla 58. Producción de biogás proyectado en base a una tonelada de estiércol	99
Tabla 59. Producción de biol con una tonelada de estiércol	100
Tabla 60. Producción de biosol proyectado.....	101
Tabla 61. Costo de materiales y equipos.....	102
Tabla 62. Costo de construcción de la planta.....	102
Tabla 63. Costos de materia prima y servicios	103
Tabla 64. Mano de obra requerida.....	103
Tabla 65. Costos variables.....	103
Tabla 66. Costo de construcción y producción	103
Tabla 67. Producción de biogás destinado a la combustión y ahorro	103
Tabla 68. Producción de biol para la comercialización.....	104
Tabla 69. Producción de biosol destinado a la comercialización	104
Tabla 70. Gastos de financiamiento	104
Tabla 71. Ingresos y gastos del proceso	104
Tabla 72. Datos para el cálculo del punto de equilibrio	105
Tabla 73. Características de la Materia orgánica utilizada en la biodigestión anaeróbica	110
Tabla 74. Potencial de producción de gas metano (pCH_4) de algunos residuos	110

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema Operativo del Biodigestor –Gásometro	10
Figura 2. Modelo de Biodigestores	12
Figura 3. Tipos de reacción en la fermentación anaerobia.....	13
Figura 4. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.	18
Figura 5. Caracterización para la Co-Digestión de diferentes residuos orgánicos.....	22
Figura 6. Tiempo de retención para la producción diaria de gas para diferente materiales	34
Figura 7. Crecimiento microbiano dentro de un digestor anaeróbico	38
Figura 8. Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso	42
Figura 9. Sistema de tratamiento de purificación de biogás	44
Figura 10. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía	45
Figura 11. Diferencias entre gas natural y GLP	46
Figura 12. Etapas del proyecto	61
Figura 13. Materiales para la construcción de los biodigestores	62
Figura 14. Construcción de biodigestores	63
Figura 15. Estiércol de vacuno	63
Figura 16. Estiércol de cuy recolectado.....	64
Figura 17. Residuos de leguminosas recolectadas	64
Figura 18. Elaboración del inoculante.....	66
Figura 19. Compostaje de estiércol y residuos de leguminosas	67

Figura 20. Pesado de las mezclas Compostaje de estiércol y residuos de leguminosas	68
Figura 21. Adición de agua a la mezcla	68
Figura 22. Adición de inóculo a la mezcla	69
Figura 23. Mezclado de los sustratos	70
Figura 24. Carga del biodigestor.....	70
Figura 25. Medición del pH de la mezcla.....	71
Figura 26. Medición de temperatura del Biodigestor	71
Figura 27. Medición de temperatura de la mezcla.....	72
Figura 28. Medición del volumen de la producción de Biogás.	73
Figura 29. Flujograma experimental de producción de biogás.....	73
Figura 30. Biodigestores Construidos.....	74
Figura 31. Comparación del pH. pre y post tratamiento	75
Figura 32. Temperatura del biodigestor N° 1 durante el tiempo de retención.....	76
Figura 33. Temperatura del biodigestor N° 4 durante el tiempo de retención.....	77
Figura 34. Temperatura ambiental y la temperatura en el biodigestor N° 1	78
Figura 35. Temperatura ambiental y la temperatura en el biodigestor N° 4	78
Figura 36. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 1	79
Figura 37. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 1	80
Figura 38. Correlación de la producción de biogás acumulada vs el tiempo de retención del tratamiento 1	81
Figura 39. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 2	82
Figura 40. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 2	83
Figura 41. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 2	84
Figura 42. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 3	85
Figura 43. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 3	86
Figura 44. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 3	87
Figura 45. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 4	88
Figura 46. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 4	89
Figura 47. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 4	90
Figura 48. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 5	91
Figura 49. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 5 ...	92
Figura 50. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 5	93
Figura 51. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 6	94
Figura 52. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 6 ...	95
Figura 53. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 6	96
Figura 54. Rendimiento de producción de biogás por cada tipo de estiércol.....	97
Figura 55. Comparación de producción de biogás por 1 tonelada de estiércol	100
Figura 56. Comparación de producción de biol por tonelada de estiércol	100
Figura 57. Comparación de producción de biosol por tonelada de estiércol.....	101
Figura 58. Calculo de la utilidad total.....	105
Figura 59. Cálculo del punto de equilibrio.....	105
Figura 60. Punto de equilibrio del proceso de producción de biogás, biol, biosol.....	106
Figura 61. Puestos de trabajo generado en la producción de biogás	109

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.

En la actualidad una de las principales preocupaciones a nivel mundial es la crisis ambiental, los desechos orgánicos son un problema que se convierte cada vez más complejo de manejar, Únicamente un 2.7 % de la producción anual de biomasa vegetal es utilizable por el hombre, los residuos agrícolas suponen casi 4 veces esta cantidad, estimándose un valor medio mundial en base seca de 2.5 toneladas por persona y año.

El problema de los residuos es el elevado volumen que se produce, prevenir y minimizar su producción así como separarlos de origen son acciones claves para que junto con las tecnologías adecuadas para el control y tratamiento se reduzca los impactos negativos de los desechos y se posibilite la valorización del residuo. En el Perú, la quema residuos agrícolas continúa siendo la manera más económica de reducir el volumen de residuos, producto de las actividades agrícolas. Se estima que la quema de biomasa de los residuos agrícolas, produce 40% del dióxido de carbono (CO_2), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de partículas de materia suspendidas (PM) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos a la atmosfera a escala mundial.

Es por eso que se deben aplicar nuevas tecnologías utilizando estos residuos como materia prima para producir biogás que es una fuente de energía renovable, ideal para el desarrollo de proyectos energéticos de comunas rurales aisladas de los servicios de distribución eléctrica convencional, contribuye a la reducción de contaminantes en el suelo, aire y agua. Además como subproducto obtenemos un fertilizante orgánico llamado biol que estimula el crecimiento de las plantas y permite la protección contra las plagas y enfermedades, además ayuda a mantener el vigor de las plantas y soportar eventos extremos del clima. Es especialmente útil, luego de heladas y granizadas.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.2.1. Delimitación Espacial:

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de la Universidad Alas Peruanas ubicado en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero provincia Arequipa, región Arequipa, a 2355 m.s.n.m. ,está ubicado geográficamente entre los paralelos 16°25'21.49" de latitud sur y 71°31'23.31" de longitud oeste.

1.2.2. Delimitación Temporal:

El trabajo de investigación se inició con la construcción de biodigestores que se realizó el día 10 de Diciembre del año 2016, posteriormente el día 16 de Diciembre se procedió con el llenado de los biodigestores con la materia prima respectivamente para poder hacer el seguimiento de los parámetros de evaluación del proceso de producción de Biogás que concluyó en el mes de Febrero del 2017.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.3.1. Objetivo General:

- Evaluar el rendimiento de producción de biogás comparando el estiércol de vacuno (*Bos taurus*) y estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) en codigestión con residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) en un biodigestor anaerobio.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- Cuantificar la producción de biogás generada por la mezcla de estiércol de vacuno (*Bos taurus*) con residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*).
- Cuantificar la producción de biogás generada por la mezcla de estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) con residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*).
- Determinar la cantidad de agua necesaria para que la producción de biogás es mayor.

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN:

- Para la digestión anaerobia de residuos orgánicos existe una concentración de mezcla de sustratos y agua que maximiza la producción de biogás en el biodigestor.

1.5. VARIABLES E INDICADORES.

1.5.1. Variable Independiente:

- Estiércol de vacuno (*Bos taurus*), de cuy (*Cavia porcellus*), agua y residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*).

A. INDICADORES :

- Volumen de agua
- Relación C/N
- Cantidad de residuos de leguminosas.

1.5.2. Variable Dependiente:

- Producción de biogás

A. INDICADORES :

- Temperatura
- pH
- Volumen de biogás (L)

1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación es viable ya que utiliza como materia prima los desechos de actividades agropecuarias como son: el estiércol de vacuno (*Cavia porcellus*) y de cuy, desechos de la preparación de alimentos y de centros de abastos como son los residuos de leguminosas, los materiales para la construcción del biodigestor Batch son de bajo costo y fácil acceso. El proceso es de fácil operatividad así que se podría implementar a mayor escala de producción.

1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1. Justificación :

En el Perú una de las principales actividades económicas es la agricultura y ganadería, estas generan desechos orgánicos, el eje de la investigación se concentra en resolver este problema, mediante la degradación anaeróbica de desechos orgánicos, obteniendo como resultado la generación de biogás, La generación y uso del biogás como fuente de energía renovable, es una opción

con garantía de rentabilidad, pues no sólo resuelve un problema ambiental al momento de reutilizar materia orgánica. Entre los factores que determinan este uso como una alternativa viable que garantiza una fuente de energía renovable y confiable más limpia, mejora la sustentabilidad y sostenibilidad de la actividad, ayuda a mitigar el cambio climático, al prevenir que el metano (CH₄) sea liberado en el aire, reduce la contaminación. La materia prima es de fácil recuperación, mejora las condiciones de higiene, reduce las molestias causadas por el olor. Cabe destacar que el creciente aumento de los precios de la energía convencional presenta al biogás como una fuente muy rentable para su uso.

1.7.2. Importancia:

La importancia de la investigación radica en el aprovechamiento de los residuos orgánicos para producir energía renovable y de bajo costo, analizando 2 tipos de materia prima (estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) y vacuno (*Bos taurus*)) para evaluar el rendimiento de la producción de biogás siendo utilizado para abastecer cualquier necesidad energética del ser humano, además como subproducto del proceso tenemos el biol un excelente fertilizante que estimula el crecimiento de las plantas y permite la protección contra las plagas y enfermedades en los cultivos.

Contribuyendo así a la adopción de técnicas de gestión de residuos agropecuarios, mitigando impactos negativos al medio ambiente, generando productos que traen beneficios económicos y ecológicos a la comunidad.

1.8. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACION.

1.8.1. Tipo de Investigación :

Experimental: Debido a que se obtiene biogás en un biodigestor anaerobio a partir de desechos orgánicos, en el cual se controla los parámetros del proceso para evaluar el rendimiento de producción.

Correlacional: Se busca analizar la relación de tipo de sustrato con el rendimiento de producción de biogás.

1.8.2. Nivel de Investigación:

El nivel de la investigación es correlacional ya que se busca encontrar la relación de la materia prima con la cantidad de los productos generados.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

- **LAWRENCE QUIPUZCO USHÑAHUA*, WILFREDO BALDEÓN QUISPE*, OSCAR TANG CRUZ*** en su artículo “**EVALUACION DE LA CALIDAD DE BIOGAS Y BIOL A PARTIR DE DOS MEZCLAS DE ESTIERCOL DE VACA EN BIODIGESTORES TUBULARES DE PVC.**”

En este estudio se evaluó la calidad de biogás y biol producido en biodigestores tubulares de PVC con dos diferentes mezclas: uno con una relación estiércol y agua de $\frac{1}{4}$ y otro con $\frac{1}{5}$. Estos biodigestores fueron instalados con fines de investigación en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos. El biol obtenido en el estudio tiene una buena cantidad de N-P-K. Las cantidades de Ca, Mg y Na encontradas en los bioles de las mezclas se asemejan a la de los abonos orgánicos, por lo que puede ser usado como fertilizante en cultivos hidropónicos.

- **JEAN LUI SALAZAR CUAILA, CRISTIAN AMUSQUIVAR COAQUIRA, JUAN JOSE LLAVE PEREZ, CÉSAR RIVASPLATA CABANILLAS** en su artículo “**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOL A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO: EXPERIENCIAS EN LA CIUDAD DE TACNA.**”

En esta investigación se instaló y evaluó un biodigestor familiar, se cuantificó la producción de biogás diario del biodigestor, a través de un método indirecto como el gasómetro de campana flotante, las condiciones climáticas, fueron muy influyentes para mantener el calor del sistema, lo que aumentó la eficiencia del biodigestor para producir biogás.

- **LAWRENCE QUIPUZCO USHÑAHUA*, WILFREDO BALDEÓN QUISPE***, en su artículo “**DESEMPEÑO DE UN BIODIGESTOR CARGADO CON LODO SEPTICO Y EXCRETA DE CUY PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS Y BIOL.**”

En esta investigación los sistemas ecológicos diseñados permitieron la recuperación casi total de todos los nutrientes y oligoelementos de las aguas servidas después de un tratamiento apropiado por separado de las heces fecales, orina y aguas grises contribuyendo a la reutilización del biol en la agricultura y generación de bioenergía mediante el biogás.

2.2. MARCO TEÓRICO.

2.2.1. RESIDUOS SÓLIDOS DE LA GESTIÓN DEL ÁMBITO MUNICIPAL EN EL PERÚ.

A. Generación per cápita (GPC).

La tabla 1 presenta la generación per-cápita de residuos sólidos según región, en el año 2013.

Tabla 1. *Generación de residuos orgánicos per cápita*

Región	Población urbana (hab.)	Generación residuos (kg/día)	GPC residuos (kg/hab./día)
Amazonas	203 597	106 286	0,522
Áncash	727 57	397 345	0,546
Apurímac	223 269	129 033	0,578
Arequipa	1 192 139	581 062	0,487
Ayacucho	444 737	230 68	0,519
Cajamarca	542 885	291 413	0,537
Callao	1 065 838	698 717	0,656
Cusco	755 563	451 474	0,598
Huancavelica	176 268	86 69	0,492
Huánuco	397 173	196 999	0,496
Ica	741 45	388 763	0,524
Junín	939 876	478 785	0,509
La Libertad	1 444 172	780 558	0,540
Lambayeque	959 775	490 205	0,511
Lima	9 614 115	5 684 258	0,591
Loreto	624 214	345 127	0,553
Madre de Dios	108 112	48 176	0,446
Moquegua	155 426	60 741	0,391
Pasco	206 618	88 573	0,429
Piura	1 385 306	811 543	0,586
Puno	797 231	374 372	0,470
San Martín	569 624	312 272	0,548
Tacna	284 697	140 065	0,492
Tumbes	206 177	94 306	0,457
Ucayali	396 209	261 571	0,660
Total	24 162 040	13 529 015	0,56

Nota: Se registra la generación de residuos domiciliarios en las regiones del Perú, la ciudad que genera mayor cantidad de residuos es la ciudad de Lima. Recuperado de: Ministerio del Ambiente (2014). Informe Nacional de Residuos Sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal Lima .GPC (generación per cápita).

B. Composición de residuos peligrosos y no peligrosos según reaprovechamiento.

Según (Ministerio del Ambiente , 2014). Los residuos sólidos peligrosos incluidos en los residuos domiciliarios, tales como pilas, restos de servicios higiénicos, papel higiénico, pañales, focos, residuos de pintura, residuos de medicamento, entre otros, a nivel del país para el año 2013 fue de 7,9 %.

En el 2013, el 27,88 % de los residuos sólidos estaba compuesto por residuos no peligrosos que podían ser reutilizados (fibra dura vegetal, restos orgánicos de cocina,

huesos, restos de jardín, diversos papeles, plásticos –botellas, bolsas, envases–, vidrios, latas, metales, madera, telas, entre otros), de los cuales el 50,43 % eran restos orgánicos de cocina y preparación de alimentos.

Tabla 2. *Composición física de los residuos*

Región	Residuos domiciliarios peligrosos no reaprovechables (%)	Restos orgánicos de cocina y preparación de alimentos (%)	Residuos no peligrosos reaprovechables (%)	Residuos no peligrosos no reaprovechables (%)
Amazonas	5,7	60,23	27,64	6,12
Áncash	6,82	52,99	27,94	10,6
Apurímac	10,53	45,19	32,49	12,58
Arequipa	11,67	45,48	30,05	10,69
Ayacucho	6,07	47,3	28,09	16,73
Cajamarca	6,01	56,61	25,74	9,46
Callao	10,29	51,58	29,59	6,69
Cusco	6,15	44,84	33,49	13,07
Huancavelica	6,92	42,58	26,77	23,06
Huánuco	5,35	49,75	29,53	14,71
Ica	10,05	48,42	25,03	22,05
Junín	9,68	49,82	25,52	15,65
La Libertad	7,05	52,18	22,59	16,23
Lambayeque	8,81	51,64	24,8	15,85
Lima	9,7	48,88	30,0	12,19
Loreto	2,56	70,19	20,24	5,28
Madre de Dios	5,58	48,14	36,93	6,94
Moquegua	10,87	51,64	27,75	9,74
Pasco	10,54	48,68	23,22	16,93
Piura	5,9	39,92	34,59	18,01

Nota: La mayor cantidad de residuos generados en cada región son los restos orgánicos y residuos de cocina. En Arequipa se genera el 45.48 % del total de los desechos. Recuperado de: Ministerio del Ambiente. (2014). *Informe Nacional de Residuos Sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal*. Lima.

2.2.2. RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS DE LA CRIANZA DE CUYES Y GANADO VACUNO.

A. Población de ganado vacuno en el Perú

La ganadería bovina en el Perú, es un sector importante en la producción agropecuaria, se encuentra mayormente en propiedad de pequeños ganaderos y comunidades campesinas. La tabla 3 muestra la población de ganado vacuno registrado del 2008 al 2014.

Tabla 3. Población de ganado vacuno

(Unidades)		Ganado vacuno						
Unidad Agraria		2008	2009	2010	2011	2012	2013 P/	2014 P/
Total	Departamental	5 442 989	5 459 435	5 520 200	5 589 173	5 660 948	5 556 188	5 578 388
I	Tumbes	17 461	17 100	13 729	14 447	18 070	16 447	14 414
II	Piura	227 803	230 765	302 158	310 158	324 960	308 181	295 041
III	Lambayeque	113 725	114 210	110 583	109 540	89 795	89 530	85 995
IV	La Libertad	253 872	253 917	254 699	259 557	262 771	262 017	259 231
V	Áncash	302 411	305 711	307 624	304 367	300 992	294 294	304 432
VI	Lima	228 844	226 800	230 422	232 109	225 265	226 410	232 070
VII	Ica	37 296	38 100	37 063	38 362	43 823	45 315	46 448
VIII	Arequipa	248 526	215 164	204 164	201 854	201 589	234 323	230 560
IX	Moquegua	30 050	31 200	30 426	28 624	27 380	26 180	27 835
X	Tacna	28 788	26 821	26 781	27 859	26 370	26 780	28 450
XI	Cajamarca	663 444	668 400	661 442	664 574	645 466	652 413	661 156
XII	Amazonas	239 911	238 500	231 680	230 526	230 190	231 874	240 121
XIII	San Martín	155 033	158 060	155 352	162 423	180 040	181 450	185 986
XIV	Huánuco	323 160	324 200	319 829	305 300	246 716	273 992	295 422
XV	Pasco	127 193	127 367	121 506	123 433	139 412	104 710	105 754
XVI	Junín	234 727	230 300	225 423	226 527	308 233	312 227	288 385
XVII	Huancavelica	192 479	196 315	193 053	190 420	181 736	192 332	210 565
XVIII	Ayacucho	422 321	433 280	457 628	502 428	523 715	534 820	496 410
XIX	Apurímac	336 476	338 610	333 045	340 719	346 088	294 610	300 975
XX	Cusco	503 610	504 329	503 311	507 051	517 772	413 659	416 924
XXI	Puno	634 530	652 210	669 200	680 050	691 610	694 240	708 700
XXII	Loreto	30 598	30 790	35 486	36 670	35 080	42 824	43 860
XXIII	Ucayali	42 475	44 280	43 334	41 105	42 210	43 180	45 194
XXIV	Madre de Dios	48 256	53 006	52 261	51 070	51 665	54 380	54 60

Nota: Se muestra la cantidad estimada de ganado vacuno en el Perú, se puede determinar el potencial de generación de biogás a nivel nacional. Recuperado de: Instituto Nacional de Estadística e Informática. (Junio de 2015). *Compendio Estadístico Perú 2015*. Lima. Obtenido de <http://www.inei.gob.pe>.

B. Generación de estiércol por vacuno.

Tabla 4. Volumen de estiércol y metano producido por las distintas especies animales.

Especie	Peso vivo	Kg estiércol /día	% CH ₄
Cerdos	50	4,5-6	65-70
Vacunos	400	25-40	65
Equinos	450	12-16	65
Ovinos	45	2,5	63
Aves	1.5	0.06	60
Caprinos	40	1.5	..

Nota: El estiércol que produce mayor cantidad de biogás, es el de cerdo es importante resaltar la disponibilidad del residuo al elaborar un proyecto de producción de biogás. Recuperado de: Instituto de Ingeniería Rural. (2009). *Manual de Producción de Biogás*. Argentina. (..) No precisa.

C. Población y producción de cuyes en el Perú.

Según datos del (Ministerio de Agricultura , 2003) se ha estimado una población de 23,240,846 distribuidas principalmente en la sierra con 21, 462,950 cabeza en comparación de 1, 439,746 de la costa y tan solo 338,150 animales existentes en la selva. Es importante señalar que en los fenómenos migratorios del campo

a la ciudad de las últimas décadas no han incluido el abandono de esta actividad es así, que se estima que en más de 90 mil hogares urbanos se mantiene la crianza de cuyes estimándose en más de un millón de cabezas criadas en la ciudad.

(Ministerio de Agricultura , 2003). Para el 2006, sobre un estimado de beneficio de 65 millones de animales anuales a un peso promedio de carcasa de 0.400 kg producidos por una población estable de 23'240,846 animales, y para una población del país proyectada de 27'627,553 habitantes (INEI,2006) se ha estimado un consumo per cápita de 0.940 kg.

Los principales departamentos productores de cuyes en el Perú son: Ancash, Apurímac, Cajamarca, Cusco, Huánuco, Junín, La Libertad (Ministerio de Agricultura , 2003)

D. Generación de estiércol de cuy.

Tabla 5. Estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) producido en 24 horas

Hembra gestante, no lactante y macho en actividad	Hembra lactante y su camada	Cría de engorde
70-75	180	40-50

Nota: Estos datos son de utilidad para estimar la disponibilidad diaria de materia prima por la cantidad de cuyes. Fuente: Elaboración propia basada en el pesado de estiércol de cuyes separados de su lugar de crianza diariamente.

2.2.3. BIODIGESTOR.

Un biodigestor es un sistema en el cual se genera un ambiente adecuado para que la materia orgánica se descomponga en ausencia de oxígeno, a este fenómeno se le llama digestión anaeróbica. Esta descomposición se produce por bacterias que habitan en el interior del biodigestor y proceden principalmente del estiércol fresco, las cuales se alimentan de la materia orgánica produciendo como sub productos biogás y fertilizantes llamados biol y biosol. (Ministerio de Agricultura (DGSA), 2010)

A. Componentes de un Biodigestor.

(Guevara, 1996), considera que el digestor que es una planta de fermentación anaeróbica, para la fabricación de biogás. Está compuesto por las siguientes partes:

1. Tubo de entrada de materia orgánica.
2. Cámara de fermentación o cuerpo del biodigestor.
3. Cámara de depósito de gas.

4. Cámara de salida de materia estabilizada.
5. Conducto de gas lleva el gas para ser usado.
6. Tapa hermética
7. Gasómetro.

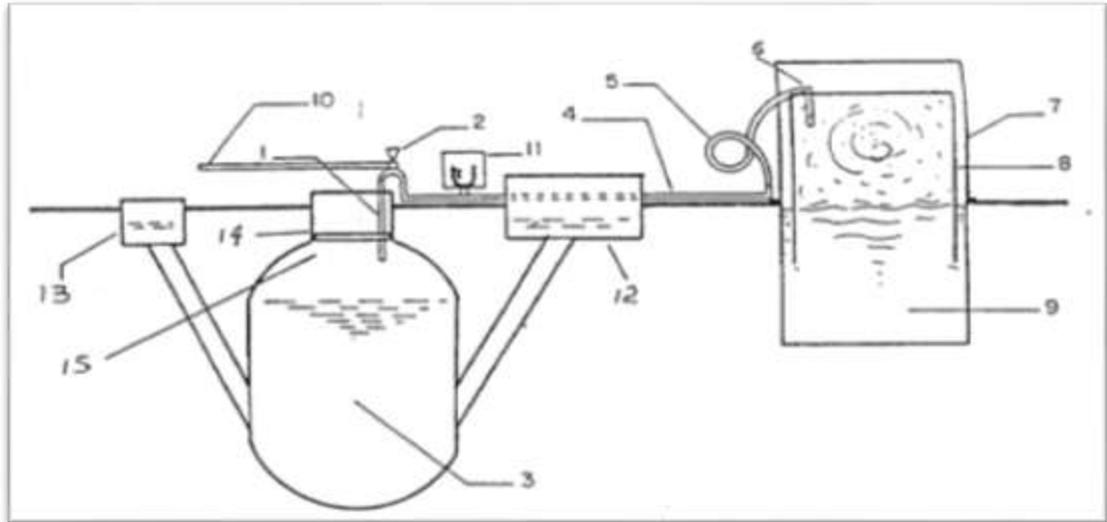


Figura 1. Esquema Operativo del Biodigestor –Gásometro, los números nos indican cada parte del biodigestor: 1 (Tubería que conduce el gas fuera del biodigestor), 2 (Llave reguladora del uso del gas), 3 (Biodigestor), 4 (Tubería que conduce al gasómetro), 5 (Manguera flexible), 6 (Tubería de entrada y salida del gasómetro), 7 (Barras guías del gasómetro), 8 (Gasómetro), 9 (Tanque de agua sobre el cual frota el gasómetro), 10 (Tubería de distribución del gas), 11 (Manómetro), 12 (Cámara de salida del material), 13 (Tubo de entrada), 14 (Tapa hermética), 15 (Cámara de depósito de gas). Recuperado Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.

B. Tipos de Biodigestor.

Según (Guevara, 1996) por sus formas y estructura los digestores pueden agruparse en los siguientes diseños:

1. Según el almacenamiento del gas :

- a) Cúpula fija
- b) Cúpula móvil con depósito flotante o de presión constante
- c) Con gasómetro de caucho o material plástico en forma de bolsa

2. Según su forma geométrica :

- a) Cámara vertical cilíndrica
- b) Cámara esférica
- c) Cámara ovalada
- d) Cámara rectangular
- e) Cámara cuadrada

3. Por los materiales de construcción:

- a) Ladrillo
- b) Mampostería
- c) Hormigón
- d) Hormigón armado
- e) Plástico

4. Por su posición respecto a la superficie terrestre:

- a) Superficiales.
- b) Semienterrados
- c) Subterráneos.

5. Modelo chino.

Este modelo está muy difundido en China, es un digestor de cúpula fija en forma cilíndrica, enterrados con cámaras de Hidropresión.

La estructura puede ser de hormigón, de ladrillos, bloques y adobes se le puede adicionar el gasómetro. Este digestor por estar enterrado favorece el proceso fermentativo, con poca influencia por los cambios de temperatura, la desventaja que presenta es que la presión del gas es variable dependiente del volumen acumulado.

6. Modelo indio.

Es originario de la India y se ha difundido mucho porque mantiene una presión de trabajo constante, generalmente son verticales, con el gasómetro incorporado, la estructura se construye de bloques y concreto, y el gasómetro es de acero, lo que lo hace costoso.

El Gasómetro posee una camisa que se desliza en un eje y lo mantiene centrado para que no rose las paredes ni escree, este eje descansa en una viga transversal de concreto armado enjaulado.

Estos digestores son de alimentación continua, se construye generalmente enterrados quedando la cúpula sin gas en un nivel cercano a la superficie del terreno.

7. Modelos Horizontales.

Se habla de digestores horizontales cuando éstos no profundizan en el suelo, son de forma rectangular, aunque pueden ser cuadrados, se caracterizan por ser en su mayoría de concreto armado debido a las presiones que están sometidas. Su uso es generalmente para el saneamiento de descargas cloacales, ya que su

conformación alargada garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, debido al flujo pistón y el tiempo de retención sean debidamente degradados. Estos digestores llevan generalmente la parte superior una pequeña cúpula metálica desmontable que sirve de boca de visita, la presión se controla con el sello de agua, además requieren gasómetro adicional debido a la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor.

8. Modelo Batch por lotes.

Estos digestores se caracterizan porque se cargan una sola vez, tiene una cúpula Metálica con sello de agua la estructura se construye con bloques y concreto reforzado; la desventaja es que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental, se utiliza para degradar materias primas sólidas, como vegetales ,desechos sólidos orgánicos el requisito básico de utilizar una buena inoculación (5 al 10% en base al peso), para garantizar una buena fermentación.

El rendimiento volumétrico de gas es superior a cualquier digestor continuo (debido al contenido de sólidos totales), igualmente el rendimiento de abonos solidos es elevado; por eso este método permite el tratamiento sanitario de desperdicios orgánicos, el control satisfactorio de toda clase de plagas, así como la proliferación de moscas así mismo la recuperación y económico del metano (CH₄) en la retención de humus e ingredientes para usos de fertilizantes.

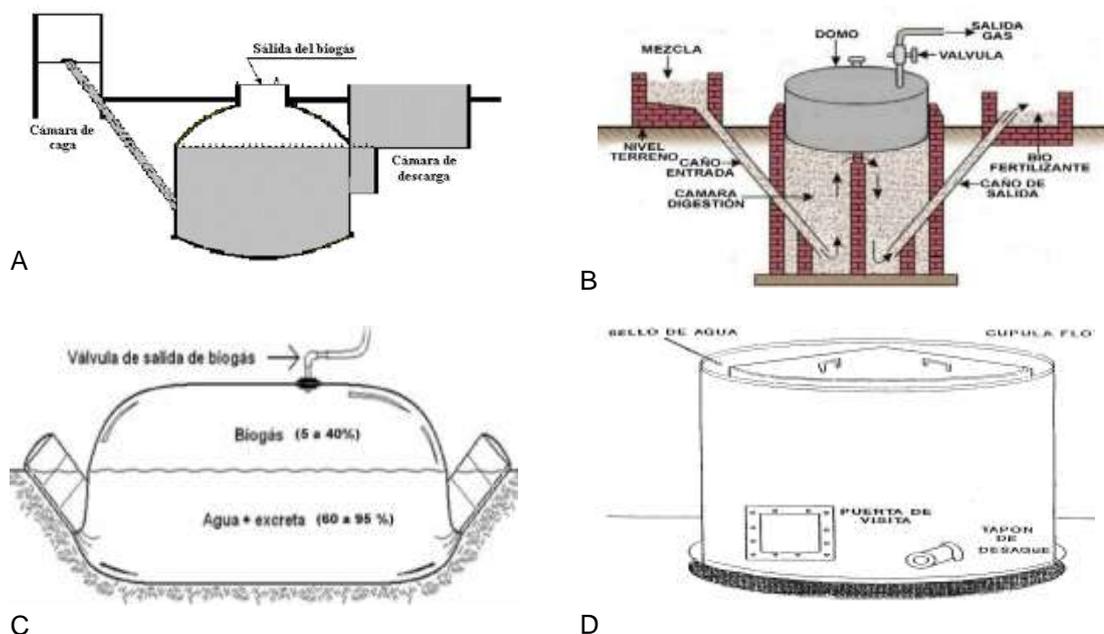


Figura 2. Modelo de Biodigestores. A: Modelo Chino. B: Modelo Indio.C: Modelo Horizontal. D: Modelo Batch por lotes.

2.2.4. FERMENTACIÓN ANAEROBIA.

Se denomina digestión anaerobia al proceso en virtud del cual la materia orgánica es convertida en metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H), en ausencia de oxígeno (O) y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas. La formación de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) corresponde a la última etapa de una serie de reacciones en las cuales los compuestos orgánicos son degradados completamente. La digestión anaerobia es un proceso que se produce en ambientes naturales como los pantanos, en zonas anegadas para el cultivo del arroz, en los sedimentos de lagos y mares, en las zonas anóxicas del suelo, en fuentes de aguas termales sulfurosas y en el tracto digestivo de los rumiantes. Bajo condiciones anaerobias, los diferentes grupos bacterianos interactúan unos con otros y constituyen una comunidad microbiana, la cual tiene una estructura definida y a la que contribuye cada población para su mantenimiento. (Díaz Báez, Espitia Vargas, & Molina Pérez, 2002)

A. Reacciones de la Fermentación Anaerobia.

TIPO DE REACCIÓN	ECUACIÓN
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación del butirato a acetato e H ₂	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogénesis a partir de H ₂ y CO ₂	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO ₂ e H ₂	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Figura 3. Tipos de reacción en la fermentación anaerobia. Recuperado de Zinder, S. H. (1984). *Microbiología de la conversión anaeróbica de desechos orgánicos en metano: desarrollos recientes*. ASM News.

B. Fases de Fermentación Anaerobia.

1. Hidrólisis.

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el

proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de amonio (NH_4) y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H), amonio (NH_4) y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un

aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores. Varnero (2011, p.19).

2. Acidogénesis.

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético (CH_3COOH), fórmico (CH_2O_2), Hidrógeno (H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$), butírico ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$), valérico ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$), láctico ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos. (p.21)

3. Acetogénesis.

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (hidrógeno (H_2) y acético (CH_3COOH)), otros (etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla hidrógeno/ dióxido de carbono (H_2/CO_2)) produciendo como único producto acetato (CH_3COO^-). Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno (H_2) como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno (H_2) y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente. (p.21).

4. Metanogénesis.

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano (CH_4) y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano (CH_4) a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato (CH_3COO^-), hidrógeno/ dióxido de carbono (H_2/CO_2), formato, metanol ($\text{CH}_3\text{-OH}$) y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen: Hidrógeno/ dióxido de carbono (H_2/CO_2) y fórmico (CH_2O_2) y acetoclásticos, que consumen acetato (CH_3COO^-), metanol ($\text{CH}_3\text{-OH}$) y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano (CH_4) producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético (CH_3COOH), a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el hidrógeno (H_2) como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato (CH_3COO^-). Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotherix*. El metano (CH_4) restante proviene de los sustratos: Ácido carbónico (H_2CO_3), ácido fórmico (CH_2O_2) y metanol ($\text{CH}_3\text{-OH}$). El más importante es el ácido carbónico (H_2CO_3), el cual es reducido por el hidrógeno (H_2), también producido en la etapa anterior. (p.22).

C. Bacterias que intervienen en el Proceso de Fermentación

Anaerobia.

Las especies de microorganismos involucrados en el proceso varían dependiendo de los materiales que serán degradados. Los alcoholes, ácidos grasos, y los enlaces aromáticos pueden ser degradados por la respiración anaeróbica de los microorganismos.

Estos utilizan, entre otros nutrientes, el nitrato (NO_3^-) (*Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas stutzerii*), azufre (*Desulfuromonas acetoxidans*, *Pyrodictium occultum*), sulfato (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfonema limicola*), carbonato (*Acetobacterium woodi*, *Clostridium aceticum*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*), fumarato (*Escherichia coli*, *Wolinella succinogenes*) o Hierro (Fe), (*Alteromonas putrefaciens*) como aceptores de electrones, por lo que pueden denominarse reductores de nitrato (NO_3^-), reductores de sulfato (SO_4), etc.

Sin embargo otros microorganismos también compiten por el nitrato (NO_3^-) como aceptor de electrones, por lo que el nitrato (NO_3^-) se reduce rápidamente a amonio (NH_4) y el nitrato (NO_3^-) como reductor juega un papel secundario en los procesos de fermentación.

Los reductores de sulfato participan activamente en la degradación de compuestos con poco oxígeno (O), tales como lactato ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

En la primera y segunda fase de la degradación, participan bacterias de al menos 128 órdenes de 58 especies y 18 géneros. Las especies que se presentan principalmente son *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Eubacterium* y *Bacteroides*.

En la tercera y cuarta fase de la degradación, se encuentran principalmente bacterias metanogénicas. En la actualidad, se han identificado 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes.

Además, existen diversos microorganismos que pertenecen al sistema ecológico de un biodigestor y que participan indirectamente en la degradación. Por ejemplo, *Staphylococcus*, especie que se desarrolla con frecuencia en los digestores, puede provocar riesgos para la salud del personal que opera el digestor si no se toman las medidas sanitarias necesarias. (p.22).

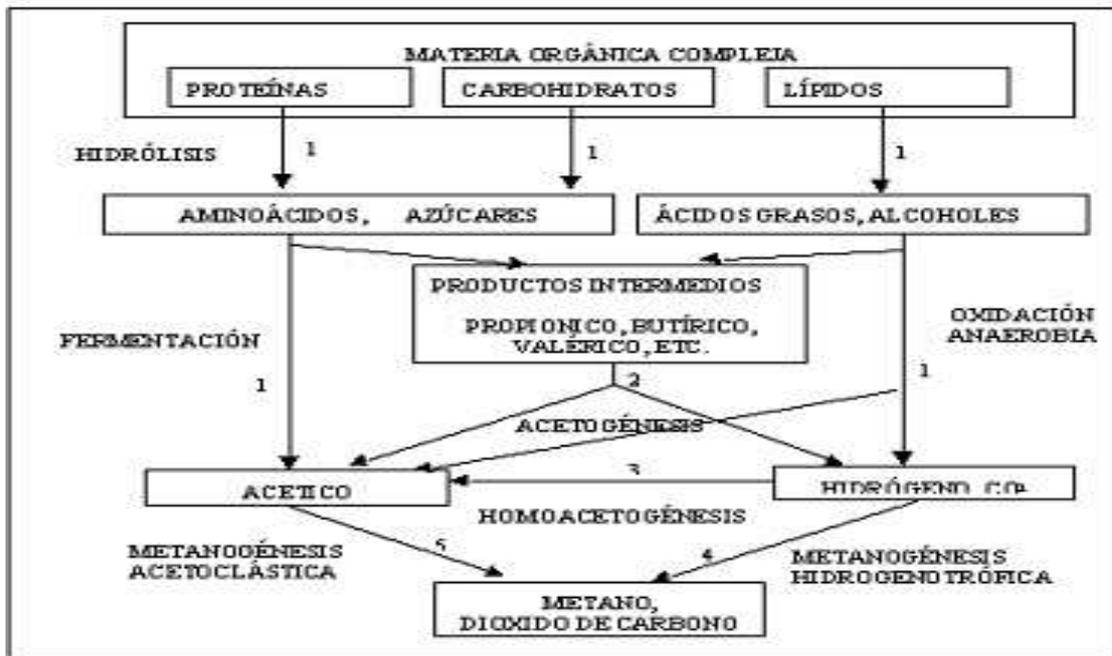


Figura 4. Reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

D. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica.

Al igual que el gas natural, el biogás tiene una amplia variedad de usos, pero al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable. Existen diversos beneficios derivados del proceso de conversión de residuos orgánicos en biogás.

La presión económica sobre los productos agrícolas convencionales se encuentra en continuo aumento. Muchos agricultores se ven obligados a renunciar a su producción, principalmente debido a que sus tierras no presentan rendimientos rentables. Sin embargo, en muchos países la producción de biogás se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos (por ejemplo, los proyectos MDL), proporcionando a los agricultores un ingreso adicional. Por lo tanto, en el sector agrícola, la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica puede permitir obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos. Por otra parte, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la captura y uso de biogás

Cuando los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan compuestos de bajo poder energético como dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Gran parte de la energía se pierde y se libera a la atmósfera. Se estima que la pérdida de energía de un proceso aeróbico es aproximadamente

veinte veces superior al de un proceso anaeróbico. En el caso de la degradación anaeróbica, se generan productos del metabolismo con alto poder energético (por ejemplo, alcoholes, ácidos orgánicos y metano (CH_4)), los cuales sirven como nutrientes de otros organismos (alcoholes, ácidos orgánicos), o bien son utilizados con fines energéticos por la sociedad (biogás).

Otro beneficio ambiental importante de las plantas de biogás es la significativa reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios. De esta forma se reducen significativamente los costos de la disposición de residuos orgánicos, e incluso se obtienen sub-productos con valor agregado (bioabono). Además, el tratamiento anaeróbico de los residuos orgánicos contribuye a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos. Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como por ejemplo, el olor a amoníaco (NH_3), producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar. La promoción e implantación de sistemas de producción de biogás colectivos -varias granjas-, y de co-digestión -tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes en una zona geográfica, usualmente agropecuarios e industriales- permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La co-digestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro. El metano (CH_4) es un gas que en la atmósfera terrestre contribuye al efecto invernadero. El contenido de metano (CH_4) en la atmósfera se ha duplicado desde la última era de hielo a $1,7 \text{ ml m}^{-3}$ en la actualidad. Este valor se ha mantenido constante en los últimos años. El metano (CH_4) contribuye un 20% al efecto invernadero antropogénico. Entre las fuentes de metano (CH_4) de origen humano, más del 50% corresponde a la ganadería y hasta el 30% provienen a partir del cultivo de arroz.

Con el fin de poder comparar el efecto de los diferentes gases de efecto invernadero, a cada uno se le asigna un factor que representa una medida de su efecto invernadero o potencial de calentamiento global, en comparación con el dióxido de carbono (CO_2) que se utiliza como "gas de referencia". El dióxido de carbono (CO_2) equivalente de gases de efecto invernadero se puede calcular

multiplicando el potencial de efecto invernadero en relación con la masa del gas respectivo. Indica la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) que produciría el mismo efecto invernadero en 100 años, es decir, el metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero más potente que el dióxido de carbono (CO_2) en un factor de 21. (p.25).

Tabla 6. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero

Gas	Potencial de calentamiento
CO_2	1
CH_4	21
N_2O	310
SF4	23900
PFC	9200
HFC	11700

Nota: En esta tabla se observa que el metano (CH_4) tiene mayor potencial de calentamiento que el dióxido de carbono, el metano (CH_4) al ser combustionado ayuda a disminuir el efecto invernadero. Recuperado de: Moreno Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

E. Codigestión Anaerobia.

Según (BESEL, S.A. (Departamento de Energía), 2007): La co-digestión consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con el objetivo de:

- a) Aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces.
- b) Compartir instalaciones de tratamiento.
- c) Unificar metodologías de gestión.
- d) Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- e) Reducir costes de inversión y explotación.

El término co-digestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. La co-digestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico. Se han conseguido buenos resultados para mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos de la industria de carne y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano

(CH₄), del orden de 47 m³/t de residuo introducido. También se han conseguido buenos resultados con la co-digestión de lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, la mezcla de estos últimos con aguas residuales urbanas, y la co-digestión de fangos de depuradora y residuos de frutas y verduras. Los residuos urbanos e industriales acostumbran a contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, por lo cual presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos. (p.22)

Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas en su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoquen problemas mecánicos. Los residuos ganaderos pueden ser una buena base para la co-digestión ya que, generalmente, presentan un contenido en agua elevado, una alta capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios. La co-digestión no debe esconder prácticas de dilución de contaminantes, tales como metales pesados. El control de la calidad de los residuos de entrada a una planta de co-digestión colectiva es más factible que en una planta individual en una granja, donde el ganadero tendrá siempre dificultad en disponer de equipos de laboratorio para realizar comprobaciones rutinarias de composiciones de entrada. Este puede ser un limitante a considerar en un escenario de plantas de co-digestión individuales, a no ser que se restrinja la tipología de residuos a entrar en estas plantas. (p.23).

	Residuos ganaderos	Lodos depuración	FORM	Residuos industria alimentaria
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Figura 5. Caracterización para la Co-Digestión de diferentes residuos orgánicos. Se indica las características para la co-digestión. Flechas de sentidos diferentes indican un posible interés en la mezcla, al compensarse la carencia relativa de uno de los dos residuos. Recuperado de BESEL, S.A. (Departamento de Energía). (2007). "Biomasa: Digestores anaerobios". Madrid: IDAE.

2.2.5. BIOGÁS.

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono (CO₂) conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H), nitrógeno (N) y sulfuro de hidrógeno (SH₂). (Instituto de Ingeniería Rural, 2009).

Según (PNUD, 2011). Es un combustible capaz de sustituir combustibles fósiles o biomasa (leña). Mediante la implementación de tecnologías de biodigestión se pueden aprovechar y manejar adecuadamente los desechos sólidos y líquidos en distintos sectores productivos, transformándolos en una fuente de energía. El biogás se genera por la descomposición de la materia orgánica o biomasa, en un entorno húmedo y sin oxígeno, por medio de la actividad bacteriológica. Se puede utilizar todo tipo de materias orgánicas o biológicas para generarlo, siempre que los microorganismos las puedan procesar. Los más comunes son:

- Estiércol de ganado, cerdos, gallinaza, excretas humanas, etc.
- Todo tipo de desechos orgánicos agrícolas: pulpa de café, restos de maíz, de frutas, bagazo de caña, restos de papas, hortalizas, desechos bananeros, etc.
- Desechos agroindustriales producidos en fábricas de conservas, empacadoras de frutas, extractoras de jugos, extractoras de aceite de palma africana, etc.

- Grasas orgánicas, restos de procesadoras de pollos y carne, desechos de procesadoras de camarón, frutos del mar, pescado, etc.
- Fuentes orgánicas en rellenos sanitarios, depósitos de basura, plantas depuradoras.
- Desechos de la producción de azúcar, alcoholes y licores.

A. Composición del Biogás.

Tabla 7. Composición bioquímica del Biogás

Componente	Fórmula química	% Volumen
Metano	CH_4	60-70
Gas Carbónico	CO_2	30-40
Hidrógeno	H_2	1.0
Nitrógeno	N_2	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O_2	0.1
Ácido Sulfhídrico	SH_2	0.1

Nota: El principal componente del biogás es el metano (CH_4) que le otorga la característica combustible. Recuperado de: Pablo, S. V. (2010). Tecnología del biogás. *Compilación referente a los aspectos básicos del biogás*. Bogotá, Colombia: Universidad del Valle.

B. Características del biogás.

Tabla 8. Características del biogás

Características	CH_4	CO_2	$H_2 - H_2S$	Otros	Biogás
Proporciones %	55-70	27-44	1	3	100
Volumen					
Valor Calórico					
(^a MJ/ m^3)	35,8	--	10,8	22	21,5
(^b kCal/ m^3)	8600	--	2581	5258	5140
Ignición % en aire	5-15	--	--	--	6-12
^c T. ignición en °C	650-750	--	--	--	650-750
Presión crítica en ^d Mpa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5-8,9
Densidad nominal en g/l	0,7	1,9	0,08	--	1,2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Vol. en % aire	5-15	--	--	--	6-12

Nota: Presenta las características químicas del biogás y de sus componentes.

(^a) Mega joules, (^b) kilocalorías, (^c) temperatura, (^d) mega pascales. Recuperado de: Instituto de Ingeniería Rural. (2009). Manual de Producción de Biogás. Argentina.

Tabla 9. Producción teórica de biogás en compuestos orgánicos

Compuesto orgánico	Fórmula química	Biogás m^3/kg SV	CH_4 m^3/kg ST
Carbohidratos	$C_6H_{10}O_5$	0,75	0,37
Lípidos	$C_{16}H_{32}O_2$	1,44	1,44
Proteínas	$C_{16}H_{24}O_5N_4$	0,98	0,49

Nota: Esta información es útil para determinar la cantidad de biogás se produce según la materia prima con la que se cuenta. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 10. Producción de biogás por tipo de estiércol

Estiércol	*Disponibilidad Kg/día	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Nota: *El dato se refiere a la cantidad estimada de estiércol que es posible recolectar de todo el producto. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

C. Factores que afectan el proceso de producción de biogás

1. Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.

a) Estiércol.

El estiércol como los purines son una mezcla de las heces de los animales con los orines y la cama. El estiércol es aquel material que puede ser manejado y almacenado como sólido, mientras que los purines lo son como líquidos. El estiércol además de contener heces y orines puede estar compuesto por otros muchos elementos, como son las camas, generalmente paja, pero también a veces contiene serrín, virutas de madera, papel de periódico o productos químicos, también suele incluir restos de los alimentos del ganado, así como agua procedente de los bebederos, de la limpieza de los establos o de lluvia, y todo tipo de materiales que puedan entrar en un establo. (Iglesias, 1994)

Tabla 11. *Composición química del estiércol*

Especie animal	Materia seca %	N %	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO %	MgO %	SO ₄
Vacunos (f)	6	0,29	0,17	0,10	0,35	0,13	0,04
Vacunos (s)	16	0,58	0,01	0,49	0,01	0,04	0,13
Ovejas (f)	13	0,55	0,01	0,15	0,46	0,15	0,16
Ovejas (s)	35	1,95	0,31	1,26	1,16	0,34	0,34
Caballos (s)	24	1,55	0,35	1,50	0,45	0,24	0,06
Caballos (f)	10	0,55	0,01	0,35	0,15	0,12	0,02
Cerdos (s)	18	0,60	0,61	0,26	0,09	0,10	0,04
Camélidos (s)	37	3,6	1,12	1,20	s.i.	s.i.	s.i.
Cuyes (f)	14	0,60	0,03	0,18	0,55	0,18	0,10
Gallina (s)	47	6,11	5,21	3,20	s.i.	s.i.	s.i.

Nota: En la producción de biogás es necesario conocer la composición química del estiércol para determinar las condiciones adecuadas en la biodigestión. (f) Fresco, (s) seco, (s.i) sin información Recuperado de: Tapia, M. E., & Fries, A. M. (2007). *Guía de cultivos andinos FAO y ANPE*. Lima.

b) Fuentes de biomasa para producción de biogás.

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la acuicultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, se usan generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de los combustibles fósiles.

Los residuos agrícolas, como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales en los países en vías de desarrollo y a usos primarios en pequeña escala, por ejemplo, la cocción de alimentos o las pequeñas actividades productivas como panaderías, calderas, secado de granos, etc.

- Plantaciones energéticas: Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación. Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como: jacinto de agua o las de algas, para producir combustibles líquidos como el etanol (C_2H_5OH) y el biodiesel.
- Residuos forestales: Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en él, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín. La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor.

Los desechos de campo, en algunos casos, son en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

- Desechos agrícolas: La agricultura genera cantidades considerables de desechos: se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar.
- Desechos industriales: La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos. Otras industrias también generan grandes cantidades de residuos que pueden ser convertidas para su aprovechamiento energético, entre estas tenemos a la industria del papel, del plástico, las destilerías, etc.
- Desechos urbanos: Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La carencia de sistemas adecuados para el procesamiento de estos residuos genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas, sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación. Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen considerable valor energético que

puede ser utilizado para la generación de energía renovable. (Méndez, Carballo, Arteaga , & Marquez , 2007)

Tabla 12. *Producción de biogás a partir de residuos vegetales*

Residuos	Cantidad residuo Ton /ha	Relación C/N	Volumen de Biogás	
			m^3 /Ton	m^3 /ha
Trigo	3,3	123:1	367	1200
Maíz	6,4	45:1	514	3300
Cebada	3,6	95:1	388	1400
Arroz	4,0	58:1	352	1400
Papas	10	20:1	606	6000
Betarraga	12	23:1	501	6000
Porotos	3,2	38:1	518	1650
Habas	4	29:1	608	1400
Tomate	5.5	12:1	603	3300
Cebolla	7,0	15:1	514	3600

Nota: Es necesario conocer el potencial de producción de los residuos vegetales para que la codigestión sea efectiva. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

c) Acondicionamiento del sustrato previo a la producción de biogás.

Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor hay que realizar una serie de operaciones de acondicionamiento. Dependiendo del tipo de reactor, el grado de pretratamiento será diferente. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuo lo más homogéneo posible, con las condiciones físico-químicas adecuadas al proceso al que va a ser sometido, y sin elementos que puedan dañar el digestor.

La forma de acondicionar los residuos de entrada puede ser por pretratamiento, reducción del tamaño de partícula, espesamiento, calentamiento, control de pH, eliminación de metales y eliminación de gérmenes patógenos.

Cuando se manejan ciertos sustratos, como los purines, es muy importante no almacenar demasiado tiempo, ya que decae muy deprisa la productividad de biogás, al producirse fermentaciones espontáneas. (BESEL, S.A. (Departamento de Energía), 2007).

d) Relación carbono/nitrógeno.

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de

nutrientes. El carbono (C) y el nitrógeno (N) son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono (C) constituye la fuente de energía y el nitrógeno (N) es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono (C) que nitrógeno (N), 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. La descomposición de materiales con alto contenido de carbono (C), superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno (N), pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación carbono /nitrógeno (C/N) menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio (NH_4^+), el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

En términos generales, se considera que una relación carbono /nitrógeno (C/N) óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono (C) por una unidad de nitrógeno (N), es decir, la relación carbono /nitrógeno (C/N) = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación carbono /nitrógeno (C/N) inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación carbono /nitrógeno (C/N) óptimas. (Varnero Moreno, 2011).

Sobre la base del contenido de carbono (C) y de nitrógeno (N) de cada una de las materias primas puede calcularse la relación carbono /nitrógeno (C/N) de la mezcla aplicando la siguiente fórmula:

$$K = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2 + \dots + C_n \cdot Q_n}{N_1 \cdot Q_1 + N_2 \cdot Q_2 + \dots + N_n \cdot Q_n}$$

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia.

Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 13. Valores de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos

Residuos	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1,30	25:1
Equinos	40	0,80	50:1
Ovinos	35	1	35:1
Porcinos	25	1,50	16:1
Caprinos	40	1	40:1
Conejos	35	1,50	23:1
Gallinas	35	1,50	23:1
Patos	38	0,80	47:1
Pavos	35	0,70	50:1
Excretas humanas	2,5	0,85	3:1
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0,53	87:1
Paja cebada	58	0,64	90:1
Paja arroz	42	0,63	67:1
Paja avena	29	0,53	55:1
Rastrojos de maíz	40	0,75	53:1
Leguminosas	38	1,50	28:1
Hortalizas	30	1,80	17:1
Tubérculos	30	1,50	20:1
Hojas secas	41	1	41:1
Aserrín	44	0,06	730:1

Nota: Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

e) Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles.

• Sólidos Totales.

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales (ST) contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales (ST) para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales (ST). (Varnero Moreno, 2011).

Tabla 14. *Contenido de sólidos totales de diversos residuos*

Residuos	% Sólidos totales
Bovinos	13,4-56,2
Porcinos	15-49
Aves	26-92
Caprinos	83-92
Ovejas	32-45
Conejos	34,7-90,8
Equinos	19-42,9
Excretas humanas	17
Hojas secas	50
Rastrojos de maíz	77
Paja de trigo	88-90
Paja arroz	88,8-92,6
Leguminosas (paja)	60-80
Tubérculos (hojas)	10-20
Hortalizas (hojas)	10-15
Aserrín	74-80

Nota: Para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje presente en cada materia prima fresca. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 15. *Resultados de análisis de materia prima*

Materiales	Renglones %	Sólidos totales (TS)	Sólidos volátiles (VS)	Grasas	lignina	Celulosa compleja	Proteína
Estiércol Porcino	Frescos %	27,4	20,97	3,15	5,8	8,88	3,0
	Totales %	100	76,54	11,5	21,49	32,39	10,95
	VS %	-----	100	15,03	28,08	42,32	14,31
Estiércol vacuno	Frescos %	20,0	15,8	0,65	7,11	6,56	1,81
	Totales %	100	76,89	3,23	35,57	32,49	9,05
	VS %	-----	100	4,20	46,2	42,26	11,77
Estiércol de aves	Frescos %	68,9	56,64	2,96	13,66	24,83	6,36
	Totales %	100	82,20	2,84	19,82	50,55	9,56
	VS %	-----	100	3,46	24,11	61,5	11,58
Paja de arroz	Frescos %	88,82	76,41	8,54	11,28	53,25	4,81
	Totales %	100	86,02	9,62	12,7	59,95	5,42
	VS %	-----	100	11,18	14,76	69,19	6,3
Pasto verde	Frescos %	15,9	12,93	1,56	1,56	9,1	0,79
	Totales %	100	81,32	9,8	9,8	57,22	4,94
	VS %	-----	100	17,05	17,05	70,36	6,07

Nota: Los análisis fueron realizados con diversos materiales por el Instituto Industrial de Microbiología de Shanghai. Recuperado de: Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.

Tabla 16. *Contenido de sólidos totales en materiales de fermentación*

Materiales	Contenido seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0,4	99,6
Orina de vaca	0,6	99,4

Nota: Esta información nos sirve como guía para agregar el contenido de agua necesario en el acondicionamiento del sustrato. Recuperado de: Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.

Para conocer el contenido de sólidos totales (ST) de una mezcla de sustratos para la producción de biogás, se puede utilizar la fórmula para calcular porcentaje de sólidos totales (ST) contenidos en la materia prima para carga

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC}$$

%ST = Porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga.
 MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.
 %EST = Porcentaje de sólidos en el estiércol.
 E = Estiércol en kilogramos por día

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Guía de Implementación de Sistemas de Biogás*. Bogotá: Incotec .

Sólidos Volátiles (S.V.). Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los sólidos volátiles (SV) contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (CH₄). (Varnero Moreno, 2011).

f) Temperatura

El principio general es que la tasa de reacciones químicas se incrementa con la temperatura ambiente. Sin embargo, esto se aplica sólo parcialmente a la descomposición biológica y a los procesos de conversión. En estos casos tenemos que recordar que los microorganismos involucrados en el proceso metabólico tienen distintas temperaturas óptimas. Si la temperatura está por encima o por debajo de su rango óptimo, los microorganismos relevantes pueden inhibirse o, en los casos extremos, sufrir un daño irremediable.

Los microorganismos que participan en la descomposición se pueden dividir en tres grupos según sus temperaturas óptimas. Se distingue entre organismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos:

- Las condiciones óptimas para los microorganismos psicrófilicos son a temperaturas por debajo de los 25 °C. A estas temperaturas aunque no hay necesidad de calentar los sustratos o el digestor, sólo se puede lograr un bajo desempeño de degradación y de producción de gas. Por lo tanto, como regla general no es factible la operación económica de las plantas de biogás.
- La mayoría de bacterias conocidas que forman metano (CH₄) tienen su crecimiento óptimo en el rango de temperaturas mesófilas entre 37 y 42 °C. Las plantas de biogás que operan en el rango mesófilico son las más generalizadas en la práctica debido a sus rendimientos de gas relativamente altos y a que se obtiene una buena estabilidad del proceso en este rango de temperatura.
- Si se desea eliminar los gérmenes dañinos por medio de la higienización del sustrato o si se usa como sustrato sub-productos o desechos que tienen una temperatura intrínseca alta (agua de proceso, por ejemplo), los cultivos termófilicos son una opción conveniente para el proceso de digestión. Su rango óptimo de temperaturas se sitúa entre 50 y 60 °C. La elevada temperatura del proceso ocasiona una tasa más alta de descomposición y una menor viscosidad. Sin embargo, se debe considerar que puede requerirse más energía para calentar el proceso de fermentación. En este rango de temperatura, el proceso de fermentación es más sensible a las perturbaciones o irregularidades en el suministro del sustrato o en el régimen operativo del digestor porque en condiciones termófilas hay menos especies diferentes de microorganismos metanogénicos presentes.

Se ha demostrado en la práctica que las fronteras entre rangos de temperaturas son fluidas y son sobre todo los cambios rápidos de temperaturas los que dañan los microorganismos, mientras que si la temperatura cambia lentamente los microorganismos metanogénicos pueden ajustarse a diferentes niveles de temperaturas.

Por lo tanto, no es tanto la temperatura absoluta la que es crucial para el manejo estable del proceso, sino la estabilidad a un cierto nivel de temperatura.

El fenómeno de auto-calentamiento se observa con frecuencia en la práctica y merece mención en relación con este punto. Este efecto ocurre cuando los sustratos consisten en gran medida de carbohidratos que se utilizan en ausencia de materiales de insumo líquidos y sin contenedores bien aislados. El auto-calentamiento es atribuible a la producción de calor por grupos individuales de microorganismos durante la descomposición de los carbohidratos. La consecuencia puede ser que en un sistema que opera originalmente en condiciones mesófilas, la temperatura se eleva a entre 43 a 48 °C. Dado el respaldo analítico intenso y la regulación de proceso que se le asocia, se puede manejar el cambio de temperatura con pequeñas reducciones en la producción de gas por cortos periodos. Sin embargo, sin las intervenciones necesarias en el proceso (como la reducción de las cantidades de insumos) los microorganismos son incapaces de adaptarse al cambio de temperatura y, en el peor de los casos, la producción de gas puede detenerse por completo. (Rohstoffe, 2010).

g) Tiempo de retención.

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor.

En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

El tiempo de retención está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el tiempo de retención, ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono (C) retenido en moléculas resistentes como la celulosa

demanda mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. (Instituto de Ingeniería Rural, 2009).

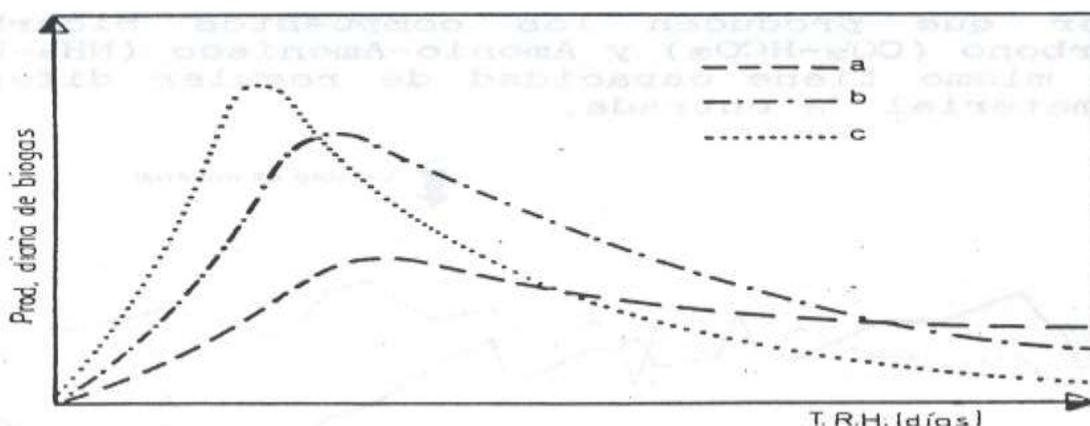


Figura 6. Tiempo de retención para la producción diaria de gas para diferente materiales. Podemos observar cómo se distribuye en función al tiempo de retención la producción diaria de gas para materiales con distintas proporciones de celulosa. a) Pasto verde; b) Estiércol vacuno; c) Paja. Recuperado de: Hilbert Jorge A., Manual de Producción de Biogás.

A modo de ejemplo se dan valores indicativos de tiempos de retención usualmente más utilizados en la digestión de estiércoles a temperatura mesófila.

El límite mínimo del tiempo de retención está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor. (Instituto de Ingeniería Rural, 2009).

Tabla 17. Rangos de temperatura y Tiempo de retención

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención
Psychophilica	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

Nota: Esta tabla muestra el tiempo de retención en el biodigestor de acuerdo a la temperatura en la que se encuentre el proceso de producción y el tipo de fermentación. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Por esta razón en los últimos años se han buscado diseños de cámaras de digestión que procuran lograr grandes superficies internas sobre las cuales se depositan como una película las bacterias u otros sistemas que logran retener a las metanogénicas pudiéndose lograr de este modo T.R. menores.

h) pH.

Según (Canales, Sorto, & Rivas Oliva, 2010). El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5-7.5 (aunque normalmente el rango es de 6.7 a 7.5 ya que sólo la *Methanosarcina* puede mantenerse debajo del pH de 6.7), cuando baja de 5 o sube de 8 puede inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo. Normalmente cuando se trabaja con residuos domésticos y agrícolas, la dinámica del mismo proceso ajusta el pH. Un descenso en el valor del pH acompañado de un incremento en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) indica que hay una perturbación en el proceso de fermentación. El primer signo de acidificación es el aumento en la concentración del ácido propiónico ($C_3H_6O_2$). Las medidas que se pueden tomar para solventar este problema son:

- Detener el suministro del sustrato para que las bacterias metanogénicas puedan degradar el ácido.
- Aumento del tiempo de residencia.
- Remoción continua de los ácidos.
- Adición de sustancias neutralizantes como lechada de cal (CaO , $Ca(OH)_2$), carbonato de sodio y solución de soda caustica.
- Adición de agua.
- Vaciar y cargar de nuevo el reactor.

i) Potencial redox.

Para adecuado crecimiento de los anaeróbios obligados el valor del potencial redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. Cuando se cultivan metanogénicas, se incorporan agentes reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial redox adecuado. (Varnero Moreno, 2011).

D. Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis.

La producción de gas puede inhibirse por varias razones estas incluyen causas técnicas que afectan la operación de la planta. Las sustancias conocidas como inhibidores también pueden hacer más lento el proceso.

Existen sustancias que, bajo ciertas circunstancias, incluso en pequeñas cantidades, bajan la tasa de descomposición o, en concentraciones tóxicas, detienen por completo el proceso de descomposición. Se debe hacer una distinción entre inhibidores que ingresan al digestor a través de la adición de sustrato y aquellos que se forman como productos intermedios a partir de las etapas individuales de descomposición.

Cuando se considera cómo se alimenta un digestor se debe recordar que añadir excesivo sustrato también puede inhibir el proceso de digestión porque cualquier constituyente de un sustrato puede tener un efecto dañino en las bacterias si su concentración es demasiado alta. Esto se aplica en particular a sustancias como los antibióticos, desinfectantes, solventes, herbicidas, sales y metales pesados que en cantidades incluso pequeñas pueden inhibir el proceso de descomposición. La introducción de antibióticos generalmente se atribuye a la adición de bosta agrícola o grasas animales, aunque el efecto inhibitorio de los antibióticos específicos varía mucho. Sin embargo, incluso algunos oligoelementos esenciales pueden también ser tóxicos para los microorganismos si están presentes en concentraciones excesivamente altas. Como los microorganismos son capaces de adaptarse a dichas sustancias hasta cierto grado, es difícil determinar la concentración en la cual una sustancia se torna dañina. Algunos inhibidores también actúan con otras sustancias. Por ejemplo, los metales pesados sólo tienen un impacto dañino sobre el proceso de digestión si están presentes en solución. De cualquier manera, están enlazados por el sulfuro de hidrógeno (H_2S), que se forma también en el proceso de digestión, y se precipitan como sulfuros poco solubles. Debido a que el sulfuro de hidrógeno (H_2S) se forma casi siempre durante la fermentación del metano (CH_4), no se espera generalmente que los metales pesados perturben el proceso. Sin embargo, esto no es igualmente válido para los compuestos de cobre, que son tóxicos incluso en concentraciones muy bajas (40-50 miligramos/litros) debido a su efecto antibacteriano. En los fondos agrícolas pueden entrar en el ciclo de producción por la desinfección de los cascos de los animales, por ejemplo.

En el curso de la fermentación, se forma toda una gama de sustancias capaces de inhibir el proceso. Una vez más, sin embargo, vale la pena llamar la atención aquí sobre la gran adaptabilidad de las bacterias: no se puede asumir que haya límites absolutos aplicables universalmente. En particular, incluso las bajas concentraciones de amoníaco no iónico libre (NH_3) tienen un impacto dañino

sobre las bacterias. Este amoníaco (NH_3) libre está en equilibrio con la concentración de amonio (NH_4^+) (el amoníaco (NH_3) reacciona con el agua para formar amonio (NH_4^+) y un ión de OH^- y viceversa). Esto significa que con un valor de pH cada vez más alcalino, en otras palabras a medida se eleva la concentración de iones (OH^-), el equilibrio cambia y la concentración de amoníaco se incrementa. Una elevación del valor de pH de 6,5 a 8,0, por ejemplo, ocasiona un incremento de 30 veces de la concentración de amoníaco (NH_3) libre.

Una elevación en la temperatura dentro del digestor resulta también en un cambio en el equilibrio en la dirección del amoníaco (NH_3) con su efecto inhibitorio. Para un sistema de digestión que no está adaptado a las altas concentraciones de nitrógeno (N), el umbral de inhibición cae en un rango de 80 a 250 mg/l de amoníaco (NH_3). Dependiendo del valor de pH y de la temperatura de la digestión, esto es equivalente a una concentración de amonio (NH_4^+) de 1,7-4 g/l. La experiencia muestra que la inhibición del nitrógeno (N) del proceso de biogás puede esperarse a una concentración total de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) de 3000-3,500 mg/l.

Otro producto del proceso de digestión es el sulfuro de hidrógeno (H_2S), que cuando está disuelto y no disociado puede inhibir el proceso de descomposición en forma de citotoxina en concentraciones de apenas 50 mg/l. A medida que cae el valor de pH, la proporción de sulfuro de hidrógeno (H_2S) libre se eleva, incrementando el riesgo de inhibición. Una manera posible de reducir la concentración de sulfuro de hidrógeno (H_2S) es mediante la precipitación como sulfuros con ayuda de iones de hierro (Fe). El sulfuro de hidrógeno (H_2S) también reacciona con otros metales pesados y es enlazado y sale en forma de precipitado acompañado por la formación de iones de sulfuros (S_2^-). Sin embargo, como se mencionó previamente, el azufre (S) también es un macronutriente importante. Como se necesita una concentración adecuada de azufre (S) para la formación de enzimas, la precipitación excesiva en la forma de sulfuros puede, a su vez, inhibir la metanogénesis. El efecto inhibitorio de una sustancia dada depende entonces de una serie de factores distintos y es difícil definir valores límites fijos. (Rohstoffe, 2010).

Tabla 18. *Inhibidores de la descomposición anaerobia y concentraciones perjudiciales*

Inhibidor	Concentración inhibidora	Comentarios
Oxígeno	> 0,1 mg/l	Inhibición de arqueas metanogénicas anaeróbicas obligadas
Sulfuro de Hidrógeno	> 50 mg/l H ₂ S	El efecto inhibitorio se eleva a medida que cae el valor de pH.
Ácidos grasos Volátiles	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	El efecto inhibitorio se eleva a medida que cae el valor de pH. Gran adaptabilidad de las bacterias
Nitrógeno de amoníaco	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	El efecto inhibitorio se eleva a medida de que se eleva el valor de pH y la temperatura. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Metales Pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Sólo los metales disueltos tienen un efecto inhibitorio. La desintoxicación se hace por medio de la precipitación de sulfuros
Desinfectantes, Antibióticos	No especificado	Efecto inhibitorio específico para el producto

Nota: Se muestra los principales Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y concentraciones perjudiciales. Recuperado de: (FNR), F. N. (2010). *Guía sobre el Biogás desde la producción hasta el uso*. Alemania : FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.

E. Promotores de la metanogénesis.

1. Inoculantes biológicos.

Se refiere al agregado de material de otro digestor rico en bacterias que se encuentran en plena actividad, de esta manera se estabiliza más pronto la actividad de las bacterias y el biogás comienza a producirse antes. La actividad de las bacterias pasa por tres etapas: (I) arranque (II) estabilización, y (III) declinación. (Gon, 2008)

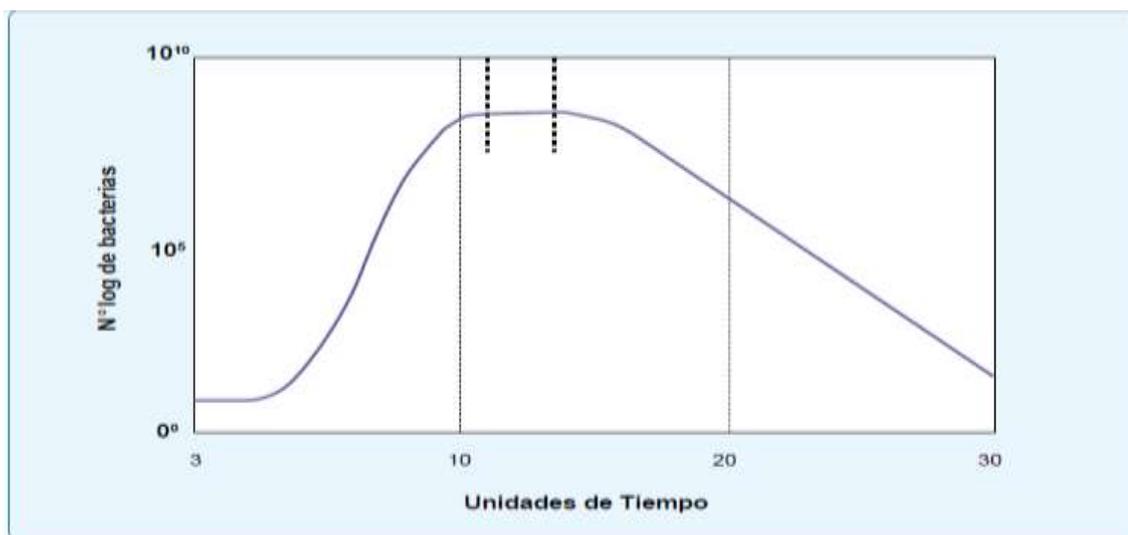


Figura 7. Crecimiento microbiano dentro de un digestor anaeróbico. El crecimiento bacteriano dentro de los digestores claramente tres etapas: La de arranque (I), la de estabilización (II) y la de declinación (III). Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad. Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente. De esta forma se alcanza en forma más rápida, la etapa de estabilización, con lo cual, puede incrementarse la producción de biogás por kg de estiércol. Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor son: la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad del inóculo, mayor será la eficacia. (Varnero Moreno, 2011).

2. Agitación – Mezclado.

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el tiempo de retención, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata” o “espuma” que dificulta la salida del biogás. (Varnero Moreno, 2011).

Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

a) Mecánica:

A través de agitadores manuales o con motores eléctricos.

b) Hidráulica:

A través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.

c) Burbujeo de biogás:

Se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa.

F. Usos del biogás.

Según (Red Española de Compostaje, 2016).El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- En una caldera para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de .una limpieza de H₂S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol (CH₃-OH) o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

El biogás, además de metano (CH₄) tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno (H₂S), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final. Una aplicación tipo de la digestión anaerobia es en las granjas de ganado bovino y porcino de gran tamaño o como planta comarcal de gestión de residuos en zonas de alta concentración de ganado estabulado, por el gran problema que generan los purines. En este caso se puede proponer y proyectar una planta de digestión anaerobia de producción de biogás como auto abastecimiento energético según las necesidades. (BESEL, S.A. (Departamento de Energía), 2007).

Tabla 19. *Tratamiento según el uso final del biogás*

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación del CO_2	Eliminación del H_2S
Producción térmica en caldera	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 ó 2	0-1-2	1 ó 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción.	2	2	2
Pilas de combustible	2	2	2

Nota: Refiere al acondicionamiento del biogás para tipo de uso. (0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial, 2= tratamiento elevado). Recuperado de: BESEL, S.A. (Departamento de Energía). (2007). *"Biomasa: Digestores anaerobios"*. Madrid: IDAE.

Una situación ideal sería implantar un pequeño sistema de cogeneración, que permitiría un ahorro en agua caliente y electricidad en épocas frías, junto con la conexión a la red para la venta eléctrica. En los meses de verano, venta a la red eléctrica o venta de biogás para su embotellado a presión.

Generalmente, los costes asociados a instalaciones de gestión de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia son elevados y la productividad es muy baja en términos de la energía contenida en el biogás respecto a la cantidad de residuo tratado. (BESEL, S.A. (Departamento de Energía), 2007).

G. Acondicionamiento del biogás.

Un factor crucial para determinar la calidad (y por lo tanto, la rentabilidad) del biogás producido, es el contenido en metano (CH_4) de la mezcla de gases. El objetivo claro es acercarse a un contenido en metano (CH_4) de aproximadamente el 92%, que es el contenido existente en el gas natural. Si logramos obtener este porcentaje, el biogás podrá utilizarse para los mismos usos que el gas natural. En este sentido, es reseñable la importancia de disponer de sistemas de depuración del biogás, mediante la eliminación del dióxido de carbono (CO_2) y otros gases presentes en la mezcla. Asimismo, el sistema de purificación del biogás más eficiente y barato es la utilización de una mezcla de codigestión que optimice la producción de metano (CH_4) presente en el biogás. (Agencia Andaluza de Energía, 2011). No obstante, existen técnicas de purificación del biogás, que describe la Figura 8.

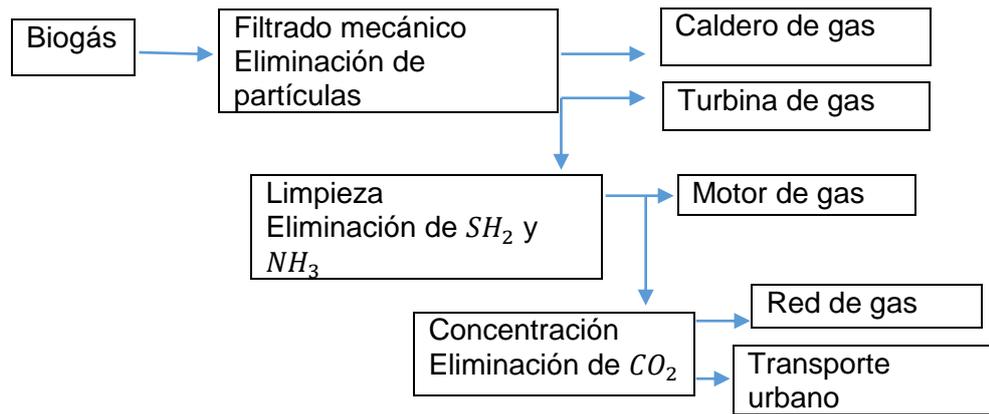


Figura 8. Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso. Recuperado de Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de residuos*. Barcelona : Diaz de Santos.

1. Eliminación de partículas.

Consiste en retirar de la mezcla de biogás las partículas suspendidas, mediante trampas de agua, filtros, rejillas metálicas o similares.

2. Deshidratación. Condensadores.

El biogás suele encontrarse saturado de vapor de agua, por lo que la disposición de condensadores supondrá la retirada de esta proporción, que suele ser de aproximadamente 35 gramos de agua por metro cúbico de biogás (si la digestión se realiza a una temperatura de unos 35°C. Este proceso se puede realizar también median (Castells X. E., 2005)te la adición de productos químicos como soluciones de glicol (C₂H₆O₂) etileno (C₂H₄) o trietileno.

3. Eliminación del ácido sulfhídrico (SH₂).

Durante el proceso de generación del biogás es frecuente que se produzca ácido sulfhídrico (SH₂) en presencia de compuestos azufrados. El ácido sulfhídrico (SH₂) es corrosivo, por lo que para el mantenimiento en condiciones adecuadas de los motores e instalaciones que utilizan biogás, es preciso retirar este compuesto del medio de reacción. Para ello, se utilizan métodos oxidantes, que provocan el paso del ácido sulfhídrico (SH₂) a azufre (S) elemental, en estado sólido. A continuación se enumeran algunos de los diferentes tipos de tratamiento de desulfuración que se utilizan a estos efectos. (Agencia Andaluza de Energía, 2011).

a) Desulfuración biológica.

Se utilizan como oxidantes microorganismos del género Thiobacillus. Para que se produzca la oxidación es preciso modificar las condiciones reductoras presentes en el tanque de digestión anaerobia, pasando a ser oxidantes. Esto se logra principalmente mediante dos métodos:

- Adición aire / oxígeno a la mezcla.
- Paso del biogás por Biofiltros o bioscrubbers, en los que se airea ligeramente la mezcla.

b) Adición cloruro de hierro (FeCl_3):

Con la adición de este compuesto se genera la precipitación de sulfuro de hierro. Este sistema es muy eficiente, aunque poco rentable desde el punto de vista económico. Este método es útil en sistemas con alto contenido en sulfuros, aunque no se llega al nivel de depuración necesario para la utilización del biogás en vehículos. (Castells X. E., 2005).

c) Adición de Óxido de Hierro (FeO):

Del mismo modo que en el método anterior, se produce la precipitación del sulfuro de hierro (FeS). En este caso, la adición se realiza habitualmente mediante dos métodos:

- Virutas de madera cubiertas de óxido de hierro (FeO),
- Pellets impregnados de óxido de hierro (FeO).

d) Columnas de adsorción:

Otro de los métodos de desulfuración consiste en hacer pasar la mezcla de biogás por columnas de adsorción con carbón activo o materiales similares. (Castells X. E., 2005).

e) Filtros moleculares:

Los compuestos de azufre (S) pueden eliminarse mediante la utilización de filtros de alúmina o sílice activada, con afinidad por los compuestos polares. Este método es adecuado para eliminar agua y/o sulfuro de hierro a media y pequeña escala. (Castells X. E., 2005).

f) Métodos en medio líquidos:

Consisten en hacer pasar el biogás por una solución acuosa absorbente. La absorción se realiza en un scrubber, en el que se aumenta la superficie de contacto mediante la aplicación de un relleno. El proceso de absorción se realiza a bajas temperaturas y altas presiones, existiendo la posibilidad de recuperación del azufre para usos industriales en instalaciones grandes. Estos procedimientos en medio líquido son caros, tanto en lo que respecta al coste de inversión como a la aplicación de diferentes productos químicos. (Agencia Andaluza de Energía, 2011).

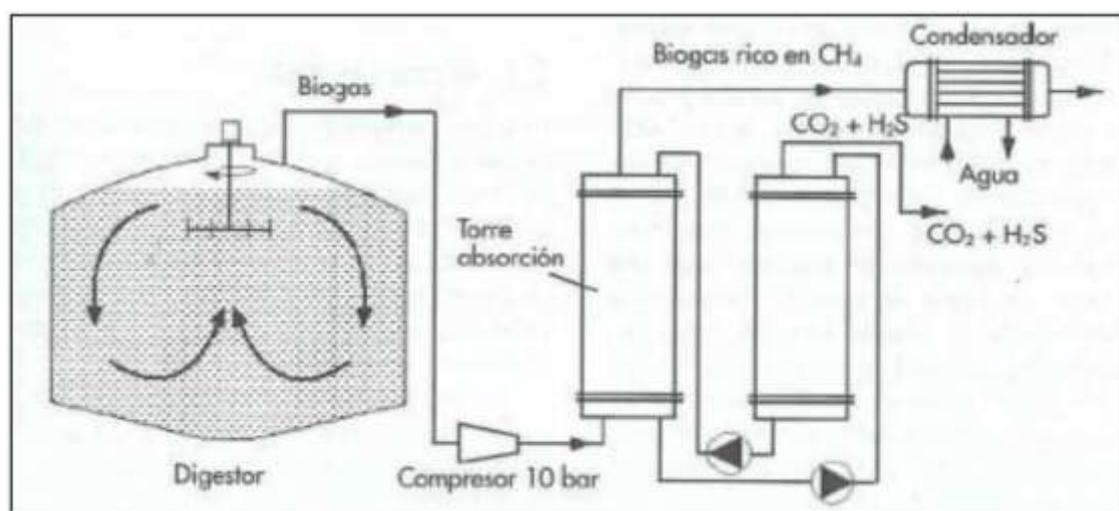


Figura 9. Sistema de tratamiento de purificación de biogás. Esta operación se realiza mediante absorción en solución acuosa, con sistema de regeneración de la solución. Recuperado de: Agencia Andaluza de la Energía, Estudio Básico del biogás, 2011.

g) Métodos de concentración del biogás.

Mediante la eliminación del dióxido de carbono (CO_2): Los métodos de desulfuración mediante soluciones acuosas, en general, son también aplicables para la retirada de dióxido de carbono (CO_2) de la mezcla de biogás. Otras posibilidades son:

- Filtros moleculares
- Filtros de membrana: Adición de yeso o hidróxido de calcio: Estos productos fijan el dióxido de carbono (CO_2), obteniéndose carbonato cálcico (CaCO_3), empleable como enmienda caliza.
- Absorción del CO_2 : Mediante lavado en monoetanolamina. El dióxido de carbono (CO_2) se transfiere así a la fase líquida, pudiendo regenerarse la fase acuosa mediante la eliminación del dióxido de

carbono (CO₂) presente en la misma mediante calentamiento. El biogás enriquecido, posteriormente se seca en un lecho de silicagel, procediéndose a la odorización del mismo y a la disposición final del mismo, como biogás comprimido (BGC) o como biogás licuado (BGL). (Agencia Andaluza de Energía, 2011).

h) Rendimiento del biogás.

Debido a su alto contenido en metano (CH₄) del 60% tiene un poder calorífico de 5.500 kcal/Nm³ (6,4 kWh/Nm³). Es decir, salvo por el contenido en ácido sulfhídrico (H₂S), es un combustible ideal, con unas equivalencias que se muestran en el cuadro siguiente. (CIEMAT, 1990)

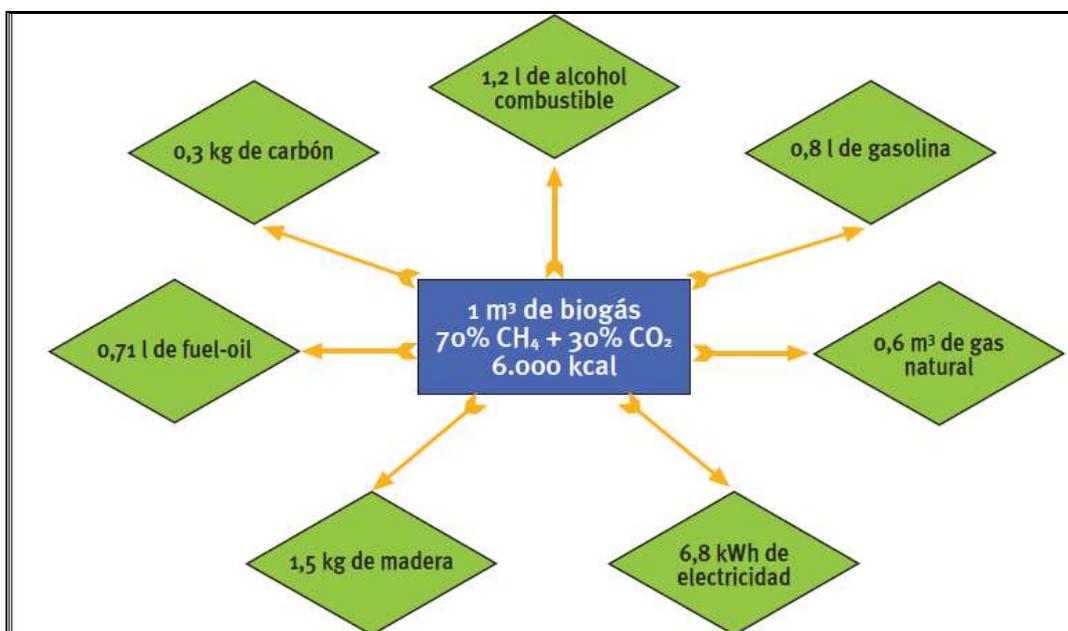


Figura 10. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. Recuperado de: CIEMAT. (1990). *La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria*. España: Ciemat.

Tabla 20. Consumo de biogás para la alimentación de artefactos

Alimentación a	Consumo Kcal/h	Rendimiento de 1m ³ de biogás
Cocina de 1 hornilla	660 a 742,5	7,4 h
Heladera de 13 pies	550 a 600	8,3 h
Lámpara a mantilla	478 a 528	10,4 h
Termotanque de 110 L	1.375 a 1.650	3,3 h
Estufa infraroja de 600 cal	3.355 a 3.487	1,57 h
Motor (por hp/hora)	2.750 a 4.400	1,25 h
Grneración deelectricidad 6,4 Kw/h	5.500	1 h

Nota: Esta información es útil para saber cuál es la cantidad necesaria de biogás para abastecer diversos artefactos. Recuperado de: Álvarez, J. M., Caneta , L., & Moyano , C. (s.f.). *Biomasa y Biogás*. . Corrientes, Argentina.

Tabla 21. Propiedades comparadas

	Unidad	Biogás	Gas Natural	Hidrógeno
Calorías por volumen	KWh/m ³	7,0	10	3
Calorías por peso	KWh/Kg	6,4	14,3	33
Mezcla Explosiva	%	6-12	6-15	4-80
Temp. Encendido	C	687	650	585
Velocidad de Llama	m/s	0,32	0,39	0,43

Nota: Se muestra las propiedades calóricas y otras en comparación con otros gases.
 Recuperado de: Urdiales, A. (2006). Biogás. Colección Permacultura. Argentina.
 Obtenido de www.permacultura.com.ar.

2.2.6. DIFERENCIAS ENTRE GAS NATURAL Y EL GLP.

Gas natural (GN) (90% de metano (CH ₄))	Gas licuado de petróleo (GLP)
Es más liviano que el aire, por ello ante cualquier fuga se disipa rápidamente sin formar acumulaciones peligrosas	Es más pesado que el aire, por ello ante cualquier fuga este gas puede acumularse en lugares poco ventilados y puede formar mezclas potencialmente explosivas.
Tiene mayor rango de inflamabilidad. Es decir se necesita mayor calor para que ocurra una explosión	Tiene menor rango de inflamabilidad. Es decir no soporta grandes temperaturas de calor, por lo cual el peligro de explosión es mayor.
Su empleo es seguro y continuo, pues se distribuye por medio de tuberías hasta el lugar de uso.	Su empleo no es continuo y el gas puede terminarse en cualquier momento y para volver a emplearlo se tiene que comprar otro balón.
Emite menor cantidad de CO ₂ al medioambiente.	Es más contaminante, pues contiene mayor cantidad de azufre.
No ocupa espacio extra, pues para su comercialización se realizan instalaciones de tuberías en los lugares de aplicación.	Ocupa espacio extra, pues es comercializado en balones de fierro.

Figura 11. Diferencias entre gas natural y GLP. Recuperado de: OSINERGMIN. (s.f.).
 Osinerming. Obtenido de Osinerming Web site : www.osinerg.gob.pe

A. Diferencias Físico - Químicas del Gas Natural el GLP.

El gas natural es un producto diferente al gas licuado de petróleo (GLP). En la Tabla 22, se puede observar las principales características físico-químicas de ambos productos y como éstas varían entre sí:

Tabla 22. *Diferencias físico - químicas entre el gas natural y el GLP*

PROPIEDAD	GAS NATURAL	GLP
Composición	90% Metano	60% Propano 40% Butano
Formula química	CH_4	C_4H_{10} C_3H_8
Gravedad específica	0,60	2,05 1,56
Poder calorífico	9 200 kcal / m ³ (**)	22 244 Kcal/m ³ 6 595 Kcal/lit 11 739 Kcal/Kilo
Presión de suministro	21 mbar (***)	50 mbar
Estado físico	Gaseoso sin límite de compresión Líquido a -160°C y a presión atmosférica	Líquido a 20°C con presión manométrica de 2,5bar
Color/olor	Incoloro/Inodoro	Incoloro/Inodoro

Nota: Se puede observar las características fisicoquímicas de ambos productos y como estos varían entre sí. (*) Corresponde a características predominantes de ambos combustibles. (**) Kcal/m³: Kilocalorías por m³ = 4,18684 x 10³ J/m³, (***) mbar (milibar): milésima parte del bar. Recuperado de: OSINERGMIN. (s.f.). *Osinermining*. Obtenido de Osinermining Web site : www.osinerg.gob.pe

Dado que el gas natural (GN) y el gas licuado de petróleo (GLP) poseen diferentes características, las consideraciones y condiciones para su transporte y uso son diferentes.

Por ejemplo, mientras que el gas natural (GN) es más ligero que el aire y se disipa rápidamente en el ambiente, el gas licuado de petróleo (GLP) es más pesado que el aire y tiene a quedarse debajo del mismo.

Otra diferencia radica en el hecho de que el gas licuado de petróleo (GLP) puede ser transportado en estado líquido con relativa facilidad dado que este estado se alcanza a los 20°C (por ejemplo, los balones de gas licuado de petróleo (GLP) que se utilizan en los hogares para cocinar), mientras que el gas natural (GN) es abastecido a los clientes, en estado gaseoso, a través de tuberías de baja presión debido a que para transportarlo en estado líquido se tendría que lograr una temperatura de - 160°C. (OSINERGMIN, s.f.).

2.2.7. RESIDUOS GENERADOS EN EL PROCESO DE BIODIGESTIÓN.

A. Biol.

Es la fracción líquida resultante del fango proveniente del fermentador o biodigestor.

Este “fango” es decantado o sedimentado obteniéndose una parte líquida a la cual se le llama “Biol”. Aproximadamente el 90% del material que ingresa al Biodigestor se transforma a Biol. Esto depende naturalmente del tipo de material a fermentar y de las condiciones de fermentación. (Arcapana, 2008).

1. Composición Química y Bioquímica del Biol.

El uso del Biol es principalmente como promotor y fortalecedor del crecimiento de la planta, raíces y frutos, gracias a la producción de hormonas vegetales, las cuales son: desechos del metabolismo de las bacterias típicas de este tipo de fermentación anaeróbico (que no se presentan en el compost). Estos beneficios hacen que se requiera menor cantidad de fertilizante mineral u otro empleado. (Arcapana, 2008).

Tabla 23. *Composición química del biol*

Componente	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4
Ph	7,96	8,1	No menciona	6,7 – 7,9
Materia seca	4,18 %	4.2	No menciona	1.4 %
Nitrógeno total	2,63 g/kg	2,4 g/kg	0,2 g/kg	0,9 g/kg
NH_4	1,27 g/kg	1.08 g/kg	No menciona	No menciona
Fósforo	0.43 g/kg	1,01 g/kg	0,076 g/kg	0,048 mg/kg
Potasio	2,66g/kg	2,94 g/kg	4,2 g/kg	0,29 mg /kg
Calcio	1,05 g/kg	0,50 g/kg	0,056 g/kg	2,1 g/kg
Magnesio	0,38 g/kg	No menciona	0,131 g/kg	0,135%
Sodio	0,404 g/kg	No menciona	2,1 g/kg	No menciona
Azufre	No menciona	No menciona	6,4 mg/kg	0.33 mg/l

Nota: Fuente 1: Biol de estiércol de vacuno (Pötsch, 2004), Fuente 2: Biol de mezcla de sustratos: estiércol de vacunos y restos de comida casera (Zethner, G.2002), Fuente 3: Biol de banano promedio hojas, tallos y frutos Clark et. Al (2007) Fuente 4: Biol de Estiércol de vacuno. Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

Tabla 24. *Composición bioquímica del biol*

Componentes	Cantidad
Ácido indol acético (ng/g)	9
Giberelina (ng/g)	8,4
Purinas (ng/g)	9,3
Citoquininas	No detectado
Tiamina (vit B1) (ng/g)	259
Riboflavina (vit B2)(ng/g)	56,4
Adenina	No detectado
Ácido fólico (ng/g)	6,7
Ácido pantotéico (ng/g)	142
Triptofano (ng/g)	26
Inositol	No detectado
Biotina	No detectado
Niacin	No detectado
Cianocobalamina (vit B 12) (ng/g)	4,4
Piridoxina (vit B6) (ng/g)	8,6

Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

2. Propiedades del Biol.

- El uso del Biol permite un mejor intercambio catiónico en el suelo. Con ello se amplía la disponibilidad de nutrientes del suelo. También ayuda a mantener la humedad del suelo y a la creación de un microclima adecuado para las plantas.
- El Biol se puede emplear como fertilizante líquido, es decir para aplicación por rociado.
- También se puede aplicar junto con el agua de riego en sistemas automáticos de irrigación.
- Siendo el BIOL una fuente orgánica de fitoreguladores en pequeñas cantidades es capaz de promover actividades fisiológicas y estimular el desarrollo de las plantas, sirviendo para: enraizamiento (aumenta y fortalece la base radicular), acción sobre el follaje (amplía la base foliar),

mejora la floración y activa el vigor y poder germinativo de las semillas, traduciéndose todo esto en un aumento significativo de las cosechas.

- Prueba realizadas con diferentes cultivos muestran que usar Biol sólo sería suficiente para lograr la misma o mayor productividad del cultivo que empleando fertilizantes químicos. (Arcapana, 2008).

3. Tipos de Biol.

a) Biol biocida.

Permite contrarrestar, neutralizar y ejercer control sobre plagas y enfermedades que afectan a los cultivos, mientras que nutre a las plantas, estimulando el desarrollo de sus hojas, raíz y fructificación.

b) Biol tipo I para crecimiento de follaje.

Este tipo de biol es aplicado en cultivos de granos y cereales orgánicos, y se utiliza para que las plantas queden expeditas para la etapa de floración. Usualmente se utiliza en tres aplicaciones: durante la siembra, 30 días después de la siembra (suele mezclarse con ¹caldo sulfocálcico) y 20 días después de la segunda aplicación. Permite contrarrestar, neutralizar y ejercer control sobre plagas y enfermedades que afectan a los cultivos, mientras que nutre a las plantas, estimulando el desarrollo de sus hojas, raíz y fructificación. (Arana, 2011).

4. Aplicación del biol.

El biol se aplica preferentemente a las hojas y tallos mezclados con agua, el aplicarlo solo es muy fuerte y puede quemar las plantas. También puede aplicarse directamente al cuello de la raíz y al suelo. La proporción de biol en relación al agua va del 5% al 25%. Para una mochila de 15 litros se puede usar desde 1 hasta 3 litros de biol aproximadamente; dependerá del tipo de cultivo, su estado de crecimiento y de la época de aplicación.

Se usa una mochila fumigadora y de preferencia en las primeras horas de la mañana o en la tarde. (Ministerio de desarrollo e inclusión social, 2014).

¹ El caldo sulfocálcico es el resultado de la reacción del azufre y de la cal viva que se utiliza en la agricultura orgánica como fungicida e insecticida.

Tabla 25. *Dosis de biol recomendadas para su aplicación.*

Cultivo	Dosis para mochila de 15 litros (litros)	Agua (litros)	Intervalo de aplicación (días)
Frutales	2 a 3	13 a 12	10 a 15
Durazno, ciruelos, Leguminosas	1.5 a 2	13.5 a 13	15
Haba, arveja, alfalfa, Tubérculos	2 a 3	13 a 12	10 a 15
Papa, olluco, oca			
Hortalizas: Zanahoria, cebolla, rábano,	1.5	13.5	10
Cereales	3	12	15
Trigo, cebada avena, Maíz	2	13	10

Nota: Se muestra la dosis recomendable de aplicación de biol en diferentes cultivos.

Recuperado de: Ministerio de desarrollo e inclusión social. (Diciembre de 2014). Producción y uso de abonos orgánicos:biol,compost y humus . Lima, Perú: Asociación Gráfica Educativa.

B. Biosol.

El Biosol es el resultado de separar la parte sólida del “fango” resultante de la fermentación anaeróbica dentro del Fermentador o Biodigestor. Dependiendo de la tecnología a emplear, este Biosol tratado puede alcanzar entre 25% a sólo 10% de humedad (de hecho esa humedad principalmente es Biol residual). Su composición depende mucho de los residuos que se emplearon para su fabricación (en el fermentador). Se puede emplear sólo o en conjunto con compost o con fertilizantes químicos. (Arcapana, 2008).

1. Características Generales del biosol.

Tabla 26. *Características del biosol de estiércol de vacuno*

Componentes	[%]
Agua	15,7
Sustancia orgánica seca	60,3
pH	7,6
Nitrógeno total	2,7
Fósforo ($P_2 O_5$)	1,6
Potasio ($K_2 O$)	2,8
Calcio (CaO)	3,5
Componentes	[%]
Magnesio (MgO)	2,3
Sodio (Na)	0,3
Azufre (S)	0,3
Boro (B)(ppm)	64

Nota: Se muestra las características del estiércol vacuno con énfasis en la composición química Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

2. Propiedades del biosol.

- El uso de este abono hace posible regular la alimentación de la planta. Los cultivos son fortalecidos y ocurre una mejora del rendimiento. El uso del Biosol permite el uso intensivo del suelo mejorando a la vez la calidad del mismo.
- El Biosol confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión mejorando con ello la retención de los nutrientes en el suelo.
- El Biosol mejora la estructura del suelo y la capacidad de retención de la humedad del mismo, esto favorece la actividad biológica en el suelo. Mejora la porosidad, y por consiguiente la permeabilidad y ventilación.
- También el Biosol puede ser combinado con la materia que va a ser compostada, con el fin de acelerar el proceso de compostaje.
- Una de las ventajas de usar el Biosol como fertilizante es que se reduce la necesidad del abono, es decir solo se necesita de 2 – 4 Toneladas/Ha. Si se empleara sólo estiércol se necesitaría 15 – 30 Toneladas/Ha y si se empleara compost se necesitaría 10 – 20 Toneladas/Ha. No hay que olvidar que estas cantidades son relativas y dependen mucho del tipo de suelo y del cultivo.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas.
- Reduce la erosión del suelo.
- El Biosol cuenta con una mayor disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre) a comparación con el estiércol, entonces esto mejora la disponibilidad del nutriente para la planta. (Arcapana, 2008).

3. Aplicación del biosol.

Normalmente se aplica el Biosol” en el campo de la misma manera que se emplea el compost, sin embargo la dosificación varía. Las cantidades de Biosol usualmente empleadas se encuentran entre 2 a 4 Toneladas/ha (dependiendo del tipo de cultivo y el tipo de suelo). Con esta dosificación se obtienen los mismos resultados y beneficios que con las cantidades notablemente mayores requeridas para el caso de Compost (10 – 20 Ton/ha.) y guano (15 – 30 Ton/ha), las cuales dependen también de las condiciones del suelo y los requerimientos de la planta. También se puede incluir el Biosol en la preparación del suelo antes

de colocar las semillas. En este caso deberá ser colocado a una profundidad de entre 10 – 20 cm.

Luego de la germinación y crecimiento de la planta se puede seguir abonando el suelo con el Biosol, el cual puede ser reforzado con fertilizantes químicos; en este caso las cantidades de fertilizantes químicos a emplear son mucho menores a las que se usan normalmente. Para la agricultura orgánica el Biosol es empleado sin fertilizantes químicos. (Arcapana, 2008).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. ACETOGÉNESIS: Es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato (CH_3COO^-), a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono). Las diferentes especies bacterianas que son capaces de realizar la acetogénesis se denominan colectivamente acetógenos.

2.3.2. ACIDOGÉNESIS: Implica la conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa de la digestión anaerobia, en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular.

2.3.3. BACTERIAS METANOGÉNICAS: Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo actualmente conocido como Archaea, son anaerobias estrictas y producen metano (CH_4) como principal producto del metabolismo energético. A pesar de los requerimientos estrictos de anaerobiosis obligada y el metabolismo especializado de este grupo, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza.

2.3.4. BIODIGESTIÓN: El fenómeno de biodigestión ocurre porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos presentes en el material fecal que, al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal, producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH_4) llamada biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible. Como resultado de este proceso genera residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas.

2.3.5. BIODIGESTOR: Será definido como el contenedor cerrado, hermético e impermeable dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en una determinada dilución de agua para que a través de

la fermentación anaerobia se produzca gas metano (CH₄) y fertilizantes orgánicos.

2.3.6. BIOGAS: El biogás es un gas combustible que se forma a partir de la fermentación anaerobia de materia orgánica en el biodigestor. El compuesto que le da su valor energético es el metano (CH₄) el cual representa entre un 50 y un 75% del gas.

2.3.7. BIOL: El Biol es el efluente resultante de la fermentación anaerobia de estiércol, residuos de leguminosas y agua rico. Son ricos en fitohormonas, un componente que mejora la germinación de las semillas, fortalece las raíces y la floración de las plantas.

2.3.8. BIOSOL: Es la parte sólida del fango resultante de la fermentación anaeróbica dentro del Biodigestor.

2.3.9. CARGA DEL DIGESTOR: Esta indica el volumen de biomasa que se alimenta al sistema o el material que debe ser procesado y la frecuencia. Las plantas de biogás domésticas y de pequeñas granjas se alimentan con cargas de hasta 1,5 m³/día. Las plantas con cargas mayores pueden requerir control de temperatura y agitación mecánica.

2.3.10. CODIGESTIÓN: Tratamiento conjunto de dos o más residuos, permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos para hacer procesos más eficientes. Además, unifica su gestión al compartir instalaciones de tratamiento, reduciendo costes de inversión y operación.

2.3.11. COMPOSTAJE: Es una técnica que imita a la naturaleza para transformar -de forma más acelerada- todo tipo de restos orgánicos, en lo que se denomina compost o mantillo. Esta técnica se basa en un proceso biológico (lleno de vida), que se realiza en condiciones de fermentación aerobia (con aire), con suficiente humedad y que asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un alimento homogéneo y altamente asimilable.

2.3.12. DESECHOS ORGÁNICOS: Los residuos orgánicos son los restos biodegradables de plantas y animales que incluyen las heces, restos de frutas y verduras procedentes de la poda de plantas y otros materiales que pueden ser descompuestos por microorganismos aeróbicos. El estiércol además de contener heces y orines puede estar compuesto por otros muchos elementos, como son las camas,

generalmente paja, pero también a veces contiene serrín, virutas de madera, papel de periódico o productos químicos, también suele incluir restos de los alimentos del ganado, así como agua procedente de los bebederos, de la limpieza de los establos o de lluvia, y todo tipo de materiales que puedan entrar en un establo.

2.3.13. DIGESTIÓN PSICROFÍLICA. Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 10°C y 20 °C. A estas temperaturas la carga debe permanecer en el digestor más de 100 días.

2.3.14. DIGESTIÓN MESOFÍLICA: Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 30°C y 35°C. La carga debe permanecer en el digestor 15 a 30 días. Este tipo de proceso tiende a ser más confiable y tolerante que el proceso termofílico, pero la producción de gas es menor y se requieren digestores de gran tamaño.

2.3.15. DIGESTIÓN TERMOFÍLICA. Es la digestión anaerobia que se realiza a temperaturas mayores de 55°C y el tiempo de residencia es debe ser de 12 a 14 días. Estos sistemas ofrecen una producción de metano (CH₄) más alta, caudales más rápidos, mejor eliminación de patógenos y virus. Estos sistemas requieren tecnología más costosa, consumen más energía y requieren mayor asistencia y monitoreo.

2.3.16. ESTIERCOL: Tanto el estiércol como los purines son una mezcla de las heces de los animales con los orines y la cama. El estiércol es aquel material que puede ser manejado y almacenado como sólido, mientras que los purines lo son como líquidos. Existen sustancias que, bajo ciertas circunstancias, incluso en pequeñas cantidades, bajan la tasa de descomposición o, en concentraciones tóxicas, detienen por completo el proceso de descomposición. Ej. : Oxígeno (O), Sulfuro de hidrógeno (SH₂), el valor de pH, ácidos grasos volátiles, amoníaco (NH₃), metales pesados, desinfectantes antibióticos.

2.3.17. FERMENTACIÓN ANAEROBIA: Se denomina digestión anaerobia al proceso en virtud del cual la materia orgánica es convertida en metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H), en ausencia de oxígeno (O) y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas. La formación de metano (CH₄) y dióxido de carbono corresponde a la última etapa de una serie de reacciones en las cuales los compuestos orgánicos son degradados completamente.

2.3.18. HIDRÓLISIS: Es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química. Esta reacción es importante por el gran número de contextos en los que el agua actúa como disolvente.

2.3.19. INHIBIDORES: Las sustancias conocidas como inhibidores también pueden hacer más lento el proceso.

2.3.20. INOCULANTE/INÓCULO: Sustancia formada por hongos, bacterias y levaduras entre otros, capaces de descomponer la materia orgánica. La cual se adiciona a la mezcla para acelerar el proceso y enriquecer la carga microbiana.

2.3.21. MATERIA PRIMA. Es la totalidad de residuos orgánicos que pueden recolectarse y que pueden ser utilizados para cargar el biodigestor. Esta guía utiliza los términos residuos orgánicos y materia prima para destacar la importancia de considerar este material como un recurso renovable (biomasa).

2.3.22. METANO: El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH_4 . Cada uno de los átomos de hidrógeno (H_2) está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás.

2.3.23. METANOGENÉISIS: Es un proceso metabólico microbiano en el cual se obtienen como producto metano (CH_4), agua y ATP. Los microorganismos envueltos en este proceso pertenecen al grupo de las Arqueas, específicamente a las Euryarqueotas. Este proceso ocurre en ambientes estrictamente anaeróbicos como por ejemplo: en suelos, sedimentos de agua dulce y marinos, en ambientes geotermales e incluso en animales en el tracto gastrointestinal y el rumen. Los sustratos utilizados para la producción de metano (CH_4) son; dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H), amonio (NH_3) y algunos casos acetato (CH_3COO^-), formato y metanol (CH_3-OH). La gran mayoría del metano (CH_4) producido biológicamente proviene de 3 rutas metabólicas. Dos terceras

partes de este metano (CH_4) son el producto de la fermentación de acetato (CH_3COO^-) y aproximadamente una tercera parte se produce por la reducción de dióxido de carbono (CO_2) con electrones provenientes de hidrógeno (H).

2.3.24. pH: Medida de la acidez o la alcalinidad de una solución, de acuerdo a la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en dicha sustancia. pH es la abreviatura de “potencial de hidrógeno”.

2.3.25. POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. Se refiere al volumen de gas teóricamente obtenible de una materia prima, en función de la producción específica y de la cantidad disponible de materia orgánica seca. Aunque el producido no puede juzgarse independientemente de otras variables del proceso.

2.3.26. PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE GAS. Es la cantidad de gas medido en m^3 que se obtiene de un biodigestor por unidad de masa orgánica seca alimentada al mismo. En la práctica ella indica la producción de gas que se obtiene de una determinada materia prima durante un tiempo de retención dado y a la temperatura de operación del digestor.

2.3.27. RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO: Proporción entre el carbono y nitrógeno presentes en la mezcla de carga. La literatura reporta que la relación Carbono/Nitrógeno está ligada directamente a la producción, entre mayor sea esta relación y su ajuste al intervalo recomendado (20 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno) mayor será la producción de gas por unidad de materia útil.

2.3.28. SÓLIDOS TOTALES: Se refiere a la fracción sólida de la materia orgánica contenidas en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente.

2.3.29. SÓLIDOS VOLATILES: Es la parte del total de los sólidos que se puede transformar en biogás.

2.3.30. TIEMPO DE RETENCIÓN (TR): Es el lapso (en días) durante el cual la carga alimentada permanece en el digestor y es el tiempo necesario para la digestión del material orgánico a la temperatura de operación del digestor. Es inversamente proporcional a la temperatura

CAPITULO III

PLANTEAMIENTO OPERACIONAL

3.1. MÉTODO Y DISEÑO.

3.1.1. MÉTODO DE LA INVESTIGACION.

Esta investigación usó el método experimental, ya que se intervino en las variables de la investigación modificando las condiciones de cada mezcla para revelar la eficiencia de cada material para la producción de biogás y las relaciones existentes entre cantidad y concentración. Además se analizó los resultados de rendimiento de producción de biogás mediante un método experimental.

3.1.2. MÉTODO EXPERIMENTAL.

Para esta investigación se realizó la construcción de 6 biodigestores tipo batch, se utilizó tres razones para la mezcla (sustrato/agua) correspondientes a los valores (1:1), (1:2), (1:3) del volumen operativo de los biodigestores a nivel laboratorio tanto para las pruebas con estiércol de cuy y estiércol vacuno, para que la producción de biogás sea mayor se añadió residuos de leguminosas.

Se usó el método experimental adaptado por recomendación (Olaya & González, 2009) en la cual indica las proporciones de agua a utilizar. La cantidad de los residuos de leguminosas fueron considerados por el cálculo de relación de C/N para dar a la mezcla la relación adecuada para la codigestión entre cada tipo de estiércol y los residuos de leguminosas.

Se realizó mediciones en tiempos equidistantes de los parámetros de control del proceso sobre los biodigestores en cada tratamiento que fueron: temperatura y producción de biogás.

En el momento de realizar la puesta en marcha, se colocó el sustrato precompostado, el agua e inóculo, se midió el pH al inicio y fin del proceso de biodigestión, se sellaron los biodigestores.

Al término de los 62 días de la biodigestión de cada tratamiento se procedió a realizar el seguimiento de la producción volumétrica de metano (CH₄) utilizando la técnica de desplazamiento volumétrico.

Posteriormente se recolectó y evaluó los datos para indicar la correlación de variables y establecer cuál es la mezcla que se obtiene un mayor rendimiento de todos los tratamientos experimentales, considerando el sustrato y agua.

3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Dado que el trabajo es de tipo descriptivo experimental, el método utilizado fue la observación directa, comparando la concentración de los tratamientos para conocer cuál será el más productivo en el proceso de biodigestión resultante de la fermentación anaerobia en los 6 biodigestores empleados, utilizando diversos materiales y equipos mencionados a continuación:

3.3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.1. MATERIALES

A. Construcción de Biodigestores.

- 4 codos.
- 4 T.
- 4 llaves de paso.
- 4 tapones de tubo.
- 4 niples
- 4 baldes de 4L
- 2 baldes de 8L.
- Cinta aislante
- Teflón.
- 4 recipientes de 100 ml
- 2 sistemas de suero
- Tubos de ½
- Tijeras
- Cinta adhesiva
- Guantes
- Rotulador
- Mascarilla
- Mandil
- Pintura en aerosol
- Tarraja
- Sierra

B. Proceso de Biodigestión

- Estiércol vacuno (*Bos taurus*)
- Estiércol de cuy (*Cavia porcellus*)
- Residuos de leguminosas
- Agua
- Inóculo
- Guantes
- Mascarilla
- Recipientes de plástico

C. Recopilación de datos

- Cuaderno de apuntes
- Lapicero

D. Procesamiento de datos

- Papel

3.3.2. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

- 2 Termómetros
- Computadora
- Impresora
- Software Microsoft excel
- Cintas medidoras de pH
- Cámara fotográfica
- Balanza

3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

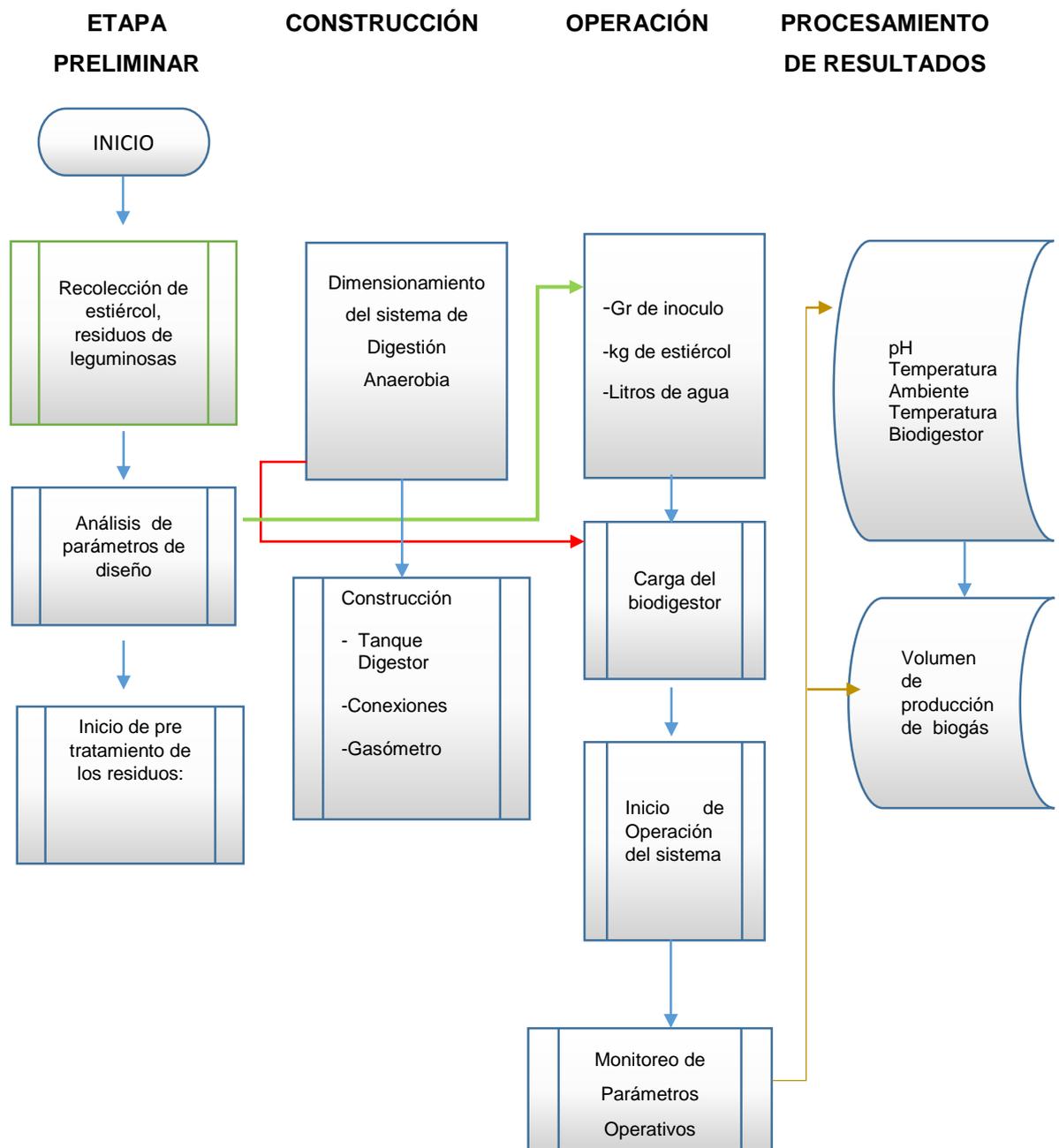


Figura 12. Etapas del proyecto. Se muestra las etapas del proyecto y los pasos tomados para la producción de biogás con cada materia prima (estiércol de cuy (*Cavia porcellus*)–estiércol vacuno (*Bos taurus*)). Elaboración propia.

3.4.1. Construcción de los biodigestores

En esta etapa se construyó y realizó las conexiones necesarias de los biodigestores.

A. Dimensiones de los biodigestores

Las dimensiones de los biodigestores se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Dimensiones de los biodigestores.

Parámetros	Tipo 1	Tipo 2
Capacidad	8 L	4 L
Diámetro	200 mm	150 mm
Altura	300 mm	160 mm

Nota: Se muestra las características dimensionales de los biodigestores construidos.
Elaboración propia



Figura 13. Materiales para la construcción de los biodigestores. Elaboración propia.





Figura 14. Construcción de biodigestores. Elaboración propia

3.4.2. Recolección de muestras:

A. Estiércol de vacuno :

El estiércol de vacuno (*Bos taurus*) se recolectó en la estancia en la que se alimentaba y descansaba el ganado, localizado en la calle Colon en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero dentro de las instalaciones de la Casa establo "Colon".



Figura 15. Estiércol de vacuno .Elaboración propia

B. Estiércol de cuy :

El estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) se recolecto en el lugar de crianza domestica de los cuyes ubicado en el distrito de Mariano Melgar.



Figura 16. Estiércol de cuy recolectado. Elaboración propia

C. Residuos de Leguminosas :

Los residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*), se obtuvieron de los desechos de la elaboración de alimentos en la cocina ubicada en el distrito de Mariano Melgar generados en una semana.



Figura 17. Residuos de leguminosas recolectadas. Elaboración propia

3.4.3. Obtención de inoculante :

Se recolecto 0.3 kg de estiércol de cuy, 0.1 kg residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*), sometidos a un pretratamiento y se puso en un biodigestor durante 25 días para aumentar la carga microbiana de los tratamientos y así acelerar el proceso de producción de biogás para el presente trabajo.

A. Características y cálculo de cantidad del inoculante

Tabla 28. Características físicas del inoculante

Características físicas	
pH	6.5
Temperatura	19 °C
Color	Café- verdusco
Volumen	0.8 L
Densidad	400 gr/0.8L
Olor	Característico
Masa	400 gr

Nota: Se muestra las características físicas del inoculante obtenido .Elaboración propia

B. Cantidad del inoculante

El inóculo corresponde al 10% de la masa total de la mezcla.

Tabla 29. Valores del inóculo

Tratamientos (T)	Mezcla total en el digestor (Mt)	Cantidad de Inóculo (Cin)
Tratamiento 1 (T1)	500 g	50 g
Tratamiento 2 (T2)	625 g	62.5 g
Tratamiento 3 (T3)	750 g	75 g
Tratamiento 4 (T4)	500 g	50 g
Tratamiento 5 (T5)	625 g	62.5 g
Tratamiento 6 (T6)	750 g	75 g

Nota: Cantidad de inóculo presente en cada tratamiento. Fuente: Elaboración propia



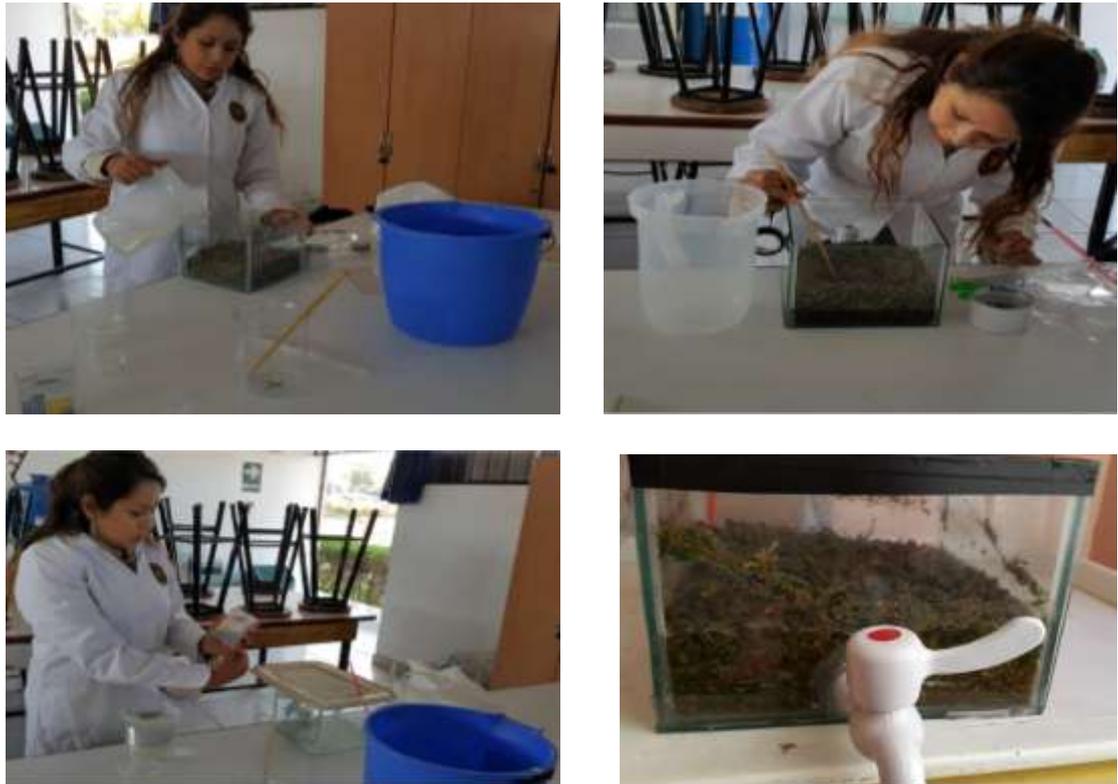


Figura 18. Elaboración del inoculante. El inoculante fue obtenido de la digestión anaerobia de 0.3 kg de estiércol de cuy, 0.1 kg residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*), sometidos a un pretratamiento durante 25 días. Elaboración propia.

3.4.4. Determinación de cantidad de residuos de leguminosas.

A. Determinación de la relación C/N de la mezcla.

Se tomó en cuenta el porcentaje de carbono y de nitrógeno del estiércol de vacuno (*Bos taurus*) y de cuy, se adicionó residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) para que la relación C/N sea entre 20 y 30 que son los valores óptimos.

Tabla 30. Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de vacuno

% C vaca	% N vaca	% C Leg	% N Leg	Peso vaca (Kg)	Peso Leg (kg)	*C/N mezcla
30	1.30	38	1.5	0.5	0	25:1
30	1.30	38	1.5	0,5	0.125	23.6:1
30	1.30	38	1.5	0.5	0.250	24 :1

Nota: Se muestra el porcentaje de nitrógeno, carbono y peso de cada componente de la mezcla (estiércol de vacuno) para el cálculo de la relación C/N. (*) relación C/N. Elaboración propia.

Tabla 31. Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de cuy

% C Cuy	% N Cuy	% C Leg	% N Leg	Peso cuy (Kg)	Peso Leg (kg)	C/N Mezcla
35.4	1.86	38	1.5	0.5	0	19:1
35.4	1.86	38	1.5	0,5	0.125	20:1
35.4	1.86	38	1.5	0.5	0.250	22 :1

Nota: Se muestra el porcentaje de nitrógeno, carbono y peso de cada componente de la mezcla (estiércol de cuy) para el cálculo de la relación C/N. (*) relación C/N. Fuente: Elaboración propia.

3.4.5. Pretratamiento de materias primas.

A. Reducción y chancado de residuos de leguminosas.

Se redujo el tamaño de los desechos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*), utilizando un cuchillo y una tabla; además se realizó el chancado para poder facilitar la degradación para la biodigestión siendo almacenados en bolsas para mantener la humedad.

B. Compostaje de Estiércol y residuos de leguminosas.

Se formó la mezcla de estiércol, los residuos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*), y agua, estos fueron secados a la sombra por una semana para facilitar la biodigestión anaerobia y así el proceso se realice en menor tiempo.



Figura 19. Compostaje de estiércol (vacuno –cuy) y residuos de leguminosas. Elaboración propia.

3.4.6. Preparación de la carga del biodigestor.

A. Pesado

Se pesaron las mezclas (estiércol de vacuno, residuos de leguminosas, inoculante), así como (estiércol de cuy, residuos de leguminosas, inoculante), utilizando la balanza de capacidad de 10 kg.



Figura 20. Pesado de las mezclas de estiércol y residuos de leguminosas arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) compostadas. Elaboración propia.

B. Adición de agua

En este proceso se almacenó el agua de la red de distribución en contenedores, los cuales fueron expuestos a la intemperie durante 48 horas, para poder eliminar el cloro ya que este es perjudicial para las bacterias anaerobias luego se realizó la dilución de las mezclas tanto de vacuno (*Bos taurus*) como de cuy (*Cavia porcellus*) en relación; sustrato: agua ;(1:1), (1:2), (1,3) respectivamente.



Figura 21. Adición de agua a la mezcla. Elaboración propia.

C. Adición de Inóculo.

El inóculo fue agregado a razón de 10% del peso total de la mezcla para la puesta en marcha del biodigestor.



Figura 22. Adición de inóculo a la mezcla. El inoculante fue obtenido de la digestión anaerobia de 0.3 kg de estiércol de cuy, 0.1 kg residuos de leguminosas, sometidos a un pretratamiento durante 25 días. Elaboración propia.

D. Mezclado

Se realizó la homogenización utilizando una varilla pequeña de madera que se utilizó para mover la mezcla en forma manual, mezclando el sustrato (estiércol de vacuno (*Bos taurus*), cuy (*Cavia porcellus*)) con el co-sustrato (residuos de leguminosas), con las siguientes relaciones: g sustrato/g co-sustrato, (500:0); (500:125); (500:250); el agua e inóculo. En la tabla N° 32 y 33 se presentan las proporciones utilizadas de las mezclas que se utilizaron en los biodigestores a escala laboratorio. El sustrato correspondió al estiércol de vacuno (*Bos taurus*), de cuy (*Cavia porcellus*) y el co-sustrato (residuos de leguminosas).

Tabla 32. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de cuy)

Tratamientos	Estiércol de cuy (g)	Leguminosas (g)	Inóculo (g)	Agua (L)
Tratamiento 1 (T1)	500	0	50	0.5
Tratamiento 2 (T2)	500	125	62.5	1.250
Tratamiento 3 (T3)	500	250	75	2.250

Nota: Se muestran todos los sustratos y agua de las mezclas con estiércol de cuy. El inoculante fue obtenido de la digestión anaerobia de 0.3 kg de estiércol de cuy, 0.1 kg residuos de leguminosas, sometidos a un pretratamiento durante 25 días Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de vacuno)

Tratamientos	Estiércol de vacuno (g)	Leguminosas (g)	Inóculo (g)	Agua (L)
Tratamiento 4 (T4)	500	0	50	0.5
Tratamiento 5 (T5)	500	125	62.5	1.250
Tratamiento 6 (T6)	500	250	75	2.250

Nota: Sustratos y agua de las mezclas con estiércol de vacuno. El inoculante fue obtenido de la digestión anaerobia de 0.3 kg de estiércol de cuy, 0.1 kg residuos de leguminosas, sometidos a un pretratamiento durante 25 días. Elaboración propia



Figura 23. Mezclado de los sustratos. Elaboración propia.

E. Carga del biodigestor

Los biodigestores de capacidad de 4L y 8 L, fueron cargados con la mezcla (sustrato: co-sustrato), agua e inóculo, que ocupó aproximadamente el 60% del volumen total de los biodigestores, dejando sin llenar del 40% que fue dedicado al espacio que ocupa el biogás producido y posteriormente fue medido en el colector de biogás (envases de 100 ml).

El llenado de los biodigestores se realizó manualmente, la mezcla fue homogenizada como se explicó anteriormente y posteriormente anotándose el número de tratamiento correspondiente.



Figura 24. Carga del biodigestor con las mezclas. Elaboración propia

3.4.7. Monitoreo de Parámetros

A. pH

Se midió el pH, para la puesta en marcha de los biodigestores al inicio y fin del proceso fermentativo. El pH se midió con una cinta indicadora de pH que se empapó con el fluido de las mezclas.

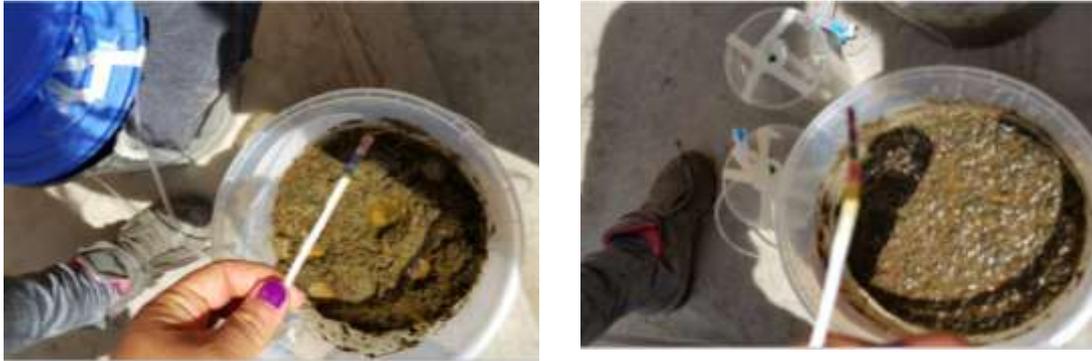


Figura 25. Medición del pH de la mezcla. Elaboración propia.

B. Temperatura Biodigestor

Se midió la temperatura de las mezclas de los sustratos en los biodigestores al inicio y cada 5 días a lo largo del proceso, introduciendo el termómetro dentro del biodigestor por la abertura que se realizó con este fin.



Figura 26. Medición de temperatura del Biodigestor. Elaboración propia.



Figura 27. Medición de temperatura de la mezcla. Elaboración propia

3.4.8. Medición del volumen de la producción de biogás en los biodigestores tipo batch.

El tiempo de biodigestión fue de 80 días (60 días de fermentación y 20 días de monitoreo de producción). La frecuencia de medición fue interdiaria, realizadas durante 20 días. Esta variable se midió con colectores de biogás (recipientes de 100 ml) dentro de los cuales se almacenó el biogás, esto consistió en que a medida que entraba el biogás a los colectores, este desplazaba el volumen de agua equivalente al volumen de biogás admitido durante todo el proceso de fermentación, los recipientes de 100ml (colectores de biogás), se encontraban debidamente calibrados y marcados, el método utilizado para medir la producción de biogás fue un diseño artesanal. Inicialmente, los recipientes se encontraban llenos de agua y libres de burbujas de aire, los que fueron colocados en un recipiente lleno de agua, éstos recolectaron el biogás producido por cada biodigestor, este método permitió conocer el volumen de biogás producido y almacenado en función del tiempo.



Figura 28. Medición del volumen de la producción de Biogás.

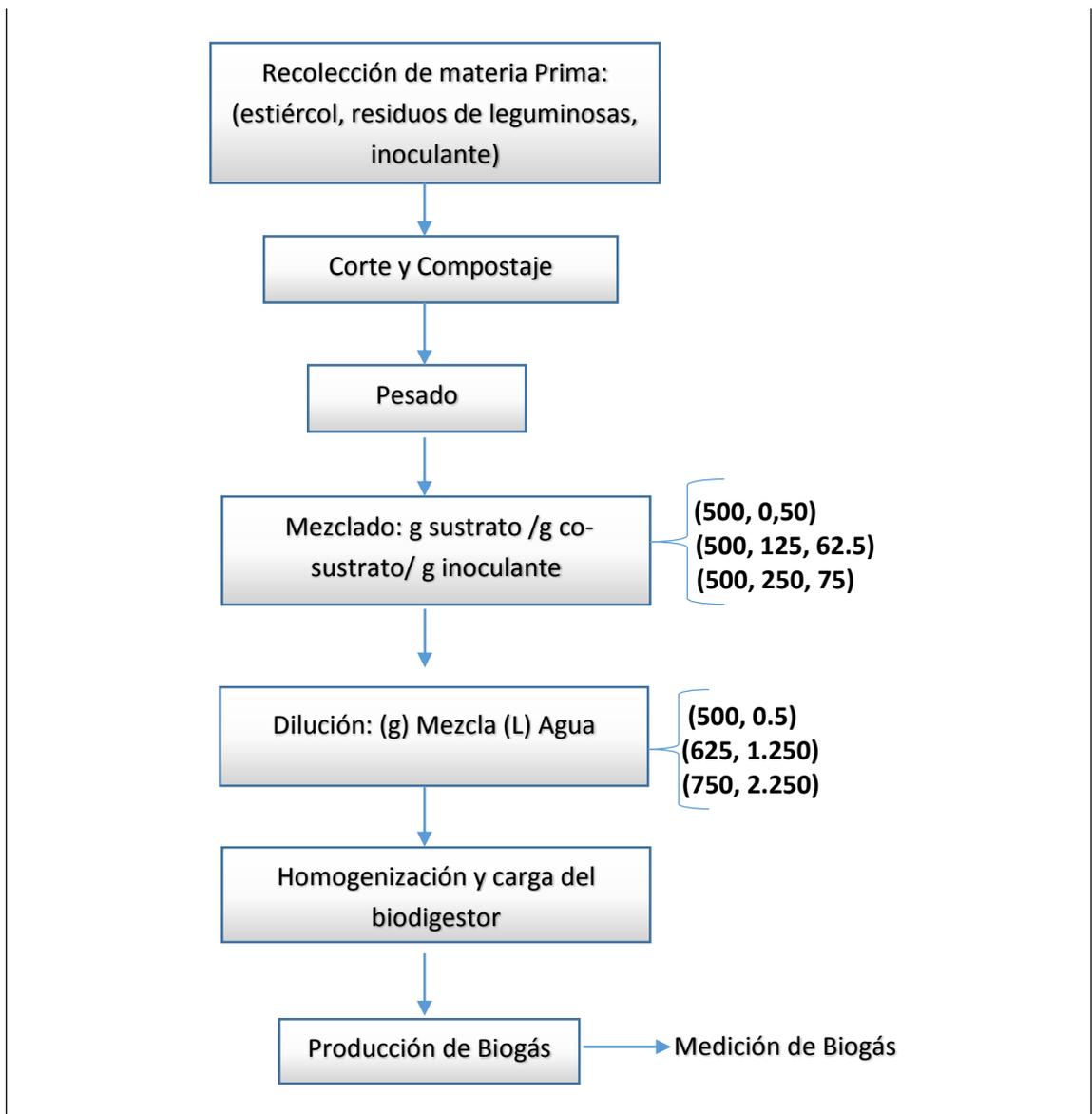


Figura 29. Flujograma experimental de producción de biogás. Elaboración propia

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. GENERALIDADES

4.1.1. BIODIGESTORES CONSTRUIDOS

Los biodigestores construidos contaron con los parámetros que se muestran en la tabla.34:

Tabla 34. Parámetros para la construcción de los biodigestores

Parámetro	Característica
Régimen	Discontinuo – Batch
Agitación mecánica	No
Volumen del biodigestor	4-8 litros
Volumen funcional	60%
Volumen del inóculo	10%
Tiempo de retención	> 60 días
Temperatura Ambiente	13-22 °C
Gasómetro	Si

Nota: Se muestran las características de diseño de los biodigestores utilizados. Elaboración propia



Figura 30. Biodigestores Construidos. Se muestra los biodigestores utilizados de 8 L y 4L. Elaboración propia.

4.1.2. DETERMINACION DE pH

De acuerdo a bibliografía, los microorganismos anaeróbicos necesitan un pH cercano a la neutralidad, para su adecuado desarrollo y además un tratamiento anaeróbico puede proceder bastante bien en un rango de pH entre 6.6–7.6. No obstante, si el pH cae por debajo de 6.2 el proceso suele ser menos eficiente.

Los resultados obtenidos demuestran que los rangos de pH obtenidos del proceso de fermentación anaeróbica se encuentran en los valores óptimos para que el proceso se haya llevado a cabo exitosamente. Los valores de pH obtenidos fueron como se indica en la Tabla. 36:

Tabla 35. *Determinación de pH*

Biodigestores	Mezcla pre-Tratamiento (pH)	Mezcla post-Tratamiento (pH)
Biodigestor N° 1	6.5	7
Biodigestor N° 2	6.5	6.5
Biodigestor N° 3	6.7	7
Biodigestor N° 4	6.6	7
Biodigestor N° 5	6.5	6.5
Biodigestor N° 6	6.5	6.5

Nota: Los biodigestores se encuentran numerados de acuerdo al tratamiento que contienen, la composición de cada uno se detallan en las tablas 33 y 34. Elaboración propia.

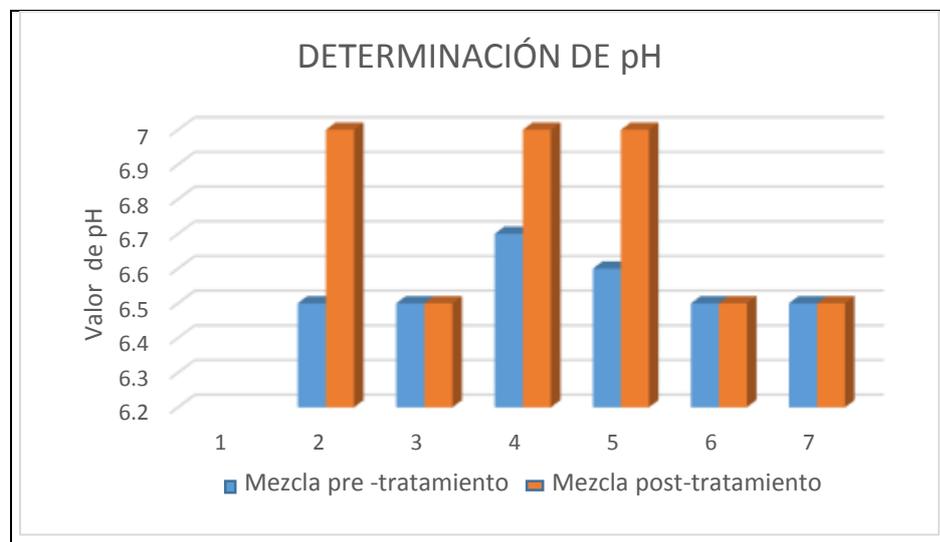


Figura 31. Comparación del pH. Pre y post tratamiento. Elaboración propia.

4.1.3. CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL BIODIGESTOR N°1 Y N°4

A. DURANTE EL TIEMPO DE RETENCIÓN

Tabla 36. *Temperatura del Biodigestor N° 1 y N° 4*

Biodigestor N° 1		Biodigestor N° 4	
TR (días)	T (°C)	TR(días)	T (°C)
1	21.8	1	21
5	22.4	5	22
10	22.3	10	22
15	22.6	15	22
20	24.3	20	24
25	22.2	25	22
30	24.8	30	25
35	23.2	35	24
40	21.3	40	21
45	21.6	45	22
50	19.5	50	20
55	20.6	55	21
60	21.1	60	21
65	23.9	65	24
70	24.8	70	25
75	24.1	75	24
80	23.8	80	24
PROMEDIO	22.6	PROMEDIO	22.58

Nota: Se muestra la temperatura tomada en °C, cada 5 días desde día 1 hasta el día 80 del proceso. Elaboración propia.

En la tabla N° 36 se indica los valores de temperatura registradas en el interior del biodigestor N° 1 y N° 4 tipo Batch cada 5 días.

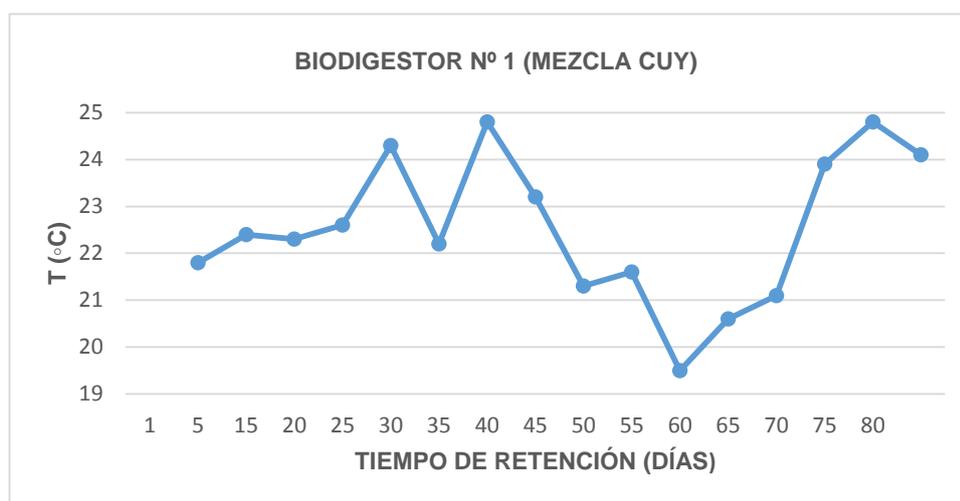


FIGURA 32. Temperatura del Biodigestor 1 durante el tiempo de retención, la mezcla estaba compuesta por (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1). Elaboración propia.

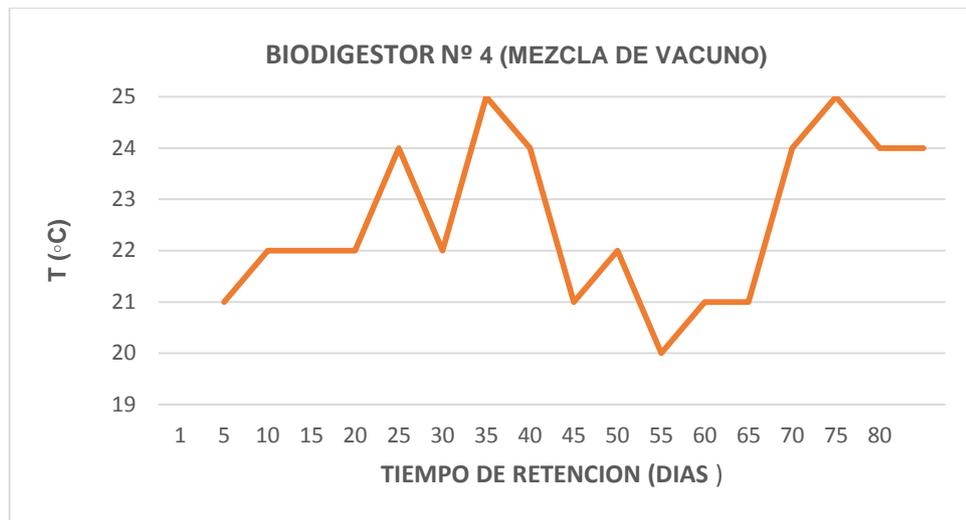


Figura 33. Temperatura del Biodigester 4 durante el tiempo de retención, la mezcla estaba compuesta por (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1).Elaboración propia.

En la Figura N° 32 y 33 se muestra que a lo largo del proceso mantuvo una variación de la temperatura con un promedio de 22.6 °C en la mezcla de cuy (*Cavia porcellus*) y 22.58 °C en la mezcla de vacuno (*Bos taurus*).

4.1.4. CONTROL DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL VS LA TEMPERATURA EN EL BIODIGESTOR N° 1 Y N° 4.

Tabla 37. Temperatura ambiental vs la temperatura en el biodigester N° 1 y N° 4

Biodigester N° 1			Biodigester N° 4		
T R (días)	T (°C) DIGESTOR	T (°C) AMB.	T R (DÍAS)	T (°C) DIGESTOR	T (°C) AMB.
1	21.8	23.4	1	21	23.4
5	22.4	26.2	5	22	26.2
10	22.3	25.4	10	22	25.4
15	22.6	22.2	15	22	22.2
20	24.3	23.2	20	24	23.2
25	22.2	24.1	25	22	24.1
30	24.8	25.2	30	25	25.2
35	23.2	26.2	35	24	26.2
40	21.3	21.6	40	21	21.6
45	21.6	23.5	45	22	23.5
50	19.5	23.8	50	20	23.8
55	20.6	22.4	55	21	22.4
60	21.1	23.3	60	21	23.3
65	23.9	20	65	24	20
70	24.8	23	70	25	23
75	24.1	22	75	24	22
80	23.8	22	80	24	22
PROMEDIO	22.6	23.4	PROMEDIO	22.6	23.4

Nota: Se detalla la temperatura ambiental, y la del biodigester. Elaboración propia.

En la Tabla N° 37, se muestra los valores de la temperatura tanto en los biodigestor N° 1 y N° 4 y la temperatura ambiente cada 5 días en un tiempo de 80 días. La temperatura en los biodigestores tuvo un promedio de 22.6 °C, mientras la temperatura ambiental tuvo un promedio de 23.4°C, en el proceso actuaron microorganismos tanto psicrófilos y mesófilos en la producción de biogás es por eso que el tiempo de retención fue de 80 días.

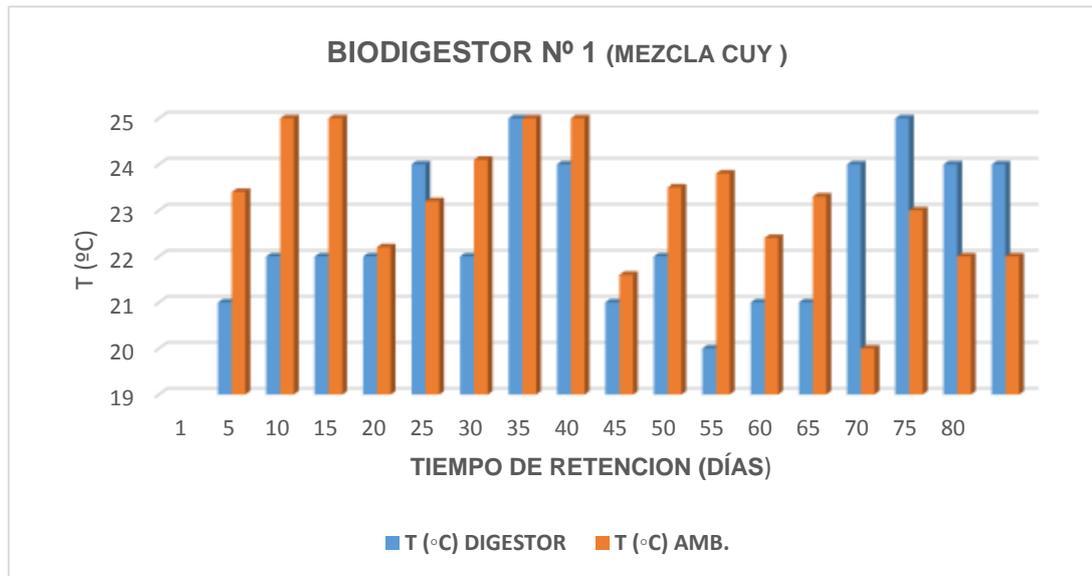


Figura 34. Temperatura ambiental y la temperatura en el biodigestor N° 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1).Elaboración propia.

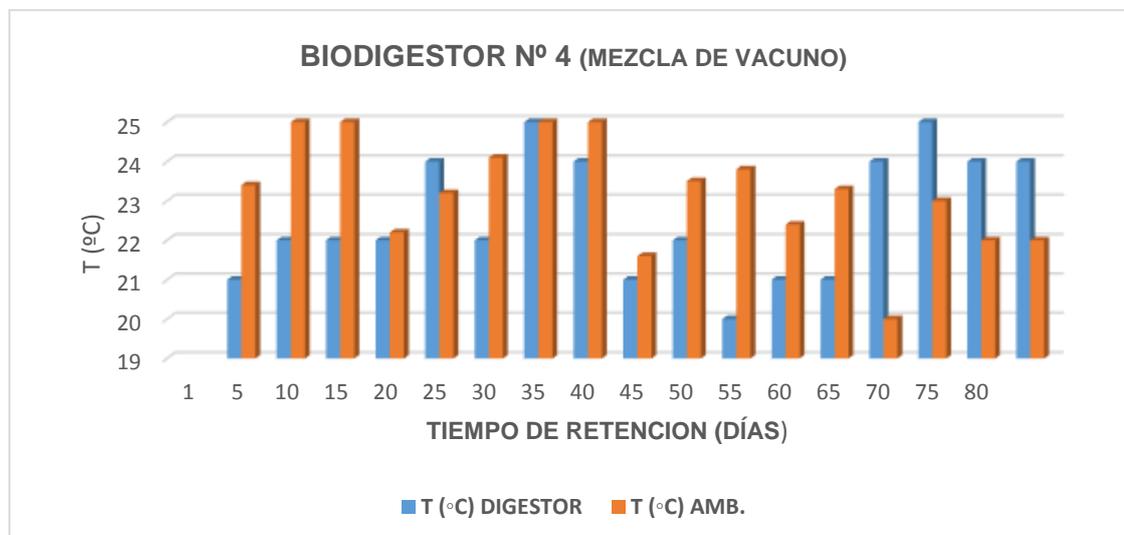


Figura 35. Temperatura ambiental y la temperatura en el biodigestor N° 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1).Elaboración propia.

4.1.5. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 1)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento N° 1 son: 0.59 L, 0,69 L, 0.79 L, 0.60 L, que corresponden del 66 al 76avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 38. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 1*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.29
2	64	0.39
3	66	0.59
4	68	0.69
5	70	0.69
6	72	0.79
7	74	0.79
8	76	0.60
9	78	0.18
10	80	0.12

Nota: Producción de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 38, muestran los valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 7 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 5.13 L.

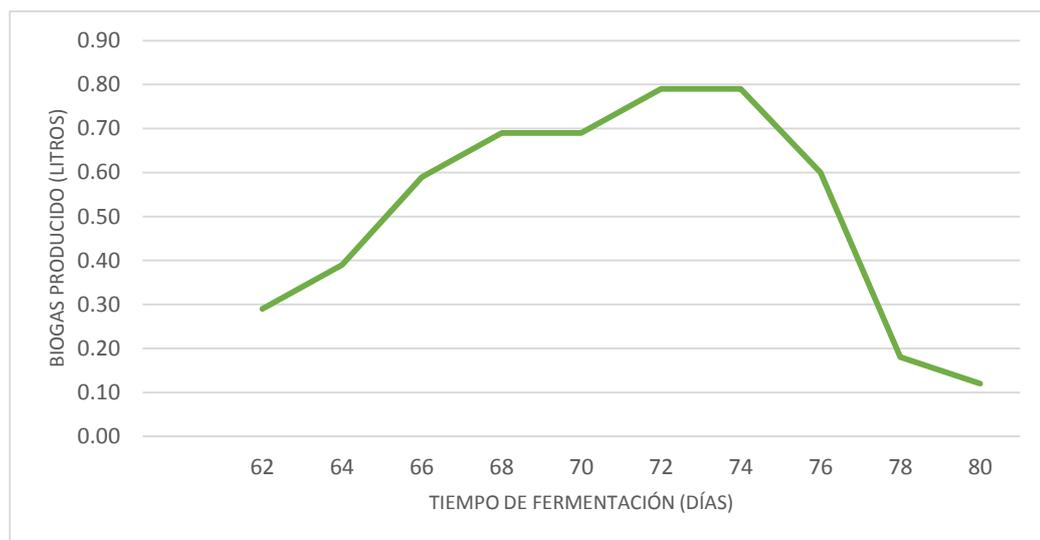


Figura 36. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), Elaboración propia.

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 1.

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1))

Tabla 39. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 1*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. correlación	Coef. determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.51	0.25	0.06	-0.19	4%	0.12	0.79

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 39, señala que el promedio de la producción de biogás fue 0.51 L, el valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.25 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.12 L y el rango máximo fue de 0.79 L con una varianza de 0.06 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = -0,19$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás disminuye, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.04$, indica que el 4 % del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

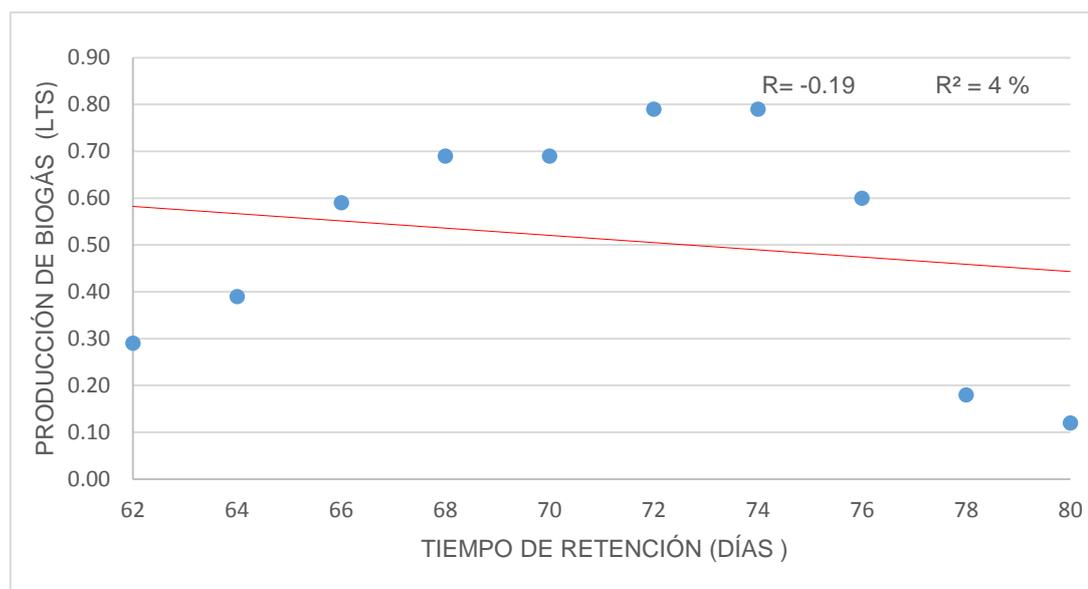


Figura 37. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento N° 1. Elaboración propia.

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 1:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1)). La producción acumulada de biogás fue de 5.13 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 40. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 1*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
2.95	1.84	3.39	0.98	98%	0.29	5.13

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

En la Tabla N° 40, señala que el promedio de la producción acumulada de biogás fue 2.95 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 1.84 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.29 L y el rango máximo 5.13 L con una varianza de 3.39 respectivamente.

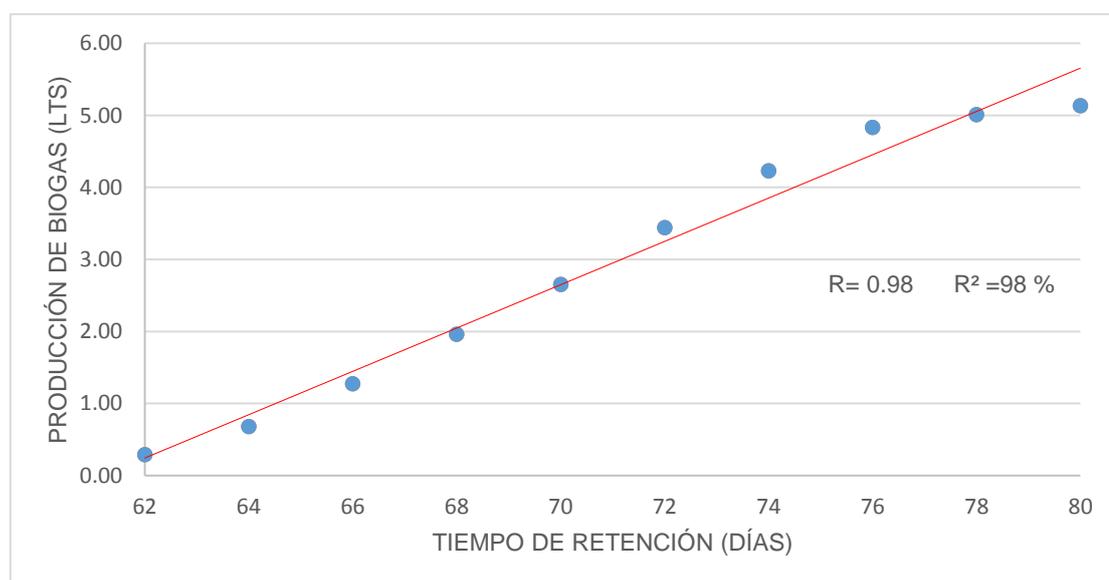


Figura 38. Correlación de la producción de biogás acumulada vs el tiempo de retención del tratamiento. Elaboración propia.

En la Figura N° 38 se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,98$, señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 98%.

4.1.6. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO Nº 2)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento Nº 2 son: 0.9 L, 0,98 L, 1L, 0.80 L, 0.85 L, 0.89 L, que corresponden del 66 al 76avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 41. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 2*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.26
2	64	0.43
3	66	0.90
4	68	0.98
5	70	1
6	72	0.80
7	74	0.85
8	76	0.89
9	78	0.40
10	80	0.32

Nota: Producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g), y agua en relación (1:2) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla Nº 41, muestra valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 7.7 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 6.83 L.

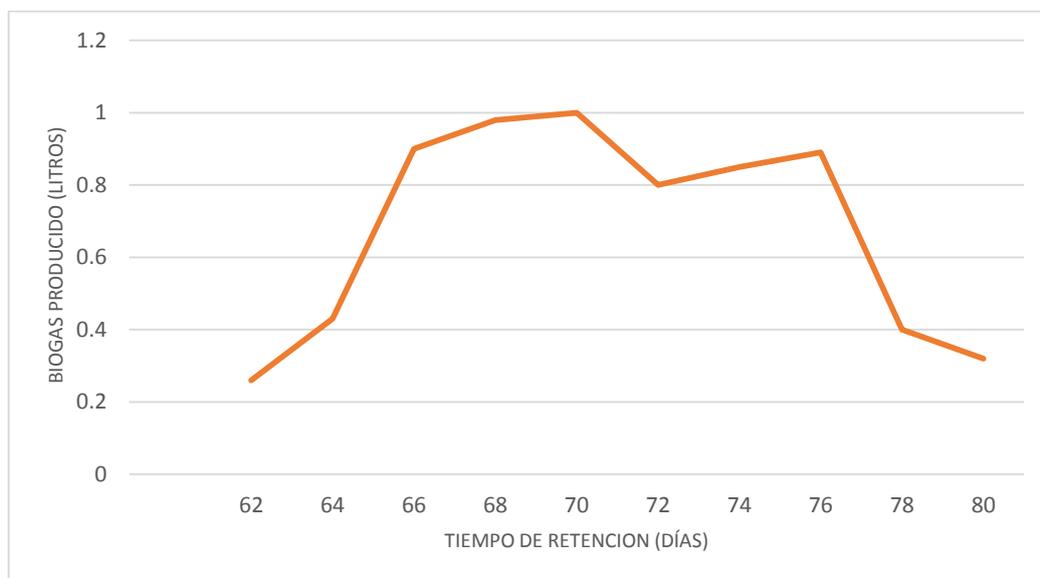


Figura 39. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g), y agua en relación (1:2), Elaboración propia.

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 2.

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2)).

Tabla 42. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 2

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.683	0.29	0.086	-0.19	0.03 %	0.26	6.83

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 42 señala que promedio de la producción de biogás fue 0.683 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.29 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.26 L y el rango máximo fue de 6.83 L con una varianza de 0.086 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = -0.19$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás disminuye, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.0003$, indica que el 0.03 % del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

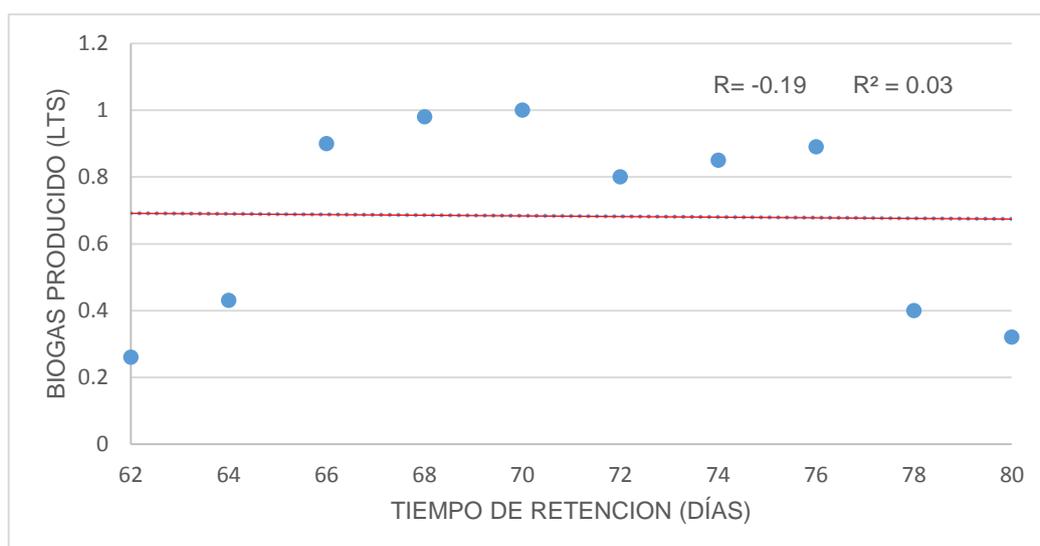


Figura 40. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 2. Elaboración propia.

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 2:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2)). La producción acumulada de biogás fue de 6.83 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 43. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 2

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
3.77	2.42	5.87	0.99	99 %	0.26	6.83

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

En la Tabla N° 43 señala que promedio de la producción acumulada de biogás fue 3.77 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 2.42 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.26 L y el rango máximo fue de 6.83 L con una varianza de 5.87 respectivamente.

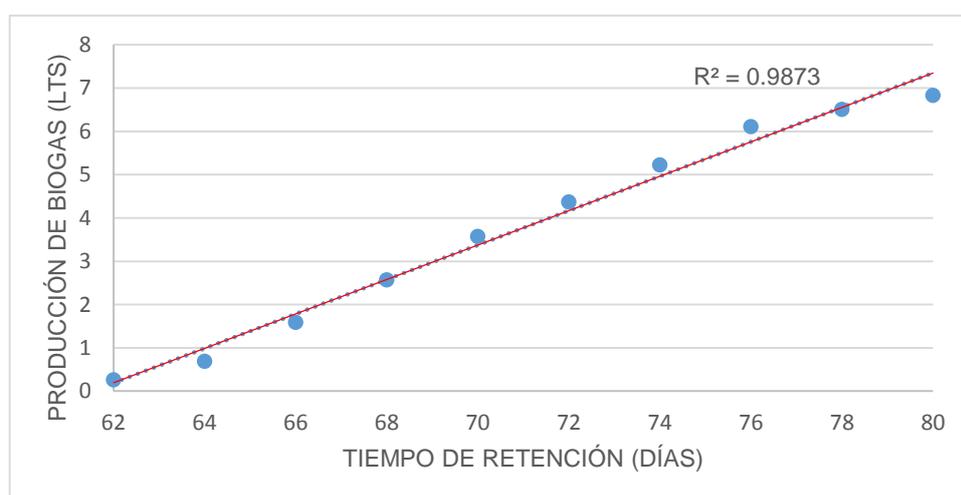


Figura 41. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 2

En la Figura N° 41, se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,99$, señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 99 %.

4.1.7. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 3)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento N° 3 son: 1.33 L, 1.79 L, 1.59 L, 1.65 L que corresponden del 66 al 72avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 44. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 3*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.77
2	64	0.88
3	66	1.33
4	68	1.79
5	70	1.59
6	72	1.65
7	74	1.12
8	76	0.90
9	78	0.50
10	80	0.40

Nota: Producción de biogás del tratamiento 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 44, muestra valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 7.3 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 10.93 L.

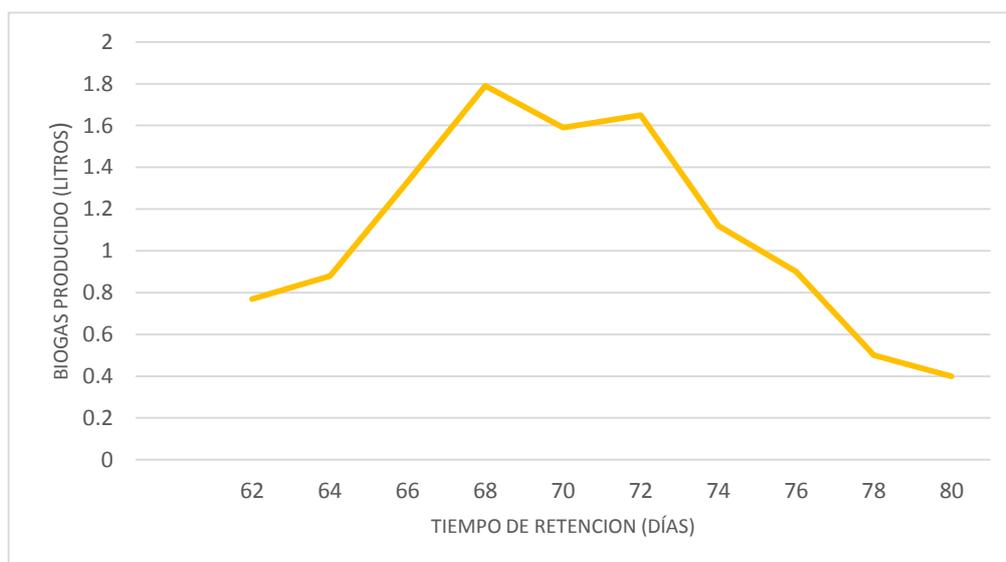


Figura 42. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3), Elaboración propia

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del tratamiento N° 3.

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3)).

Tabla 45. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 3

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
1.093	0.49	0.235	-0.38	14%	0.40	1.79

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 3 (estiércol de cuy (500 g)), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 45 señala que promedio de la producción de biogás fue 1.093 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.49 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.40 L y el rango máximo fue de 1.79 L con una varianza de 0.235 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = -0,38$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás disminuye, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.14$, indica que el 14 % del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

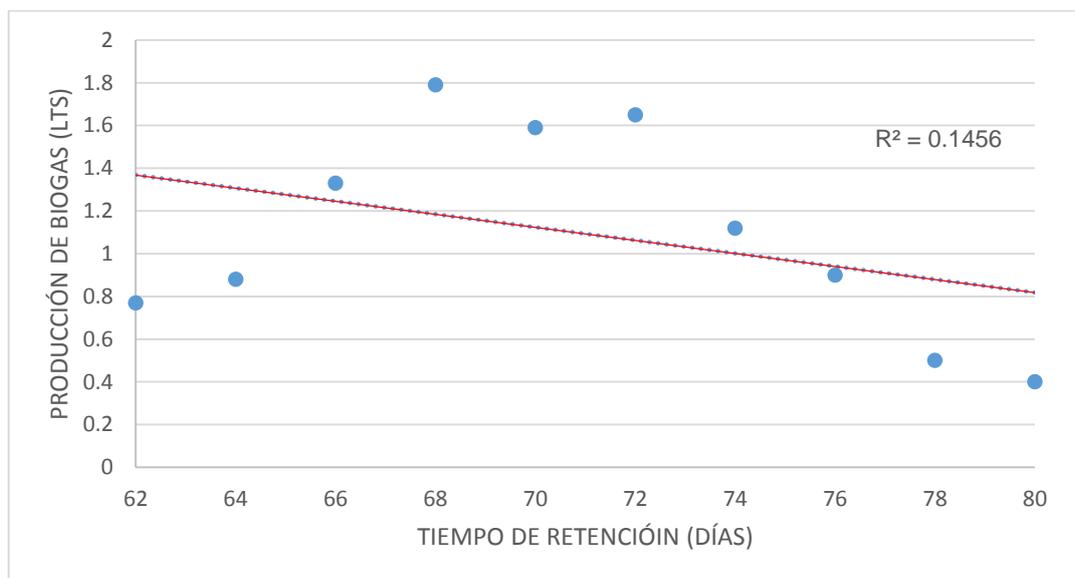


Figura 43. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 3

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 3:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3)). La producción acumulada de biogás fue de 10.93 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 46. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 3

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
6.52	3.79	14.36	0.99	97%	0.77	10.93

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

En la Tabla N° 46, señala que promedio de la producción acumulada de biogás fue 6.52 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 3.79 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.77 L y el rango máximo fue de 10.93 L con una varianza de 14.36 respectivamente.

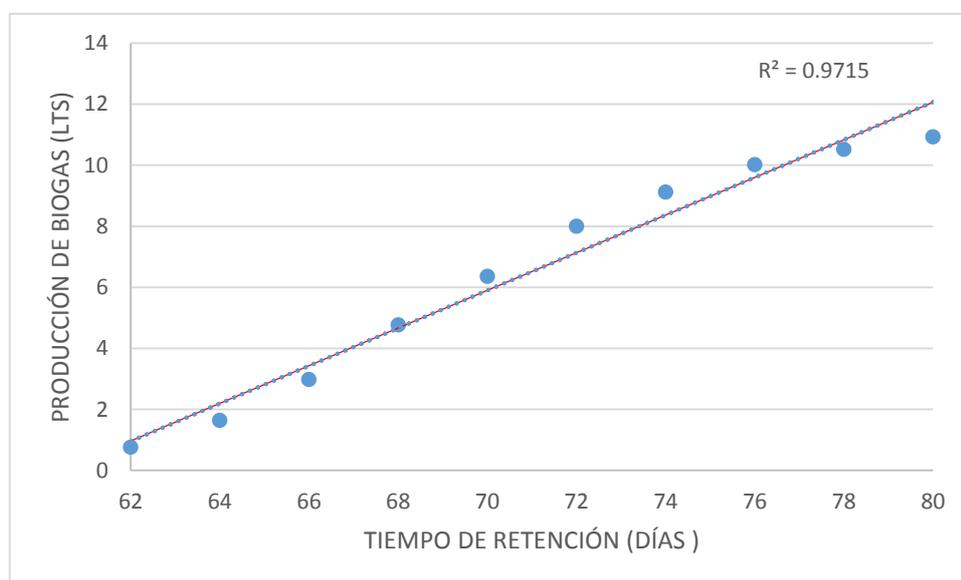


Figura 44. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 3

En la Figura N° 44 se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,97$, señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 97 %.

4.1.8. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 4)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento N° 4 son: 0.11 L, 0.10 L, 0.12 L, 0.13 L, 0.17 L que corresponden del 64 al 72avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 47. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 4*

Días de medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.058
2	64	0.088
3	66	0.11
4	68	0.10
5	70	0.12
6	72	0.13
7	74	0.17
8	76	0.08
9	78	0.07
10	80	0.058

Nota: Producción de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno (500 g), y agua en relación (1:1) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 47, muestra valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 10 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 0.98 L.

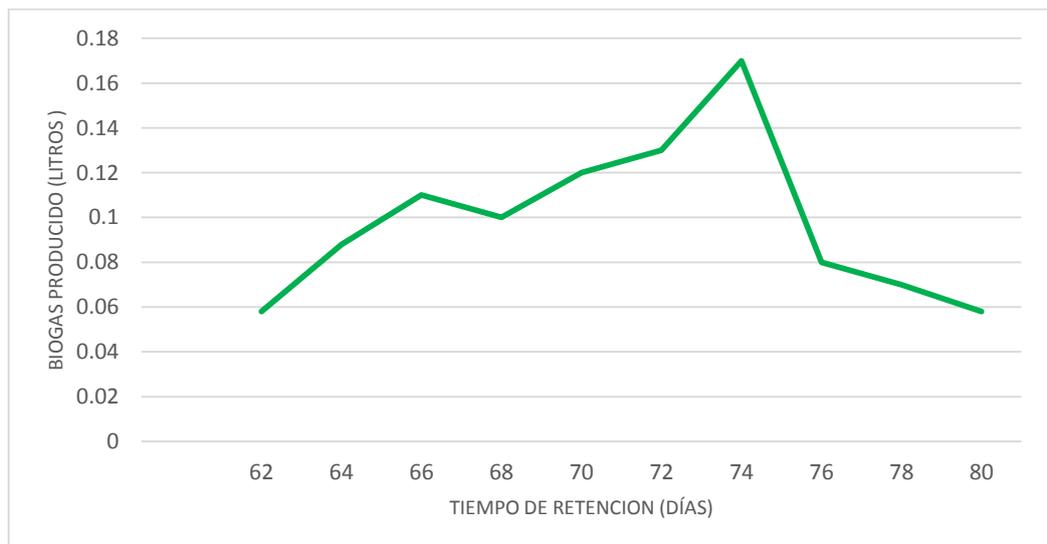


Figura 45. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1), Elaboración propia.

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 4

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1))

Tabla 48. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 4

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.098	0.035	0.001	-0.03	0.08%	0.058	0.17

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 48, señala que promedio de la producción de biogás fue 0.098 L, el valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.035 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.058 L y el rango máximo fue de 0.17 L con una varianza de 0.001 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = -0.03$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás disminuye, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.0008$, indica que el 0.08% del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

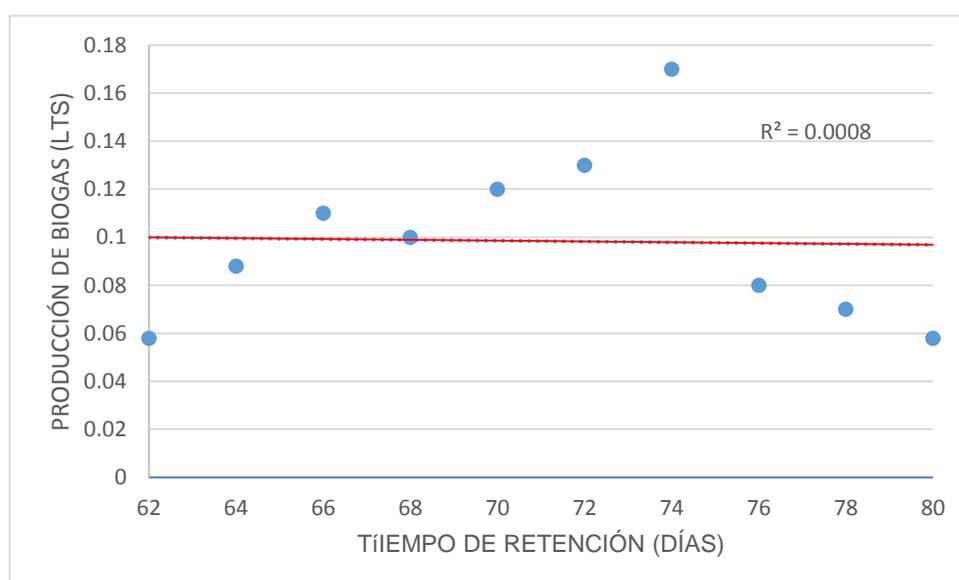


Figura 46. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 4

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 4:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1)). La producción acumulada de biogás fue de 0.984 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 49. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 4*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.54	0.34	0.11	0.99	99%	0.058	0.984

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno, (500 g), y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

En la Tabla N° 49 señala que promedio de la producción acumulada de biogás fue 0.54 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.34 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.058 L y el rango máximo 0.984 L con una varianza de 0.11 respectivamente.

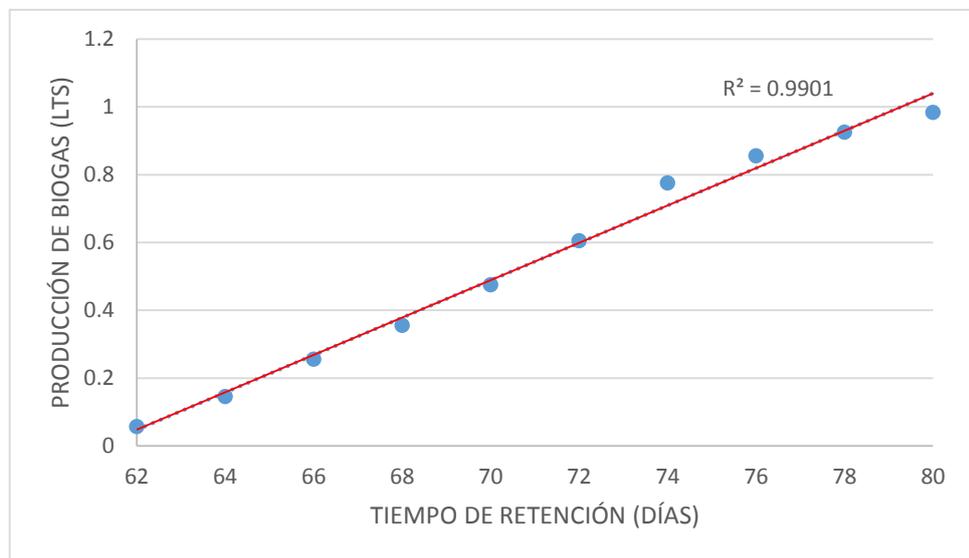


Figura 47. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 4

En la Figura N° 47, se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,99$, señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 99 %.

4.1.9. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (TRATAMIENTO N° 5)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento N° 5 son: 0.30 L, 0.35 L, 0.42 L, 0.43 L, 0.48 L, 0.51 L que corresponden del 64 al 74avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 50. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 5*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.15
2	64	0.22
3	66	0.30
4	68	0.35
5	70	0.42
6	72	0.43
7	74	0.48
8	76	0.51
9	78	0.25
10	80	0.20

Nota: Producción de biogás del tratamiento 5 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (125 g), y agua en relación (1:2) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 50, muestra valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 9.3 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 3.31 L.

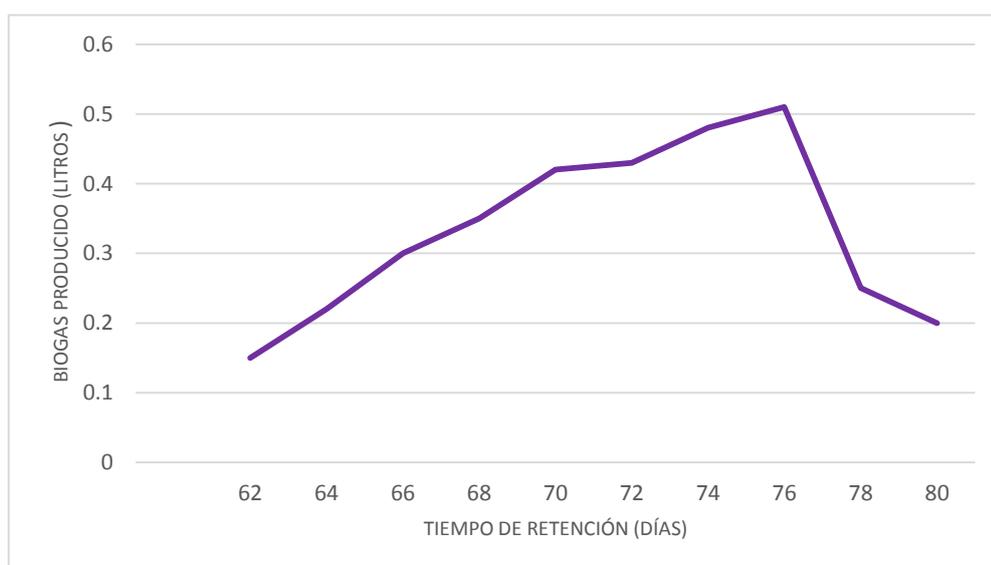


Figura 48. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 5 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2)). Elaboración propia.

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 5

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 5 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2)).

Tabla 51. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 5*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.33	0.125	0.015	0.30	9%	0.15	0.51

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 5 (estiércol de vacuno (500 g)), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 51 señala que promedio de la producción de biogás fue 0.33 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.125 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.15 L y el rango máximo fue de 0.51 L con una varianza de 0.015 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = 0,30$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás aumenta ligeramente, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.09$, indica que el 9 % del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

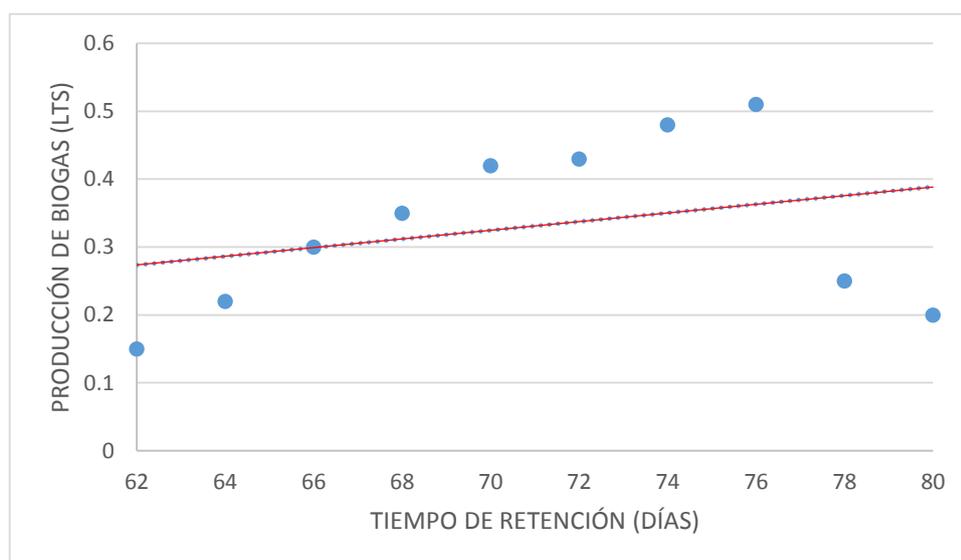


Figura 49. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 5.

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 5:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 5 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2)). La producción acumulada de biogás fue de 3.31 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 52. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 5*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango Mínimo	Rango Máximo
1.72	1.16	1.35	0.99	99%	0.15	3.31

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno,(500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

En la Tabla N° 52 señala que promedio de la producción acumulada de biogás fue 1.72 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 1.16 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.15 L y el rango máximo 3.31 L con una varianza de 1.35 respectivamente.

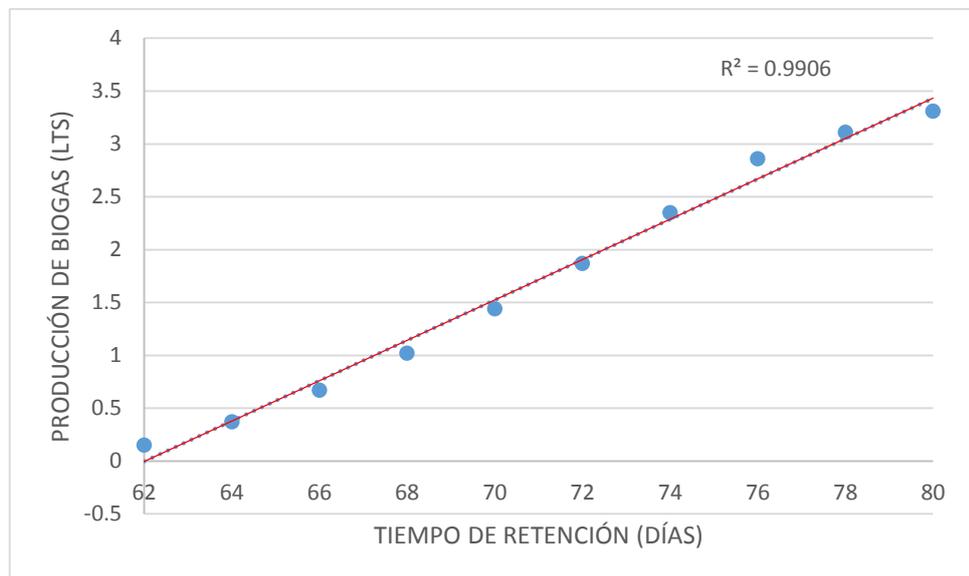


Figura 50. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 5

En la Figura N° 50 se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,99$, señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 99%.

4.1.10. Producción de biogás (TRATAMIENTO N° 6)

Los valores máximos de producción de biogás que reporto el tratamiento N° 6 son: 0.4 L, 0.5 L, 0.58 L, 0.64 L, 0.57 L que corresponden del 66 al 74avo día del tiempo de retención dentro del proceso de fermentación anaeróbica.

Tabla 53. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 6*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.22
2	64	0.33
3	66	0.36
4	68	0.40
5	70	0.50
6	72	0.58
7	74	0.64
8	76	0.57
9	78	0.47
10	80	0.38

Nota: Producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 53, muestra valores de producción de biogás cada 2 días. Para una concentración de sólidos totales del 8.3 %. Con una producción total de biogás en un tiempo de ochenta días de 4.45 L.

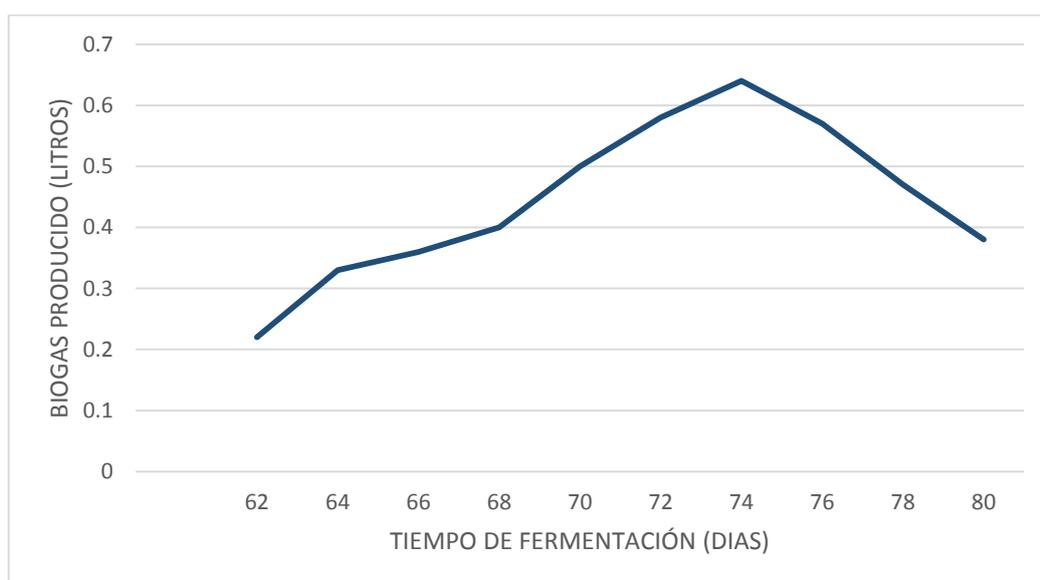


Figura 51. Volumen de producción de biogás vs el tiempo de retención del tratamiento 6 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3)). Elaboración propia

A. Análisis estadístico de la producción de biogás del Tratamiento N° 6.

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás con el Tratamiento N° 6 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3))

Tabla 54. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 6*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.445	0.13	0.0016	0.60	36%	0.22	0.64

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 6 (estiércol de vacuno (500 g)), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

La Tabla N° 54 señala que promedio de la producción de biogás fue 0.445 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 0.13 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.22 L y el rango máximo fue de 0.64 L con una varianza de 0.0016 respectivamente. Además el coeficiente de correlación de Pearson, $R = 0,60$ nos dice que a medida que pasan los días el volumen de biogás aumenta, respectivamente, asimismo se observa que el volumen va disminuyendo en los últimos días. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.36$, indica que el 36 % del volumen de biogás total se ha producido dentro de los 20 días de medición en el tiempo de retención de 80 días.

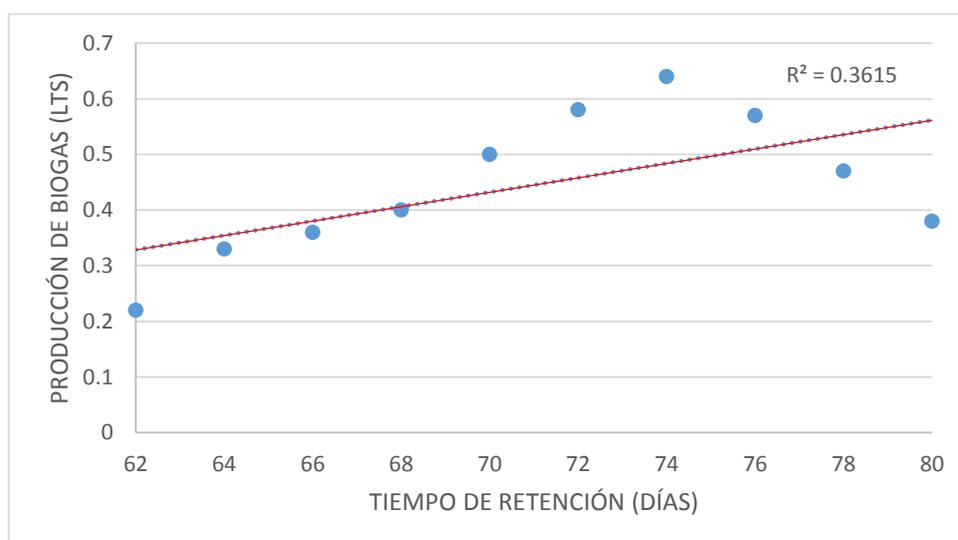


Figura 52. Correlación de la producción de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 6

B. Producción acumulada de biogás del Tratamiento N° 6:

A continuación se muestra el análisis estadístico de la producción de biogás acumulada con el Tratamiento N° 6 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3)). La producción acumulada de biogás fue de 4.45 L a los 80 días de la fermentación.

Tabla 55. Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 6

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. correlación	Coef. determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
2.23	1.51	2.28	0.99	99%	0.22	4.45

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 6 (estiércol de vacuno,(500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

En la Tabla N° 55 señala que promedio de la producción acumulada de biogás fue 2.23 L, su valor de la desviación estándar indica que en promedio las observaciones individuales se desvían de las medias 1.51 L. Asimismo nos indica que el rango mínimo fue de 0.22 L y el rango máximo fue de 4.45 L con una varianza de 2.28 respectivamente.

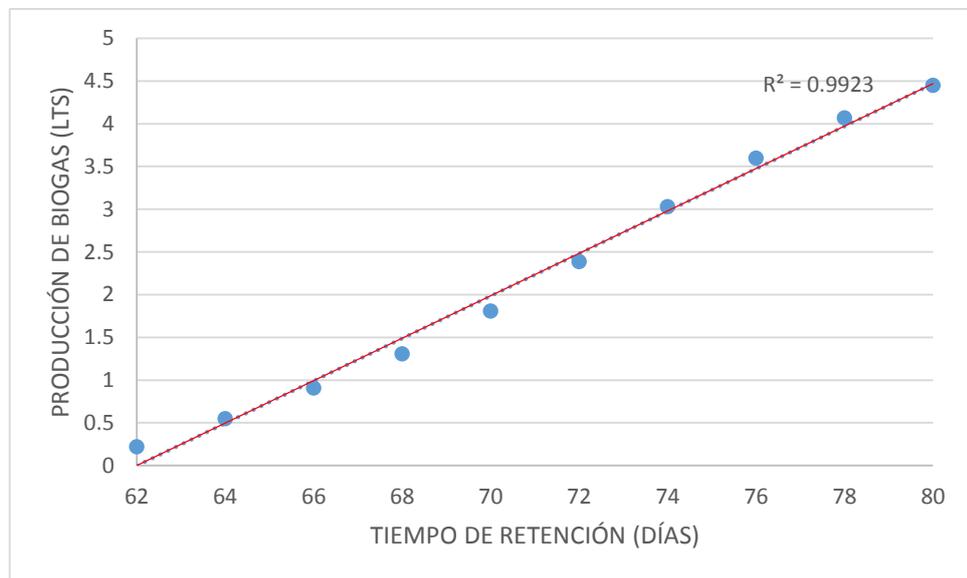


Figura 53. Correlación de la producción acumulada de biogás vs el tiempo de retención del Tratamiento 6

En la Figura N° 53 se observa el volumen acumulado de biogás donde se obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,99$ señalando que existe una correlación altamente significativa entre el volumen acumulado y los días. El coeficiente de determinación fue de 99 %.

4.1.11.RENDIMIENTO COMPARADO EN LA PRODUCCION DE BIOGAS.

En la tabla 56, observamos la producción de biogás del Tratamiento N° 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3)).y Tratamiento N° 6 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3) que fueron los tratamientos de mayor producción.

Tabla 56. Rendimiento en la producción de biogás.

Materia prima	Biogás (L)
Mezcla vacuno	4.45
Mezcla de cuy	10.93

Elaboración propia.

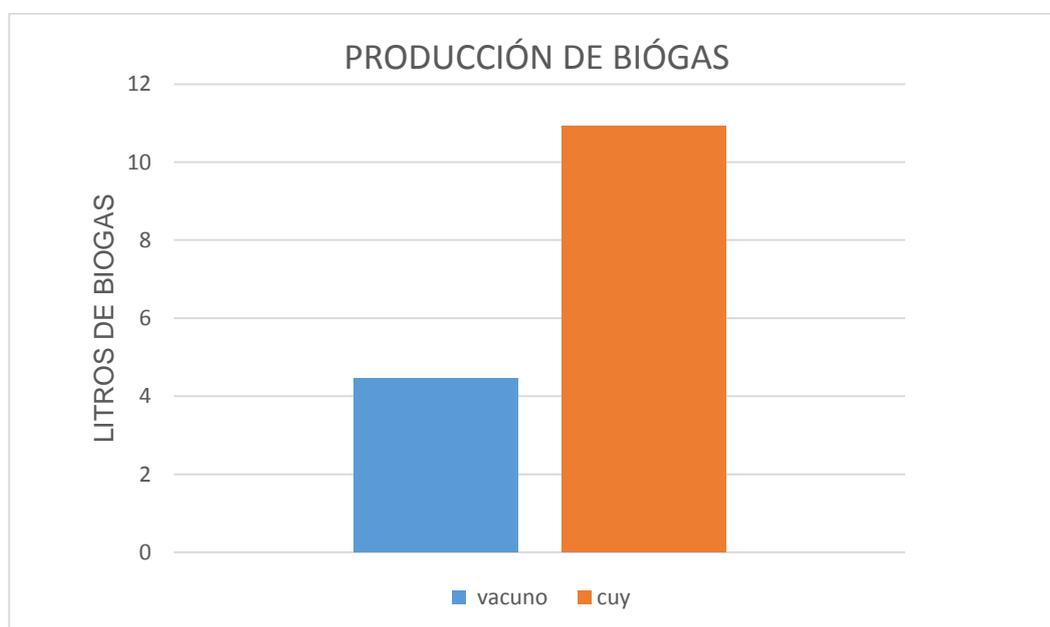


Figura 54. Rendimiento de producción de biogás por cada tipo de estiércol. Elaboración propia

En la figura N° 54, observamos que la mayor producción se obtuvo del estiércol de cuy (500g), leguminosas (250g), y agua en relación (1:3)) produciendo 10.93 L de biogás vs los 4.45 L de biogás que se produjo con la mezcla (estiércol de vacuno (500g), leguminosas (250g), y agua en relación (1:3), siendo la más eficiente la mezcla de estiércol de cuy.

4.2. DISCUSIÓN

En el siguiente cuadro se muestra el análisis estadístico obtenido de la producción de biogás de todos los tratamientos.

TRATAMIENTO	PRODUCCION TOTAL	ANÁLISIS ESTADÍSTICO				
		MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA	Coef. Correlación	Coef. Determinación
1	5.13 L	2.95	1.84	3.39	0.98	98%
2	6.83 L	3.77	2.42	5.87	0.99	99 %
3	10.93 L	6.52	3.79	14.36	0.99	97%
4	0.984 L	0.54	0.34	0.11	0.99	99%
5	3.31 L	1.72	1.16	1.35	0.99	99%
6	4.45 L	2.23	1.51	2.28	0.99	99%

- El promedio mayor de producción de biogás lo obtuvo el tratamiento 3 que establece un valor de 6.52 L producto de las mediciones de biogás acumuladas realizadas durante 20 días.
- El promedio menor lo obtuvo el tratamiento N° 4 con 0.54 L. Notándose así que la adición de leguminosas al proceso muestra una mayor producción de biogás.
- En el caso de la desviación estándar se muestra que en el tratamiento N° 3 la producción de biogás tuvo una mayor variación con respecto al promedio a lo largo de las mediciones.
- El tratamiento N° 4 muestra que la producción de biogás fue la que tuvo mayor uniformidad, ya que su desviación estándar fue la menor en todos los tratamientos.
- En cuanto al coeficiente de correlación se muestra que en todos los tratamientos la correlación es positiva significa que en la producción acumulada de biogás aumenta mientras el tiempo de retención es mayor.
- En todos los tratamientos el coeficiente de determinación nos muestra que casi la totalidad de biogás fue producido dentro de los 60 días de fermentación.

CAPITULO V

ANÁLISIS ECÓNOMICO Y PRODUCCIÓN DE BIÓGAS A MAYOR ESCALA

5.1. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIÓGAS PROYECTADA A MAYOR ESCALA

La siguiente fórmula nos permitirá conocer la producción de biogás a mayor escala.

$$PG = MPC \times SO \times P$$

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética,
Guía de Implementación de Sistemas de
Biogás, 2003.

Donde:

PG = Gas producido en litros

MPC = Estiércol en kilogramos

SO = Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie.

P = Producción aproximada de m^3 de gas/1 kg de masa orgánica
seca total

Tabla 57. *Contenido de materia orgánica de cada tipo de estiércol*

Nutriente	Vacuno	Cuy
Materia orgánica (%)	48.9	63.9

Recuperado de: Suquilanda, M. (1996). *Agricultura Órgánica Fase II Fundagro*. Ecuador .

Tabla 58. *Producción de biogás proyectado en base a una tonelada de estiércol*

Estiércol de cuy	Estiércol de vacuno
PG = MPC xSOxP	PG = MPC xSOxP
PG = 1000x0.639x21.86	PG = 1000x0.489x8.90
PG = 13968.54 L	PG = 4352.1 L

Nota: Proyección de producción basada en los resultados experimentales obtenidos, .formula recuperada de: Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Guía de Implementación de Sistemas de Biogas* . Bogotá: Incotec .

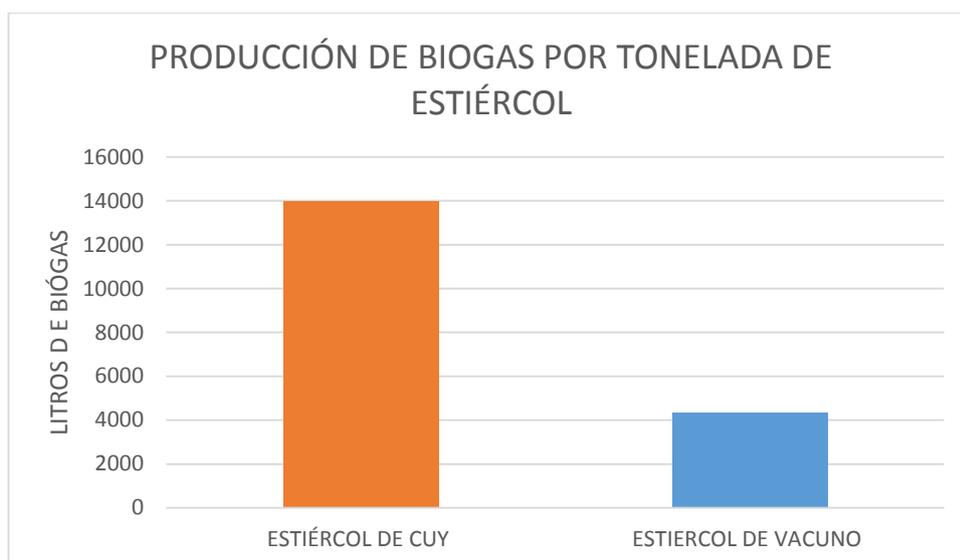


Figura 55. Comparación de producción de biogás por 1 tonelada de estiércol. Elaboración propia.

De acuerdo a los cálculos realizados la producción de biogás en base a una tonelada de estiércol de vacuno es de 4352.1 L de biogás, de cuy es de 13996.54 L, respecto a la energía producida el estiércol de cuy se obtiene un total de 8381.124 Kcal y el estiércol de vacuno 26112.6 kcal.

Tabla 59. Producción de biol con una tonelada de estiércol

PRODUCCIÓN DE BIOL PARA 1 TONELADA DE ESTIÉRCOL DE CUY	PRODUCCIÓN DE BIOL PARA 1 TONELADA DE ESTIÉRCOL DE VACUNO
PB = Agua agregada x (*) 0.99	PB = Agua agregada x (**) 0.986
PB = 3000x0.99	PG = 3000x0.986
PB = 2970 L	PG = 2958 L

Nota: (*), (**) Datos tomados en la recolección de biol por diferencia de volumen al inicio y fin de proceso. Elaboración propia.

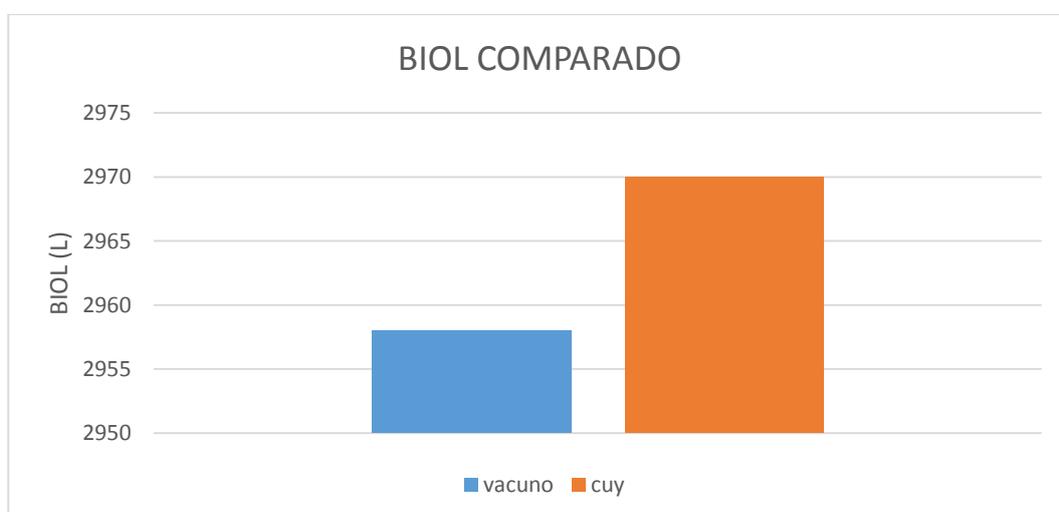


Figura 56. Comparación de producción de biol por tonelada de estiércol de cuy y vacuno

En la Figura N° 56, se observa que habrá una producción de 2970 L de biol usando el estiércol de cuy con una dilución de (1:3) vs a la producción de estiércol de vacuno que sería de 2958 L siendo el estiércol de cuy el más apropiado para obtener una mayor producción de biol.

Tabla 60. *Producción de biosol proyectado*

Producción de biosol para 1 tonelada de estiércol de cuy	Producción de biosol para 1 tonelada de estiércol de vacuno
PBS= Mezcla x0.997	PBS=Mezcla x 0.9946
PB = 1500x0.997	PG = 1500x0.9946
PB = 1496 kg	PG = 1492 kg

Nota: basado en una tonelada de estiércol de cuy en dilución (1:3).(*), (**) Datos tomados en la recolección de biol por diferencia de peso al inicio y fin de proceso. Elaboración propia.

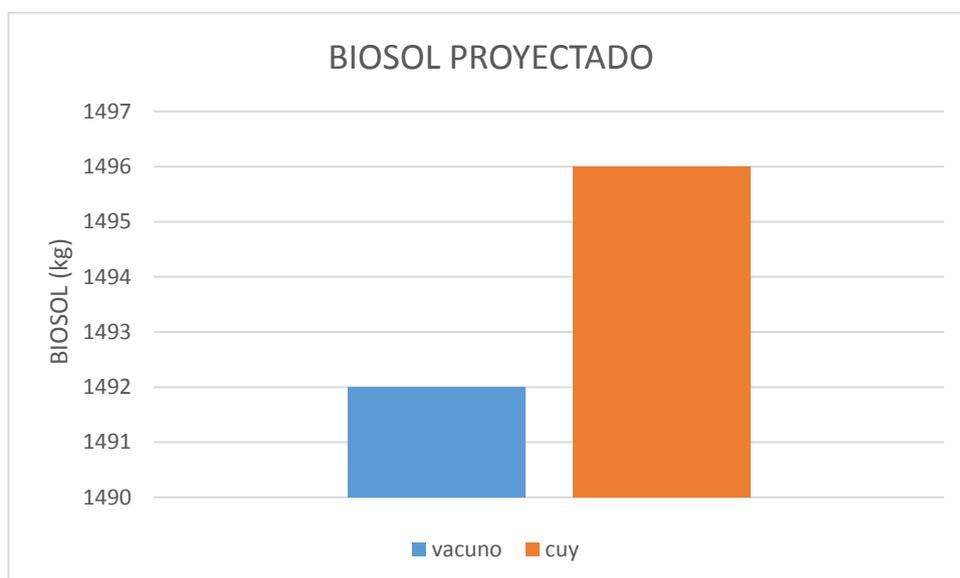


Figura 57. Comparación de producción de biosol por tonelada de estiércol. Elaboración propia.

En la Figura N° 57, se aprecia que la producción proyectada de biosol con el estiércol de cuy y 500 kg de desechos orgánicos se obtiene 1496 Kg vs la producción con el estiércol de vacuno y desechos orgánicos que se estima será de 1492 kg de biosol, siendo la más rentable para la producción de biosol, el estiércol de cuy.

5.2. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico de la planta comprende el estudio de los costos de inversión y producción necesarios para tratar una tonelada de estiércol.

5.2.1. Inversión fija

La inversión fija comprende todos los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de producción, la construcción e instalación de los equipos y de los elementos que permiten su funcionamiento.

Tabla 61. *Costo de materiales y equipos*

Materiales y equipos	Valor unitario (s/.)	Valor total (s/.)
Tanque de biodigestión	284.90	854.7
Tuberías	27.00	54.00
Niples	2.00	16.00
Tapones	2.00	6.00
Llaves de paso	3.50	21.00
Manómetro	24.00	72.00
Codos	2.00	12.00
T	2.00	12.00
Tapones de tubo	2.00	6.00
Teflón	1.00	5.00
Cinta aislante	2.00	8.00
Guantes	15.00	30.00
Rotulador	1.00	5.00
Mascarilla	6.00	18.00
Mandil	15.00	45.00
Tarraja	35.00	35.00
Recipiente de plástico	1.00	1.00
Botella de plástico	0.20	0.60
Virutas de hierro	5.00	15.00
Balanza	60.00	60.00
Tanque de almacenamiento de biol	284.00	854.00
	TOTAL	S/ 2130.3

Nota: Datos obtenidos de precios del mercado por cotizaciones de materiales. Elaboración propia.

Tabla 62. *Costo de construcción de la planta*

Rubro	Valor s/
Equipo y materiales	S/ 2130.3
Mano de obra	S/ 600.00
Total	S/ 2730.3

Nota: Recopilación de equipos y materiales y el costo de mano de obra. Elaboración propia.

5.2.2. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos de producción se refieren a todos los insumos, mano de obra necesaria para llevar a cabo el proceso. Los desechos orgánicos y estiércol,

tienen un costo muy bajo. El desglose de la materia prima se presenta a continuación:

Tabla 63. *Costos de materia prima y servicios*

Material	Cantidad	Unidad	Precio	Costo total
Estiércol	1000	Kg	S/ 0.10	S/ 100
Agua	3000	L	S/ 0.03	S/ 100
Desechos orgánicos	500	Kg	S/ 0.10	S/ 50
Transporte	2	Viaje	S/ 50	S/ 100
Presentación	4000	Envase	S/0.20	S/ 800
			Total	S/ 1150

Nota: Costos basados en cotizaciones de los posibles proveedores en cada caso. Elaboración propia.

Tabla 64. *Mano de obra requerida*

Tipo	Cantidad	Costo mensual
Encargado de planta	1	S/ 800
Operarios	2	S/ 400
Coordinador de ventas	1	S/ 750
Total	4	S/ 1950

Elaboración Propia.

Tabla 65. *Costos variables*

Concepto	Costo S/
Electricidad	150.00
Agua	20.00
Papel	20.00
Mantenimiento de planta	200.00
Total	S/ 390

Nota: Presupuesto asignado a los costos variables del proceso. Elaboración propia.

Tabla 66. *Costo de construcción y producción*

Costo de construcción de planta	S/ 2.730.3
Mano de obra	S/ 1950
Materia prima y servicios	S/ 1150
Costos variables	S/390
TOTAL	S/ 6220

Elaboración propia.

5.2.3. RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SUBPRODUCTOS

Tabla 67. *Producción de biogás destinado a la combustión y ahorro*

Biogás producido (l)	Energía generada (kcal)	Ahorro (s/)
13968.54 L	8381.124 kcal	40.00

Nota: 1 metro cubico de biogás equivale 6000 kcal .Elaboración propia.

5.2.4. COMERCIALIZACIÓN DEL BIOL Y BIOSOL

El costo del Biol fertilizante y Biosol, que son los productos de valor agregado que sale al mercado del proceso, lleva consigo el costo de producción y precio de venta como se muestra a continuación.

Tabla 68. *Producción de biol para la comercialización*

Biol (l) Producido	Unidad (l)	Precio de venta	Ingresos
2970	1	S/ 2.00	S/ 5940

Elaboración propia.

Tabla 69. *Producción de biosol destinado a la comercialización*

Biosol Producido	Unidad (kg)	Precio de venta	Ingresos
1496	1	S/ 2.00	S/ 2992

Elaboración propia.

5.2.5. GASTOS DE FINANCIAMIENTO

Tabla 70. *Gastos de financiamiento*

Cápital	Interes	Seguro desgravamen	Total cuota
S/4000	S/.1191.95	S/172.80	S/150.00

Elaboración propia. basada en datos obtenidos de la sede del Banco Financiero

Tabla 71. *Ingresos y gastos del proceso*

Costos fijos	
Costos fijos de producción	S/ 1150.00
Mano de obra	S/ 1950.00
Gastos financiamiento	S/ 150.00
Total	S/3250.00
Costos variables	S/ 390.00
Ingresos totales	S/ 8932.00
Ganancia neta	S/5292.00

Elaboración propia.

5.2.6. PUNTO DE EQUILIBRIO

En este punto se calcula el punto de equilibrio del proceso productivo en unidades para venta y la cantidad de ingresos que se deberá obtener para el equilibrio económico.

Tabla 72. Datos para el cálculo del punto de equilibrio

Costos fijos	Costos variables unitarios	Precio de venta	Unidades a vender
S/. 3250	S/. 0.08732	S/. 2	4466 unidades

Elaboración propia.

$$Q = \frac{CF + U}{PVu - CVu}$$

Donde:
 U= Utilidades
 Q=unidades para venta
 PVu= Precio de venta unitario
 CVu=Costo variable unitario
 CF=Costos fijos

U= Q (PVu- Cvu)-CF
 U=4466(2-0.08732)-3250
 U= S/. 5292

Figura 58. Calculo de la utilidad total. Elaboración propia

Punto de equilibrio en soles (s/.)	Punto de equilibrio en unidades
$Q = \frac{CF}{1 - \frac{CVu}{VT}}$ <p>Donde : Q= Punto de equilibrio (unidades monetarias) CF= Costos fijos VT= Ventas Totales CVu=Co sto variable unitario</p> $Q = \frac{CF}{1 - \frac{CVu}{VT}}$ $PE = \frac{3250}{1 - \frac{390}{8932}}$ <p>PE= S/.3398.40</p>	$Q = \frac{CF}{PVu - CVu}$ <p>Donde : Q= Punto de equilibrio (unidades Físicas) CF= Costos fijos PVu= Precio de venta unitario CVu=Costo variable unitario</p> $Q = \frac{CF}{PVu - CVu}$ $Q = \frac{3250}{2 - 0.08732} = 1699.2$ <p>Q= 1700 unidades</p>

Figura 59. Cálculo del punto de equilibrio. Elaboración propia.

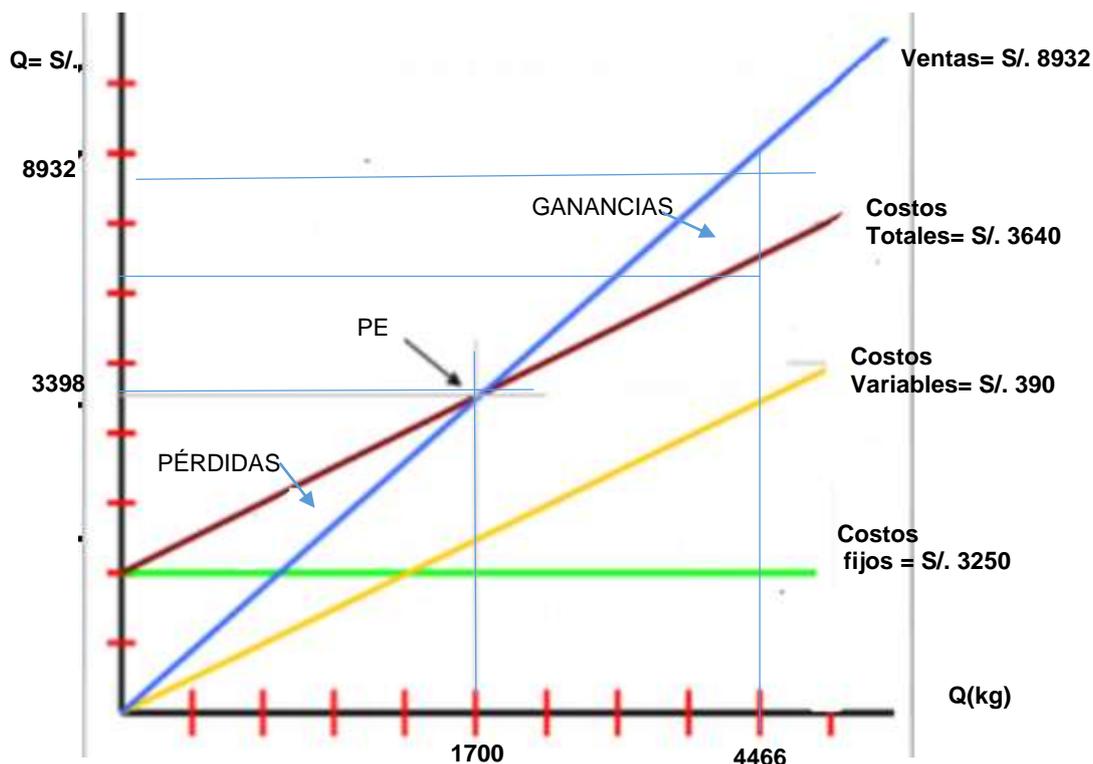


Figura 60. Punto de equilibrio del proceso de producción de biogás, biol, biosol .Elaboración propia

Según lo calculado para poder tener cubiertos todos los costos de producción necesitamos vender 1700 unidades recaudando así S/.3398.4, para no tener ni pérdidas ni ganancias en el proceso productivo.

5.3. ASPECTOS DEL PROYECTO

5.3.1. SALUD:

En las zonas rurales se usa la combustión de leña como fuente de calor, preparación de alimentos entre otros, los miembros de la familia están expuestos a la inhalación de gases, en especial las personas encargadas de cocinar ya que la mayoría realiza esta tarea con leña. Implementando la tecnología de producción de biogás, el riesgo es menor ya que en la combustión de biogás las emisiones son menores y el olor es mínimo en la cocina. Los resultados que se obtienen son:

- Al no inhalar los gases causadas por la combustión de leña, van desapareciendo o disminuyendo enfermedades respiratorias y oculares.
- Reducción de fuentes de enfermedades causadas por el manejo inadecuado de excretas de animales.

- Disminuye la proliferación de vectores de enfermedades ya que dificulta la multiplicación de hongos patógenos ya que no presenta condiciones para la multiplicación de insectos, moscas y bacterias.
- La aplicación de fertilizantes orgánicos obtenidos mejora la calidad de los productos cultivados siendo más saludables y nutritivos.

El consumo de alimentos de mejor calidad junto a la menor exposición a la más inhalación de gases tóxicos es una apuesta por la prevención de enfermedades. Una población más sana conlleva a un menor gasto médico. Y un medio ambiente más sano implica una mejora de las condiciones de vida de las personas.

5.3.2. AMBIENTAL:

Con el uso del sistema de producción de biogás disminuye las emisiones de metano (CH₄) causados por la mala disposición de residuos agropecuarios, reduce la lixiviación de nitratos en las aguas subterráneas causados por el almacenamiento inadecuado de estiércol en el suelo, en el proceso se usa como materia prima los desechos orgánicos ayudando a mitigar los efectos negativos de la acumulación de estos desechos. Además contribuye a disminuir la deforestación. “Se ha calculado que 1 m³ de biogás utilizado para cocción imposibilita la deforestación de 0.335 hectáreas de bosques con un promedio de 10 años de vida de los árboles”. (Sasse, 1989), si un biodigestor promedio produce 1.5 m³ de biogás al día, 547.5 m³ al año, dejándose de cocinar con leña se evitaría la deforestación de 183.41 hectáreas de bosques cada año por cada biodigestor operando.

El uso del biodigestor puede contribuir a mitigar una amplia gama de impactos ambientales, provocados, por el pique de leña y por la ganadería extensiva. En las áreas donde se utilizan biodigestores se reduce la tala de los bosques por consumo de leña, favoreciendo la conservación de las especies de plantas y animales, contribuyendo a mantener la calidad de las fuentes de agua y conservando los nutrientes del suelo. En el entorno circula el aire por encima del depósito de estiércol, esta situación origina la liberación de gases responsables del deterioro de la capa de ozono causando daños en la salud y la producción agrícola. Otra ventaja es que si no se cocina con leña los utensilios de cocina son más fáciles de limpiar de modo que se consume una menor cantidad de

agua y productos químicos para limpiarlos, la producción diaria de biogás permite reducir la dependencia de insumos como: agroquímicos, gas comercial y energía eléctrica. En resumen su factibilidad ambiental puede sintetizar lo siguiente:

- Combustible renovable que utiliza desechos orgánicos para su elaboración, dándole un uso combustible al metano (CH_4) disminuyendo el efecto negativo al liberarlo a la atmósfera por la disposición inadecuada de desechos orgánicos.
- Produce biol (abono orgánico) que puede sustituir en parte el abono y urea de naturaleza sintética.
- Mitiga el impacto de emisión de metano (CH_4) por descomposición de residuos orgánicos, vegetales y animales.
- Producción de energía renovable.
- Transforma los desechos orgánicos en fertilizantes de alta calidad.
- Favorece la protección del suelo, agua, aire y vegetación.

5.3.3. SOCIO-ECONÓMICO.

El uso de los biodigestores para la producción de biogás trae grandes beneficios económicos a la comunidad a causa de la sustitución de energía ya que se reduce considerablemente la compra de elementos productores de energía como el GLP. Además el beneficio de uso del biol en sustitución de urea, aumenta la producción agrícola. En resumen los resultados son:

- Con la utilización de una nueva fuente calorífica disminuye la dependencia energética y existe un ahorro monetario al disminuir el consumo de gas, leña, electricidad y gasolina.
- Ahorro en costos de fertilizantes químicos: Las familias rurales que se dedican a la producción agrícola, emplea fertilizantes el costo de los mismos es alto. El efluente líquido (biol) sale de forma líquida del biodigestor y sirve de abono orgánico para pastos y cultivos, equivalente a un fertilizante de fórmula completa. El abono orgánico permite sustituir el abono químico Nitrógeno, Fósforo, Potasio (N, P, K) permite incrementos de la producción.
 - Potencial ingreso por medio de la venta de Biol.
 - Incremento de los rendimientos agrícolas y mayor volumen de forraje

- Posibilidad de producción orgánica.
- Disminución de la carga de trabajo doméstico.
- Ahorro de energía para cocinar.
- Más tiempo libre para descansar y/o dedicar a otras actividades.
- Generación de puestos de trabajo: En la implementación de sistemas de producción de biogás se necesita mano de obra para la carga, descarga de los biodigestores y apoyo logístico para la venta de los subproductos generados como el biol y el biosol.

5.3.4. SOCIAL.

La propuesta de producción de biogás desarrollada dentro de este trabajo de investigación comprende el mejoramiento de calidad de vida, sistema productivo y los ingresos de los trabajadores del sector agropecuario y a las personas que adopten este tipo de tecnología, no solamente a corto plazo, sino también con una visión de sostenibilidad y de respeto de los derechos de las generaciones futuras. Se atenderá de manera directa a cubrir el consumo energético a un bajo costo y utilizando como materia prima los residuos de la industria agropecuaria y además los residuos domésticos como son los desechos de verduras generando puestos de trabajo ya que además se comercializa los subproductos como son el biol, biosol (fertilizantes orgánicos).

PUESTOS DE TRABAJO (FUNCIONES)		
ENCARGADO DE PLANTA	2 OPERARIOS	COORDINADOR DE VENTAS
<ul style="list-style-type: none"> • Monitorear los parámetros del proceso • Verificar la producción de biogás • Verificar la presión • Detectar anomalías en el proceso • Llenar el parte diario de incidencias • Aplicar las medidas correctivas en caso de fugas. • Dar mantenimiento al biodigestor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar el tratamiento previo del estiércol y desechos orgánicos como es el compostaje de los mismos • Cargar el biodigestor para la puesta en marcha del proceso • Echar el agua al biodigestor • Verificar que no haya fugas • Recolectar el biol y biosol • Envasarlo para su comercialización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recepcionar pedidos de los clientes • Despachar los pedidos realizados • Salir a campo a ofrecer los productos • Llenar los documentos necesarios para la comercialización. • Apoyar en actividades de oficina.

Figura 61. Puestos de trabajo generado en la producción de biogás. Se muestra el personal necesario en la producción de biogás.

5.4. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS - ESTIÉRCOL DE VACUNO

En una granja se recolecta 1000 kg de estiércol de vacuno por día.

Debemos encontrar:

1. La producción de metano (CH_4) que obtendría para un tiempo de retención de 30 días y temperatura de $15^\circ C$.
2. Si la composición del biogás es de un $60\%CH_4$ y un $40\% CO_2$ ¿cuáles son las cantidades de biogás, de CH_4 y de CO_2 ?
3. Si utiliza este metano (CH_4) para la producción de calor, ¿Cuántos kg de LPG (gas licuado de petróleo) podría reemplazar durante una semana si las pérdidas en el sistema son del 30% ?
4. Calcular el volumen del digestor para una mezcla de estiércol y agua de 1 a 3,
5. ¿Cuál es el volumen del tanque gasificador requerido si la relación de $VD/VG = 5$?

Solución: Para hallar los datos requeridos necesitaremos los siguientes datos:

Tabla 73. Características de la Materia orgánica utilizada en la biodigestión anaeróbica

Fuente	W_A	T	ST	SV	NP	PO	KO	ST/T	SV/ST
Vacuno	500	86	12	10	0,45	0,094	0,29	14 %	83 %
Cuy	2	64	16	12	1,1	0,3	0,4	25 %	75 %

Recuperado de: ASAE Standard D384.1 DEC93; American Society of Agricultural Engineers.

Donde:

W_A = Peso promedio del animal en Kg.

T = Cantidad total de residuo (estiércol) promedio en Kg. por cada 1000 Kg de peso del animal.

ST = Contenido promedio de sólidos totales en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal.

SV = Contenido promedio de sólidos volátiles en Kg. por cada 1000Kg de peso del animal.

N_p = Contenido promedio de nitrógeno en gramos por Kg de sustancia.

P_p = Contenido promedio de fósforo en gramos por Kg de sustancia.

K_p = Contenido promedio de potasio en gramos por Kg de sustancia.

ST/T = Porcentaje de ST sobre el total de estiércol.

SV/ST = Porcentaje de sólidos volátiles sobre sólidos totales.

Tabla 74. Potencial de producción de gas metano (pCH_4) de algunos residuos

Residuo orgánico	$P CH_4 [m^3 CH_4/kg sv]$
Vaca	0.2
Cuy	0.3

Recuperado de: López Álvaro Fabricio, "Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para la generación de biogás en la finca Tanguarin de la parroquia de san Antonio de Ibarra ,2012.

a). Cálculo de la producción de metano (CH₄) que obtendría para un tiempo de retención de 30 días y temperatura de 15°C.

Para calcular el porcentaje de CH₄ y CO₂ producido es necesario partir desde la cantidad de materia prima a procesar. La cantidad de materia prima disponible en la granja, corresponde a un valor de 1000 Kg estiércol. Basándose en los datos establecidos en la tabla N° 73, se determina lo siguiente:

1. PESO TOTAL DE LOS ANIMALES (W_A)

$$T = W_A * \frac{86 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Despejando W_A y reemplazando valores se tiene:

$$W_A = \frac{1000 \text{ Kg} * 1000 \text{ Kg de animal}}{86 \text{ kg}}$$

$$W_A = 11627 \text{ Kg}$$

2. SÓLIDOS TOTALES (TS)

$$ST = W_A * \frac{12 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$ST = 11627 * \frac{12 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

$$ST = 139.524 \text{ kg/día}$$

3. SÓLIDOS VOLÁTILES (SV)

$$SV = W_A * \frac{10 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$SV = 11627 * \frac{10 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

$$SV = 116.27 \text{ Kg/día}$$

4. VOLUMEN DE BIOGÁS

Según la Tabla N° 74, el potencial de producción de metano (P_{CH₄}), correspondiente a estiércol de vacuno es 0.2 [m³ CH₄/Kg VS], se procederá a calcular la producción de metano (CH₄).

Seleccionamos un valor de temperatura de 15 °C y un tiempo de retención de 30 días, reemplazando valores en las ecuaciones se tiene:

Volumen de Metano producido

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} * SV * \left(1 - \frac{K_o}{U_o * TR - 1 + K_o}\right) [m^3 CH_4/día]$$

Donde:

V_{CH_4} = Volumen de metano

P_{CH_4} = Potencial de producción de metano

SV = Sólidos Volátiles

K_o = Descomposición de sólidos volátiles en el tiempo

U_o = Crecimiento de la producción de metano con el cambio de temperatura

TR = Tiempo de retención

Descomposición de sólidos volátiles en el tiempo (K_o)

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{0.1185 * SV}$$

Donde:

SV = sólidos Volátiles

Crecimiento de la producción de metano (CH_4) con el cambio de temperatura (U_o)

$$U_o = 0.013 * TC - 0.129 [m^3 /día]$$

Donde:

TC = Temperatura

Hallando la producción de metano (CH_4) para $T=15^\circ C$ y $TR=30$ días

Valor de K_o

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{0.1185 * SV}$$

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{0.1185 * 116.27}$$

$$K_o = 578.508$$

Valor de U_o

$$U_o = 0.013 * TC - 0.129 [m^3 /día]$$

$$U_o = 0.013 * 15 - 0.129$$

$$U_o = 0.066 m^3 /día$$

Valor de V_{CH_4}

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} * SV * \left(1 - \frac{K_o}{U_o * TR - 1 + K_o}\right) [m^3 CH_4/día]$$

$$V_{CH_4} = 0.2 * 116.27 * \left(1 - \frac{578.508}{0.066 * 30 - 1 + 578.508}\right) = 0.23 [m^3 CH_4/día]$$

b) Si la composición del biogás es de un 60% CH_4 y un 40% CO_2 ¿cuáles son las cantidades de biogás, de CH_4 y de CO_2 ?

Basándose en la condición de que el biogás está formado por 60% de CH_4 y 40% CO_2 , se tiene:

1. Volumen de CO_2 en el sustrato

$$\text{Volumen de } CO_2 = \frac{0.23 \cdot 0.4}{0.6}$$

$$\text{Volumen de } CO_2 = 0.15 [m^3 CH_4 / \text{día}]$$

2. Volumen de CH_4

$$\text{Volumen de } CH_4 = 0.23 [m^3 CH_4 / \text{día}]$$

3. Volumen de biogás

$$\text{Volumen de biogás} = CH_4 + CO_2$$

$$CH_4 + CO_2 = 0.23 + 0.15$$

$$CH_4 + CO_2 = 0.38 [m^3 \text{Biogás/día}]$$

c) Si utiliza este metano (CH_4) para la producción de calor, ¿Cuántos kg de GLP (gas licuado de petróleo) podría reemplazar durante una semana si las pérdidas en el sistema son del 30%?

$$1 \text{ kg de } CH_4 \text{ equivale a } 55 \text{ MJ} = 38 \text{ MJ/m}^3$$

$$1 \text{ Kg de GLP equivale a } 50 \text{ MJ/Kg}$$

$$\text{Total MJ de } CH_4 = 0.23 \text{ m}^3/\text{día} * 38 \text{ MJ/m}^3 = 8.74 \text{ MJ/día}$$

$$\text{Menos las pérdidas} = 8.74 * (1 - 0.3) = 6.12 \text{ MJ/día}$$

$$\text{Total de Kg de GLP/día} = 6.12 \text{ MJ/día} / 50 \text{ MJ/kg} = 0.122 \text{ kg /día}$$

$$\text{En una semana} = 0.122 \text{ kg /día} * 7 = 0.85 \text{ Kg}$$

d) Calcular el volumen del digestor para una mezcla de estiércol y agua de 1 a 3,

$$\text{Sólidos Totales / día} = 138.524 \text{ kg/día}$$

Factor de dilución = 1:3 es decir, uno de sustrato por 3 de agua

Entonces: Total de sustrato: $4 * 138.524 \text{ kg/día} = 554 \text{ Kg/día}$, como 1 kg de sustrato = 1 litro y

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}, \text{ entonces el total del sustrato en } m^3 = 0.554 \text{ m}^3/\text{día}$$

Tiempo de Retención = 30 días

Volumen del digestor = total del sustrato * tiempo de retención

$$0.554 * 30 = 16.62 \text{ m}^3$$

e) ¿Cuál es el volumen del tanque gasificador requerido si la relación de VD/VG =5?

La relación VD/VG =5, entonces el volumen del VG=VD/5 =16.62/5 =3.32 m³

5.5. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS - ESTIÉRCOL DE CUY

En una granja se recolecta 1000 kg de estiércol de cuy por día.

Debemos encontrar:

- La producción de metano (CH₄) que obtendría para un tiempo de retención de 30 días y temperatura de 15°C.
- Si la composición del biogás es de un 60% CH₄ y un 30% CO₂ ¿cuáles son las cantidades de biogás, de CH₄ y de CO₂?
- Si utiliza este metano (CH₄) para la producción de calor, ¿Cuántos kg de LPG (gas licuado de petróleo) podría reemplazar durante una semana si las pérdidas en el sistema son del 30%?
- Calcular el volumen del digestor para una mezcla de estiércol y agua de 1 a 3,
- ¿Cuál es el volumen del tanque gasificador requerido si la relación de VD/VG =5?

Solución:

a) Cálculo de la producción de metano (CH₄) que obtendría para un tiempo de retención de 30 días y temperatura de 15°C.

Para calcular el porcentaje de CH₄ y CO₂ producido es necesario partir desde la cantidad de materia prima a procesar. La cantidad de materia prima disponible en la granja, corresponde a un valor de 1000 Kg. estiércol. Basándose en los datos establecidos en la tabla N° 73, se determina lo siguiente:

5.5.1.1. PESO TOTAL DE LOS ANIMALES (W_A)

$$T = W_A * \frac{64 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Despejando W_A y reemplazando valores se tiene:

$$W_A = \frac{1000 \text{ Kg} * 1000 \text{ Kg de animal}}{64 \text{ kg}}$$

$$W_A = 15625 \text{ Kg}$$

5.5.1.2. SÓLIDOS TOTALES (TS)

$$ST = W_A * \frac{16 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$ST = 15625 * \frac{16 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

$$ST = 250 \text{ kg/día}$$

5.5.1.3. SÓLIDOS VOLÁTILES (SV)

$$SV = W_A * \frac{12 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$SV = 15625 * \frac{12 \text{ KG}}{1000 \text{ Kg de animal}}$$

$$SV = 187.5 \text{ Kg/día}$$

5.5.1.4. VOLUMEN DE BIOGÁS

Según la Tabla N° 74, el potencial de producción de metano (P_{CH_4}), correspondiente a estiércol de cuy es 0.3 [$m^3 CH_4/Kg VS$], se procederá a calcular la producción de metano (CH_4).

Seleccionamos un valor de temperatura de 15 °C y un tiempo de retención de 30 días, reemplazando valores en las ecuaciones se tiene:

Volumen de Metano producido

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} * sv * \left(1 - \frac{K_o}{U_o * TR - 1 + K_o}\right) [m^3 CH_4/día]$$

Donde:

V_{CH_4} = Volumen de metano

P_{CH_4} = Potencial de producción de metano

SV = Sólidos Volátiles

K_o = Descomposición de sólidos volátiles en el tiempo

U_o = Crecimiento de la producción de metano con el cambio de temperatura

TR = Tiempo de retención

Descomposición de sólidos volátiles en el tiempo (K_0)

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{0.1185 * sv}$$

Donde:

SV = sólidos Volátiles

Crecimiento de la producción de metano (CH₄) con el cambio de temperatura (U₀)

$$U_0 = 0.013 \cdot TC - 0.129 \text{ [m}^3/\text{día]}$$

Donde:

TC=Temperatura

Hallando la producción de metano (CH₄) para T=15°C y TR=30 días

Valor de K₀

$$K_0 = 0.6 + 0.0006 \cdot e^{0.1185 \cdot sv}$$

$$K_0 = 0.6 + 0.0006 \cdot e^{0.1185 \cdot 187.5}$$

$$K_0 = 2676898.273$$

Valor de U₀

$$U_0 = 0.013 \cdot TC - 0.129 \text{ [m}^3/\text{día]}$$

$$U_0 = 0.013 \cdot 15 - 0.129$$

$$U_0 = 0.066 \text{ m}^3/\text{día}$$

Valor de V_{CH₄}

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} \cdot SV \cdot \left(1 - \frac{K_0}{U_0 \cdot TR - 1 + K_0}\right) \text{ [m}^3 \text{ CH}_4/\text{día]}$$

$$V_{CH_4} = 0.3 \cdot 187.5 \cdot \left(1 - \frac{2676898.273}{0.066 \cdot 30 - 1 + 2676898.273}\right) = 5.625 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4/\text{día]}$$

b) Si la composición del biogás es de un 60% CH₄ y un 40% CO₂ ¿Cuáles son las cantidades de biogás, de CH₄ y de CO₂ ?

Basándose en la condición de que el biogás está formado por 60% de CH₄ y 40% CO₂, se tiene:

4. Volumen de CO₂ en el sustrato

$$\text{Volumen de CO}_2 = \frac{5.625 \cdot 0.4}{0.6}$$

$$\text{Volumen de CO}_2 = 3.75 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4/\text{día]}$$

5. Volumen de CH₄

$$\text{Volumen de CH}_4 = 5.625 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4/\text{día]}$$

6. Volumen de biogás

$$\text{Volumen de biogás} = CH_4 + CO_2$$

$$CH_4 + CO_2 = 5.625 + 3.75$$

$$CH_4 + CO_2 = 9.375 \text{ [m}^3 \text{ Biogás/día]}$$

c) Si utiliza este metano (CH₄) para la producción de calor, ¿Cuántos kg de LPG (gas licuado de petróleo) podría reemplazar durante una semana si las pérdidas en el sistema son del 30%?

1 kg de CH₄ equivale a 55 MJ = 38 MJ/m³

1 Kg de GLP equivale a 50 MJ/Kg

Total MJ de CH₄ = 5.625 m³/día * 38 MJ/m³ = 213.75 MJ/día

Menos las pérdidas = 213.75*(1-0.3)=149.625 MJ/día

Total de Kg de GLP/día = 149.625 MJ/día / 50 MJ/kg = 2.99 kg / día

En una semana = 2.99 kg / día * 7 = 20.93 Kg

d) Calcular el volumen del digestor para una mezcla de estiércol y agua de 1 a 3.

Sólidos Totales / día = 250 kg/día

Factor de dilución = 1:3 es decir: 1 de sustrato por 3 de agua

Entonces: Total de sustrato: 4 * 250 kg/día = 1000 Kg/día, como 1 kg de sustrato = 1 litro y 1 m³ = 1000 L, entonces el total del sustrato en m³ = 1 m³/día

Tiempo de Retención = 30 días

Volumen del digestor = total del sustrato * tiempo de retención

$$1 * 30 = 30 \text{ m}^3$$

e) ¿Cuál es el volumen del tanque gasificador requerido si la relación de VD/VG = 5?

La relación VD/VG = 5, entonces el volumen del VG = VD/5 = 30/5 = 6 m³

²Referencia: Fuentes López Álvaro Fabricio, "Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para la generación de biogás en la finca Tanguarin de la parroquia de san Antonio de Ibarra ,2012.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que la mayor producción de biogás fue de 10.93 L con el tratamiento 3 (estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) (500 g), desechos de leguminosas : arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) (250 g) y la relación mezcla: agua (1:3))
- La mayor producción de biogás basada en estiércol de vacuno (*Bos taurus*) fue con la mezcla: estiércol (500 g), desechos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) (250 g) y la relación mezcla: agua (1:3) fue de 4.45 L de biogás.
- La mayor producción de biogás basada en estiércol de cuy (*Cavia porcellus*), fue con la mezcla: estiércol (500 g), desechos de leguminosas: arveja (*Pisum sativum*) y haba (*Vicia faba*) (250 g) y la relación mezcla: agua (1:3) fue de 10.93 L de biogás.
- Se obtuvo mayor producción de biogás tanto en la mezcla de estiércol de vacuno (*Bos taurus*) y de cuy (*Cavia porcellus*) con la relación de mezcla: agua (1:3).

6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar la producción de biogás a gran escala utilizando estiércol de cuy y desechos orgánicos como: residuos de: cosechas, centros de abastos, consumo y preparación de alimentos con una proporción de agua y sustrato de (1:3).
- Utilizar los subproductos obtenidos como biol y biosol en la agricultura.
- Al establecer un sistema de biodigestión colocar un filtro de agua para evitar que el agua condensada obstruya las tuberías y el paso del gas sea más rápido.
- Colocar un filtro de virutas de hierro (Fe) para remover el ácido sulfhídrico (H₂S) para evitar que al mezclarse con el agua condensada forme ácidos corrosivos que dañe las conexiones del biodigestor.
- Construir un tanque de almacenamiento del biogás que debe estar colocado en un almacén protegido del sol, de los vientos, para guardar el biogás que no se utilice.
- Dar un tratamiento previo a los residuos orgánicos como: corte, chancado, compostaje para uniformizar la mezcla y la degradación sea más efectiva.
- Iniciar y mantener el proceso de fermentación a una temperatura entre los 37 y 42 °C para que el tiempo de producción sea menor.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Andaluza de Energía. (2011). *Estudio básico del biogás*. Andalucía.
- Álvarez, J. M., Caneta, L., & Moyano, C. (s.f.). *Biomasa y Biogás*. Corrientes, Argentina.
- Arana, S. (2011). *Manual de elaboración de biol*. Cusco : Soluciones Prácticas.
- Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás". Lima, Perú.
- BESEL, S.A. (Departamento de Energía). (2007). *"Biomasa: Digestores anaerobios"*. Madrid: IDAE.
- Canales, M., Sorto, R., & Rivas Oliva, L. (Agosto de 2010). ESTUDIO DEL PROCESO BIOQUIMICO DE FERMENTACION EN DIGESTORES PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS Y BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS PROVENIENTES DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR. San Salvador, El Salvador : Universidad San Salvador .
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de residuos*. Barcelona : Diaz de Santos.
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y valoración energética de residuos*. Madrid .
- CIEMAT. (1990). *La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria*. España: Ciemat .
- Díaz Báez, M. C., Espitia Vargas, S. E., & Molina Pérez, F. (2002). *Digestion anaerobia una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Fuentes, Á. (2012). Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para la generación de biogás en la finca Tangurín. Ibarra, Ecuador .
- Gon, L. (Diciembre de 2008). *Guía para proyectos de biodigestión en establecimientos agropecuarios*. Santa Fe, Argentina : Universidad Católica de Santa Fe.

- Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.
- Iglesias, L. (1994). *El estiércol y las practicas agrarias respetuosas con el medioambiente*. España .
- Instituto de Ingeniería Rural. (2009). *Manual de Produccion de Biogás*. Argentina .
- Instituto Nacional de Estadística e Informatica. (Junio de 2015). *Compendio Estadístico Perú 2015*. Lima. Obtenido de <http://www.inei.gob.pe>
- Méndez, C. L., Carballo, L., Arteaga , Y., & Marquez , F. (08 de Agosto de 2007). *Monografías.com*. Obtenido de Monografias.com: www.monografias.com
- Ministerio de Agricultura . (2003). *Informe situacional de la crianza de cuy* . Lima .
- Ministerio de Agricultura (DGSA). (2010). *Biodigestores en el Perú*. Lima.
- Ministerio de desarrollo e inclusión social. (Diciembre de 2014). *Producción y uso de abonos orgánicos:biol,compost y humus . . Lima, Perú:* Asociación Gráfica Educativa.
- Ministerio del Ambiente . (2014). *Informe Nacional de Residuos Sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal* . Lima .
- OSINERGMIN. (s.f.). *Osinerming*. Obtenido de Osinerming Web site : www.osinerg.gob.pe
- Pablo, S. V. (2010). *Tecnología del biogás. Compilación referente a los aspectos básicosdel biogás*. Bogotá , Colombia : Universidad del Valle.
- PNUD. (2011). *Biogas su potencial de produccion en Honduras* . Honduras : Comunica.
- Red Española de Compostaje. (2016). *De residuo a recurso, el camino a la sostenibilidad*. España: Ediciones Paraninfo.
- Rohstoffe, F. N. (2010). *Guía sobre el Biogás desde la produccion hasta el uso*. Alemania: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.

- Suquilanda, M. (1996). *Agricultura Órganica Fase II Fundagro*. Ecuador .
- Tapia, M. E., & Fries, A. M. (2007). *Guía de cultivos andinos* FAO y ANPE.
Lima.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Guía de Implementación de Sistemas de Biogás* . Bogotá: Incotec .
- Urdiales, A. (2006). Biogás. *Colección Permacultura*. Argentina. Obtenido de www.permacultura.com.ar
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.
- Zinder, S. H. (1984). *Microbiología de la conversión anaeróbica de desechos orgánicos en metano: desarrollos recientes*. ASM News.

ANEXOS

ANEXO Nº 1: HOJA DE SEGURIDAD (HDS) METANO

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA			
Nombre del producto : Metano Familia química : Hidrocarburos alifáticos Nombre químico : Metano Fórmula : CH_4 Sinónimos: Hidruro de metilo, gas de los pantanos. Usos: El metano es usado principalmente como iniciador para síntesis de gran variedad de sustancias orgánicas. Algunas de las más importantes son cloroformo, tetracloruro de carbono, acetileno, alcoholes, aldehídos y ácidos orgánicos. También es usado para la producción de amoniaco y como gas combustible. Presentación: Como gas comprimido en cilindros.			
2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES			
COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Metano	93.0-99.995%	74-82-8	TLV : Asfixiante simple
3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS			
Resumen de emergencia Gas comprimido extremadamente inflamable. El metano no es tóxico, es incoloro, inoloro y es más ligero que el aire por lo que puede alcanzar fuentes de ignición lejanas. El peligro primordial relacionado con escapes de este gas es combustión o explosión por formación de mezclas con el aire.			
Efectos potenciales para la salud Inhalación: La exposición a elevadas concentraciones puede causar asfixia por desplazamiento de oxígeno; se manifiestan síntomas como pérdida del conocimiento y de la movilidad; a bajas concentraciones puede causar narcosis, vértigos, dolor de la cabeza, náuseas y pérdida de coordinación.			
4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS			
Inhalación: Suministrar atención médica de forma inmediata. Trasladar la víctima a un área no contaminada para que inhale aire fresco; mantenerla caliente y en reposo. Si la víctima no respira, administrar oxígeno suplementario o respiración artificial.			
5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO			
Punto de inflamación :	-187.8° C (-306° F)		
Temperatura de autoignición :	537° C (999° F)		
Límites de Inflamabilidad	Inferior (LEL): 5%		
(en aire por volumen, %):	Superior (UEL): 15%		
Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.			
Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: Una descarga estática puede causar que este producto se encienda explosivamente, en caso de escape.			
Riesgo general Gas altamente inflamable que puede formar una gran variedad de mezclas explosivas fácilmente con el aire. En caso de incendio, puede producir gases tóxicos incluyendo monóxido de carbono y dióxido de carbono.			

Medios de extinción

Rocío de agua, polvo químico seco y dióxido de carbono.

Instrucciones para combatir incendios

Si no hay riesgo, se debe detener la fuga cerrando la válvula. Los cilindros cercanos al fuego deben ser retirados y los que se encuentren expuestos al fuego deben ser enfriados rociándolos con agua desde un lugar seguro. Si el incendio se extingue antes de que la fuga sea sellada, el gas puede encenderse explosivamente sin aviso y causar daño extensivo, heridas o muerte. En este caso, aumentar la ventilación (en áreas cerradas) para prevenir la formación de mezclas inflamables o explosivas. Se deben eliminar todas las posibles fuentes de ignición.

Si un camión que transporta cilindros se ve involucrado en un incendio, aislar un área de 1600 metros (1 milla) a la redonda. Combatir el incendio desde una distancia segura utilizando soportes fijos para las mangueras.

El equipo requerido para la atención de la emergencia se encuentra reseñado en la sección 8.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de un escape despejar el área afectada, evacuando hacia un lugar contrario a la dirección del viento que cubra por lo menos 800 metros (1/2 milla) a la redonda. Proteger a la gente y responder con personal entrenado. Si es posible, cerrar la válvula del cilindro para detener el escape. Si no se logra detener (o si no es posible llegar a la válvula), permitir que el gas se escape en su lugar o mover el cilindro a un sitio seguro, alejado de fuentes de ignición.

Se debe tener mucha precaución cuando se mueva un cilindro de metano con escape. Monitorear el nivel de oxígeno presente en el área con el fin de detectar posibles mezclas explosivas, teniendo en cuenta que el contenido de oxígeno debe estar por encima de 19.5%.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO**Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros**

Antes del uso: Mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como por ejemplo, el baúl de un automóvil, camioneta o van. Para descargarlos, usar un rodillo de caucho.

Durante su uso: No calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (<200 bar–3.000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

Después del uso: Cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos, notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de cilindros

Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto, usar el sistema de inventario "primero en llegar, primero en salir" con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser

almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia. El área debe ser protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54° C (130° F) ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen “PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO”, “NO FUMAR” y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un sistema extintor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Ventilación: Para la manipulación de este gas se debe proveer ventilación mecánica a prueba de explosión.

Equipos de detección: Utilizar sistemas de detección de gases diseñados de acuerdo con las necesidades. Rango recomendado del instrumento 0 – 100% LEL.

Protección respiratoria

Usar protección respiratoria como equipo de respiración auto-contenido (SCBA) o máscaras con mangueras de aire o de presión directa, si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5% o durante emergencias de un escape del gas. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que éstos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad, botas con puntera de acero y ropa de algodón para prevenir la acumulación de cargas electrostáticas.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar, como mínimo, con un aparato de respiración auto-contenido y protección personal completa a prueba de fuego (equipo para línea de fuego).

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad relativa del gas a 15° C (59° F), 1 atm:	0.5549
Punto de ebullición a 1 atm:	-161.49° C (-258.64° F)
Punto de fusión a 1 atm:	-182.48° C (-296.42° F)
Peso molecular:	16.043
Densidad a 15°C y 1 atm:	0,671 kg/m ³
Volumen específico del gas 15.6° C (60° F) 1 atm:	1.474 m ³ /kg (23.6113 ft ³ /lb)
Temperatura de combustión (en aire)	1957° C (3554.6° F)
Temperatura de combustión (en oxígeno)	2810° C (5090° F)
Presión de vapor:	No aplica
Apariencia y color:	Gas incoloro e inoloro.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El metano es un gas estable.

Incompatibilidad

El metano puede reaccionar explosivamente en presencia de halógenos, óxidos de nitrógeno y acetileno.

Condiciones a evitar

Mantener los cilindros lejos de fuentes de ignición y de las descargas electrostáticas. Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden romperse o estallar violentamente.

Reactividad

- a) Productos de descomposición : Ninguno
- b) Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

El metano es un asfixiante simple. Los efectos en humanos son los siguientes :

Concentración**Síntomas de exposición**

12-16% Oxígeno:	Aumenta el ritmo de la respiración y el pulso. Disturbios leves en la coordinación muscular
10-14% Oxígeno:	Trastorno emocional, fatiga, respiración interrumpida.
6-10% Oxígeno:	Nausea y vómito, colapso y pérdida de la conciencia.
Por debajo del 6%:	Movimientos convulsivos, posible colapso respiratorio y muerte

Capacidad irritante del material: Producto no irritante

Sensibilidad a materiales: El producto no causa sensibilidad en humanos.

Efectos al sistema reproductivo

Habilidad mutable: No Aplicable

Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para metano.

Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para el metano.

Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para el metano.

Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para el metano.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

El metano no contiene ningún químico Clase I o Clase II que reduzca el ozono. No se anticipa ningún efecto en la vida de las plantas. El metano es un combustible muy limpio comparado con los combustibles tradicionales, lo que facilita el cumplimiento de las exigentes normas ambientales. El metano en la atmósfera es una de las causas del efecto invernadero.

El metano no es considerado un contaminante marino por el D.O.T.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Regresar los cilindros vacíos al fabricante para que éste se encargue de su disposición final, de acuerdo con lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Número de Naciones Unidas : UN 1971
Clase de peligro D.O.T : 2.1
Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS INFLAMABLE



El metano se transporta en cilindros color ocre (Pintulux 61 Ref: CO-176), según lineamientos establecidos al interior de la compañía.

Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y debe ser descartado.

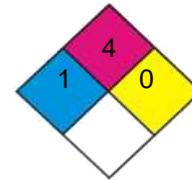
15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

El transporte y manejo de este producto está sujeto a las disposiciones y requerimientos establecidos en el NTE INEN 2266 2.010 Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :

Código NFPA	
Salud :	1 "Ligeramente riesgoso"
Inflamabilidad :	4 "Extremadamente inflamable"
Reactividad :	0 "Estable"
Tipo de Conexión:	CGA 350.



Recomendaciones de material

El metano no es corrosivo y se pueden usar todos los metales comúnmente usados para gases.

ANEXO Nº 2: PANEL FOTOGRÁFICO



Pesado del recipiente vacío en el que se colocó la materia prima para el proceso de biodigestión.



Vaciado del estiercol en el recipiente para el pesado correspondiente.



Instrumentos utilizados para preparar la mezcla para el proceso de biodigestión.



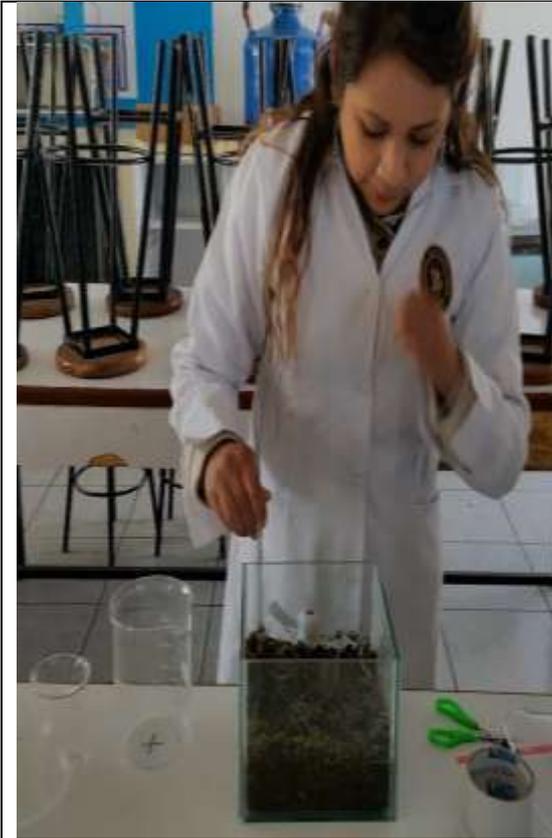
Echado de Estiercol previamente pesado



Pesando la materia prima para la producción de Biogas.



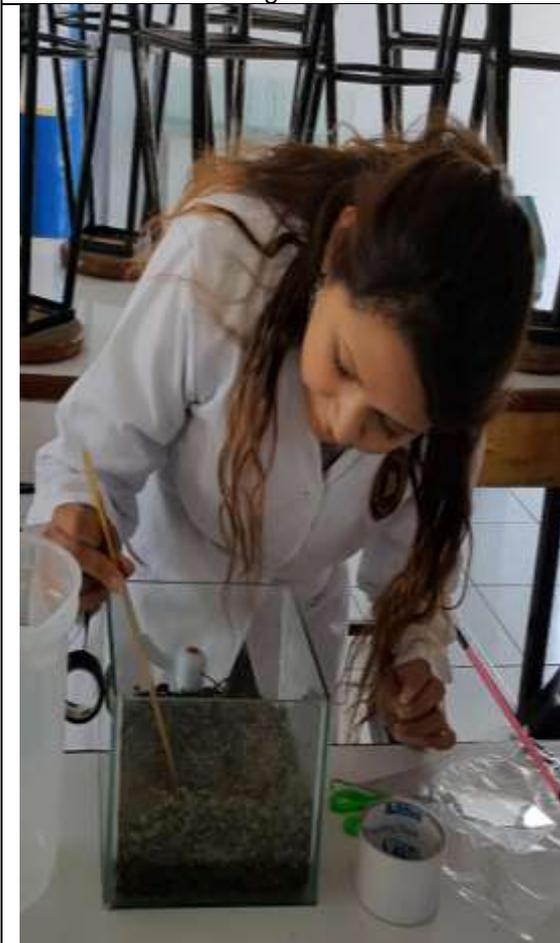
Vaciado de agua para la preparación de la mezcla.



Homogenización de la mezcla con una
bagueta.



Medición de pH de la muestra con el papel de
pH.



Toma de la temperatura



Mezcla para el proceso de biodigestión



TOMA DE DATOS EN LA MEDICION DE PRODUCCION DE BIOGÁS

MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 1

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº1



COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº1



MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 2

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº2



COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº2



MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 3

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº3



COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº3



MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 4

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº4

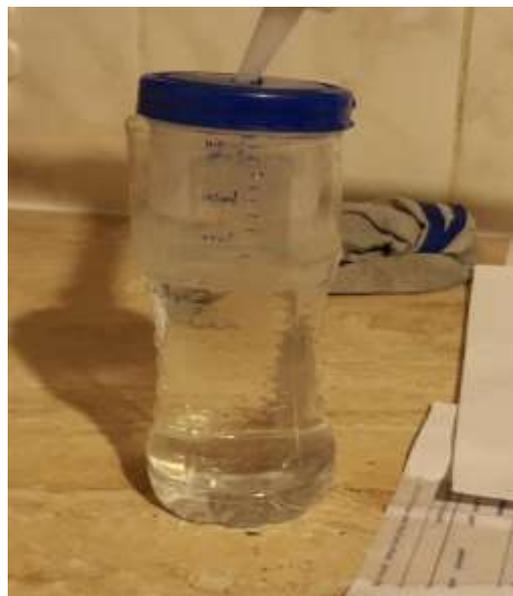


COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº4



MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 5

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº5



COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº5



MEDICIÓN Y COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN EL BIODIGESTOR Nº 6

MEDICIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO BIODIGESTOR Nº6



COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DE BIODIGESTOR Nº6



Tabla 1. *Generación de residuos orgánicos per cápita*

Región	Población urbana (hab.)	Generación residuos (kg/día)	GPC residuos (kg/hab./día)
Amazonas	203 597	106 286	0,522
Áncash	727 57	397 345	0,546
Apurímac	223 269	129 033	0,578
Arequipa	1 192 139	581 062	0,487
Ayacucho	444 737	230 68	0,519
Cajamarca	542 885	291 413	0,537
Callao	1 065 838	698 717	0,656
Cusco	755 563	451 474	0,598
Huancavelica	176 268	86 69	0,492
Huánuco	397 173	196 999	0,496
Ica	741 45	388 763	0,524
Junín	939 876	478 785	0,509
La Libertad	1 444 172	780 558	0,540
Lambayeque	959 775	490 205	0,511
Lima	9 614 115	5 684 258	0,591
Loreto	624 214	345 127	0,553
Madre de Dios	108 112	48 176	0,446
Moquegua	155 426	60 741	0,391
Pasco	206 618	88 573	0,429
Piura	1 385 306	811 543	0,586
Puno	797 231	374 372	0,470
San Martín	569 624	312 272	0,548
Tacna	284 697	140 065	0,492
Tumbes	206 177	94 306	0,457
Ucayali	396 209	261 571	0,660
Total	24 162 040	13 529 015	0,56

Nota: Se registra la generación de residuos domiciliarios en las regiones del Perú, la ciudad que genera mayor cantidad de residuos es la ciudad de Lima. Recuperado de: Ministerio del Ambiente . (2014). Informe Nacional de Residuos Sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal . Lima .GPC (generación per cápita).

Tabla 2. *Composición física de los residuos*

Región	Residuos domiciliarios peligrosos no reaprovechables (%)	Restos orgánicos de cocina y preparación de alimentos (%)	Residuos no peligrosos reaprovechables (%)	Residuos no peligrosos no reaprovechables (%)
Amazonas	5,7	60,23	27,64	6,12
Áncash	6,82	52,99	27,94	10,6
Apurímac	10,53	45,19	32,49	12,58
Arequipa	11,67	45,48	30,05	10,69
Ayacucho	6,07	47,3	28,09	16,73
Cajamarca	6,01	56,61	25,74	9,46
Callao	10,29	51,58	29,59	6,69
Cusco	6,15	44,84	33,49	13,07
Huancavelica	6,92	42,58	26,77	23,06
Huánuco	5,35	49,75	29,53	14,71
Ica	10,05	48,42	25,03	22,05
Junín	9,68	49,82	25,52	15,65
La Libertad	7,05	52,18	22,59	16,23
Lambayeque	8,81	51,64	24,8	15,85
Lima	9,7	48,88	30,0	12,19
Loreto	2,56	70,19	20,24	5,28
Madre de Dios	5,58	48,14	36,93	6,94
Moquegua	10,87	51,64	27,75	9,74
Pasco	10,54	48,68	23,22	16,93
Piura	5,9	39,92	34,59	18,01

Nota: La mayor cantidad de residuos generados en cada región son los restos orgánicos y residuos de cocina .En Arequipa se genera el 45.48 % del total de los desechos. Recuperado de: Ministerio del Ambiente . (2014). *Informe Nacional de Residuos Sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal* . Lima.

Tabla 3. *Población de ganado vacuno*

(Unidades)		Ganado vacuno						
Unidad Agraria								
Departamental		2008	2009	2010	2011	2012	2013 P/	2014 P/
Total		5 442 989	5459435	5 520 200	5 589 173	5 660 948	5 556 188	5 578 388
I	Tumbes	17 461	17 100	13 729	14 447	18 070	16 447	14 414
II	Piura	227 803	230 765	302 158	310 158	324 960	308 181	295 041
III	Lambayeque	113 725	114 210	110 583	109 540	89 795	89 530	85 995
IV	La Libertad	253 872	253 917	254 699	259 557	262 771	262 017	259 231
V	Áncash	302 411	305 711	307 624	304 367	300 992	294 294	304 432
VI	Lima	228 844	226 800	230 422	232 109	225 265	226 410	232 070
VII	Ica	37 296	38 100	37 063	38 362	43 823	45 315	46 448
VIII	Arequipa	248 526	215 164	204 164	201 854	201 589	234 323	230 560
IX	Moquegua	30 050	31 200	30 426	28 624	27 380	26 180	27 835
X	Tacna	28 788	26 821	26 781	27 859	26 370	26 780	28 450
XI	Cajamarca	663 444	668 400	661 442	664 574	645 466	652 413	661 156
XII	Amazonas	239 911	238 500	231 680	230 526	230 190	231 874	240 121
XIII	San Martín	155 033	158 060	155 352	162 423	180 040	181 450	185 986
XIV	Huánuco	323 160	324 200	319 829	305 300	246 716	273 992	295 422
XV	Pasco	127 193	127 367	121 506	123 433	139 412	104 710	105 754
XVI	Junín	234 727	230 300	225 423	226 527	308 233	312 227	288 385
XVII	Huancavelica	192 479	196 315	193 053	190 420	181 736	192 332	210 565
XVIII	Ayacucho	422 321	433 280	457 628	502 428	523 715	534 820	496 410
XIX	Apurímac	336 476	338 610	333 045	340 719	346 088	294 610	300 975
XX	Cusco	503 610	504 329	503 311	507 051	517 772	413 659	416 924
XXI	Puno	634 530	652 210	669 200	680 050	691 610	694 240	708 700
XXII	Loreto	30 598	30 790	35 486	36 670	35 080	42 824	43 860
XXIII	Ucayali	42 475	44 280	43 334	41 105	42 210	43 180	45 194
XXIV	Madre de Dios	48 256	53 006	52 261	51 070	51 665	54 380	54 60

Nota: Se muestra la cantidad estimada de ganado vacuno en el Perú, se puede determinar el potencial de generación de biogás a nivel nacional. Recuperado de: Instituto Nacional de Estadística e Informática. (Junio de 2015). *Compendio Estadístico Perú 2015*. Lima. Obtenido de <http://www.inei.gob.pe>.

Tabla 4. *Volumen de estiércol y metano producido por las distintas especies animales.*

Especie	Peso vivo	Kg estiércol /día	% CH ₄
Cerdos	50	4,5-6	65-70
Vacunos	400	25-40	65
Equinos	450	12-16	65
Ovinos	45	2,5	63
Aves	1.5	0.06	60
Caprinos	40	1.5	..

Nota: El estiércol que produce mayor cantidad de biogás, es el de cerdo es importante resaltar la disponibilidad del residuo al elaborar un proyecto de producción de biogás. Recuperado de: Instituto de Ingeniería Rural. (2009). *Manual de Producción de Biogás*. Argentina. (..) No precisa.

Tabla 5. Estiércol de cuy producido en 24 horas

Hembra gestante, no lactante y macho en actividad	Hembra lactante y su camada	Cría de engorde
70-75	180	40-50

Nota: Estos datos son de utilidad para estimar la disponibilidad diaria de materia prima por la cantidad de cuyes. Fuente: Elaboración propia basada en el pesado de estiércol de cuyes separados de su lugar de crianza diariamente.

Tabla 6. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero

Gas	Potencial de calentamiento
CO_2	1
CH_4	21
N_2O	310
SF4	23900
PFC	9200
HFC	11700

Nota: En esta tabla se observa que el metano tiene mayor potencial de calentamiento que el dióxido de carbono, el metano al ser combustionado ayuda a disminuir el efecto invernadero. Recuperado de: Moreno Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 7. Composición bioquímica del Biogás

Componente	Fórmula química	% Volumen
Metano	CH_4	60-70
Gas Carbónico	CO_2	30-40
Hidrógeno	H_2	1.0
Nitrógeno	N_2	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O_2	0.1
Ácido Sulhídrico	SH_2	0.1

Nota: El principal componente del biogás es el metano que le otorga la característica combustible. Recuperado de: Pablo, S. V. (2010). *Tecnología del biogás. Compilación referente a los aspectos básicos del biogás*. Bogotá, Colombia: Universidad del Valle.

Tabla 8. Características del biogás

Características	CH_4	CO_2	$H_2 - H_2S$	Otros	Biogás
Proporciones %	55-70	27-44	1	3	100
Volumen					
Valor Calórico					
(^a MJ/ m^3)	35,8	--	10,8	22	21,5
(^b kCal/ m^3)	8600	--	2581	5258	5140
Ignición % en aire	5-15	--	--	--	6-12
^c T. ignición en °C	650-750	--	--	--	650-750
Presión crítica en ^d Mpa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5-8,9
Densidad nominal en g/l	0,7	1,9	0,08	--	1,2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Vol. en % aire	5-15	--	--	--	6-12

Nota: Presenta las características químicas del biogás y de sus componentes.

(^a) Mega joules, (^b) kilocalorías, (^c) temperatura. (^d) mega pascales. Recuperado de: Instituto de Ingeniería Rural. (2009). *Manual de Producción de Biogás*. Argentina.

Tabla 9. *Producción teórica de biogás en compuestos orgánicos*

Compuesto orgánico	Fórmula química	Biogás	CH_4
		m^3/kg SV	m^3/kg ST
Carbohidratos	$C_6H_{10}O_5$	0,75	0,37
Lípidos	$C_{16}H_{32}O_2$	1,44	1,44
Proteínas	$c_{16}H_{24}O_5N_4$	0,98	0,49

Nota: Esta información es útil para determinar la cantidad de biogás se produce según la materia prima con la que se cuenta. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 10. *Producción de biogás por tipo de estiércol*

Estiércol	*Disponibilidad Kg/día	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m^3/kg húmedo	$m^3/día$
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Nota: *El dato se refiere a la cantidad estimada de estiércol que es posible recolectar de todo el producto. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 11. *Composición química del estiércol*

Especie animal	Materia seca %	N %	P_2O_5	K_2O	CaO %	MgO %	SO_4
Vacunos (f)	6	0,29	0,17	0,10	0,35	0,13	0,04
Vacunos (s)	16	0,58	0,01	0,49	0,01	0,04	0,13
Ovejas (f)	13	0,55	0,01	0,15	0,46	0,15	0,16
Ovejas (s)	35	1,95	0,31	1,26	1,16	0,34	0,34
Caballos (s)	24	1,55	0,35	1,50	0,45	0,24	0,06
Caballos (f)	10	0,55	0,01	0,35	0,15	0,12	0,02
Cerdos (s)	18	0,60	0,61	0,26	0,09	0,10	0,04
Camélidos (s)	37	3,6	1,12	1,20	s.i.	s.i.	s.i.
Cuyes (f)	14	0,60	0,03	0,18	0,55	0,18	0,10
Gallina (s)	47	6,11	5,21	3,20	s.i.	s.i.	s.i.

Nota: En la producción de biogás es necesario conocer la composición química del estiércol para determinar las condiciones adecuadas en la biodigestión.(f) Fresco,(s) seco, (s.i) sin información Recuperado de: Tapia, M. E., & Fries, A. M. (2007). *Guía de cultivos andinos FAO y ANPE*. Lima.

Tabla 12. *Producción de biogás a partir de residuos vegetales*

Residuos	Cantidad residuo Ton /ha	Relación C/N	Volumen de Biogás	
			m ³ /Ton	m ³ /ha
Cereales (paja)				
Trigo	3,3	123:1	367	1200
Maíz	6,4	45:1	514	3300
Cebada	3,6	95:1	388	1400
Arroz	4,0	58:1	352	1400
Tubérculo (hojas)				
Papas	10	20:1	606	6000
Betarraga	12	23:1	501	6000
Leguminosas (paja)				
Porotos	3,2	38:1	518	1650
Habas	4	29:1	608	1400
Hortalizas (hojas)				
Tomate	5,5	12:1	603	3300
Cebolla	7,0	15:1	514	3600

Nota: Es necesario conocer el potencial de producción de los residuos vegetales para que la codigestión sea efectiva. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 13. *Valores de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos*

Residuos	% C	% N	C/N
Animales			
Bovinos	30	1,30	25:1
Equinos	40	0,80	50:1
Ovinos	35	1	35:1
Porcinos	25	1,50	16:1
Caprinos	40	1	40:1
Conejos	35	1,50	23:1
Gallinas	35	1,50	23:1
Patos	38	0,80	47:1
Pavos	35	0,70	50:1
Excretas humanas	2,5	0,85	3:1
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0,53	87:1
Paja cebada	58	0,64	90:1
Paja arroz	42	0,63	67:1
Paja avena	29	0,53	55:1
Rastrojos de maíz	40	0,75	53:1
Leguminosas	38	1,50	28:1
Hortalizas	30	1,80	17:1
Tubérculos	30	1,50	20:1
Hojas secas	41	1	41:1
Aserrín	44	0,06	730:1

Nota: Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 14. *Contenido de sólidos totales de diversos residuos*

Residuos	% Sólidos totales
Bovinos	13,4-56,2
Porcinos	15-49
Aves	26-92
Caprinos	83-92
Ovejas	32-45
Conejos	34,7-90,8
Equinos	19-42,9
Excretas humanas	17
Hojas secas	50
Rastrojos de maíz	77
Paja de trigo	88-90
Paja arroz	88,8-92,6
Leguminosas (paja)	60-80
Tubérculos (hojas)	10-20
Hortalizas (hojas)	10-15
Aserrín	74-80

Nota: Para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje presente en cada materia prima fresca. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 15. *Resultados de análisis de materia prima*

Materiales	Renglones %	Sólidos totales (TS)	Sólidos volátiles (VS)	Grasas	lignina	Celulosa compleja	Proteína
Estiércol Porcino	Frescos %	27,4	20,97	3,15	5,8	8,88	3,0
	Totales %	100	76,54	11,5	21,49	32,39	10,95
	VS %	-----	100	15,03	28,08	42,32	14,31
Estiércol vacuno	Frescos %	20,0	15,8	0,65	7,11	6,56	1,81
	Totales %	100	76,89	3,23	35,57	32,49	9,05
	VS %	-----	100	4,20	46,2	42,26	11,77
Estiércol de aves	Frescos %	68,9	56,64	2,96	13,66	24,83	6,36
	Totales %	100	82,20	2,84	19,82	50,55	9,56
	VS %	-----	100	3,46	24,11	61,5	11,58
Paja de arroz	Frescos %	88,82	76,41	8,54	11,28	53,25	4,81
	Totales %	100	86,02	9,62	12,7	59,95	5,42
	VS %	-----	100	11,18	14,76	69,19	6,3
Pasto verde	Frescos %	15,9	12,93	1,56	1,56	9,1	0,79
	Totales %	100	81,32	9,8	9,8	57,22	4,94
	VS %	-----	100	17,05	17,05	70,36	6,07

Nota: Los análisis fueron realizados con diversos materiales por el Instituto Industrial de Microbiología de Shanghai. Recuperado de: Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.

Tabla 16. *Contenido de solidos totales en materiales de fermentación*

Materiales	Contenido seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0,4	99,6
Orina de vaca	0,6	99,4

Nota: Esta información nos sirve como guía para agregar el contenido de agua necesario en el acondicionamiento del sustrato. Recuperado de: Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima.

Tabla 17. *Rangos de temperatura y Tiempo de retención*

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención
Psychophilica	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

Nota: Esta tabla muestra el tiempo de retención en el biodigestor de acuerdo a la temperatura en la que se encuentre el proceso de producción y el tipo de fermentación. Recuperado de: Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.

Tabla 18. *Inhibidores de la descomposición anaerobia y concentraciones perjudiciales*

Inhibidor	Concentración inhibidora	Comentarios
Oxígeno	> 0,1 mg/l	Inhibición de arqueas metanogénicas anaeróbicas obligadas
Sulfuro de Hidrógeno	> 50 mg/l H ₂ S	El efecto inhibitorio se eleva a medida que cae el valor de pH.
Ácidos grasos Volátiles	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	El efecto inhibitorio se eleva a medida que cae el valor de pH. Gran adaptabilidad de las bacterias
Nitrógeno de amoníaco	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	El efecto inhibitorio se eleva a medida de que se eleva el valor de pH y la temperatura. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Metales Pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Sólo los metales disueltos tienen un efecto inhibitorio. La desintoxicación se hace por medio de la precipitación de sulfuros
Desinfectantes, Antibióticos	No especificado	Efecto inhibitorio específico para el producto

Nota: Se muestra los principales Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y concentraciones perjudiciales. Recuperado de:(FNR), F. N. (2010). *Guía sobre el Biogás desde la producción hasta el uso*. Alemania : FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.

Tabla 19. *Tratamiento según el uso final del biogás*

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Producción térmica en caldera	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 ó 2	0-1-2	1 ó 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción.	2	2	2
Pilas de combustible	2	2	2

Nota: Refiere al acondicionamiento del biogás para tipo de uso. (0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial, 2= tratamiento elevado). Recuperado de: BESEL, S.A. (Departamento de Energía). (2007). "Biomasa: Digestores anaerobios". Madrid: IDAE.

Tabla 20 *Consumo de biogás para la alimentación de artefactos*

Alimentación a	Consumo Kcal/h	Rendimiento de 1m ³ de biogás
Cocina de 1 hornilla	660 a 742,5	7,4 h
Heladera de 13 pies	550 a 600	8,3 h
Lámpara a mantilla	478 a 528	10,4 h
Termotanque de 110 L	1.375 a 1.650	3,3 h
Estufa infraroja de 600 cal	3.355 a 3.487	1,57 h
Motor (por hp/hora)	2.750 a 4.400	1,25 h
Grneración de electricidad 6,4 Kw/h	5.500	1 h

Nota: Esta información es útil para saber cuál es la cantidad necesaria de biogás para abastecer diversos artefactos. Recuperado de: Álvarez, J. M., Caneta , L., & Moyano , C. (s.f.). Biomasa y Biogás. . Corrientes, Argentina.

Tabla 21. *Propiedades comparadas*

	Unidad	Biogás	Gas Natural	Hidrógeno
Calorías por volumen	KWh/m ³	7,0	10	3
Calorías por peso	KWh/Kg	6,4	14,3	33
Mezcla Explosiva	%	6-12	6-15	4-80
Temp. Encendido	C	687	650	585
Velocidad de Llama	m/s	0,32	0,39	0,43

Nota: Se muestra las propiedades calóricas y otras en comparación con otros gases. Recuperado de: Urdiales, A. (2006). Biogás. Colección Permacultura. Argentina. Obtenido de www.permacultura.com.ar

Tabla 22. *Diferencias físico - químicas entre el gas natural y el GLP*

PROPIEDAD	GAS NATURAL	GLP
Composición	90% Metano	60% Propano 40% Butano
Formula química	CH ₄	C ₄ H ₁₀ C ₃ H ₈
Gravedad específica	0,60	2,05 1,56
Poder calorífico	9 200 kcal / m ³ (**)	22 244 Kcal/m ³ 6 595 Kcal/lit 11 739 Kcal/Kilo
Presión de suministro	21 mbar (***)	50 mbar
Estado físico	Gaseoso sin límite de compresión Líquido a -160°C y a presión atmosférica	Líquido a 20°C con presión manométrica de 2,5bar
Color/olor	Incoloro/Inodoro	Incoloro/Inodoro

Nota: Se puede observar las características fisicoquímicas de ambos productos y como estos varían entre sí. (*) Corresponde a características predominantes de ambos combustibles. (**)Kcal/m³: Kilocalorías por m³ = 4,18684 x 10³ J/m³, (***) mbar (milibar): milésima parte del bar. Recuperado de: OSINERGMIN. (s.f.). *Osinerming*. Obtenido de Osinerming Web site : www.osinerg.gob.pe

Tabla 23. *Composición química del biol*

Componente	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4
pH	7,96	8,1	No menciona	6,7 – 7,9
Materia seca	4,18 %	4.2	No menciona	1.4 %
Nitrógeno total	2,63 g/kg	2,4 g/kg	0,2 g/kg	0,9 g/kg
NH ₄	1,27 g/kg	1.08 g/kg	No menciona	No menciona
Fósforo	0.43 g/kg	1,01 g/kg	0,076 g/kg	0,048 mg/kg
Potasio	2,66g/kg	2,94 g/kg	4,2 g/kg	0,29 mg /kg
Calcio	1,05 g/kg	0,50 g/kg	0,056 g/kg	2,1 g/kg
Magnesio	0,38 g/kg	No menciona	0,131 g/kg	0,135%
Sodio	0,404 g/kg	No menciona	2,1 g/kg	No menciona
Azufre	No menciona	No menciona	6,4 mg/kg	0.33 mg/l

Nota: Fuente 1: Biol de estiércol de vacuno (Pötsch, 2004), Fuente 2: Biol de mezcla de sustratos: estiércol de vacunos y restos de comida casera (Zethner, G.2002), Fuente 3: Biol de banano promedio hojas, tallos y frutos Clark et. Al (2007) Fuente 4: Biol de Estiércol de vacuno. Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

Tabla 24. *Composición bioquímica del biol*

Componentes	Cantidad
Ácido indol acético (ng/g)	9
Giberelina (ng/g)	8,4
Purinas (ng/g)	9,3
Citoquininas	No detectado
Tiamina (vit B1) (ng/g)	259
Riboflavina (vit B2)(ng/g)	56,4
Adenina	No detectado
Ácido fólico (ng/g)	6,7
Ácido pantotéico (ng/g)	142
Triptofano (ng/g)	26
Inositol	No detectado
Biotina	No detectado
Niacin	No detectado
Cianocobalamina (vit B 12) (ng/g)	4,4
Piridoxina (vit B6) (ng/g)	8,6

Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

Tabla 25. *Dosis de biol recomendadas para su aplicación.*

Cultivo	Dosis para mochila de 15 litros (litros)	Agua (litros)	Intervalo de aplicación (días)
Frutales	2 a 3	13 a 12	10 a 15
Durazno, ciruelos,			
Leguminosas	1.5 a 2	13.5 a 13	15
Haba, arveja, alfalfa,			
Tubérculos	2 a 3	13 a 12	10 a 15
Papa, olluco, oca			
Hortalizas: Zanahoria, cebolla, rábano,	1.5	13.5	10
Cereales	3	12	15
Trigo, cebada avena,			
Maíz	2	13	10

Nota: Se muestra la dosis recomendable de aplicación de biol en diferentes cultivos.

Recuperado de: Ministerio de desarrollo e inclusión social. (Diciembre de 2014). Producción y uso de abonos orgánicos:biol,compost y humus . Lima, Perú: Asociación Gráfica Educativa.

Tabla 26. *Características del biosol de estiércol de vacuno*

Componentes	[%]
Agua	15,7
Sustancia orgánica seca	60,3
pH	7,6
Nitrógeno total	2,7
Fósforo ($P_2 O_5$)	1,6
Potasio ($K_2 O$)	2,8
Calcio (CaO)	3,5
Componentes	[%]
Magnesio (MgO)	2,3
Sodio (Na)	0,3
Azufre (S)	0,3
Boro (B)(ppm)	64

Nota: Se muestra las características del estiércol vacuno con énfasis en la composición química Recuperado de: Arcapana, S. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "Fermentación anaeróbica para producción de biogás . Lima, Perú.

Tabla 27. *Dimensiones de los biodigestores.*

Parámetros	Tipo 1	Tipo 2
Capacidad	8 L	4 L
Diámetro	200 mm	150 mm
Altura	300 mm	160 mm

Nota: Se muestra las características dimensionales de los biodigestores construidos. Elaboración propia

Tabla 28. *Características físicas del inoculante*

Características físicas	
Ph	6.5
Temperatura	19 °C
Color	Café- verdusco
Volumen	0.8 L
Densidad	400 gr/0.8L
Olor	Característico
Masa	400 gr

Nota: Se muestra las características físicas del inoculante obtenido .Elaboración propia

Tabla 29. *Valores del inóculo*

Tratamientos (T)	Mezcla total en el digestor (Mt)	Cantidad de Inóculo (Cin)
Tratamiento 1 (T1)	500 g	50 g
Tratamiento 2 (T2)	625 g	62.5 g
Tratamiento 3 (T3)	750 g	75 g
Tratamiento 4 (T4)	500 g	50 g
Tratamiento 5 (T5)	625 g	62.5 g
Tratamiento 6 (T6)	750 g	75 g

Nota: Cantidad de inóculo presente en cada tratamiento. La obtención del inóculo fue realizada por digestión anaerobia de 500 g de estiércol de cuy y 1.5 L de agua durante 25 días. Elaboración propia

Tabla 30 *Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de vacuno*

% C Vaca	% N Vaca	% C Leg	% N Leg	Peso Vaca (Kg)	Peso Leg (kg)	*C/N Mezcla
30	1.30	38	1.5	0.5	0	25:1
30	1.30	38	1.5	0,5	0.125	23.6:1
30	1.30	38	1.5	0.5	0.250	24 :1

Nota: Se muestra el porcentaje de nitrógeno, carbono y peso de cada componente de la mezcla (estiércol de vacuno) para el cálculo de la relación C/N. (*) relación C/N. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. *Valores de la relación C/N de los tratamientos con estiércol de cuy*

% C Cuy	% N Cuy	% C Leg	% N Leg	Peso cuy (Kg)	Peso Leg (kg)	C/N Mezcla
35.4	1.86	38	1.5	0.5	0	19:1
35.4	1.86	38	1.5	0,5	0.125	20:1
35.4	1.86	38	1.5	0.5	0.250	22 :1

Nota: Se muestra el porcentaje de nitrógeno, carbono y peso de cada componente de la mezcla (estiércol de cuy) para el cálculo de la relación C/N. (*) relación C/N. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de cuy)

Tratamientos	Estiércol de cuy (g)	Leguminosas (g)	Inóculo (g)	Agua (L)
Tratamiento 1 (T1)	500	0	50	0.5
Tratamiento 2 (T2)	500	125	62.5	1.250
Tratamiento 3 (T3)	500	250	75	2.250

Nota: Se muestran todos los sustratos y agua que conformaron las mezclas con estiércol de cuy. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Mezclas que se utilizaron en los biodigestores (estiércol de vacuno)

Tratamientos	Estiércol de vacuno (g)	Leguminosas (g)	Inóculo (g)	Agua (L)
Tratamiento 4 (T4)	500	0	50	0.5
Tratamiento 5 (T5)	500	125	62.5	1.250
Tratamiento 6 (T6)	500	250	75	2.250

Nota: Sustratos y agua que conformaron las mezclas con estiércol de vacuno. La obtención del inóculo fue realizada por digestión anaerobia de 500 g de estiércol de cuy y 1.5 L de agua durante 25 días. Elaboración propia

Tabla 34. Parámetros para la construcción de los biodigestores

Parámetro	Característica
Régimen	Discontinuo – Batch
Agitación mecánica	No
Volumen del biodigestor	4-8 litros
Volumen funcional	60%
Volumen del inóculo	10%
Tiempo de retención	> 60 días
Temperatura Ambiente	13-22 °C
Gasómetro	Si

Nota: Se muestran las características de diseño de los biodigestores utilizados. Elaboración propia

Tabla 35. *Determinación de pH*

Biodigestores	Mezcla pre- Tratamiento (pH)	Mezcla post- Tratamiento (pH)
Biodigestor N° 1	6.5	7
Biodigestor N° 2	6.5	6.5
Biodigestor N° 3	6.7	7
Biodigestor N° 4	6.6	7
Biodigestor N° 5	6.5	6.5
Biodigestor N° 6	6.5	6.5

Nota: Los biodigestores se encuentran numerados de acuerdo al tratamiento que contienen, la composición de cada uno se detallan en las tablas 33 y 34. Elaboración propia.

Tabla 36. *Temperatura del Biodigestor N° 1 y N° 4*

Biodigestor N° 1		Biodigestor N° 4	
TR (días)	T (°C)	TR(días)	T (°C)
1	21.8	1	21
5	22.4	5	22
10	22.3	10	22
15	22.6	15	22
20	24.3	20	24
25	22.2	25	22
30	24.8	30	25
35	23.2	35	24
40	21.3	40	21
45	21.6	45	22
50	19.5	50	20
55	20.6	55	21
60	21.1	60	21
65	23.9	65	24
70	24.8	70	25
75	24.1	75	24
80	23.8	80	24
PROMEDIO	22.6	PROMEDIO	22.58

Nota: Se muestra la temperatura tomada en °C, cada 5 días desde día 1 hasta el día 80 del proceso. Elaboración propia.

Tabla 37. *Temperatura ambiental vs la temperatura en el biodigestor N° 1 y N° 4*

Biodigestor N° 1			Biodigestor N° 4		
T R (días)	T (°C)	T (°C)	T R (DÍAS)	T (°C)	T (°C)
	DIGESTOR	AMB.		DIGESTOR	AMB.
1	21.8	23.4	1	21	23.4
5	22.4	26.2	5	22	26.2
10	22.3	25.4	10	22	25.4
15	22.6	22.2	15	22	22.2
20	24.3	23.2	20	24	23.2
25	22.2	24.1	25	22	24.1
30	24.8	25.2	30	25	25.2
35	23.2	26.2	35	24	26.2
40	21.3	21.6	40	21	21.6
45	21.6	23.5	45	22	23.5
50	19.5	23.8	50	20	23.8
55	20.6	22.4	55	21	22.4
60	21.1	23.3	60	21	23.3
65	23.9	20	65	24	20
70	24.8	23	70	25	23
75	24.1	22	75	24	22
80	23.8	22	80	24	22
PROMEDIO	22.6	23.4	PROMEDIO	22.6	23.4

Nota: Se detalla la temperatura ambiental, y la del biodigestor. Elaboración propia.

Tabla 38. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 1*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.29
2	64	0.39
3	66	0.59
4	68	0.69
5	70	0.69
6	72	0.79
7	74	0.79
8	76	0.60
9	78	0.18
10	80	0.12

Nota: Producción de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 39. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 1*

Media	Desviación Estándar	Varianza	Coef. correlación	Coef. determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.51	0.25	0.06	-0.19	4%	0.12	0.79

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 40. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 1*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
2.95	1.84	3.39	0.98	98%	0.29	5.13

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 1 (estiércol de cuy (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

Tabla 41. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 2*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.26
2	64	0.43
3	66	0.90
4	68	0.98
5	70	1
6	72	0.80
7	74	0.85
8	76	0.89
9	78	0.40
10	80	0.32

Nota: Producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g), y agua en relación (1:2) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 42. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 2*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.683	0.29	0.086	-0.19	0.03 %	0.26	6.83

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 43. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 2*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
3.77	2.42	5.87	0.99	99 %	0.26	6.83

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:2), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

Tabla 44. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 3*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.77
2	64	0.88
3	66	1.33
4	68	1.79
5	70	1.59
6	72	1.65
7	74	1.12
8	76	0.90
9	78	0.50
10	80	0.40

Nota: Producción de biogás del tratamiento 3 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 45. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 3*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
1.093	0.49	0.235	-0.38	14%	0.40	1.79

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 3 (estiércol de cuy (500 g)), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 46. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 3*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
6.52	3.79	14.36	0.99	97%	0.77	10.93

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 47. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 4*

Días de medición	Tiempo de fermentación	Biogás producido
	(días)	(litros)
1	62	0.058
2	64	0.088
3	66	0.11
4	68	0.10
5	70	0.12
6	72	0.13
7	74	0.17
8	76	0.08
9	78	0.07
10	80	0.058

Nota: Producción de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno (500 g), y agua en relación (1:1) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 48. Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 4

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.098	0.035	0.001	-0.03	0.08%	0.058	0.17

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno (500 g) y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 49. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 4*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.54	0.34	0.11	0.99	99%	0.058	0.984

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno, (500 g), y agua en relación (1:1), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

Tabla 50. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 5*

Medición	Tiempo de fermentación (días)	Biogás producido (litros)
1	62	0.15
2	64	0.22
3	66	0.30
4	68	0.35
5	70	0.42
6	72	0.43
7	74	0.48
8	76	0.51
9	78	0.25
10	80	0.20

Nota: Producción de biogás del tratamiento 5 (estiércol de vacuno (500 g), leguminosas (125 g), y agua en relación (1:2) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 51. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 5*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.33	0.125	0.015	0.30	9%	0.15	0.51

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 5 (estiércol de vacuno (500 g)), leguminosas (125 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 52. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 5*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
1.72	1.16	1.35	0.99	99%	0.15	3.31

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 4 (estiércol de vacuno,(500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia

Tabla 53. *Volumen de producción de biogás durante el tiempo de retención del tratamiento 6*

Medición	Tiempo de fermentación	Biogás producido
	(días)	(litros)
1	62	0.22
2	64	0.33
3	66	0.36
4	68	0.40
5	70	0.50
6	72	0.58
7	74	0.64
8	76	0.57
9	78	0.47
10	80	0.38

Nota: Producción de biogás del tratamiento 2 (estiércol de cuy (500 g), leguminosas (250 g), y agua en relación (1:3) desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 54. *Datos estadísticos de la producción de biogás del tratamiento 6*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. Correlación	Coef. Determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
0.445	0.13	0.0016	0.60	36%	0.22	0.64

Nota: Procesamiento de los resultados de producción de biogás del tratamiento 6 (estiércol de vacuno (500 g)), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 55. *Datos estadísticos de la producción acumulada de biogás con el tratamiento 6*

Media	Desviación estándar	Varianza	Coef. correlación	Coef. determinación	Rango	
					Mínimo	Máximo
2.23	1.51	2.28	0.99	99%	0.22	4.45

Nota: Producción acumulada de biogás del tratamiento 6 (estiércol de vacuno,(500 g), leguminosas (250 g) y agua en relación (1:3), desde el día 60 al 80 de la fermentación. Elaboración propia.

Tabla 56. *Rendimiento en la producción de biogás, biol, biosol.*

Materia prima	Biogás (L)	Biol (L)	Biosol (kg)
Mezcla vacuno	4.45	2.22	0.746
Mezcla de cuy	10.93	2.23	0.747

Elaboración Propia

Tabla 57. *Contenido de materia orgánica de cada tipo de estiércol*

Nutriente	Vacuno	Cuy
Materia orgánica (%)	48.9	63.9

Recuperado de: Suquilanda, M. (1996). *Agricultura Órgánica Fase II Fundagro*. Ecuador .

Tabla 58. *Producción de biogás proyectado en base a una tonelada de estiércol*

ESTIERCOL DE CUY	DE VACUNO
PG = MPC ×SO×P	PG = MPC ×SO×P
PG = 1000x0.639x21.86	PG = 1000x0.489x8.90
PG = 13968.54 L	PG = 4352.1 L

Nota: Proyección de producción basada en los resultados experimentales obtenidos, .formula recuperada de: Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Guía de Implementación de Sistemas de Biogás* . Bogotá: Incotec .

Tabla 59. *Producción de biol con una tonelada de estiércol*

PRODUCCIÓN DE BIOL PARA 1 TONELADA DE ESTIERCOL DE CUY	PRODUCCIÓN DE BIOL PARA 1 TONELADA DE ESTIERCOL DE VACUNO
PB = Agua agregada x (*) 0.99	PB = Agua agregada x (**) 0.986
PB = 3000x0.99	PG = 3000x0.986
PB = 2970 L	PG = 2958 L

Nota: (*), (**) Datos tomados en la recolección de biol por diferencia de volumen al inicio y fin de proceso. Elaboración propia.

Tabla 60. *Producción de biosol proyectado*

Producción de biosol para 1 tonelada de estiércol de cuy	Producción de biosol para 1 tonelada de estiércol de vacuno
PBS= Mezcla x0.997	PBS=Mezcla x 0.9946
PB = 1500x0.997	PG = 1500x0.9946
PB = 1496 kg	PG = 1492 kg

Nota: basado en una tonelada de estiércol de cuy en dilución (1:3).(*), (**) Datos tomados en la recolección de biol por diferencia de peso al inicio y fin de proceso. Elaboración propia.

Tabla 61. *Costo de materiales y equipos*

Materiales y equipos	Valor unitario (s/.)	Valor total (s/.)
Tanque de biodigestión	284.90	854.7
Tuberías	27.00	54.00
Niples	2.00	16.00
Tapones	2.00	6.00
Llaves de paso	3.50	21.00
Manómetro	24.00	72.00
Codos	2.00	12.00
T	2.00	12.00
Tapones de tubo	2.00	6.00
Teflón	1.00	5.00
Cinta aislante	2.00	8.00
Guantes	15.00	30.00
Rotulador	1.00	5.00
Mascarilla	6.00	18.00
Mandil	15.00	45.00
Tarraja	35.00	35.00
Recipiente de plástico	1.00	1.00
Botella de plástico	0.20	0.60
Virutas de hierro	5.00	15.00
Balanza	60.00	60.00
Tanque de almacenamiento de biol		854.00
	284.00	
	TOTAL	S/ 2130.3

Nota: Datos obtenidos de precios del mercado por cotizaciones de materiales. Elaboración propia.

Tabla 62. *Costo de construcción de la planta*

Rubro	Valor s/
Equipo y materiales	S/ 2130.3
Mano de obra	S/ 600.00
Total	S/ 2730.3

Nota: Recopilación de equipos y materiales y el costo de mano de obra. Elaboración propia.

Tabla 63. *Costos de materia prima y servicios*

Material	Cantidad	Unidad	Precio	Costo total
Estiércol	1000	Kg	S/ 0.10	S/ 100
Agua	3000	L	S/ 0.03	S/ 100
Desechos orgánicos	500	Kg	S/ 0.10	S/ 50
Transporte	2	Viaje	S/ 50	S/ 100
Presentación	4000	Envase	S/0.20	S/ 800
			Total	S/ 1150

Nota: Costos basados en cotizaciones de los posibles proveedores en cada caso. Elaboración propia.

Tabla 64. *Mano de obra requerida*

Tipo	Cantidad	Costo mensual
Encargado de planta	1	S/ 800
Operarios	2	S/ 400
Coordinador de ventas	1	S/ 750
Total	4	S/ 1950

Elaboración Propia.

Tabla 65. *Costos variables*

Concepto	Costo S/
Electricidad	150.00
Agua	20.00
Papel	20.00
Mantenimiento de planta	200.00
Total	S/ 390

Nota: Presupuesto asignado a los costos variables del proceso. Elaboración propia.

Tabla 66. *Costo de construcción y producción*

Costo de construcción de planta	S/ 2.730.3
Mano de obra	S/ 1950
Materia prima y servicios	S/ 1150
Costos variables	S/390
TOTAL	S/ 6220

Elaboración propia.

Tabla 67. *Producción de biogás destinado a la combustión y ahorro*

Biogás producido (l)	Energía generada (kcal)	Ahorro (s/)
13968.54 L	8381.124 kcal	40.00

Nota: 1 metro cubico de biogás equivale 6000 kcal .Elaboración propia.

Tabla 68. *Producción de biol para la comercialización*

Biol (l) Producido	Unidad (l)	Precio de venta	Ingresos
2970	1	S/ 2.00	S/ 5940

Elaboración propia.

Tabla 69. *Producción de biosol destinado a la comercialización*

Biosol Producido	Unidad (kg)	Precio de venta	Ingresos
1496	1	S/ 2.00	S/ 2992

Elaboración propia.

Tabla 70. *Gastos de financiamiento*

Cápital	Interes	Seguro desgravamen	Total cuota
S/4000	S/.1191.95	S/172.80	S/150.00

Elaboración propia. basada en datos obtenidos de la sede del Banco Financiero

Tabla 71. *Ingresos y gastos del proceso*

Costos fijos	
Costos fijos de producción	S/ 1150.00
Mano de obra	S/ 1950.00
Gastos financiamiento	S/ 150.00
Total	S/3250.00
Costos variables	S/ 390.00
Ingresos totales	S/ 8932.00
Ganancia neta	S/5292.00

Elaboración propia.

Tabla 72. Datos para el cálculo del punto de equilibrio

Costos fijos	Costos variables unitarios	Precio de venta	Unidades a vender
S/. 3250	S/. 0.08732	S/. 2	4466 unidades

Elaboración propia.

Tabla 73. Características de la Materia orgánica utilizada en la biodigestión anaeróbica

Fuente	W_A	T	ST	SV	NP	PO	KO	ST/T	SV/ST
Vacuno	500	86	12	10	0,45	0,094	0,29	14 %	83 %
Cuy	2	64	16	12	1,1	0,3	0,4	25 %	75 %

Recuperado de: ASAE Standard D384.1 DEC93; American Society of Agricultural Engineers.

Tabla 74. Potencial de producción de gas metano (pCH_4) de algunos residuos

Residuo orgánico	$P_{CH_4} [m^3 CH_4/kg sv]$
Vaca	0.2
Res	0.35
Desecho municipal	0.2
Cerdo	0.45
Gallina	0.39
Aguas Negras	0.406
Cuy	0.3

Recuperado de: López Álvaro Fabricio, "Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para la generación de biogás en la finca Tanguarin de la parroquia de san Antonio de Ibarra ,2012.

INFORME DE ENSAYO FISICO QUIMICO

N° DE REPORTE: 18831-17

NOMBRE DEL CLIENTE	: STEFANY VELASQUEZ TAPIA
DIRECCIÓN	: AREQUIPA
ASUNTO	: ANÁLISIS FISICO QUIMICO
PRODUCTO	: BIOSOL Y BIOL
LUGAR Y FECHA DE RECEPCIÓN	: AREQUIPA, 2017-12-04
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES	: BOLSA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS	: AREQUIPA, 2017-12-11
REFERENCIA	: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA	: ELABORACION PROPIA
CÓDIGO DE REGISTRO DE MUESTRA	: 24534

- LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
- ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

PAGINA 1 DE 2

INFORME DE ENSAYO

Nº DE REPORTE: 18831-17

DETERMINACIÓN DE :					
Carbono	%	5,62			
Nitrógeno	%	0,32			
OBSERVACIONES:					

METODO DE ENSAYO	
DETERMINACIÓN	METODO DE ENSAYO APLICADO
	NORMA /REFERENCIA / NOMBRE
Carbono	Método de Walkley Black
Nitrógeno	Método 2.057 de la AOAC

PAGINA 2 DE 2

Emitido en Arequipa (Perú), el 11 de Diciembre de 2017



Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP - 348




Lic. Freddy Valdivia Peña
Químico Responsable
RCQP - 842

Anexo N° 3: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: “EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGAS COMPARANDO EL ESTIERCOL DE VACUNO, DE CUY Y RESIDUOS DE LEGUMINOSAS EN UN BIODIGESTOR ANAEROBIO EN LA UAP- AREQUIPA 2016”

Pregunta General	Preguntas Específicas	Objetivo General	Objetivos Específicos	Hipótesis General	Tipo de Investigación:	Diseño de la Investigación:	Variables	Indicadores	Instrumentos y Equipos
¿Qué tipo de estiércol producirá mayor cantidad de biogás utilizando un biodigestor anaerobio?	¿A partir de qué tipo de materia prima se puede producir biogás en un biodigestor anaerobio? ¿Cuál es la proporción adecuada de estiércol de vacuno, de cuy y residuos de leguminosas para la mayor producción de biogás en un biodigestor anaerobio?	Evaluar el rendimiento de cada tipo de estiércol en la producción de biogás utilizando un biodigestor anaerobio.	Producir biogás a partir de la codigestión de estiércol de vacuno, de cuy y residuos de leguminosas Determinar la proporción de residuos de leguminosas para maximizar la producción de biogás.	Para la digestión anaerobia de residuos orgánicos existe un tipo y proporción de mezcla de sustratos que maximiza la producción de biogás en el biodigestor.	Experimental: Debido a que se obtiene biogás en un Biodigestor anaerobio a partir de desechos orgánicos, en el cual se controla los parámetros del proceso para evaluar el rendimiento de producción. Correlacional: Se busca analizar la relación de tipo de sustrato con el rendimiento de producción de biogás.	Para esta investigación se utilizó el diseño experimental que se basa en la construcción de 6 biodigestores tipo batch utilizando tres razones de sustrato (sustrato/agua) correspondientes a los valores (1:1), (1:2), (1:3) del volumen operativo de biodigestores a nivel laboratorio tanto para las pruebas con estiércol de cuy y estiércol vacuno. Se realiza mediciones en tiempos equidistantes de los parámetros de control del proceso sobre los biodigestores en cada proceso que será, temperatura y producción de biogás. En el momento de realizar el arranque se colocara el sustrato precompostado, y el agua, se tomara en cuenta el pH, la temperatura al iniciar el proceso de biodigestión, se sellaran los biodigestores controlando las variables a lo largo del proceso. Al término de la biodigestión de cada tratamiento se procederá a realizar el seguimiento de la producción volumétrica de metano utilizando la técnica de desplazamiento volumétrico. Posteriormente se recolecto y evaluó datos para indicar la correlación de variables para establecer cuál será mejor rendimiento de todas las pruebas considerando el sustrato y agua.	Variables Independientes : • Estiércol de vacuno, • Estiércol de cuy • Residuos de leguminosas Variable Dependiente: • Producción de biogás	Variable Independiente : • Volumen de agua • Relación C/N • Cantidad de residuos de leguminosas. Variable Dependiente: • Temperatura • pH • Volumen de biogás	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Termómetros • Computadora • Impresora • Software Microsoft Excel • Cintas medidoras de pH • Cámara fotográfica • Balanza