

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



“PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DE LA CASCARA DEL FRUTO DEL CACAO
(*Theobroma cacao L.*) A NIVEL DE LABORATORIO”

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

YESHUA ISAI LIJARZA GALVEZ

Tingo María – Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°009-2023-FRNR-UNAS

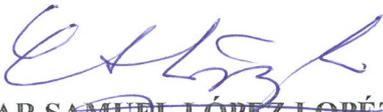
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 13 de diciembre de 2022, a horas 5:00 p.m. a través de la plataforma virtual Ms Teams de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE LA CASCARA DEL FRUTO DEL CACAO (*Theobroma cacao L.*) A NIVEL DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **YESHUA ISAI LIJARZA GALVEZ**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

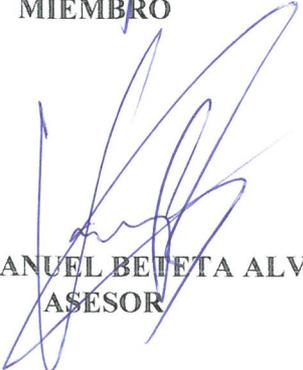
Tingo María, 16 de febrero de 2023


Dr. CESAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ
PRESIDENTE


Ing. M.Sc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO


Blgo. M.Sc. CÉSAR AGUSTO GOZME SULCA
MIEMBRO




Dr. VÍCTOR MANUEL BETETA ALVARADO
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
(RIDUNAS)

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 049 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DE LA CASCARA DEL FRUTO DEL CACAO (Theobroma cacao L.) A NIVEL DE LABORATORIO	YESHUA ISAI LIJARZA GALVEZ	16% Dieciséis

Tingo María, 08 de marzo de 2023


Mg. Ing. García Villegas, Christian
Coordinador del Repositorio Institucional
Digital (RIDUNAS)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DE LA CASCARA DEL FRUTO DEL CACAO
(*Theobroma cacao L.*) A NIVEL DE LABORATORIO

Autor	: LIJARZA GALVEZ, Yeshua Isai
Asesor	: Dr. BETETA ALVARADO, Victor Manuel
Programa	: Ciencia y tecnologías ambientales
Línea de investigación	: Bioproducción: aditivos, combustibles, fertilizantes y otros.
Eje temático de investigación	: Biogás
Lugar de Ejecución	: Laboratorio de Tratamiento y Calidad del Aire de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración	: 6 meses
Financiamiento	: Propio
Monto	: S/. 1040

Tingo María – Perú

2023

DEDICATORIA

A DIOS en primer lugar

A mi padre Armando

A mi madre Hedit

A mi hermana Jaqueline

A mis familiares: tíos, primos y sobrinos

A mis amigos en general

Gracias por formar parte de mi formación,

Como persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Doy las gracias a DIOS ya que sin su ayuda no hubiese sido posible la finalización de esta tesis y la valiosa contribución de cada una de las personas que contribuyeron en el desarrollo de la presente investigación. Sea mi total reconocimiento con todos.

Quiero expresar mis agradecimientos a la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por formar parte de mi formación y expreso mi reconocimiento al Dr. Victor Manuel Beteta Alvarado, asesor del presente trabajo por su confianza, orientación y exigencia que me brindó para la realización de este trabajo; a los señores miembros del jurado calificador: Ing. M.Sc. Franklin Dionisio Montalvo y al Blgo. M.Sc. César Augusto Gozme Sulca por sus oportunas sugerencias y en especial al Dr. Cesar Samuel Lopez Lopez por su tiempo, amabilidad y generosidad.

Mi agradecimiento a los laboratorios de tratamiento y calidad del aire, Química, Suelos y Calidad y tratamiento de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva por su apoyo en la realización de las determinaciones analíticas que conllevaron el desarrollo del presente trabajo

A los INGE PITOT'S y futuros M.Sc. (Cristian, Elvis, Leoncio y Ader), por sus consejos y recomendaciones para la realización de este trabajo de investigación.

INDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos Específicos	2
II. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes de investigación	3
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	3
2.1.2. Antecedente Nacional	3
2.1.3. Antecedentes Regionales	4
2.2. Utilidad de los residuos como materia prima.....	4
2.2.1. Residuos del cacao	4
2.2.2. Gallinaza	6
2.3. Digestión anaerobia.....	6
2.3.1. Hidrólisis	7
2.3.2. Acidogénesis	7
2.3.3. Acetogénesis	8
2.3.4. Metanogénesis.....	8
2.4. Factores que afectan la digestión anaerobia	8
2.4.1. Sustrato.....	8
2.4.2. Humedad	9
2.4.3. Relación carbono – nitrógeno (C:N).....	9
2.4.4. Tiempo de retención hidráulica.....	9
2.4.5. Potencial de Hidrógeno (pH)	10

2.4.6.	Temperatura	10
2.4.7.	Contenido de agua en la mezcla.....	11
2.5.	Biogás.....	11
2.5.1.	Características del biogás	11
2.5.2.	Aplicación del biogás.....	12
2.5.3.	Cuantificación de biogás y metano en laboratorio – Potencial Bioquímico de metano (PBM)	13
III.	MATERIALES Y METODOS	15
3.1.	Lugar de estudio	15
3.1.1.	Ubicación política	15
3.1.2.	Ubicación geográfica	15
3.2.	Materiales y equipos.....	16
3.2.1.	Materiales de Campo.....	16
3.2.2.	Materiales de Laboratorio	16
3.2.3.	Equipos de Laboratorio	16
3.2.4.	Reactivos	16
3.2.5.	Materiales para el equipo	16
3.2.6.	Software	17
3.3.	Tipo de investigación	17
3.4.	Variables en estudio	17
3.5.	Diseño experimental.....	18
3.6.	Diseño estadístico.....	18
3.7.	Metodología	19
3.7.1.	Fase de campo.....	19
3.7.2.	Fase de Laboratorio.....	20

IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	25
4.1.	Análisis de los parámetros (pH, temperatura, humedad y relación C:N) de la cáscara del fruto del cacao	25
4.1.1.	Potencial de Hidrógeno	25
4.1.2.	Temperatura (T°).....	25
4.1.3.	Humedad	26
4.1.4.	Relación (C/N)	26
4.2.	Determinación del tiempo adecuado para la estabilidad degradativa anaerobia de la cáscara del fruto del cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>).....	26
4.3.	Determinación de la producción de biogás y metano a nivel de laboratorio	28
4.3.1.	Testigo.....	28
4.3.2.	Tratamiento 1	29
4.3.3.	Tratamiento 2	30
4.3.4.	Tratamiento 3	31
4.4.	Análisis Estadístico	35
4.4.1.	Prueba de Normalidad (Shapiro - Wilk)	35
4.4.2.	Prueba de Homogeneidad de varianzas (Levene)	36
4.4.3.	Análisis de Varianza	36
4.4.4.	Prueba de Tukey.....	37
V.	CONCLUSIONES	38
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	39
VII.	REFERENCIAS	40
	ANEXOS	43

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Residuos del cacao y cantidades generadas.....	5
2. Parámetros químicos de la cáscara de cacao	5
3. Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza	6
4. Características de la fase acidogénica y metanogénica	8
5. Relación C:N para varios tipos de residuos.....	9
6. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	11
7. Composición del biogás.....	12
8. Tratamientos a evaluarse	22
9. Composición fisicoquímica de la cáscara del fruto del cacao	25
10. Producción de biogás y metano del testigo (gallinaza)	28
11. Producción de biogás y metano del tratamiento 1	29
12. Producción de biogás y metano del tratamiento 2.....	30
13. Producción de biogás y metano del tratamiento 3.....	31
14. Prueba de Normalidad Shapiro Wilk.....	36
15. Prueba de Homogeneidad de Varianzas	36
16. Análisis de Varianza.....	36
17. Comparación de la significancia según prueba de Tukey	37
18. Prueba de Tukey	37
19. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	44
20. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	44
21. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	45
22. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	45
23. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	45
24. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	46
25. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	46
26. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos.....	46
27. Producción de biogás del testigo	47
28. Producción de metano del testigo.....	47

29. Producción de biogás del tratamiento 1.....	48
30. Producción de metano del tratamiento 1	48
31. Producción de biogás del tratamiento 2.....	49
32. Producción de metano del tratamiento 2	49
33. Producción de biogás del tratamiento 3.....	50
34. Producción de metano del tratamiento 3	50
35. Producción de biogás del tratamiento experimental.....	51
36. Producción de metano del tratamiento experimental	51
37. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final del tratamiento	52
38. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final del tratamiento	52

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Esquema de la descomposición anaeróbica.....	7
2. Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia	10
3. Alternativas de uso del biogás.....	12
4. Instalación experimental simplificada para determinar el potencial bioquímico de metano	13
5. Instalación experimental simplificada para determinar el potencial bioquímico del biogás.....	14
6. Mapa de ubicación del lugar de estudio	15
7. Diseño de la investigación.....	18
8. Flujograma de investigación.....	18
9. Tiempo de estabilidad del biogás y metano, en el testigo y los tres tratamientos.....	27
10. Tiempo de biogás y metano producido para el testigo y tratamientos.	27
11. Producción acumulada de biogás y metano del testigo	29
12. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 1.....	30
13. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 2.....	31
14. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 3.....	32
15. Composición de volúmenes de los gases por tratamientos	32
16. Composición de porcentajes de los gases por tratamientos.....	33
17. Potencial de producción de metano entre los tratamientos 1, 2 y 3.....	33
18. Potencial de producción de biogás entre los tratamientos 1, 2 y 3.....	34
19. Cambios en el potencial bioquímico de metano por tratamientos.....	34
20. Muestra de gallinaza a prepararse para el desarrollo de la carga microbiana	53
21. Carga microbiana preparada.....	53
22. Cáscara del fruto del cacao picadas en trozos	54
23. Cáscara del fruto del cacao ralladas	54
24. Pesado de la cáscara del fruto del cacao rallada.....	55
25. Insertamiento de las muestras pesadas en las botellas.....	55
26. Medición de cantidad a utilizarse de la carga microbiana.....	56
27. Insertamiento de la carga microbiana en las botellas	56
28. Medición de la cantidad de agua a utilizarse.....	57

29. Añadido del agua en las botellas	57
30. Estabilización de pH en cada uno de los biorreactores	58
31. Botellas listas a utilizarse para los tratamientos	58
32. Tratamiento testigo en funcionamiento	59
33. Sistema de medición para el biogás.....	59
34. Sistema de medición para el metano	60
35. Agitamiento previo a la medición de los volúmenes producidos.....	60
36. Medición del volumen producido en un tratamiento.....	61

RESUMEN

La producción de cacao y la industria ganadera (gallinaza) en nuestro país vienen incrementándose en los últimos años, y debido a esto llegan a formarse cantidades grandes de residuos orgánicos que se generan, ocasionando de esta manera una contaminación ambiental tanto para el aire debido a los gases contaminantes que se generan y para el suelo debido a sus pH ácidos que se componen. Por lo cual el presente trabajo de investigación tuvo como propósito determinar el biogás a producirse a partir de la cáscara del fruto del cacao, utilizando a la gallinaza como medio para extraer la fuente de inóculos necesarios para lograr una correcta digestión anaerobia; aplicando como metodología el sistema volumétrico a nivel de laboratorio. Se realizaron tres tratamientos con diferentes concentraciones de cáscara del fruto del cacao, la misma cantidad de Microorganismos Eficientes de gallinaza y el restante se completó con agua, comparándolas con un tratamiento testigo la cual tuvo solo a los Microorganismos Eficientes de gallinaza y agua. Obteniéndose como resultado que en el segundo tratamiento es en donde se obtuvo una mayor producción promedio de biogás de 1107.6 ml en 5 días en el segundo tratamiento, siendo a proporción 2:1 (inóculo: muestra). Lo cual demuestra que si llega a producirse biogás a partir de la cáscara del fruto del cacao.

Palabras clave: Residuos orgánicos, microorganismos eficientes, digestión anaerobia, sistema volumétrico.

ABSTRACT

Cacao production and the livestock industry (hen manure) in our country has been increasing in recent years, and due to this, the organic waste that it creates becomes large quantities, and thus, causes environmental contamination in the air due to the contaminating gasses that are generated, as well as for the soil due to the pH acids that it is made up of. Thus, the objective of the present research work was to determine the biogas produced from the hull of cacao fruit, using chicken manure as a medium with which to extract the source of the inocula necessary in order to achieve a correct anaerobic digestion; using the volumetric system at a laboratory level as the methodology. Three treatments with different concentrations of cacao fruit hull were used, [with] the same quantity of efficient microorganisms from chicken manure, and the rest was finished with water; comparing them to a control treatment, which only had efficient microorganisms from chicken manure and water. The result that was obtained was that the second treatment was where a greater average production of biogas was obtained, at 1107.6 ffml in five days, for the second treatment, with the proportion being 2:1 (inoculum: sample). This shows that biogas can be produced from the cacao fruit hull.

Keywords: organic waste, efficient microorganisms, anaerobic digestion, volumetric system

I. INTRODUCCION

En los últimos años se ha comenzado a desarrollar el aprovechamiento de la biomasa, abriéndose soluciones que aporten a la protección del medio ambiente con bajas emisiones y utilizar una variedad de fuentes, incluyendo residuos de la industria agropecuaria.

Actualmente, existe una gran cantidad de residuos orgánicos generados por el sistema de producción de cacao (cáscara) y la industria ganadera (estiércol de gallina). Gran parte de los residuos generados están constituidos principalmente en su mayoría por la cáscara, siendo durante la cosecha en donde las cáscaras de la mazorca del cacao son retiradas en el mismo lugar donde se recolectan los granos, debido a que la mayoría de los agricultores hoy en día carecen de saber qué hacer con estos residuos, por lo que se desechan en sus propios terrenos o en ocasiones quemándolos, contribuyendo a las emisiones de CO₂ a la atmósfera; algunos agricultores lo utilizan en el proceso de compostaje tradicional y como fertilizante para cultivos.

Con un manejo adecuado podemos aportar en gran manera a la obtención y procesamiento de desechos orgánicos en variadas formas energéticas. Considerando esto existen tecnologías apropiadas para reducir los riesgos de contaminación y degradación ambiental, una de las cuales es la digestión anaeróbica, en la que se genera biogás por medio de reacciones bioquímicas. El biogás se puede capturar y utilizar como un gas natural y dependiendo de ciertos estándares en electricidad. Por tanto, la digestión anaerobia al ser un sistema para tratar residuos nos da la posibilidad de reducir un número de contaminantes orgánicos, estabilizarlos y al mismo tiempo generar energía. Por otro lado, la digestión de ciertos ingredientes tiene el potencial de aumentar la producción total de metano.

Por tanto, el propósito de la presente investigación es determinar el biogás a producirse a partir de la cáscara del fruto del cacao utilizando la digestión anaerobia.

Por lo cual se plantea el problema de investigación de la siguiente manera: ¿Habría biogás producto de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*) a nivel de laboratorio?, teniendo como hipótesis en relación al problema planteado que hay una influencia significativa en la producción de biogás a partir de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*) a nivel de laboratorio.

1.1. Objetivo General

- Determinar el biogás a producirse a partir de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*).

1.2. Objetivos Específicos

- Analizar los parámetros (pH, temperatura, humedad y relación C:N) de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*)
- Determinar el tiempo adecuado para la estabilidad degradativa anaerobia de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*)
- Determinar la producción de biogás y metano a nivel de laboratorio

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Méndez et al. (2021) menciona en su trabajo de investigación “Metanización de la biomasa residual de dos variedades de cacao y caracterización nutricional del sustrato”, que evaluaron el biogás y metano resultantes de la fermentación anaerobia de dos tipos de cacao (Nacional y CCN-51) y realizaron la caracterización nutricional del sustrato obtenido. Haciendo mediciones diarias al biogás y metano producido. También analizó los parámetros fisicoquímicos de los sustratos digeridos biológicamente. El Tratamiento 6 que fue de Cáscara Nacional (20 % ST) fue el que más se destacó en producción acumulada de biogás (1297,66 ml) y proporción de gas metano a un 76%. En distintos tratamientos de biomasa biodigerida, encontró variados resultados para micro y macronutrientes pudiendo ser utilizados como biofertilizante vegetal.

García y Gómez (2016), afirma en su trabajo de investigación “Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos Vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia”, en donde se formularon tres combinaciones; la primera en hortalizas, la segunda en frutas y un testigo en donde se combinó estiércol y agua. Así, de la biodegradación se obtuvo un alto porcentaje de biogás, presentando un metano al 69,5% en la primera combinación, 67,7% para la mezcla de frutas y 64,1% para los testigos. Para seleccionar el mejor sustrato se realizó un análisis estadístico de modo que se pudiera seleccionar una combinación que presente un tiempo de estabilidad menor y un alto porcentaje de metano, siendo la combinación con vegetales la que presentó un tiempo de estabilidad de 50 días

2.1.2. Antecedente Nacional

Valdez (2016), refiere en su trabajo de investigación “Evaluación de la calidad de biogás y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa”, que su investigación se desarrolló en tres fases bien definidas: El primero fue de caracterizar los residuos de las heces de los animales. Seguido se llevó a cabo digestión anaerobia mediante botellas que se asemejen a tanques de biodigestión anaerobio en donde se obtuvo una medida diaria al biogás y metano. Para finalizar se realizó un análisis de la calidad del

biol (fertilizante líquido) resultante de la digestión anaerobia en todos los tratamientos. El segundo tratamiento fue el que presentó volúmenes mayores de biogás (2115,8 ml) y de metano (688,6 ml). Para los bioles el tratamiento dos es el que obtuvo una óptima calidad entre todos los tratamientos ya que se hallaron una mejor concentración de macronutrientes y menos coliformes fecales y totales.

2.1.3. Antecedentes Regionales

Caceres (2019), menciona en su trabajo de investigación “Potencial de la pulpa de *Coffea arabica* L. para la producción de metano, biol y biosol a nivel de laboratorio – UNAS”, en donde utilizando un sistema de digestión anaerobia determinó el potencial bioquímico del metano con distintas concentraciones de pulpa de café. Asimismo, determinó cuanto demora en descomponerse, midiendo también el volumen de metano y biogás. También obtuvo el biosol y biol que se produjo, aplicando ensayos de toxicidad germinativa en placas. Finalmente, se obtuvo que utilizando posos de café en una concentración inferior al 30% se podía descomponer y por lo tanto producir metano con una pureza del 90%.

2.2. Utilidad de los residuos como materia prima

La digestión anaerobia como método de tratamiento puede emplear diversos residuos. En general, los principales residuos biodegradables en este proceso son de naturaleza animal y vegetal (Braun, 2013). Por tanto, los sustratos que pueden emplearse son:

- Residuos de origen animal: Estiércol de bovino, porcino, pavo, pollo, etc.
- Subproductos vegetales: Rastrojos, semillas, plantas acuáticas, etc.
- Subproductos agrícolas e industriales: Torta de semillas oleaginosas, bagazo, etc.

2.2.1. Residuos del cacao

Según Bochmann (2013), el proceso de cultivo del cacao genera una serie de desechos desde la cosecha hasta el procesamiento. La Tabla 1 presenta los principales subproductos que se generan durante la producción del cacao.

Tabla 1. Residuos del cacao y cantidades generadas

Residuos	Cantidad que se genera
Podas	20,24 toneladas por hectárea
Cáscaras	90 % del fruto fresco
Placenta o mucílago	1,72 % del fruto fresco
Semillas dañadas	6 - 8 % del fruto fresco

Fuente: Bochmann (2013)

2.2.1.1. Mazorca del cacao

Las mazorcas de cacao están formadas por mazorcas, placenta y semillas (cacao en grano) recubiertas de compuestos químicos principalmente agua y azúcar, cada una con una determinada composición, la cual es estudiada o analizada, el mayor volumen corresponde al cacao en grano (García, 2016).

La clasificación energética de las mazorcas de cacao indica que se puede utilizar como fuente de energía y también es una fuente prometedora de fibra dietética. Hay muchos tipos diferentes de cacao que se venden, de esta manera sus parámetros químicos varían como se muestran en la tabla 2 (Sánchez, 2013).

Tabla 2. Parámetros químicos de la cáscara de cacao

Parámetros	Proporciones
Humedad	85%
Proteínas	1.07%
Minerales	1.41%
Fibra	5.45%
Carbohidratos	7.05%
N	0.17%
P	0.03%
Pectinas	0.89%

Fuente: García (2016)

2.2.2. Gallinaza

Viene a ser la combinación de excrementos y orina obtenida de gallinas en cautiverio o puestas en el suelo; asociado con partículas de alimentos no digeribles, microorganismos intestinales, plumas, huevos rotos (Castillo, 2012). La fermentación del estiércol de gallina produce gases. En la tabla 3 se muestran los principales parámetros que presentan.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza

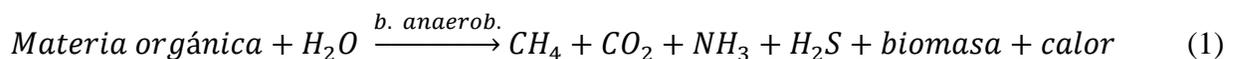
Parámetros	Rango
pH	8 - 9
Humedad	1 - 2
Sólidos Volátiles	2 - 4
D.Q. O	200 - 500
Nitrógeno Total	3 - 12
Nitrógeno Amoniacal	3 - 7
Fósforo	5 - 25
Nitratos	2 - 16

Fuente: Castillo (2012)

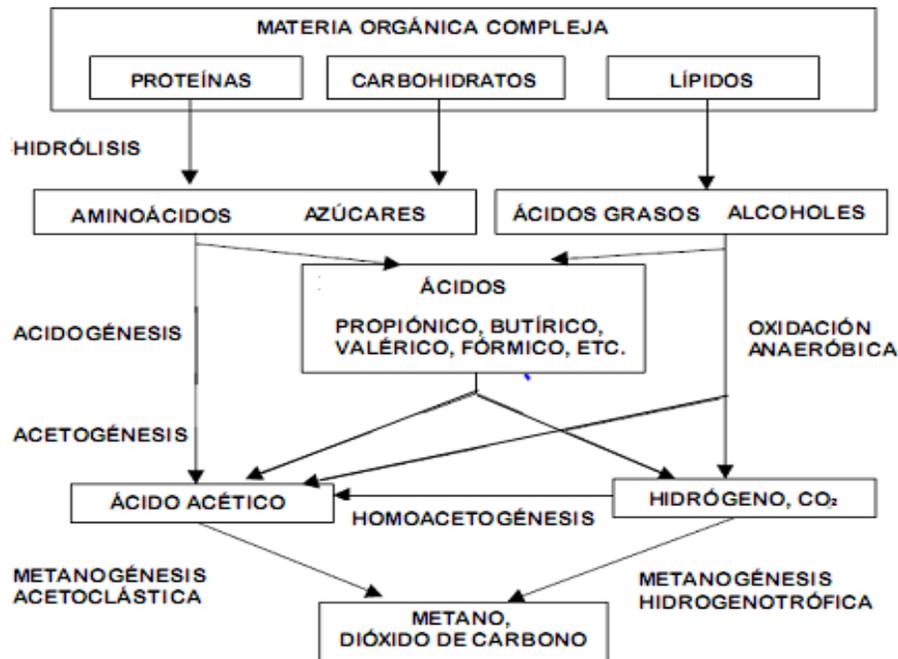
Según Apolo (2013), nos dice que este tipo de estiércol es diferente a otros porque tiene un gran volumen de nutrientes, debido a la alta concentración en la dieta que digieren y a la menor cantidad de agua en la gallinaza.

2.3. Digestión anaerobia

Este es un proceso biológico en el que diferentes microorganismos interactúan entre sí, en ausencia de oxígeno, fijando el sustrato orgánico convirtiéndola en metano disuelto y distintos sustratos inorgánicos, incluidos el H₂O y CO₂ (Valdez, 2016). Así como se presenta:



Se distribuyen en: hidrólisis, acidogénesis, acidogénesis y metanogénesis. Crecen sucesivamente por diferentes tipos de microorganismos.



Fuente: Valdez (2016)

Figura 1. Esquema de la descomposición anaeróbica

2.3.1. Hidrólisis

Es el inicio en el proceso de digestión anaerobia, en el que diversos elementos biológicos (carbohidratos, celulosa, etc.) biológicamente (hidrolasa) o por medio de series fisicoquímicas a solutos; y componentes biológicos (monómero o dímero), estableciéndose una etapa de su bioconversión en condiciones anaeróbicas (Sanchez, 2013).

2.3.2. Acidogénesis

Esta es la etapa fuertemente ácida que comienza con las composiciones fácilmente degradables, donde se produce más CO₂, sulfuro de hidrógeno (H₂S) y bicarbonato; su pH está en el rango ácido de 5.1 a 6.8 (Ruiz, 2015).

2.3.3. Acetogénesis

Aquí la descomposición de ácidos grasos y complejos aromáticos (conseguidos por digestión) ocurre por hidrogenación acetogénica (Espitia, 2002). En este se requiere la obtención de H_2 por microorganismos anaeróbicos que llevan a cabo la oxidación de ácidos aceitosos (Paucar, 2015).

2.3.4. Metanogénesis

Es el último paso, en donde composiciones como el hidrógeno del ácido acético se convierten en CH_4 y CO_2 . La vía principal de creación de CH_4 es a través de la descomposición de ácido acético. Este paso es bien susceptible a las variaciones de pH, donde habitualmente se realiza en un medio neutro (Montenegro, 2016). Como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de la fase acidogénica y metanogénica

Fase Acidogénica	Fase Metanogénica
Bacterias facultativas y replicación efectiva	Bacterias anaeróbicas estrictas y replicación retardada
Baja sensibilidad a variaciones en acidez y temperatura	Alta sensibilidad a variaciones de acidez y temperatura

Fuente: Montenegro (2016)

2.4. Factores que afectan la digestión anaerobia

2.4.1. Sustrato

La mayor fracción de la materia orgánica se puede utilizar para la fermentación. Los seres humanos para obtener biogás utilizan esencialmente aguas sobrantes de industrias alimentarias y ligeras, residuos vegetales y estiércol de animales. Los sustratos más utilizados para el cultivo de sustancias biodegradables son: Estiércol (bovino, porcino, entre otros), residuos vegetales, residuos orgánicos, componentes ruminales (obtenidos de mataderos y mataderos de ciudad), residuos de alimentos, etc (Gomez, 2016).

2.4.2. Humedad

Es el contenido acuoso que se encuentra en una sustancia. En el cual la humedad afecta el desarrollo de transformación energética de la biomasa. La biomasa con un contenido de humedad bajo del 50 - 60 % se puede utilizar para generar calor mediante combustión. Gran parte de las conversiones de energía, es esencial que la biomasa no supere el 30% de humedad (Drosg, 2013). En una humedad superior al 50% se sugiere que los residuos orgánicos se utilicen como fuente de energía a través de procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaerobia (Braun, 2013).

2.4.3. Relación carbono – nitrógeno (C:N)

Representa unidades de carbono por unidad de nitrógeno que tiene el material. De ser elevada (40:1), el nitrógeno se empleará por los metanógenos aceleradamente formando proteínas sin responder con el resto de sustancias, por lo que el biogás producido será bajo. Un buen grado será de 9:1 a 25:1, posibilitando mejores funcionamientos en los procesos digestivos que realizan los organismos (Avalos, 2012).

Tabla 5. Relación C:N para varios tipos de residuos

Residuos	C:N	Residuos	C:N
Agua Residuales	11 : 1	Paja de Maíz	112 : 1
Corteza de café	53 : 1	Habichuelas sobrantes	24 : 1
Cáscara de fruto de Cacao	38 : 1	Tomates	13 : 1
Hojas de yuca	12 : 1	Éstiercol de caballo	25 : 1

Fuente: Apolo, 2013.

2.4.4. Tiempo de retención hidráulica

Este es el tiempo (en días) que el material permanece en el digestor y es el tiempo que tarda en descomponerse la materia orgánica a la temperatura de funcionamiento del digestor. Los tiempos de retención típicos para la eliminación de desechos oscilan entre 10 y 30

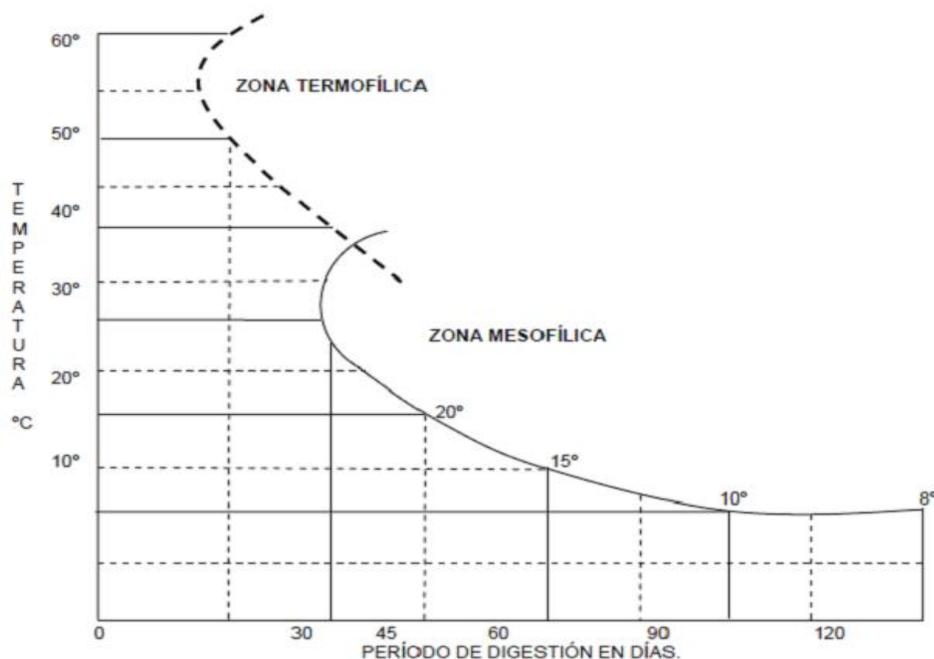
días, pero pueden verse afectados por una variedad de circunstancias: volumen del inhibidor, modelo de dilución utilizada y temperatura (Zambrano, 2021).

2.4.5. Potencial de Hidrógeno (pH)

Nos permite describir la fase que se está desarrollando. Las bacterias involucradas en el proceso de digestión anaeróbica se encuentran entre los valores de 6 a 8, con valores cercanos a 7 un desarrollo adecuado (López, 2008). Resulta primordial mantenerse dentro de los valores esperados sin descender, ya que los microorganismos metanogénicos no pueden desarrollarse correctamente cuando el pH baja de 6, lo que resulta en la generación de gas bajo, resaltándose una capacidad amortiguadora insuficiente dentro del reactor (Valdez, 2016).

2.4.6. Temperatura

Viene a ser un factor influyente en el proceso digestivo, dado que las enzimas son alteradas por su desarrollo, en donde la aceleración de descomposición cambia. Los cambios de temperatura causan variaciones en la obtención de metano (CH_4) pudiendo afectar el crecimiento microbiano (Montenegro, 2016).



Fuente: Montenegro, (2016)

Figura 2. Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia

Hay niveles de temperatura, como se muestra en la Tabla 6, en los que los microorganismos anaerobios pueden estar activos (Ruiz, 2015).

Tabla 6. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Microorganismos anaeróbicos	Rangos de temperatura			Tiempo de fermentación
	Bajo	Óptimo	Alto	
Psicrofílica	4 - 10°C	15 - 18°C	20 - 25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15 - 20°C	25 - 35°C	35 - 45°C	30 - 60 días
Termofílica	25 - 45°C	50 - 60°C	75 - 80°C	10 - 15 días

Fuente: Ruiz, 2015.

2.4.7. Contenido de agua en la mezcla

A cantidades de agua mínimas el biogás a producirse será bajo por lo tanto todos los microorganismos presentes no se desarrollarán con eficacia. La cantidad de agua varía según las materias primas destinadas a la digestión. La combinación de estiércol y agua requeridas en la obtención de biogás se probaron en escalas pequeñas para obtener un biogás de gran medida, que es 1:1, 1:3 y 1:5, y de utilizarse estiércol y residuos agrícolas como fuente para la descomposición, la proporción de biomasa: el agua debe estar entre 1:1 y 1:2 (Engler, 2019).

2.5. Biogás

Es el resultado de la transformación de sustancias orgánicas por medio de microorganismos en un ambiente húmedo sin oxígeno. Dependerá de la temperatura, el material a utilizarse y el periodo que tarda en descomponerse (Avalos, 2012). Cuanto mayor sea la temperatura, más rápida será la descomposición, lo que significa que se necesita menos tiempo para el material.

2.5.1. Características del biogás

Resultante de la digestión anaerobia y contiene del 50 al 80 % en volumen de metano (CH₄), del 20 al 50 % de CO₂ y una pequeña cantidad de H₂S, una mezcla que puede el entorno (Ávalos, 2012). Se detalla con precisión en la Tabla 7.

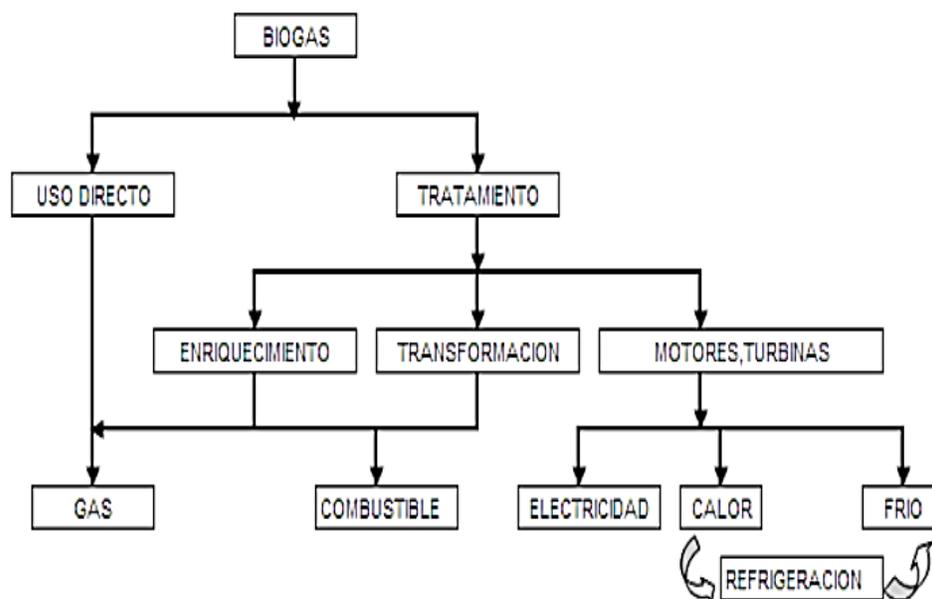
Tabla 7. Composición del biogás

Sustancias	Proporciones (%)
Metano	50 - 80
Dióxido de carbono	20 - 50
Agua	Saturado
Nitrógeno	0 - 1
Oxígeno	0 - 1
Compuestos orgánicos	Trazas

Fuente: Engler (2019)

2.5.2. Aplicación del biogás

Se utiliza para generar electricidad o calor en calderas en: automóviles, calefacción directa y generación de electricidad; siendo de esta manera una causa de energía sustentable, utilizado como material relacionado al gas natural licuado o el metanol (Montenegro, 2016).

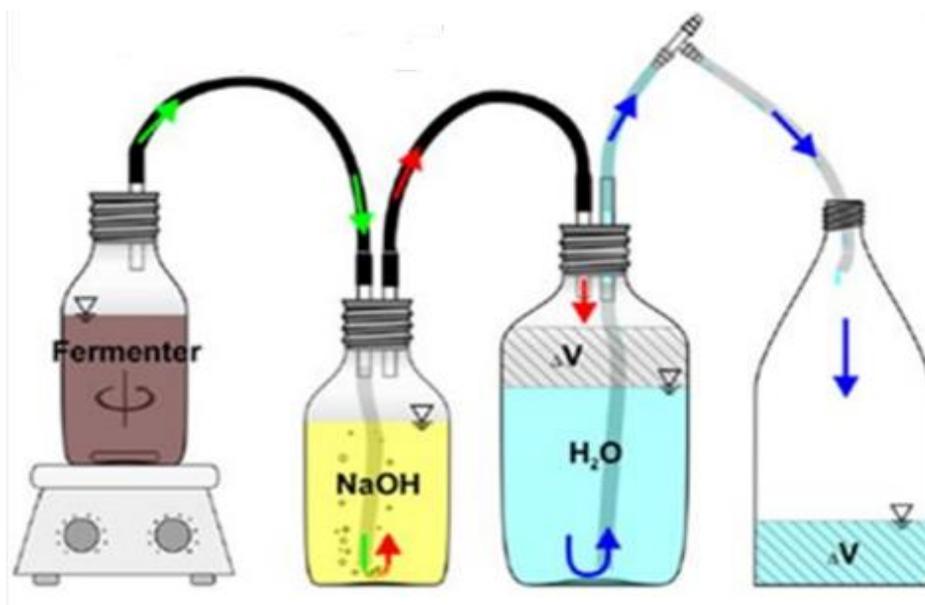


Fuente: Montenegro (2016)

Figura 3. Alternativas de uso del biogás.

2.5.3. Cuantificación de biogás y metano en laboratorio – Potencial Bioquímico de metano (PBM)

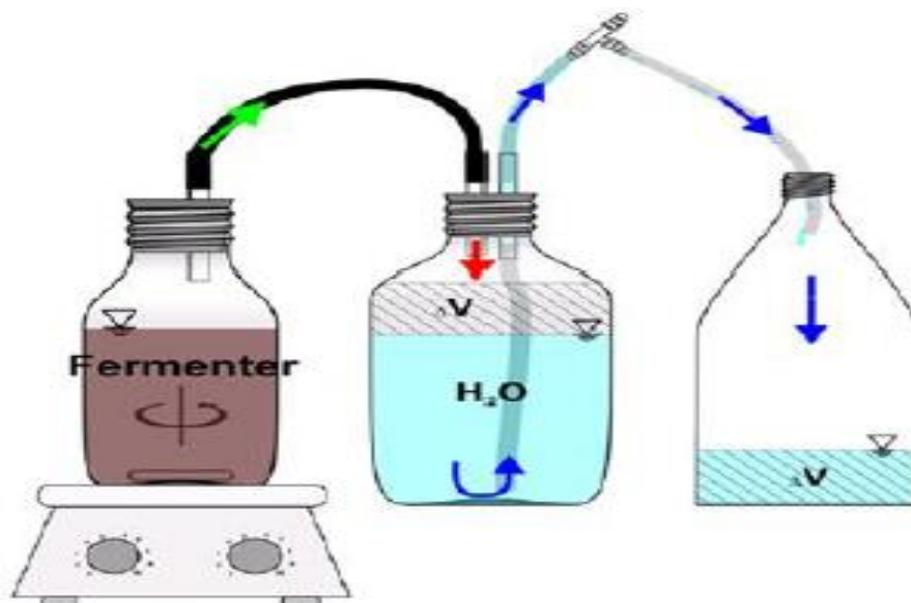
Esta prueba viene a ser un test para calcular la capacidad degradativa de un sustrato. Esta prueba permite la determinación del potencial de generación de metano de un sustrato particular mediante experimentación en laboratorio. Lo provechoso que resulta la prueba son la: evaluación del potencial de metano, facilidad de construcción e instalación, precio bajo de instalación, repetibilidad y reproducibilidad. Las pruebas estandarizadas de biodegradación anaeróbica se describen en DIN 38 414-8. (Lorber, 2014). Para cada muestra de materia prima, la prueba se realizará tres veces. Si las pruebas de PBM se realizan en múltiples muestras de materia prima, los blancos por triplicado son suficientes. Para realizar la prueba, se pesan el inóculo y la muestra a utilizarse y se vierten en un recipiente de reacción de 500 a 1000 ml. Se utiliza un agitador imantado que sirve para la mezcla. Las botellas se colocan en baño maría. La mayor parte del gas generalmente se produce dentro de la primera semana. Después de 20 a 30 días, la biodegradación suele ser casi completa. Finalizando, se mide el pH en cada prueba, constatando si se ha producido ácidos o si la solución alcalina ha regresado al recipiente de digestión causa de la presión negativa. De ser necesario se repite la prueba (Drosg, 2013).



Fuente: Lorber (2014)

Figura 4. Instalación experimental simplificada para determinar el potencial bioquímico de metano

La instalación que se muestra es donde el metano puede ser medido. Para el biogás a medirse el sistema es similar, pero el recipiente de solución alcalina debe retirarse del sitio de prueba; Asimismo, el agua del recipiente que se desplaza debe acidificarse en donde el CO_2 que se produce no pueda disolverse en el agua. En la siguiente figura, se observa la configuración experimental para la medición de biogás (Drosg, 2013).



Fuente: Drosg (2013)

Figura 5. Instalación experimental simplificada para determinar el potencial del Biogás

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de estudio

3.1.1. Ubicación política

Ubicado políticamente en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco, la tesis se desarrolló en el Laboratorio de Tratamiento y Calidad del Aire de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS),

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el laboratorio de tratamiento y calidad del aire está ubicado en las coordenadas $76^{\circ} 01' 00''$ longitud oeste y $09^{\circ} 18' 00''$, con altitud de 660 m.s.n.m., en la franja contigua Tingo María hoja 19-k presente en la carta nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN).



Figura 6. Mapa de ubicación del lugar de estudio

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales de Campo

Bidón de 20L, botella plástica de 10 L, balde de 20L, bolsas de fibra de plástico tejida, bolsa plástica 7 x 10, muestras (cáscaras de mazorca de cacao) y gallinaza, y notas de apuntes.

3.2.2. Materiales de Laboratorio

Matraz de Erlenmeyer 1L, piceta, 2 probetas graduadas (50 ml y 250 ml), embudo de vidrio, rallador metálico, guantes, mascarilla y guardapolvo.

3.2.3. Equipos de Laboratorio

Baño María (Thermo Lab), balanza electrónica (Patrick's), balanza de precisión (Highland HCB 302), balanza analítica (OHRUS) y un multiparámetro (Milwaukee Mi 180).

3.2.4. Reactivos

Agua destilada, ácido acético, anaranjado de metilo, agua destilada, anhídrido (K_2HPO_4), ortofosfato de potasio di hidrogeno anhídrido (KH_2PO_4), ortofosfato de potasio hidrogeno (dibásico) y thymolphthaleina

3.2.5. Materiales para el equipo

Botellas de vidrio de 1L (20 unidades), botellas de vidrio de 500 ml (cantidad 5 unidades), matraces de Erlenmeyer de 1L (cantidad 10 unidades), 3 probetas graduadas (50 ml, 250 ml y 500 ml), tapones de jebe (cantidad 25 unidades), tubos de vidrio, manguera de silicona transparente y etiquetas.

3.2.6. Software

Microsoft Word v. 2019, Microsoft Excel v. 2019, Microsoft PowerPoint v. 2019 y IBM SPSS Statistics 21.

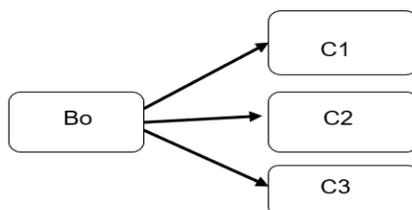
3.3. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación fue de tipo experimental, porque se manipuló la variable independiente (concentraciones de cáscara del fruto del cacao), midiéndose las variables dependientes (producción de biogás y metano) y finalmente comparándose con un testigo (ME de gallinaza). De esta manera se tuvo como unidades experimentales a 10 digestores anaeróbicos de 1L por cada tratamiento evaluado.

3.4. Variables en estudio

- a) **Variable independiente**
 - Cáscara del fruto de cacao (g)
- b) **Variable dependiente**
 - Producción de Biogás (ml)
 - Producción de metano (ml)
- c) **Variables intervinientes**
 - Relación Carbono – nitrógeno (C: N)
 - Humedad (%)
 - Potencial de Hidrógeno (Unidades)
 - Temperatura (°C)

3.5. Diseño experimental



Leyenda: [Po]: Biogás a producirse de la cáscara del fruto del cacao, [C1] Concentración de la cáscara del fruto del cacao 1, [C2]: Concentración de la cáscara del fruto del cacao 2, [C3]: Concentración de la cáscara del fruto del cacao 3.

Figura 7. Diseño de la investigación

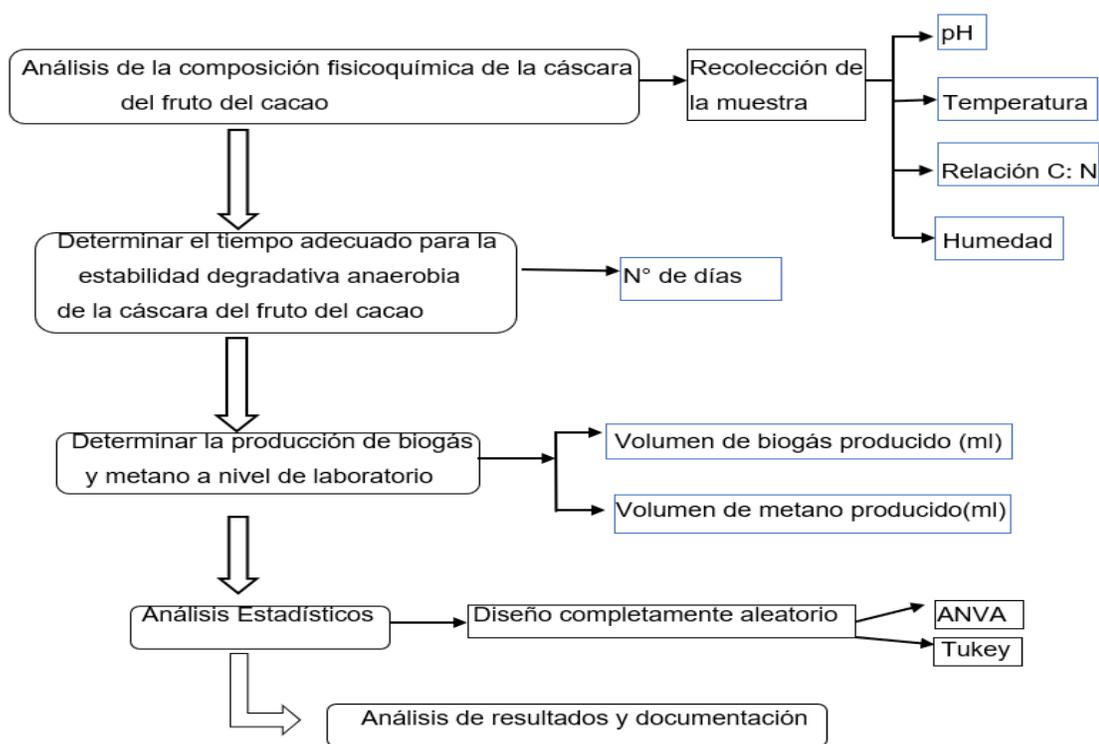


Figura 8. Flujograma de investigación

3.6. Diseño estadístico

Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de comportamiento normal y homogeneidad de datos. Se distribuyó cada tratamiento según el modelo estadístico completamente al azar (DCA) contando con cinco repeticiones cada tratamiento. También, se efectuó un (ANVA) Análisis de Varianza para la prueba de hipótesis con un nivel de

significancia del 5%, en cada tratamiento y repeticiones. Finalmente, mediante la prueba Tukey se hizo un análisis de separación de medias, con el objetivo de verificar cuál de los tratamientos evaluados es el mejor (Badii et al., 2007).

3.7. Metodología

3.7.1. Fase de campo

3.7.1.1. Preparación de la carga microbiana

Para su preparación se extrajo 3 kg de gallinaza, ver en Anexos - Figura 20; la cual fue recolectada del corral de aves de la (UNAS) Universidad Nacional Agraria de la Selva, verificando que sea la más fresca que se tenga, previa autorización del encargado. Esta gallinaza se mezcló en un balde de 20L con agua a tope del volumen disponible, para luego ser llevadas a un bidón de 20L, previamente se exprimió con una tela para poder filtrar trozos grandes de la gallinaza. Adicional a la gallinaza se introdujo dentro del bidón: 1L de yogurt, 2 kg. de azúcar y 280 g de maicena en polvo para poder acelerar el crecimiento de los microorganismos, siendo completados el volumen restante del bidón con agua; dejando un espacio de 20 cm para no obstruir la salida del gas. Luego se selló herméticamente con la tapa de seguridad del propio bidón,

Finalmente, estas se conectaron a través de una manguera de silicona a una botella plástica de 10L que solo contiene agua para evitar el escape de gases y como indicador de que se están formando gases. El proceso de descomposición concluyó luego de 60 días.

3.7.1.2. Colecta de la cáscara del fruto del cacao

Se colectaron 20 frutos de cacao del tipo CCN-51, las cuales fueron traídas del fundo agrícola de la Universidad Nacional Agraria de la Selva; previa autorización del encargado. De las cuales se despulpó para quedarnos solo con la cáscara, para luego picarlo en trozos pequeños para sus análisis fisicoquímicos correspondientes en el laboratorio de análisis de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ver Anexos – Figura 22.

Para su uso en los respectivos biorreactores, se tuvo que rallar las cáscaras en un rallador metálico para que estas muestras sean homogéneas, ver Anexos - Figura 23.

3.7.2. Fase de Laboratorio

3.7.2.1. Análisis de los parámetros (pH, temperatura, humedad y relación C:N) de la cáscara del fruto del cacao

Fueron realizados en el Laboratorio de Tratamiento y Calidad del Aire y Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva con la supervisión de los encargados.

- **Potencial de Hidrógeno (pH) y Temperatura:**

Fue determinado a través del multiparámetro (Milwaukee Mi 180). Preparándose una solución acuosa consistente en una dilución 1:3 de muestra: agua, respectivamente. Luego se verificó que el instrumento esté calibrado de acuerdo con las recomendaciones, luego de lo cual se introduce un electrodo de vidrio en las muestras analizadas, lo que permite estabilizarlas y finalmente registrar el pH y la temperatura.

- **Relación carbono – nitrógeno (C:N)**

La determinación de la relación C:N de la cáscara de la mazorca del cacao y la gallinaza, se realizó mediante la combustión total de cada muestra a una temperatura aproximada de 1000°C, donde se produjeron compuestos como CO₂, H₂O y N₂ los cuales fueron separados y medidos por un detector de conductividad térmica que cuantifica cada compuesto y se utilizó la ecuación 2 (Varnero, 2011):

$$k = \frac{C1*Q1+C2*Q2+\dots+Cn*Qn}{N1*Q1+N2*Q2+\dots+Nn*Qn} \dots(2)$$

Donde: K = C:N de la mezcla de materias primas, C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima, N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima y Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

- **Humedad**

Se utilizó el método descrito en la NTP 251.010 (Ruiz, 2015) para determinar el contenido de humedad de la cáscara del fruto del cacao y gallinaza, incluyendo pesaje del residuo (Pha), secado en estufa a 103 ± 2 aproximación a peso constante y determinación de peso final (Psa) y se utilizó la siguiente ecuación 3:

$$Ch = \frac{(Pha - Psa)}{Pha} * 100 \dots (3)$$

Donde: Ch es el contenido de humedad expresado en porcentaje, Pha: es el peso del recipiente más la muestra húmeda y Psa: es el peso del recipiente más la muestra seca

- **Sólidos totales**

Se evaluó para una muestra de biomasa descompuesta tomando una muestra de biomasa fresca, que se seca en un horno a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h, eliminando así toda el agua presente en la muestra de biomasa. La materia seca obtenida y el contenido de sólidos totales se calcularon de acuerdo con la siguiente fórmula

$$St = \frac{(Ps)}{(Pf)} * 100 \dots (4)$$

Donde: St son los Sólidos Totales (%), Ps: es el peso seco (g) y Pf: Peso Fresco (g)

3.7.2.2. Montaje experimental

Estuvo compuesto por 10 modelos de biorreactores anaeróbicos a escala de laboratorio, en donde fueron usados botellas de vidrio de laboratorio de 1 litro. Fueron puestas en baño maría a 37°C , con la cual se controló la temperatura durante el tiempo que duren la pruebas. En donde se tuvieron dos medios de evaluación, una para el metano y la otra para el biogás. El sistema de medición para el metano, consistió en adicionar una segunda fila de botellas de 1L que contenían hidróxido de sodio (NaOH) a 3 molar con indicador de timolftaleína para proporcionar un pH de aproximadamente 12; sirve como purificador para eliminar el sulfuro de hidrógeno y otros gases. Posteriormente una tercera fila de botellas de 1L que contenían ácido

acético y anaranjado de metilo, la cual finalmente desplazó el líquido equivalente al metano producido a una cuarta fila de matraces de Erlenmeyer de 200 ml. Y para el sistema de medición de biogás, es similar a la medición de metano, excepto que solo hay una segunda fila de botellas de 1L que contenían ácido acético y anaranjado de metilo, la cual finalmente desplazó el líquido equivalente al biogás producido a una tercera fila de matraces de Erlenmeyer de 200 ml.

3.7.2.3. Determinación de la producción de biogás y metano a nivel de laboratorio

- Concentraciones de los tratamientos

Antes de preparación de los tratamientos, se consideró apartar un volumen del 25% (250 ml) en la parte de arriba la botella de vidrio (biorreactor) de 1L de capacidad, esto se debe a que el gas que se forma en esa parte del frasco. espacio como productos de la fermentación anaeróbica de las muestras. Luego, debido a que el pH del tratamiento fue más bajo de lo esperado, se agregó hidróxido de sodio (NaOH) a 3 molar hasta que el pH estuvo entre 6 y 8.5. Los tratamientos con 5 repeticiones cada una fueron distribuidas con las características que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Tratamientos a evaluarse

Tratamientos	Repeticiones	Cantidades utilizadas		Proporciones		
Tratamiento Testigo	5	200 ml de Microorganismo Eficientes (ME)	550 ml Agua Destilada	20% ME	55 % H ₂ O	
Tratamiento 1	5	200 ml (ME)	50 g de Cáscara de cacao	500 ml Agua Destilada	20% ME	5% Cáscara de cacao 50% H ₂ O
Tratamiento 2	5	200 ml (ME)	100 g de Cáscara de cacao	450 ml Agua Destilada	20% ME	10% Cáscara de cacao 45% H ₂ O
Tratamiento 3	5	200 ml (ME)	200 g de Cáscara de cacao	350 ml Agua Destilada	20% ME	20% Cáscara de cacao 35% H ₂ O

Para el tratamiento 1 compuesta por 20 % de inóculo, 50 % de agua y 5 % de cáscara de fruto de cacao

En la tabla anterior se puede apreciar las 5 repeticiones que se realizaron por cada tratamiento y las proporciones de las medidas usadas en las muestras. Cada tratamiento planteado analiza las condiciones de la mezcla de la carga microbiana obtenidos de la Gallinaza y Cáscara de cacao; teniendo en cuenta la influencia directa que tuvo la dosis planteada de Gallinaza como fuente de bacterias metanogénicas, responsables directos de la producción de biogás.

- **Determinación de biogás producido**

El biogás generado se midió con el desplazamiento de agua, con la excepción de que no se usaron las botellas de 1000 mL que contenían hidróxido de sodio, sino que se conectaron directamente desde el reactor con botellas de 1000 mL, las cuales contenían agua ácida con pH de 2 (naranja de metilo). El biogás resultante desplazó la misma porción de agua de la botella de depósito al final. Estas fueron recolectadas y el volumen de desplazamiento se midió diariamente hasta el final del periodo evaluado.

- **Determinación de metano producido**

El metano generado se midió con el desplazamiento de agua, aquí si se usaron las botellas de 1000 mL que contenían hidróxido de sodio, sumado a las botellas de 1000 mL que contenían agua ácida con un pH de 2 (naranja de metilo) y así de esta manera obtener el metano. El metano capturado desplazó una cantidad igual de agua a la botella de depósito al final. Estas fueron recolectadas y el volumen de desplazamiento se midió diariamente hasta el final del periodo evaluado.

- **Potencial bioquímico de metano (PBM)**

Se utilizó para determinar el potencial de producción de metano y biogás de la cáscara del fruto del cacao, calculado a partir del volumen de líquido desplazado durante la digestión anaeróbica, donde se normaliza el volumen. Este volumen corregido se divide por la masa de sólidos volátiles colocados en la digestión anaeróbica, como se muestra por las siguientes ecuaciones:

$$V_{cntp} = \frac{V_m * P_m * T}{T_m * p} \dots(5)$$

Donde: V_{CNTP} : volumen de gas en condiciones normales (mL), V_m : volumen de gas producido (mL), P_m : presión al medir gas metano (atm), p : presión atmosférica absoluta (1,0133 bar), T : absoluta temperatura (273,15 K) y T_m : temperatura de ensayo ($^{\circ}C + 273,15$ K).

$$PBM = \frac{V_{cntp}}{SV} \dots(6)$$

Donde: PBM: Potencial bioquímico de metano (m^3CH_4/Kg MS), V_{CNTP} : Volumen de metano en condiciones normales (m^3) y SV: Sólidos volátiles (kg MS).

3.7.2.4. Determinación del tiempo adecuado para la estabilidad degradativa anaerobia de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao* L.)

El tiempo de estabilidad se determinó mediante el día en el que finaliza la producción de biogás y metano.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Análisis de los parámetros (pH, temperatura, humedad y relación C:N) de la cáscara del fruto del cacao

Para el desarrollo del presente objetivo se tomaron en cuenta cuatro parámetros para determinar la composición fisicoquímica, las cuales se presentan a continuación los valores obtenidos luego de sus respectivos análisis realizados en laboratorio:

Tabla 9. Composición fisicoquímica de la cáscara del fruto del cacao

Parámetros	Valor
pH	5.31
T°	25.7
Humedad	75.38
Relación C/N	11.47

4.1.1. Potencial de Hidrógeno

Con un pH por debajo de 6.3 y por encima de 7.8, la cinética de la metanogénesis se reduce significativamente, por ello es vital que el pH se mantenga dentro de estos límites y no disminuya, ya que los metanógenos no pueden funcionar a valores de pH por debajo de 6, induciendo una baja producción de metano (Molina, 2002). Del resultado obtenido para este parámetro nos indica que tiene un valor de 5.31, por lo tanto, se encuentra por debajo de los límites; lo que nos dice que habrá una baja producción. Entonces para que haya una correcta producción de biogás en cada uno de los tratamientos se tuvo que adicionar el Hidróxido de Sodio y de esta manera se subió el pH dentro de los rangos establecidos.

4.1.2. Temperatura (T°)

Es un parámetro que tiene influencia significativa en la digestión anaeróbica, dado que modifica las funciones de las enzimas y por ende la velocidad de fermentación; estas fluctuaciones tienden a causar desequilibrio en la producción de metano (CH₄)

influyendo al crecimiento microbiano; entre 20 y 40°C la reacción no muestra cambios significativos (Foidl, 2008). Del resultado obtenido para este parámetro nos indica que tiene un valor de 25.7°C, por lo tanto, se encuentra entre los límites de una temperatura óptima influyendo de buena manera en el crecimiento de microorganismos anaerobios, y además de ello se resalta que en todos los tratamientos se usó el baño para climatizar de una manera uniforme la temperatura del proceso.

4.1.3. Humedad

La materia orgánica con un contenido de humedad superior al 50% se sugiere para la producción de energía en procesos bioquímicos como la fermentación o la digestión anaeróbica (Braun, 2013). Del resultado obtenido para este parámetro nos indica que tiene un valor de 75.38% la cual supera el rango establecido en la literatura, por lo tanto, la cáscara del fruto del cacao muestra un correcto porcentaje de humedad para su aprovechamiento en el proceso de digestión anaerobia.

4.1.4. Relación (C/N)

Con una relación elevada (40:1) de C:N, el nitrógeno tenderá a absorberse por los metanógenos de manera acelerada formando proteínas sin reaccionar con el resto de materiales, por lo que el biogás a producirse será lenta (tiende a volverse ácido). De igual forma, los niveles adecuados están de 9:1 a 25:1, posibilitando al organismo digerir mejor los alimentos (Diaz, 2002). Del resultado obtenido para este parámetro nos indica que tiene un valor de 11.47, encontrándose dentro del valor reportado en la literatura (9:1 y 25:1) por lo tanto nos indica de esta manera una producción rápida de biogás dentro del proceso de digestión anaerobia.

4.2. Determinación del tiempo adecuado para la estabilidad degradativa anaerobia de la cáscara del fruto del cacao (*Theobroma cacao L.*)

En esta investigación se puede ver que el biogás producido finaliza en el día 7 para el testigo, específicamente en su tercera repetición. Para el metano también se repite los 7 días en el tiempo de producción de biogás, específicamente en la segunda, cuarta y quinta repetición; la misma que se refleja en la figura 9.

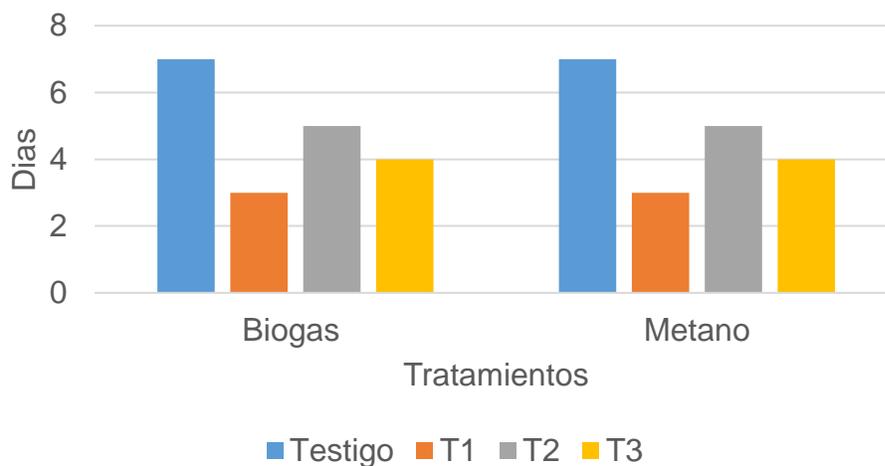


Figura 9. Tiempo de estabilidad del biogás y metano, en el testigo y los tres tratamientos.

Para el tratamiento 1 compuesta por 20 % de inóculo, 50 % de agua y 5 % de cáscara de fruto de cacao, el tiempo de estabilización de la degradación del biogás y el metano fue de 3 días. Para el tratamiento 2, que consiste en 20 % de inóculo, 45 % de agua y 10 % de cáscara de fruto de cacao, el tiempo de descomposición del biogás y el metano fue de cinco días. El tratamiento 3 consta de 20% de inóculo más 35% de agua y 20% de cáscara de fruto cacao se observa que el tiempo de estabilidad degradativa es de cuatro días para el biogás y metano. En la figura 10 se puede ver en días el tiempo en el finalizan las producciones, encontrándose la estabilidad degradativa anaerobia en todos los tratamientos, tanto para el biogás y metano, pudiéndose ver cambios en todos los tratamientos.

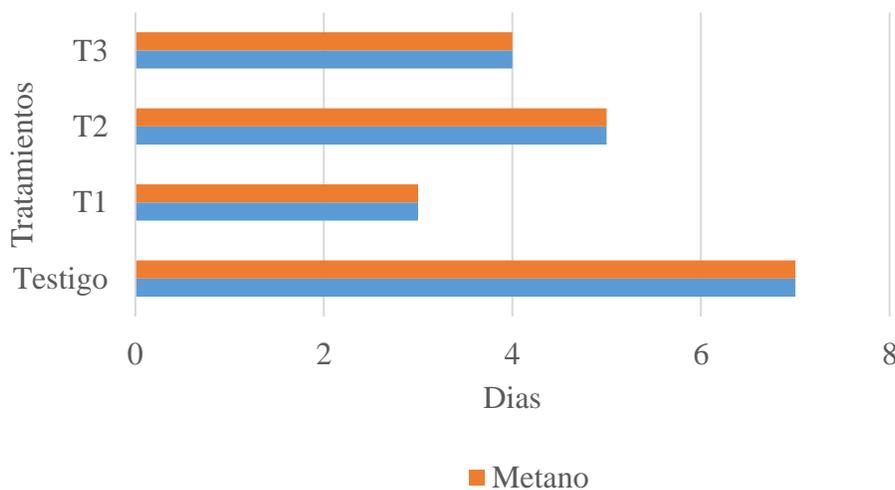


Figura 10. Tiempo de biogás y metano producido para el testigo y tratamientos.

Los tiempos típicos de estabilidad para la eliminación de desechos varían ampliamente según las fuentes a consultarse, entre 10 y 30 días, pero pueden verse influenciados por muchos factores, como la temperatura, el tipo de diluyente utilizado y la concentración de inhibidores (Aliaga, 2006). De nuestros resultados obtenidos tenemos lo siguiente: En el caso del testigo la producción de biogás se dio hasta los 7 días, la misma cantidad de 7 días en el metano producido. Para T1 el biogás producido se dio en menos días a comparación del testigo siendo en 3 días de igual forma para la producción del metano. Para T2 y T3 también se dio en menos días que el testigo, siendo 5 días para el biogás y metano producido en el tratamiento dos y finalmente 4 días para el biogás y metano producido en el tratamiento tres. Por lo tanto, los valores reportados mostrados no están dentro del rango de días establecidos anteriormente por otros autores, debido a que pudieron ser afectados por el contenido de sustancias inhibitoras en el proceso observándose una mayor aceleración en la degradabilidad de la materia orgánica, además de la composición fisicoquímica que presenta la cáscara del fruto del cacao.

4.3. Determinación de la producción de biogás y metano a nivel de laboratorio

4.3.1. Testigo

El biogás producido en este tratamiento control fue de 1765.6 ml que es 100 por ciento ya que no tiene que someterse a ningún proceso de segregación y para el metano producido es de 1242 ml, presentando una pureza de 70.34%. dado que este si fue sometido a un tratamiento previo de separación los mismos que se observan en la tabla 10.

Tabla 10. Producción de biogás y metano del testigo (gallinaza)

Elemento	Volumen (ml)	Pureza (%)
Biogás	1765.6	100
Metano	1242	70.34
Impurezas	523.6	29.66

Esta figura 11 muestra el biogás y metano acumulado producido durante los 7 días de producción, siendo el biogás producido el que muestra una mayor cantidad.

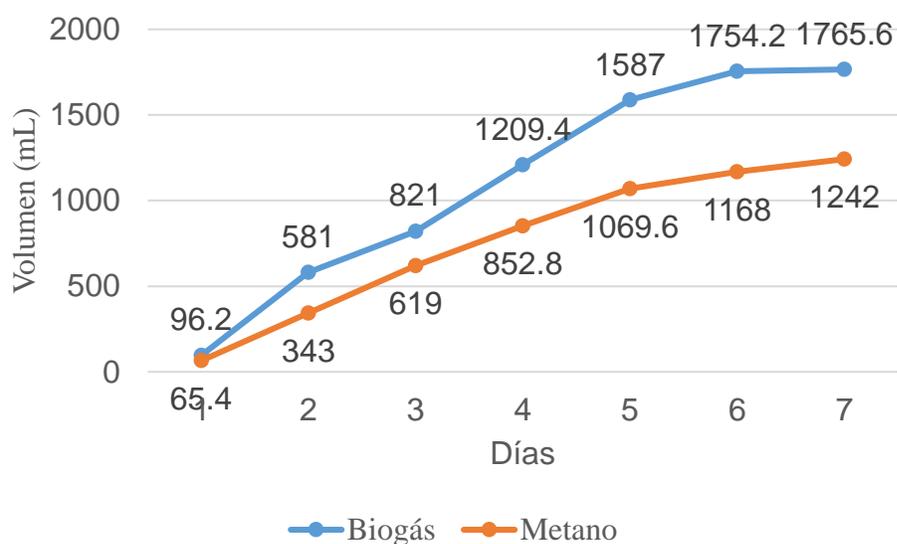


Figura 11. Producción acumulada de biogás y metano del testigo

4.3.2. Tratamiento 1

El biogás producido en este tratamiento fue de 418 ml que es el 100 por ciento ya que no tiene que someterse a ningún proceso de segregación y para el metano producido es de 262.8 ml, presentando una pureza de 62.87 % dado que este si fue sometido a un tratamiento previo de separación; los mismos que se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Producción de biogás y metano del tratamiento 1

Elemento	Volumen (ml)	Pureza (%)	PBM
Biogás	418	100	0.0264
Metano	262.8	62.87	0.0172
Impurezas	155.2	37.13	0.0092

Esta figura 12 muestra el potencial de producción por día de biogás y metano del primer tratamiento, las cuales empiezan desde el primer día para luego ascender hacia el

segundo y tercer día. Siendo $0.0264 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgST}$ en el biogás y $0.0172 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgST}$ en el metano en su tercer y último día de producción.

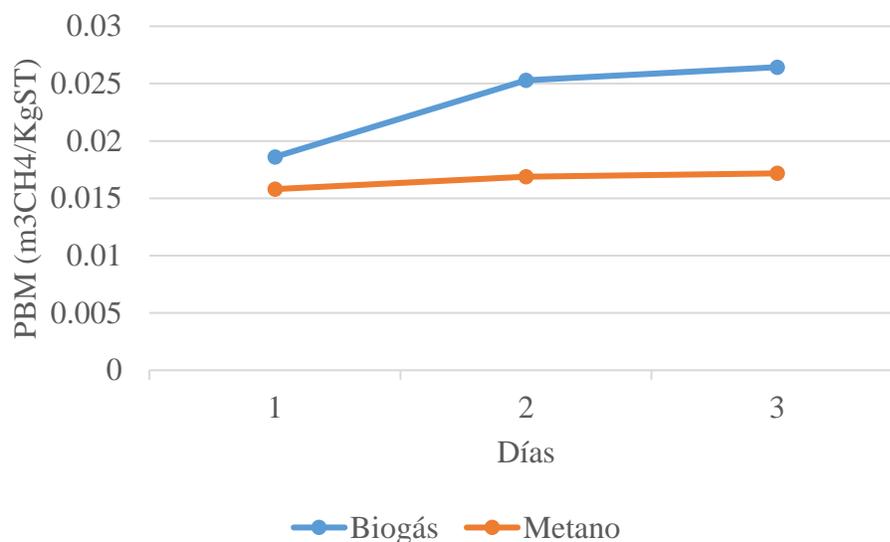


Figura 12. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 1

4.3.3. Tratamiento 2

El biogás producido en este tratamiento fue de 1107.6 ml que es el 100 por ciento ya que no fue sometido a ningún proceso de segregación y para el metano producido es de 756 ml, presentando una pureza de 68.26 % dado que este si fue sometido a un tratamiento previo de separación; los mismos que se observan en la tabla 12.

Tabla 12. Producción de biogás y metano del tratamiento 2

Elemento	Volumen (ml)	Pureza (%)	PBM
Biogás	1107.6	100	0.1516
Metano	756	68.26	0.0961
Impurezas	351.6	31.74	0.0555

Esta figura 13 muestra el potencial de producción por día de biogás y metano del segundo tratamiento, las cuales empiezan desde el primer día para luego ascender hacia el quinto día tanto para el biogás y metano. Siendo $0.01516 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgST}$ en el biogás y $0.0961 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{KgST}$ en el metano en su quinto y último día de producción.

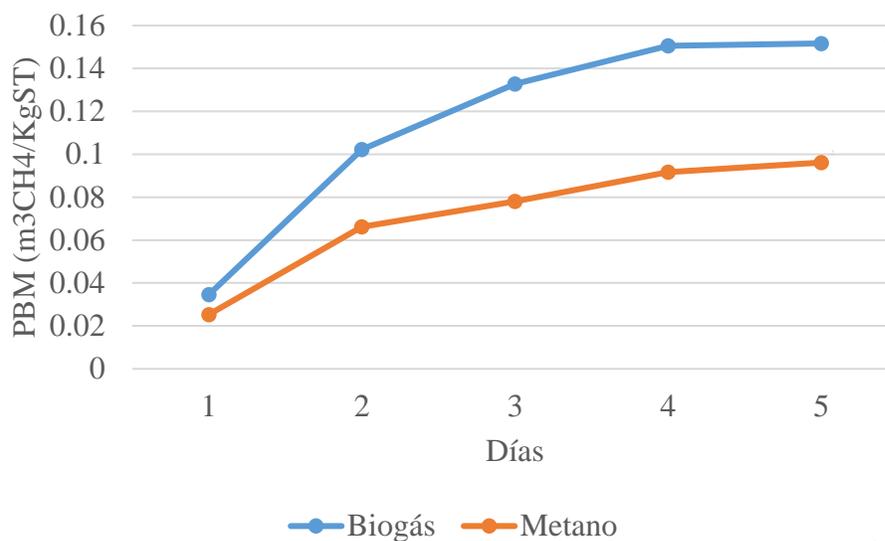


Figura 13. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 2

4.3.4. Tratamiento 3

El biogás producido en este tratamiento fue de 844.8 ml, que es el 100 por ciento ya que no fue sometido a ningún proceso de segregación y para el metano producido es de 713.2 ml, presentando una pureza de 84.42 % dado que este si fue sometido a un tratamiento previo de separación, los mismos que se observan en la tabla 13.

Tabla 13. Producción de biogás y metano del tratamiento 3

Elemento	Volumen (ml)	Pureza (%)	PBM
Biogás	844.8	100	0.1040
Metano	713.2	84.42	0.0579
Impurezas	131.6	15.58	0.0461

Esta figura 14 muestra el potencial de producción por día de biogás y metano del tercer tratamiento, las cuales empiezan desde el primer día y van subiendo hasta el cuarto día tanto para el biogás y metano. Siendo 0.01040 m³CH₄/KgST en el biogás y 0.0579 m³CH₄/KgST para el metano en su cuarto y último día de producción.

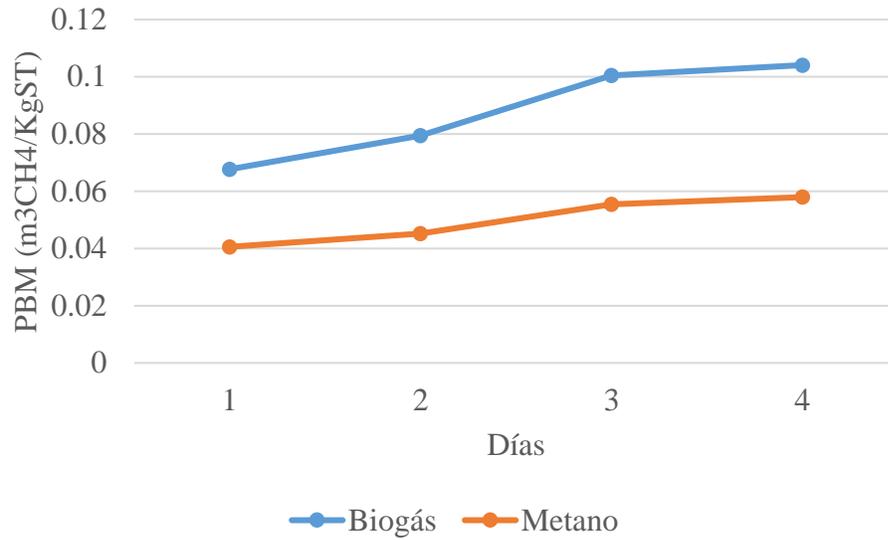


Figura 14. Potencial de producción de biogás y metano para el tratamiento 3

El tratamiento testigo es el que presenta la mayor cantidad de biogás y metano producido (1765.6 y 1242 ml respectivamente) siendo de este modo el que presenta la mayor cantidad de impurezas (523.6 ml) como se muestra en la figura 15.

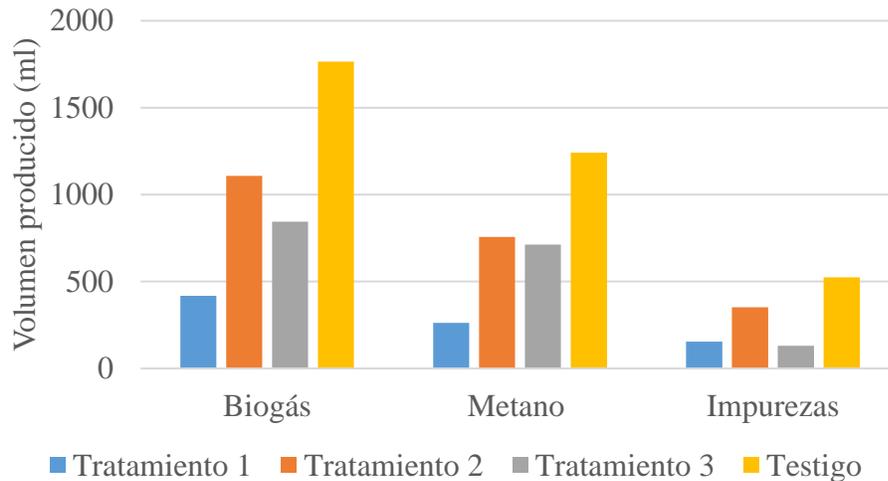


Figura 15. Composición de volúmenes de los gases por tratamientos

El tercer tratamiento es el que presenta el menor porcentaje de impurezas (15.58%) siendo inversamente proporcional en cuanto a su composición de metano, dado que es el de mayor porcentaje entre los tratamientos (84.42%). Asimismo, el primer tratamiento en

términos porcentuales (37.13%) es el que más impurezas presenta siendo también inversamente proporcional en cuanto a su composición de metano, dado que es el de menor porcentaje entre los tratamientos (62.87%); tal y como se aprecian en la figura 16.

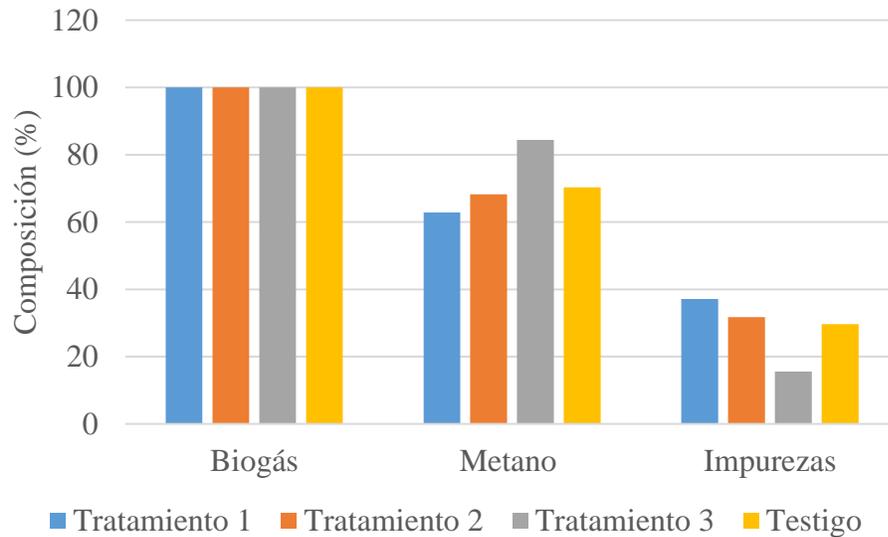


Figura 16. Composición de porcentajes de los gases por tratamientos

En la figura 17 se muestra la interacción de los potenciales de producción de metano entre los tratamientos 1, 2 y 3; viéndose que es el segundo tratamiento el que presenta un mejor potencial de metano producido (0.0961429 m³CH₄/KgST).

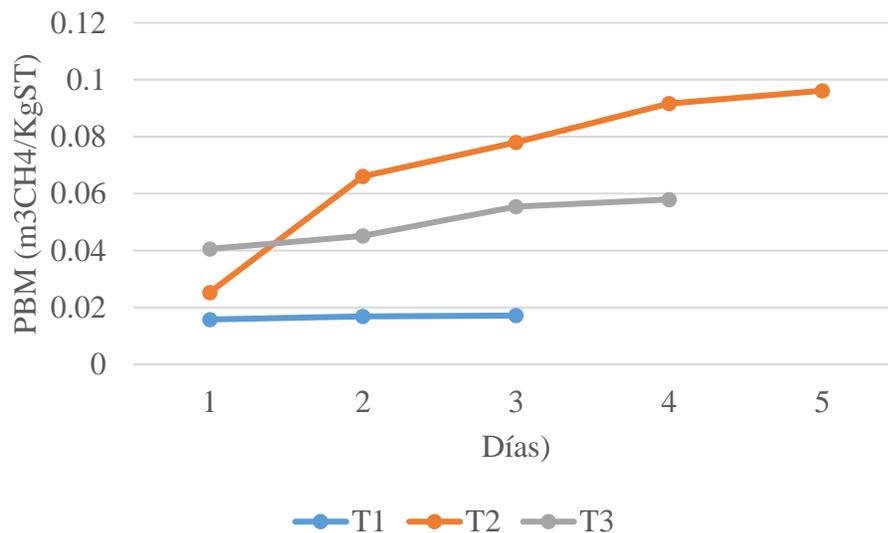


Figura 17. Potencial de producción de metano entre los tratamientos 1, 2 y 3

En la figura 18 se muestra la interacción de los potenciales de producción de biogás entre los tratamientos 1, 2 y 3; viéndose que es el segundo tratamiento el que presenta un mejor potencial de biogás producido (0.1516433 m³CH₄/KgST).

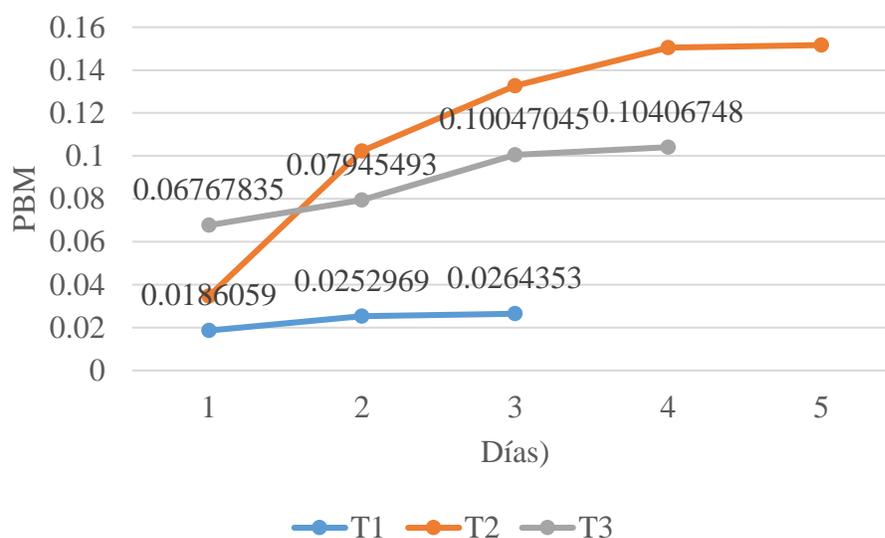


Figura 18. Potencial de producción de biogás entre los tratamientos 1, 2 y 3

Y por lo tanto el segundo tratamiento es donde se presentan los mayores potenciales de producción tanto para el biogás y metano (0.1516 y 0.0961 m³CH₄/KgST respectivamente) y en el primer tratamiento es donde se presentan los menores potenciales tanto para el biogás y metano (0.0264 y 0.0172 m³CH₄/KgST respectivamente) como se muestra en la figura 18.

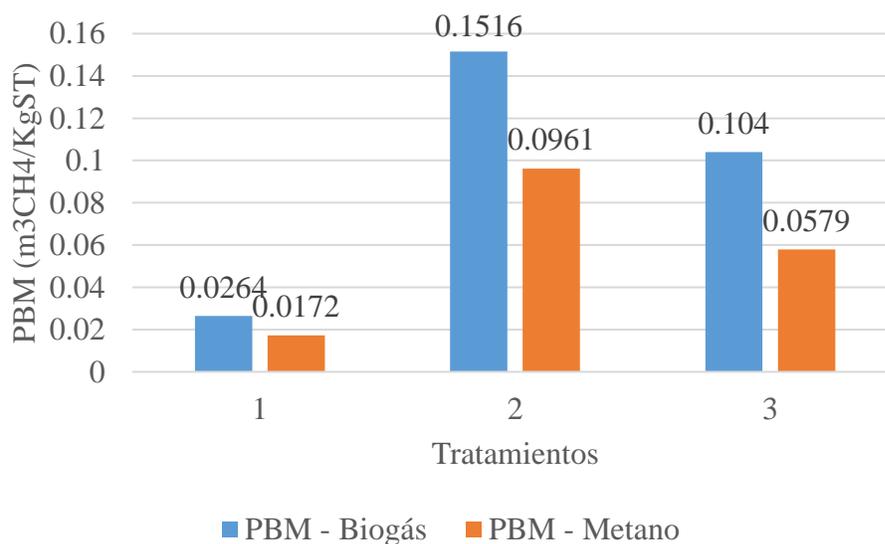


Figura 19. Cambios en el potencial bioquímico de metano por tratamientos

(Méndez *et al.*, 2021), menciona que el tratamiento con cáscara del fruto del cacao Nacional 20 por ciento (T6) presentó el mayor contenido 1297,66 mL, continuado con el tratamiento con cáscara de mazorca de cacao CCN-51 20 por ciento (T1) con 1024,66 mL, en la cual se utilizó un inóculo a partir de un fermentador anaeróbico activo con estiércol de vaca; en donde para esta investigación se usó el cacao CCN-51 y como inóculo la gallinaza o estiércol de gallinaza, encontrándose un valor de producción de biogás superior de 1107.6 ml en el segundo tratamiento, debido al inóculo en su biodigestión dado que la gallinaza presenta mejores características fisicoquímicas que el estiércol de vaca, permitiendo un mejor desarrollo del proceso de digestión anaerobia vital para la producción de biogás.

(Antwi *et al.*, 2019) precisa que se analizaron la digestión anaeróbica, mostrando que los restos de las mazorcas de cacao presentan un potencial de biogás de 0.0357 m³CH₄/kgST y un contenido de metano del 55%; en donde en esta investigación el mayor valor de potencial de biogás fue de 0.152 m³CH₄/kgST y un contenido de metano del 68.26 %, apreciándose de esta forma una mejor calidad de biogás dado que a mayor porcentaje de metano mejor será su calidad.

Asimismo, se aprecia una diferencia significativa en cuanto al testigo y los demás tratamientos dado que el valor de producción de biogás fue de 1765.6 ml, esto debido a que el testigo fue solo de gallinaza y agua sin la cáscara de la mazorca del cacao y por ello por sí solos los microorganismos al ser un principio de aceleración en el proceso de digestión anaeróbica son capaces de producir en abundancia sin tener un sustrato, muchas veces que al tener el sustrato diferentes composiciones son las que desaceleran la producción de biogás.

4.4. Análisis Estadístico

4.4.1. Prueba de Normalidad (Shapiro - Wilk)

Es un test estadístico que se aplicó para determinar si los datos sobre la producción de biogás (ml), las cuales fueron extraídas aleatoriamente del conjunto de datos, pueden seguir un modelo de probabilidad ajustado a una distribución normal. Como se puede observar en la tabla 14, el valor-P entre las pruebas realizadas es mayor que 0.05, por lo tanto, se

procede a aceptar la hipótesis de que los datos sobre la producción de biogás (ml) cuentan con una distribución normal, con un 95% de confianza.

Tabla 14. Prueba de Normalidad Shapiro Wilk

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadística Shapiro - Wilk	0.953	0.416

4.4.2. Prueba de Homogeneidad de varianzas (Levene)

Es un test estadístico que se aplicó para verificar el supuesto de homogeneidad de varianzas de los cuatro tratamientos para la producción de biogás. Como se puede observar en la tabla 15, el valor-P entre las demostraciones hechas es menor a 0.05, por lo tanto, se procede a aceptar la hipótesis en donde los cuatro tratamientos evaluados no presentan varianzas iguales, con un 95% de confianza.

Tabla 15. Prueba de Homogeneidad de Varianzas

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadística de Levene	3.848	0.03

4.4.3. Análisis de Varianza

El análisis de varianza que se presenta en la tabla 16 muestra que la razón - F es igual a 5.159. Dado que el valor - P (0.024) de la prueba F es inferior a 0.05, nos dice que hay una desigualdad estadísticamente significativa en medio de las medias de la producción de biogás (ml) entre cada tratamiento con un 95% de confianza. Por lo tanto, hay evidencia estadística de que al menos uno de los tratamientos presenta una diferencia significativa entre las diferentes concentraciones preparadas por tratamiento.

Tabla 16. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	20013.333	2	10006.667	5.159	.024
Intra-grupos	23275.600	12	1690.650		
Total	43288.933	14			

4.4.4. Prueba de Tukey

En la tabla 17 se muestra la comparación múltiple en donde se establece que entre cada par de medias se han estimado valores que son significativamente diferentes entre sí, por lo que cada asterisco junto a dos pares indica que ambos presentan una diferencia estadísticamente significativa en un nivel de confianza del 95%.

Tabla 17. Comparación de la significancia según prueba de Tukey

Contraste	Sig.	Diferencia	Límite Inferior	Límite superior
T1 – T2	*	-82.000	-156.31	-7.69
T2 – T1	*	82.000	7.69	156.31

* La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05

Por medio de esta prueba estadística se determinó cuál de las medias calculadas de cada tratamiento evaluado llegaron a ser significativamente diferentes que otras, determinándose por la conformación de un par de grupos iguales según la alineación X's en las columnas. De esta manera no hay diferencias estadísticamente significativas entre los niveles que compartan una misma columna de X's, por lo tanto, hay un riesgo del 5.0% de afirmar que el tratamiento 1 es diferente significativamente al tratamiento 2; como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Prueba de Tukey

Tratamiento	Repeticiones	Media	Grupos iguales	
I	5	139.40	X	
2	5	221.40		X
3	5	211.40	X	X

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

V. CONCLUSIONES

1. Se determinó que se produjo biogás desde la cáscara del fruto del cacao. El segundo tratamiento fue el de mayor producción de biogás acumulado (1107.6 ml) y un potencial (0.1516 m³CH₄/kgST), siendo en una proporción 2:1 (inóculo: muestra) la más adecuada.
2. Se analizaron los parámetros fisicoquímicos de la cáscara del fruto del cacao, en donde se obtuvo para el pH: 5.31, temperatura: 25.7°C, humedad: 75.38, relación C/N: 11.47.
3. El tiempo adecuado para la para la estabilidad degradativa anaerobia de la cáscara de la mazorca del cacao en los digestores usados, fue de 5 días dado que es en el tratamiento 2 en donde se observó una mayor producción de biogás y metano.
4. De los resultados en todos los tratamientos hubo producción de biogás y metano, en donde se obtuvo mayor producción fue en el segundo tratamiento (1107.6 ml) y un potencial (0.1516 m³CH₄/kgST) para el biogás y para el metano (756 ml) con un potencial (0.0961 m³CH₄/kgST).

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- 1.** Usar siempre muestras frescas, ya que los microorganismos que realizan el proceso de digestión son anaerobios, y si se tiene una prolongada exposición al ambiente se tiende a limitar el número de microorganismos presentes.
- 2.** Mezclar las muestras de cáscara del fruto del cacao con una base que dé alcalinidad (Bicarbonato sódico, cal, entre otros) llevándolas a un pH neutro (7) para que de esta manera inicie adecuadamente el proceso.
- 3.** Usar otros tipos sustratos a diferencia de la cáscara del fruto del cacao para ver si es que también es posible la producción de biogás.
- 4.** Llevar desde esta escala piloto o laboratorio hacia una escala del tipo industrial para que de esta manera se pueda ofrecer beneficios a la población.

VII. REFERENCIAS

- Antwi, E., Engler, N., Nelles, M., Schüch, A. (2019). Anaerobic digestion and the effect of hydrothermal pretreatment on the biogas yield of cocoa pods residues. *Management*, 88: 131-140. [En Línea]: Science Direct, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301667#:~:text=The%20result%20show%20that%20untreated,resulted%20in%20lower%20biogas%20yield.,> 18 de Noviembre 2021)
- Apha. Awwa. Wpcf. (2012). Métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales. Edición 22. Asociación Americana de Salud Pública, Washington. 1265 pp.
- Apolo, A (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo. [En Línea]: Repositorio Universidad San Francisco de Quito, (<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4768>, tesis, 11 de Febrero 2019)
- Avalos, V. (2012). Energías Renovables y las oportunidades del Biogás en Chile. Seminario Energías Renovables para el Sector Agroalimentario: Las oportunidades del biogás. Santiago, Chile. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. 28 p.
- Caceres, O. (2019). Potencial de la pulpa de *Coffea arabica L.* para la producción de metano, biol y biosol a nivel de laboratorio – UNAS. [En Línea]: Repositorio UNAS, (<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1672>, tesis de maestría, 5 de Mayo 2021)
- Castillo, G. (2012). Evaluación de codornaza y gallinaza de granjas avícolas para la producción de biogás y bioabono mediante digestión anaeróbica. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Drosg, B., Braun, R., Bochmann, G., (2013). Análisis y caracterización de materias primas de biogás. Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida. Austria

- García, A. y Gómez, J. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos Vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. [En Línea]: Repositorio, (<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>, Repositorio Universidad de América, 10 de Agosto 2021)
- Lorber, G. (2014). Batch Test - Norma estandarizada DIN 38414-8. 14 p
- Méndez, J., Zambrano, F., Ponce, W. (2021). Metanización de la biomasa residual de dos variedades de cacao y caracterización nutricional del sustrato. Instituto de Posgrado, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador. [En Línea]: Revista Biotempo, (<https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/view/4318>, Biotempo, 13 de Setiembre 2021)
- Montenegro et al. (2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. [En Línea]: Revista ION, (http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120100X2016000200023#:~:text=Cundinamarca%20tiene%20un%20potencial%20promedio,a%20trav%C3%A9s%20de%20proceso%20anaerobio, Scielo, 7 de Setiembre 2021)
- Paucar, L. (2015). Producción y evaluación de la calidad del biogás y biol en un biodigestor usando estiércol de codorniz de la Granja V.A. Velebit S.A.C. ubicada en el distrito de Lurigancho – Chosica. [En Línea]: Library, (<http://1library.co/document/yd2mmwjq-produccion-evaluacion-biodigestor-estiercol-velebit-distrito-lurigancho-chosica.html>, tesis, 2 de Setiembre 2021)
- Ruiz, J. (2015). Potencial energético de los residuos sólidos de caña (*saccharum officinarum* l) y cacao (*theobroma cacao* l) en las provincias de padre abad y coronel portillo, Región Ucayali; 2015. [En Línea]: Repositorio UNU, (<http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/2219/000002061T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, tesis, 12 de Febrero 2019)

- Sanchez, J. (2013). Evaluación Energética de Cáscaras de Cacao Nacional y CCN-51. [En Línea]: Universidad de Cuenca, (<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4508/1/tesis.pdf>, tesis de maestría, 10 de Febrero 2019)
- Valdez, B. (2016). Evaluación de la calidad de biogás y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa. [En Línea]: Repositorio Institucional La Molina, (<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2009>, tesis, 6 de Setiembre 2021)

ANEXOS

Apéndice 1. Tablas

Anexo A. Parámetros pH y T° al inicio y al final de los tratamientos

Tabla 19. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

testigo para el biogás

	pH Inicio	T° Inicio	pH ultimo día	T° ultimo día
B0 - R1	7.31	26.8	4.51	25.9
B0 - R2	7.08	27	4.33	26.4
B0 - R3	7.25	26.9	4.38	25.8
B0 - R4	7.51	26.9	4.36	25.8
B0 - R5	7.73	26.9	4.40	25.7

Tabla 20. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

testigo para el metano

	pH Inicio	T° Inicio	pH ultimo día	T° ultimo día
M0 - R1	7.05	26.9	4.42	25.7
M0 - R2	7.25	26.9	4.32	25.9
M0 - R3	7.13	26.9	13.25	25.7
M0 - R4	7.10	26.9	6.26	25.9
M0 - R5	7.38	27.0	11.21	26.6

Tabla 21. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

1 para el biogás

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
B1 - R1	7.58	27.5	5.15	26.1
B1 - R2	7.33	27.3	5.30	26.1
B1 - R3	7.38	27.2	5.29	20.3
B1 - R4	7.75	27.3	5.52	26.4
B1 - R5	7.99	27.1	5.25	26.0

Tabla 22. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

1 para el metano

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
M1 - R1	7.72	27.2	5.73	25.9
M1 - R2	7.55	27.1	13.48	25.9
M1 - R3	7.93	27.1	13.42	25.9
M1 - R4	7.84	27.1	13.45	25.9
M1 - R5	7.61	27.0	12.47	25.8

Tabla 23. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

2 para el biogás

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo Día	T° Ultimo día
B2 - R1	7.22	27.5	5.88	25.0
B2 - R2	7.15	27.5	5.25	25.0
B2 - R3	7.12	27.3	5.00	25.4
B2 - R4	7.90	27.4	5.93	25.4
B2 - R5	7.20	27.5	5.99	25.3

Tabla 24. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

2 para el metano

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
M2 - R1	7.29	25.9	5.82	25.2
M2 - R2	7.17	25.9	13.01	25.2
M2 - R3	7.52	25.9	5.64	25.0
M2 - R4	7.70	25.9	5.70	25.0
M2 - R5	7.10	25.9	12.90	25.0

Tabla 25. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

3 para el biogás

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
B3 - R1	7.22	26.8	5.53	25.8
B3 - R2	7.29	26.6	5.37	25.9
B3 - R3	7.27	26.5	5.40	25.9
B3 - R4	7.20	26.5	5.29	24.7
B3 - R5	7.63	26.5	5.60	24.9

Tabla 26. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final de los tratamientos

3 para el metano

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
M3 - R1	7.16	26.4	5.48	25.0
M3 - R2	7.27	26.4	5.55	23.6
M3 - R3	7.42	26.4	5.40	25.1
M3 - R4	7.24	26.4	12.88	24.9
M3 - R5	7.58	26.4	5.14	24.9

Anexo B. Producción de biogás y metano

Tabla 27. Producción de biogás del testigo

Tiempo	Valor diario					Promedio	Acumulado
	R1	R2	R3	R4	R5		
1	73	100	105	125	78	96.2	96.2
2	328	475	624	542	455	484.8	581
3	221	245	220	255	259	240	821
4	342	450	290	462	398	388.4	1209.4
5	325	400	400	410	353	377.6	1587
6	135	132	229	164	176	167.2	1754.2
7	0	0	57	0	0	11.4	1765.6

Tabla 28. Producción de metano del testigo

Tiempo	Valor diario					Promedio	Acumulado
	R1	R2	R3	R4	R5		
1	60	59	58	70	80	65.4	65.4
2	279	444	229	196	240	277.6	343
3	214	309	287	229	341	276	619
4	180	255	200	246	288	233.8	852.8
5	244	210	182	215	233	216.8	1069.6
6	35	26	23	222	186	98.4	1168
7	0	7	0	206	157	74	1242

Tabla 29. Producción de biogás del tratamiento 1

Tie mpo	Valor diario					Promedio	Acumulado	Volumen Normalizado (ml)	Volumen Normalizado (m3)	ST (Kg)	PBM (m ³ CH ₄ /KgST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	300	288	266	360	257	294.2	294.2	356.7	0.00036	0.01917	0.0186059
2	155	80	90	140	64	105.8	400	485	0.000485	0.01917	0.0252969
3	0	16	27	34	13	18	418	506.8	0.000507	0.01917	0.0264353
4	0	0	0	0	0	0	418	506.8	0.000507	0.01917	0.0264353
5	0	0	0	0	0	0	418	506.8	0.000507	0.01917	0.0264353
6	0	0	0	0	0	0	418	506.8	0.000507	0.01917	0.0264353
7	0	0	0	0	0	0	418	506.8	0.000507	0.01917	0.0264353

Tabla 30. Producción de metano del tratamiento 1

Tiem po	Valor diario					Promedio	Acumulado	Volumen Normalizado (ml)	Volumen Normalizado (m3)	ST (Kg)	PBM (m ³ CH ₄ /KgST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	305	240	204	245	215	241.8	241.8	293.182	0.00029	0.01856	0.0157993
2	83	0	0	0	0	16.6	258.4	313.31	0.00031	0.01856	0.0168839
3	22	0	0	0	0	4.4	262.8	318.645	0.00031	0.01856	0.0171714
4	0	0	0	0	0	4.4	262.8	318.645	0.00031	0.01856	0.0171714
5	0	0	0	0	0	4.4	262.8	318.645	0.00031	0.01856	0.0171714
6	0	0	0	0	0	4.4	262.8	318.645	0.00031	0.01856	0.0171714
7	0	0	0	0	0	4.4	262.8	318.645	0.00031	0.01856	0.0171714

Tabla 31. Producción de biogás del tratamiento 2

Tie mpo	Valor diario					Prome dio	Acumu lado	Volumen Normaliz ado (ml)	Volumen Normaliz ado (m3)	ST (Kg)	PBM (m3CH4/ KgST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	217	307	268	245	226	252.6	252.6	306.2775	0.000306	0.00885	0.0345838
2	508	451	422	550	539	494	746.6	905.2525	0.000905	0.00885	0.1022182
3	405	0	0	253	455	222.6	969.2	1175.155	0.001175	0.00885	0.1326947
4	255	48	22	75	250	130	1099.2	1332.78	0.001332	0.00885	0.1504932
5	12	0	19	6	5	8.4	1107.6	1342.965	0.001343	0.00885	0.1516433
6	0	0	0	0	0	8.4	1107.6	1342.965	0.001343	0.00885	0.1516433
7	0	0	0	0	0	8.4	1107.6	1342.965	0.001343	0.00885	0.1516433

Tabla 32. Producción de metano del tratamiento 2

Tiem po	Valor diario					Prome dio	Acumula do	Volume n Normali zado (ml)	Volume n Normali zado (m3)	ST (Kg)	PBM (m3CH4/K gST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	132	216	189	173	285	199	199	241.287	0.00024	0.00953	0.0253074
2	293	329	286	336	360	320.8	519.8	630.257	0.00063	0.00953	0.0661046
3	134	127	208	0	0	93.8	613.6	743.99	0.00074	0.00953	0.0780334
4	110	154	203	70	0	107.4	721	874.212	0.00087	0.00953	0.0916918
5	0	0	40	135	0	35	756	916.65	0.00091	0.00953	0.096142
6	0	0	0	0	0	35	756	916.65	0.00091	0.00953	0.096142
7	0	0	0	0	0	35	756	916.65	0.00091	0.00953	0.096142

Tabla 33. Producción de biogás del tratamiento 3

Tiempo	Valor diario					Promedio	Acumulado	Volumen Normalizado (ml)	Volumen Normalizado (m3)	ST (Kg)	PBM (m3CH4/KgST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	695	604	410	438	600	549.4	549.4	666.1475	0.000666	0.00984	0.0676783
2	95	115	16	205	47	95.6	645	782.0625	0.000782	0.00984	0.0794549
3	222	28	310	193	100	170.6	815.6	988.915	0.000988	0.00984	0.1004704
4	0	44	46	28	28	29.2	844.8	1024.32	0.001024	0.00984	0.1040674
5	0	0	0	0	0	29.2	844.8	1024.32	0.001024	0.00984	0.1040674
6	0	0	0	0	0	29.2	844.8	1024.32	0.001024	0.00984	0.1040674
7	0	0	0	0	0	29.2	844.8	1024.32	0.001024	0.00984	0.1040674

Tabla 34. Producción de metano del tratamiento 3

Tiempo	Valor diario					Promedio	Acumulado	Volumen Normalizado (ml)	Volumen Normalizado (m3)	ST (Kg)	PBM (m3CH4/KgST)
	R1	R2	R3	R4	R5						
1	550	492	575	435	445	499.4	499.4	605.5225	0.0006055	0.01492	0.04057474
2	68	60	10	45	100	56.6	556	674.15	0.0006741	0.01492	0.04517331
3	100	185	57	105	184	126.2	682.2	827.1675	0.0008271	0.01492	0.05542668
4	27	60	33	24	11	31	713.2	864.755	0.0008647	0.01492	0.05794534
5	0	0	0	0	0	31	713.2	864.755	0.0008647	0.01492	0.05794534
6	0	0	0	0	0	31	713.2	864.755	0.0008647	0.01492	0.05794534
7	0	0	0	0	0	31	713.2	864.755	0.0008647	0.01492	0.05794534

Anexo C. Tratamiento Experimental sin carga microbiana con cáscara de cacao (100g) y agua (650 ml)

Tabla 35. Producción de biogás del tratamiento experimental

	1 DIA		Acumulado
	12 h	24 h	
BE - R1	365	415	780
BE - R2	315	550	865
BE - R3	320	490	810
BE - R4	300	600	900
BE - R5	330	418	748

Tabla 36. Producción de metano del tratamiento experimental

	1 DIA		Acumulado
	12 h	24 h	
ME - R1	300	440	740
ME - R2	370	192	562
ME - R3	330	393	723
ME - R4	320	205	525
ME - R5	385	214	599

Tabla 37. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final del tratamiento experimental para el biogás

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo Día	T° Ultimo Día
BE - R1	7.61	25.7	5.00	25.9
BE - R2	7.88	25.7	5.02	26.0
BE - R3	7.34	25.7	5.28	26.0
BE - R4	7.98	25.6	5.23	26.0
BE - R5	7.91	25.6	5.41	28.8

Tabla 38. Variación de los parámetros pH y T°, al inicio y final del tratamiento experimental para el metano

	pH Inicio	T° Inicio	pH Ultimo día	T° Ultimo día
ME - R1	7.75	25.6	5.42	26.0
ME - R2	7.63	25.6	5.26	26.0
ME - R3	7.57	25.1	12.61	26.6
ME - R4	8.33	25.6	5.70	26.6
ME - R5	7.61	25.7	12.49	26.6

Apéndice 2. Panel Fotográfico

Anexo A. Preparación de Inóculo



Figura 20. Muestra de gallinaza a prepararse para el desarrollo de la carga microbiana



Figura 21. Carga microbiana preparada

Anexo B. Cáscara de mazorca de cacao



Figura 22. Cáscara del fruto del cacao picadas en trozos



Figura 23. Cáscara del fruto del cacao ralladas

Anexo C. Preparación de los tratamientos a analizar



Figura 24. Pesado de la cáscara del fruto del cacao rallada



Figura 25. Insertamiento de las muestras pesadas en las botellas



Figura 26. Medición de cantidad a utilizarse de la carga microbiana



Figura 27. Insertamiento de la carga microbiana en las botellas



Figura 28. Medición de la cantidad de agua a utilizarse



Figura 29. Añadido del agua en las botellas



Figura 30. Estabilización de pH en cada uno de los biorreactores



Figura 31. Botellas listas a utilizarse para los tratamientos

Anexo D. Montaje experimental – Test Batch



Figura 32. Tratamiento testigo en funcionamiento

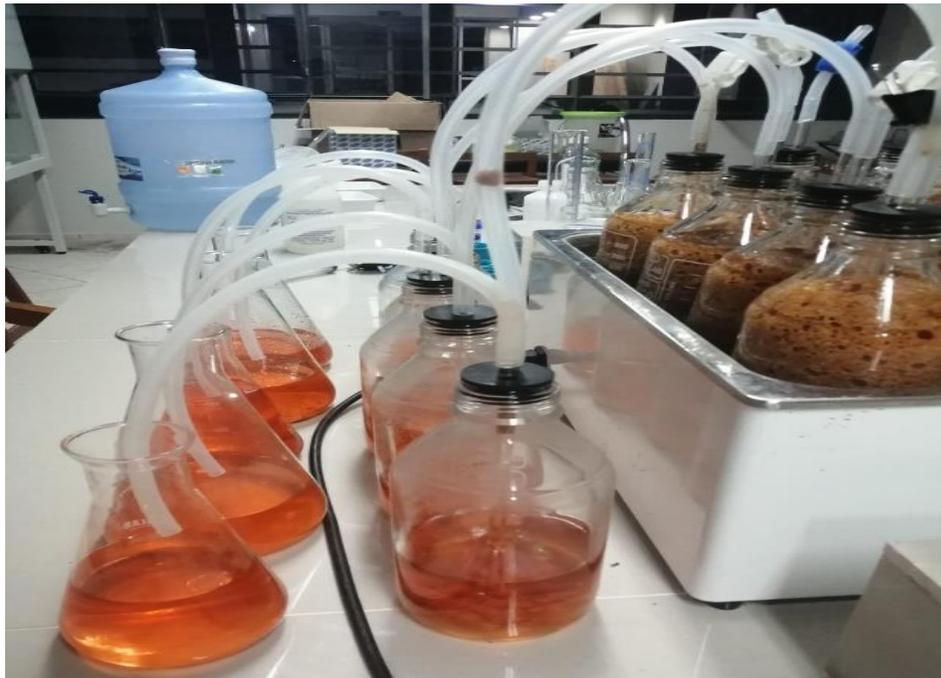


Figura 33. Sistema de medición para el biogás



Figura 34. Sistema de medición para el metano



Figura 35. Agitación previo a la medición de los volúmenes producidos



Figura 36. Medición del volumen producido en un tratamiento