

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE AGUAS
MIELES Y PULPA DE CAFÉ (*Coffea arabica*) EN EL
DISTRITO DE COPALLÍN, BAGUA – AMAZONAS, 2017.**

Autor: Bach. Olano Requelme, Edil

Asesor: Dr. Barrena Gurbillón, Miguel Ángel

Registro.....

CHACHAPOYAS – AMAZONAS – PERÚ

2018

AGRADECIMIENTO

A Dios; por darme la sabiduría suficiente para cumplir y hacer realidad un sueño infantil, que nació en busca de nuevas mejoras de calidad de vida personal y familiar.

A mis progenitores, quienes me dieron la vida, los valores y las enseñanzas que casi nunca se fugan de mi rutina diaria. Agradezco por todo el apoyo incondicional e indesmayable, por enseñarme que no todo en la vida es color de rosa; sino también el color que menos se lo espera. ¡Gracias Papá! ¡Gracias Mamá! ¡Gracias Familia!... Lo logramos!.

A todas las buenas personas por el apoyo humanístico, los tengo siempre presentes. No olvidaré de recompensarles porque también forman parte de este logro.

A todos los Maestros, al Asesor y Jurados, que formaron parte de mi formación profesional e integraron nuestra Gran Familia, por brindarnos las enseñanzas para emprender una nueva vida y enfrentar a este mundo globalizado competitivo, solucionando adversidades que nuestra vida cotidiana nos plantea.

Edil

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MAENDOZA DE AMAZONAS**

Dr. Policarpio Chauca Valqui

Rector

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Vicerrector Académico

Dra. Flor Teresa García Huamán

Vicerrectora de Investigación

Msc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

VISTO BUENO DEL ASESOR

EL docente de la UNTRM – A, Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, que suscribe hace constar que ha asesorado la tesis titulada:

Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (*Coffea arabica*) en el Distrito de Copallín, Bagua – Amazonas, 2017.

Realizada por el Bachiller en Ingeniería Ambiental: Edil Olano Requelme. Habiendo revisado el informe final de la tesis en mención doy la conformidad y el visto bueno para continuar con los trámites correspondientes, comprometiéndome a apoyar en el levantamiento de observaciones para su sustentación.

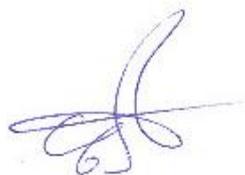
Chachapoyas, 07 de setiembre del 2018.



Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Asesor

JURADO EVALUADOR



Dra. Cástula Alvarado Chuqui

Presidente



Dr. Danilo Edson Bustamante Mostajo

Secretario



Msc. Gino Alfredo Vergara Medina

Vocal



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 30 de enero del año 2019, siendo las 12:30 horas, el aspirante: Edil Olano Piquelme

defiende públicamente la tesis titulada: PRODUCCION DE BIGGAS A PARTIR DE AGUAS MIELES Y PULPA DE CAFE (COFFEA ARABICA) EN EL DISTRITO DE COPALLIN - BAGUA - AMAZONAS, 2017

para optar el Título Profesional INGENIERO AMBIENTAL,

otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el

Jurado, constituido por: Presidente: Dra. CASTULA ALVARADO CHUGUI

Secretario: Dr. DANILO EDSON BUSTAMANTE MOSTAJO

Vocal: Msc. GINO ALFREDO VERGARA MEDINA



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideraran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente () Aprobado () No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 1:30 horas del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación de la tesis.

SECRETARIO

Daniilo Bustamante

PRESIDENTE

VOCAL

OBSERVACIONES:



ANEXO 2-0

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo, EDIL OLANO REQUELME, identificado con DNI 48303642.....
estudiante de la Escuela Profesional de
INGENIERIA AMBIENTAL de la Facultad de
INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL de la Universidad Nacional
Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor de la tesis titulada:

PRODUCCION DE BIOGAS A PARTIR DE AGUAS MIELES Y PULPA DE CAFE

La misma que presento para optar:

Título Profesional de Ingeniero Ambiental

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para LA UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

Chachapoyas, 07 de Febrero.....de 2019.


EDIL OLANO REQUELME

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL	ii
VISTO BUENO DEL ASESOR	iii
JURADO EVALUADOR	iv
ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS	v
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO	vi
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MATERIAL Y MÉTODOS	11
2.1. Diseño de la investigación	11
2.2. Material biológico	11
2.3. Métodos	12
2.4. Recolección de datos	17
2.5. Medición del volumen	17
2.6. Análisis de datos	17
III. RESULTADOS	18
3.1. Volumen de biogás	18
3.2. Análisis estadístico del volumen de biogás producido	20
IV. DISCUSIÓN	22
V. CONCLUSIONES	24
VI. RECOMENDACIONES	25
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
VIII. ANEXOS	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de beneficio húmedo del café	6
Figura 2. Resumen de las posibles aplicaciones de biogás.....	9
Figura 3. Material biológico de pulpa y agua miel de café.....	11
Figura 4. Agua de la quebrada Copallín y estiércol de ganado vacuno.....	12
Figura 5. Mapa de la ubicación del laboratorio experimental	12
Figura 6. Calibración de gasómetros	13
Figura 7. Construcción de laboratorio de campo	14
Figura 8. Biodigestores en el laboratorio de campo	14
Figura 9. Diagrama de proporciones de sustrato por cada tratamiento	16
Figura 10. Comportamiento de la producción de biogás a las 07:00 horas	20
Figura 11. Volumen de biogás a las 07:00 horas	21
Figura 12. Comportamiento de la temperatura a las 07:00 horas	21
Figura 13. Esquema del equipo experimental para producir biogás.....	30
Figura 14. Modelo de reactor anaerobio discontinuo.	30
Figura 15. Volumen de biogás a las 13:00 horas.....	33
Figura 16. Comportamiento de la producción de biogás a las 13:00 horas.....	34
Figura 17. Comportamiento de la temperatura a las 13:00 horas.	34
Figura 18. Volumen de biogás por tratamiento durante las 18:00 horas	35
Figura 19. Comportamiento de la producción de biogás a las 18:00 horas.....	36
Figura 20. Comportamiento de la temperatura las 18:00 horas.....	36
Figura 21. pH en agua de la Quebrada Copallín.....	37
Figura 22. pH en agua miel de café.....	37
Figura 23. pH en estiércol de ganado vacuno.	37
Figura 24. pH en pulpa de café.....	37
Figura 25. pH en agua y estiércol.	38
Figura 26. pH en pulpa y agua miel de café.	38
Figura 27. Pulpa de café, estiércol y agua miel de café.....	38
Figura 28. Medida de pH en las mezclas.....	38
Figura 29. Balanza utilizada para la distribución de variables.	39
Figura 30. pH metro digital y termómetro.....	39
Figura 31. Laboratorio de campo.....	40
Figura 32. Recolección de datos.	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Residuos orgánicos obtenidos en el proceso de beneficio de café.	5
Tabla 2. Composición química de agua miel del café.	7
Tabla 3. Composición química de la pulpa de café.	7
Tabla 4. Composición química del biogás.	8
Tabla 5. Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.	10
Tabla 6. Valores de pH inicial	15
Tabla 7. Proporción de sustrato por cada tratamiento	15
Tabla 8. Recolección de datos	17
Tabla 9. Registro de datos a las 07: 00 horas.	19
Tabla 10. Volumen de biogás a las 07:00 horas.	20
Tabla 11. Registro de datos a las 13: 00 horas.	31
Tabla 12. Registro de datos a las 18: 00 horas.	32
Tabla 13. Volumen de biogás por tratamiento a las 13:00 horas.	33
Tabla 14. Volumen de biogás por tratamiento a las 18:00 horas.	35

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue producir biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (*Coffea arabica*), que son subproductos de desecho que se generan en el beneficio húmedo del café (BHC), los que son arrojados a ecosistemas terrestres y acuáticos, sin ningún control ni tratamiento, por razones que el productor desconoce o no cuenta con alternativas, causando graves problemas a la salud de la población y contaminación del medio ambiente. Para ello se empleó biodigestores de plástico de 3 litros, para producir biogás como energía alterna sustituyente de los combustibles fósiles y del uso de leña, para las familias rurales. El biogás producido se recolectó con la técnica del desplazamiento de agua en estas botellas calibradas de 3 L cada 100 mL durante 30 días con un rango de temperatura de 17°C a 36°C. El análisis estadístico para analizar la diferencia de medias de producción de biogás entre los cuatro tratamientos fue ANOVA (análisis de varianza), usando el software SPSS. Los resultados se expresan como producción de biogás por tratamiento, donde la producción de biogás en el Tratamiento 4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%) fue 1 320 mL, el Tratamiento 3 (estiércol 70%, agua 30%) produjo 1 711,7 mL, Tratamiento 2 (estiércol 40%, agua 20%, pulpa de café 40%) produjo 500 mL y Tratamiento 1 (pulpa de café 70% y agua miel 30%) produjo 250 mL de biogás. Estos resultados indican que el principal sustrato para la producción de biogás es el estiércol de ganado vacuno. Para tratar los efluentes que genera el BHC, será necesario emplear el tratamiento 4 que contiene 40% de pulpa de café, 40% estiércol de ganado vacuno y 20% de agua miel; para compensar y/o mantener la producción de biogás en menor tiempo, siempre que la mezcla a fermentar contenga estiércol de ganado vacuno y el agua se reemplace por agua miel.

Palabras claves: energías renovables, energía de la biomasa, efluentes del beneficio húmedo del café, pulpa de café, agua miel de café, biogás, reutilización del café.

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to produce biogas from honey and coffee pulp (*Coffea arabica*), which are waste byproducts that are generated in the humid benefit of coffee (BHC), which are thrown into terrestrial and aquatic ecosystems. , without any control or treatment, for reasons that the producer does not know or does not have alternatives, causing serious problems to the health of the population and contamination of the environment. To this end, plastic biodigesters of 3 liters were used to produce biogas as alternate energy, replacing fossil fuels and the use of firewood, for rural families. The biogas produced was collected with the technique of water displacement in these calibrated bottles of 3 L per 100 mL for 30 days with a temperature range of 17°C to 36°C. The statistical analysis to analyze the difference of means of production of biogas between the four treatments was ANOVA (analysis of variance), using the software SPSS. The results are expressed as biogas production by treatment, where the production of biogas in Treatment 4 (40% coffee pulp, 20% honey water and 40% cattle manure) was 1 320 mL, Treatment 3 (manure 70 %, water 30%) produced 1 711.7 mL, Treatment 2 (manure 40%, water 20%, coffee pulp 40%) produced 500 mL and Treatment 1 (coffee pulp 70% and water honey 30%) produced 250 mL of biogas. These results indicate that the main substrate for the production of biogas is cattle manure. To treat the effluents generated by the BHC, it will be necessary to use treatment 4 that contains 40% coffee pulp, 40% cattle manure and 20% honey water; to compensate and / or maintain the production of biogas in less time, provided that the mixture to be fermented contains manure from cattle and the water is replaced by honey water.

Keywords: renewable energies, biomass energy, effluents from the wet coffee benefit, coffee pulp, honey coffee water, biogas, coffee reuse.

I. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos más comercializados a nivel mundial, según la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2010), es el segundo producto más comercializado después del petróleo, se calcula que 125 millones de personas viven de su cultivo y que el consumo anual es de 400 mil millones de tazas con base en la producción de 2010 que fue de 7 millones de toneladas o 117 millones de sacos. Por otro lado, la inadecuada disposición final de los residuos que genera esta actividad, son arrojados a las fuentes hídricas o abandonada a cielo abierto (Londoño, 2017), contaminando los cuerpos de agua, suelo y aire en zonas productoras (Rodríguez, 2010), alterando el equilibrio biológico como también proliferando la fauna nociva (bacterias patógenas, zancudos, cría de moscas u otras plagas) con alto potencial de ser vector de enfermedades (Galindo, 1998).

En el Perú y sobre todo en la Región Amazonas una de las principales actividades de la población rural es la agricultura y ganadería con el cultivo de café y cría de ganado vacuno respectivamente, dejando sin aprovechamiento los subproductos de beneficio. La pulpa de café, agua miel y estiércol de ganado, que son arrojados a fuentes de agua, ríos, quebradas, canales de regadío o tierras de cultivo, se convierten en contaminantes (García, 2014) y por ello en problemas de la salud de las personas y del medio ambiente (Schutgens, 2010). Uno de los principales problemas lo constituye el excesivo uso de agua para lavar la miel. Se ha reportado que la cantidad de agua utilizada de la cuenca del río Entaz en Tingo María es de 11,65 L/kg de café cerezo para los años 2007 al 2011 (Salazar, 2011), y la generación de aguas residuales con altos niveles de contaminación orgánica, los cuales se expresan en demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con un rango de 2400-21900 ppm y sólidos totales por encima de 5000 ppm. (Houbron *et al.*, 2003; Guardia *et al.*, 2010).

La altura óptima para el cultivo del café se encuentra entre los 500 y 1 700 msnm y requiere lluvias menores a 1 000 mm al año (ICAFE, 2011). Además, las lluvias continuas humedecen la leña utilizada como fuente de energía (Schutgens, 2010).

Se pretende reducir dicho volumen de pulpa y agua miel, evitar problemas relacionado al consumo racionado de energía y sobretodo la quema de leña, generando la reducción de CO₂ en la atmósfera y enfermedades en el productor a consecuencia de los gases

emanados por la quema de leña. También las altas precipitaciones perjudican la accesibilidad, debido al mal estado de las carreteras o caminos. Esto obliga al productor a internarse en sus parcelas por un periodo común de una semana, muchas veces replegados a la oscuridad.

A raíz de los problemas ambientales anteriormente citados, diferentes organizaciones han comenzado a buscar métodos de tratamiento y reciclaje de los desechos industriales y agrícolas (Chynoweth *et al.*, 2001).

Según el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2017), la producción acumulada de energía eléctrica a nivel nacional alcanzó los 52 643 GW.h (Gigavatios.hora), lo que representa un incremento de 1,8% respecto al mismo periodo de 2016. Del total, el 55% se generó con recurso hídrico, 42% con gas natural, y 3% fue con energía solar y eólica. El Perú tiene una demanda de 6 mil megavatios de energía (MW) y la capacidad instalada es de más de 8 mil MW, según los cálculos hacia el 2024; pero 3 500 MW dependen del Gas de Camisea. En otras palabras, alrededor del 60% de la demanda energética es abastecida por una sola fuente (MEM, 2017).

La contaminación ambiental por falta de alternativas de uso de las aguas mieles y pulpa de café, agotamiento de los combustibles fósiles, emisión de compuestos tóxicos; producidos por el incremento del parque vehicular y de las plantas térmicas y demanda de energía eléctrica, justifican la presente investigación que permitirá la transformación del material contaminante en un producto aprovechable con la generación de biogás como energía renovable; que se utilizará en plantas de procesamiento del café y en hogares. Así mismo, permitirá sensibilizar a instituciones involucradas en la extensión rural y a productores de café, a generar conocimientos y desarrollar tecnologías que puedan hacer al país más competitivo y contribuir de esta manera a la conservación del medio ambiente, primordialmente por la generación de biocombustibles que sin duda son la alternativa sustituyente de los combustibles fósiles; debido a los altos costos y su inestabilidad en el precio y dado que la energía obtenida de la pulpa del café proviene de recursos renovables, es una alternativa a tener en cuenta para depurarla, estudiarla, tecnificarla e implementarla (Londoño, 2017).

En el Perú, la generación de biogás o bioetanol recién empieza a tomar interés; en el 2010, el país ha reafirmado compromisos en la Política Energética Nacional 2010-2040, y en la reunión ministerial de la XVI Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas sobre

Cambio Climático, asumió compromisos voluntarios ante NN.UU. para modificar su matriz energética actual y alcanzar un 40% de utilización de energías renovables al año 2021. Por ende, los proyectos de investigación son muy escasos, dado que su proyección se enfoca sobre el manejo sostenible forestal, los residuos madereros, asimismo la utilización de las áreas degradadas o deforestadas a través de plantaciones de palma aceitera, con el fin de incentivar la producción de biodiesel (Velasquez, 2012).

Balseca y Cabrera (2011) plantearon 12 pruebas con 3 repeticiones por cada tratamiento de las siguientes proporciones: tratamiento 1 mezcla de estiércol 40%, aguas miel 20%, pulpa de café 40%, tratamiento 2 mezcla de estiércol 40%, agua 20 %, pulpa de café 40%, tratamiento 3 mezcla de estiércol 70% y agua 30% con un tiempo de retención (TR) de 47 días. Estos estudios demostraron que la pulpa de café produjo mayor volumen de biogás en comparación con los otros dos sustratos de aguas mieles y estiércol de ganado vacuno.

Los materiales orgánicos de origen animal más comúnmente empleados en la producción de biogás son: estiércol de vacuno, porcino y avícola. Los residuos vegetales más usados se obtienen de: plantas de maíz, arroz, trigo, café, grama, serrín, e incluso basura doméstica (Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial [INCAITI], 1983).

De acuerdo con Botero y Preston (1987), reportan un valor de 50% - 70% de contenido de metano para el estiércol de ganado vacuno, mientras que Dinsdale *et al.*, (1996), el metano que puede contener la pulpa de café varía entre 61 a 70%. Estos valores no indican que la producción de biogás fuera la misma en los tratamientos, ya que la producción de metano estará condicionada tanto al tipo de sustrato, como a la interacción de las bacterias en la biodegradación anaeróbica (Balseca y Cabrera, 2011).

En estudios realizados sobre la obtención de biogás a partir de la pulpa y aguas mieles de café, se evaluó la solubilización y biodegradabilidad, obteniendo que las aguas residuales tienen una biodegradabilidad anaeróbica de 98,5%. Esto confirma la excelente fermentación del agua miel para la valorización de la materia orgánica por digestión anaeróbica; el tratamiento de las aguas residuales brutas preacidificadas y la pulpa en un reactor, alcanza una remoción superior al 90% y una tasa de producción de metano cercana al 100% (Houbroun *et al.*, 2007).

Por otro lado, en la biodegradación de las aguas residuales del café utilizando fluido ruminal, se degrada la carga orgánica del vertido hasta en un 91,2% de la DQO en 16 días de fermentación con pH de 4,6 y 28 °C. Esto comprueba que la cantidad de metano generado está en relación directa con la disminución en la demanda química de oxígeno (DQO) (Del Real e Islas, 2010).

En un biodigestor de 1750 mL que contenía 583 mL de estiércol, 35 mL de agua de desagüe, y 79 g de cáscara de papa, se logró producir 195 mL; siendo la relación estiércol: agua de 1:2 la que produjo mayor volumen de biogás, a los 45 días (Barrena *et al.*, 2007).

La mayor parte del café se transforma por vía húmeda, en cinco etapas principales: despulpado, fermentación, lavado, secado y almacenaje (Figura 1). Durante este procesamiento se generan dos tipos importantes de desechos contaminantes: los desechos sólidos orgánicos (pulpa de café), proveniente principalmente de la etapa de despulpado; y las aguas residuales, procedentes de las etapas de lavado y fermentación del grano (Houbron *et al.*, 2007).

Según Calle (1977), en la industria del café, solamente se utiliza el 9,5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, el 90,5% queda en forma de residuo orgánico que son desechados (Tabla 1).

Ante estos antecedentes de uso como materias primas: la pulpa y mucilago del café, y ante el impacto negativo que estos generan sobre el medio ambiente, urge realizar la presente investigación para aportar a la ciencia con conocimientos más actualizados en la producción de biogás como innovación agraria de las comunidades campesinas cafetaleras.

El agua utilizada para despulpar y lavar se convierte en agua residual o comúnmente llamado en Latinoamérica agua miel (Molina, 1999). Estas aguas por ser muy ácidas y ricas en materia orgánica pueden ser particularmente nocivas si se descargan en cuerpos de agua, y si se retienen en lagunas o fosas, se corre el riesgo de contaminar el agua subterránea (Molina, 1999).

El agua miel se genera en la etapa del desmucilaginado y representa entre el 14,85% (Montilla, 2006) y el 16% (Gómez, Morales y Adalid, 2006) del peso del fruto fresco. En términos de volumen, por cada kg de café cereza se producen 91 mL de mucílago puro (Zambrano e Isaza, 1994).

Tabla 1. Residuos orgánicos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 Kg de café cereza.

Proceso	Pérdida (gramos)	Residuo obtenido
Despulpado	394	Pulpa Fresca
Desmucilaginado	216	Mucílago
Trilla	35	Pergamino
Secado	171	Agua
Torrefacción	22	Volátiles
Preparación Bebida	104	Borra
Pérdida Acumulada	942	

Fuente: Calle, 1977.

Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra se generan aproximadamente 55 500 toneladas de mucílago fresco, el cual si no se utiliza adecuadamente produciría contaminación equivalente a la generada durante un año, por excretas y orina, de una población de 310 mil habitantes en términos de DBO (Rodríguez, 2009).

Debido a su composición química (Tabla 2), el material orgánico disuelto puede retirar o consumir muy rápidamente el oxígeno del agua, en un proceso natural de oxidación, por lo que la pulpa y el mucílago contenidos en un kg de café cereza pueden retirar todo el oxígeno a 7 400 litros de agua pura (Zambrano, 1989).

La pulpa es el desecho más importante del beneficiado, pues representa aproximadamente 40% (López y Castillo, 2011), 42% (Gómez, Morales, y Adalid, 2006) y de 43,58% (Montilla, 2006) del peso total del fruto fresco del café. Su poder contaminante es mayor cuando se transporta y se separa por vía húmeda debido a su composición química (Tabla 3), pues la humedad en exceso retarda su descomposición y dificulta su manejo, y cuando se fermenta posteriormente causa malos olores y proliferación de moscas (López y Castillo, 2011).

El estiércol de vacuno corresponde a la mezcla producida por las excretas y orina de ganado vacuno y agua utilizada para el lavado de las instalaciones del plantel. Estos residuos presentan una alta biodegradabilidad (Chamy y Vivanco, 2007). El producto de la descomposición de materia orgánica en anaerobiosis, es un gas combustible denominado biogás, el cual puede ser usado para cocción de alimentos, calefacción y las múltiples aplicaciones que tiene los combustibles convencionales. En el Perú existe 106 biodigestores con predominio en modelos chinos artesanales (Tardillo, 2008).

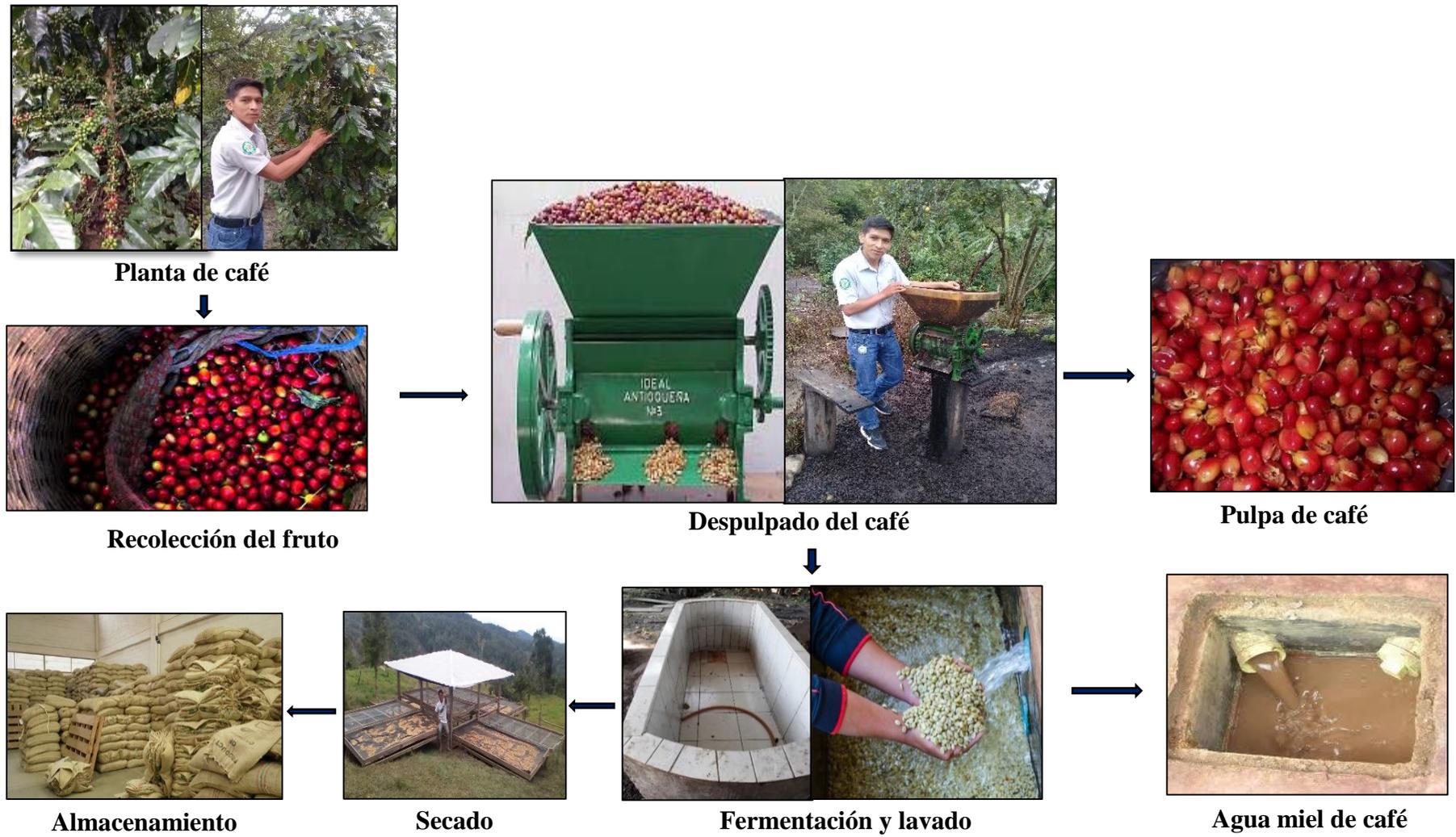


Figura 1. Proceso de beneficio húmedo del café.

Tabla 2. Composición química de agua miel del café.

Parámetros	Valor
pH inicial	4,6
Temperatura (°C)	28
DQO (mg/L)	8936,84
Nitrógeno total (mg/L)	8,624
Carbohidratos totales(mg/L)	0,83
Taninos (mg/L)	0,16
Fenoles (mg/L)	80,0
Cafeína (mg/L)	23,0

Fuente: Del Real e Islas, 2010.

Tabla 3. Composición química de la pulpa de café.

Componente	Porcentaje (%)
Grasa	1-2
Proteína	4-12
Celulosa	12-20
Pectinas	6-10
Azúcares totales	14
Ceniza	6-10
Cafeína	1-2
Polifenoles	3

Fuente: Rodríguez, 2009 citado por López y Castillo, 2012.

La mezcla de gases que conforman el biogás generado en la digestión anaerobia, está compuesta, fundamentalmente de metano (50 -70% CH₄), dióxido de carbono (30 -50% CO₂), sulfuro de hidrógeno (<2% H₂S) y otros gases (NH₃, N₂, otros.). El metano es el principal gas combustible y la mezcla de gases tiene una potencia calorífica en torno a 5 500 kcal/m³ (con un 60% de CH₄) (Palau, 2016; Hidalgo *et al.*, 2010) (Tabla 4).

La llama producida por el biogás al ser quemado es azul pálido, casi invisible a la luz del día; siendo su poder calorífico cercano a 5342 kilocalorías por m³ (Hidalgo *et al.*, 2010).

López *et al.* (2008), indican que un metro cúbico de biogás es suficiente para:

- Generar 1,25 KW de electricidad
- Generar 6 horas de luz equivalente a un foco incandescente de 60 Watt
- Poner a funcionar un refrigerador de 1 m³ de capacidad durante 1 hora
- Hace funcionar un motor de 1HP durante 2 horas.

Baculima y Rocano (2015), un metro cúbico de biogás de 60% de CH₄ + 40% de CO₂ equivale a:

- 1,3 Kg de madera
- 0,3 Kg de carbón
- 0,6 m³ de gas natural
- 0,7 litros de gasolina
- Se puede cocinar tres comidas para una familia de cuatro personas.

Cuando un reactor flujo pistón (PFR) es alimentado con pulpa de café, la eficiencia en producción de biogás y su poder calorífico son altos (Lodoño, 2017). Esto se evidencia en el trabajo realizado por Rodríguez y Zambrano donde reportan rendimientos de 25 L de biogás por 1 kg de pulpa fresca alimentado a los digestores. El poder calorífico del biogás, con un contenido de metano de 60%, es de 21,46 KJ/L, con un valor para la pulpa fresca de 0,54 MJ/kg. Palacio (2007), afirma que el contenido de energía del biogás es 21,5 MJ/m³, con 60% de metano, esto significaría una producción de energía eléctrica de 6,35 kWh/m³.

Tabla 4. Composición química del biogás.

Composición del Biogás	
Componente	Porcentaje %
Metano (CH ₄)	54 - 70
Bióxido de Carbono (CO ₂)	27 - 45
Nitrógeno (N ₂)	0,5 - 3
Hidrógeno (H ₂)	1 - 10
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0,10

Fuente: Hidalgo *et al.*, 2010.

El biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural (Figura 2).

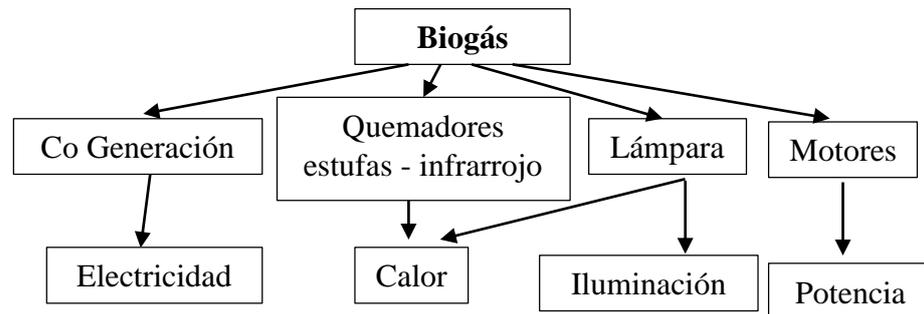


Figura 2. Resumen de las posibles aplicaciones de biogás.

Fuente: Bautista, 2010.

La contaminación ocasionada por la industria cafetalera en el proceso de beneficio húmedo del café (BHC), constituye un serio problema en los países productores de café. Se consume grandes cantidades de agua y casi el 80% del fruto se considera de poco o nulo valor económico y por consiguiente es designado como desecho, el cual se vierte generalmente en los ríos, generando malos olores y contaminándolos, más los propios problemas sociales que esta situación trae aparejado, sobre todo, limitaciones con sus usos con fines recreativo y de sustento familiar por la contaminación de los ríos en épocas de proceso (Pérez, 2002; citado por Pérez *et al.*, 2006).

Así también, Sotolongo *et al.*, (2000), presenta los principales impactos detectados en la provincia de Guantánamo, Cuba por los residuales del proceso del beneficiado húmedo del café como son:

- Creación de aguas ácidas (pH < 7).
- Malos olores.
- Aguas coloreadas, de aspecto estético desagradable.
- Imposibilidad del uso del agua para consumo humano, la ganadería e irrigación.
- Destrucción de ecosistemas acuáticos.
- Afectación de los suelos irrigados por esta agua.
- Elevación del % de metano en el agua.
- Modificaciones paisajísticas.
- Aumento de la concentración de Ca, K, Mg y P en el agua.
- Aumento de la carga orgánica y del consumo de O₂ en el agua.

- Sólidos en suspensión.
- Aumento de la DBO y DQO por encima de 2 500 y 3 000 mg/L, respectivamente.

Según Proarca (2002), las cantidades de agua se ajustan a los tipos de procesos como: beneficiado convencional con un gasto de 7,22 a 11,47 L/kgCc; beneficiado semiecológico, donde se recircula el agua con un gasto de hasta 50%; y el beneficiado ecológico, este no requiere de fermentado, utiliza una máquina desmucilagadora, disminuyendo así hasta el 90% del agua utilizado en el beneficio tradicional.

En una investigación realizada por Salazar (2011), muestran la cantidad de agua utilizado en las PBHC de la cuenca del río Entaz en Tingo María, es representado por el promedio de 11,65 L/kgCc para los años, del 2007 al 2011.

Un biodigestor es un contenedor donde se depositan desechos vegetales o animales como, pulpa de café, aguas mieles y estiércol, cuyas bacterias en ausencia de la actividad del oxígeno lo descomponen produciendo biogás y fertilizante (Martí, 2008).

Todos los materiales orgánicos pueden ser fermentados; sin embargo, solo sustratos líquidos u homogéneos pueden ser considerados para plantas de biogás simples. Entre estos se encuentran heces y orina de ganado, cerdos, aves, aguas negras, desechos vegetales, entre otros (Hidalgo *et al.*, 2010). Normalmente, el biogás producido por un digestor puede ser usado tal como está, de la misma forma que cualquier otro gas combustible. Sin embargo, es posible y deseable que un tratamiento posterior sea realizado para remover gases no deseables o impurezas (Hidalgo *et al.*, 2010).

Se necesita una temperatura mínima de 4°C a 5°C y no sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C. Se realiza una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas (Tabla 5). Cuando mayor es la actividad biológica, la producción de gas aumenta con la temperatura (Hilbert, 2003).

Tabla 5. Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.

Bacterias	Rango de temperatura			TR (días)	Sensibilidad
	Min.	Óptimo	Máx.		
Psicrofílicas	4-10	15-18	25-30	>100	+/- 2°C/hora
Mesofílicas	14-20	28-33	35-45	30-60	+/- 1°C/hora
Termofílicas	25-45	50-50	75-80	75-80	+/- 0,5°C/hora

Fuente: Hilbert, 2003.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

El diseño es experimental. Tiene como finalidad descubrir nuevos hechos, confirmar o denegar resultados de ensayos anteriores planteados en forma hipotética (Condo y Pazmiño, 2015).

X1 \longrightarrow Y1

X1: representa la cantidad de sustrato. Cada tratamiento estuvo conformado por proporciones diferentes de agua miel, pulpa de café, estiércol de ganado vacuno y agua.

Y1: representa el volumen de biogás, que se obtuvo en los tratamientos a partir del proceso de digestión anaeróbica. Esto permitió medir el efecto del uso de estiércol de ganado, agua miel y pulpa de café en la producción de biogás.

2.2. Material biológico

Como materia prima se utilizó pulpa de café y agua miel; recolectadas de dos unidades productivas del caserío Cambiopitec – Copallín (Figura 3). También se empleó agua de la quebrada Copallín y estiércol de ganado vacuno recogido del establo de ganado vacuno de la UNTRM – Pomacochas (Figura 4).



Figura 3. Material biológico de pulpa y agua miel de café.



Figura 4. Agua de la quebrada Copallín y estiércol de ganado vacuno.

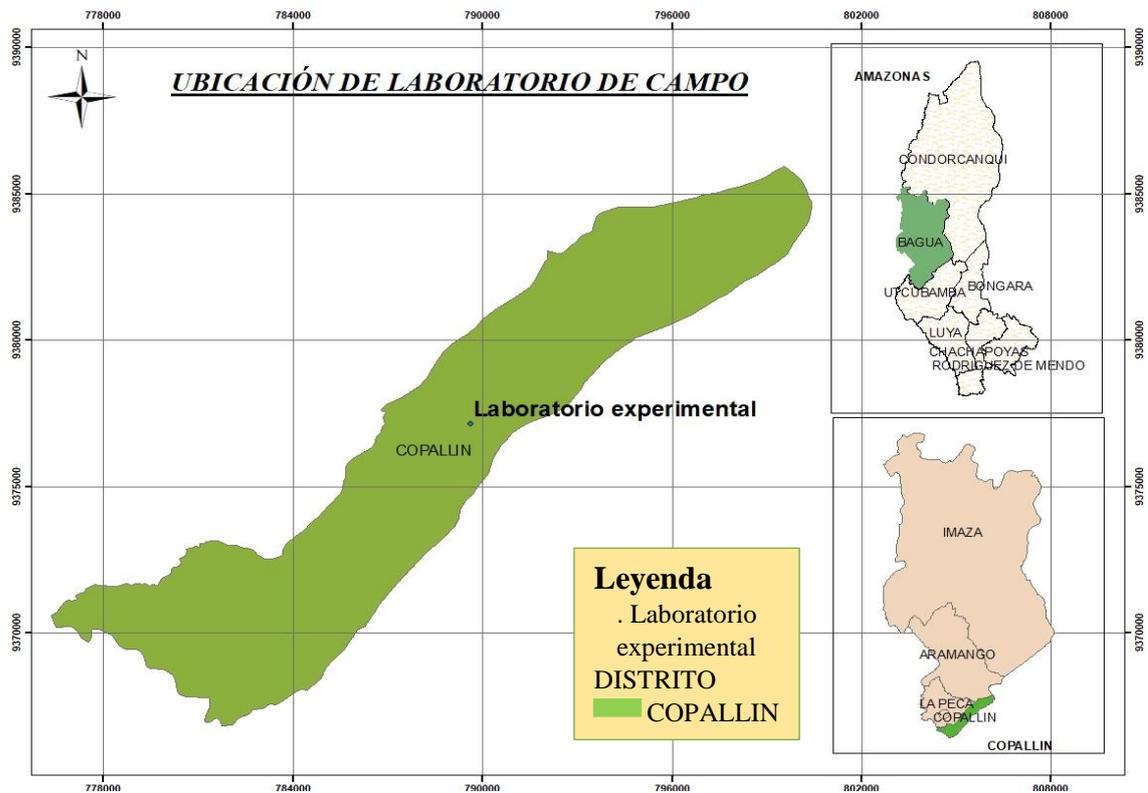


Figura 5. Mapa de la ubicación del laboratorio experimental.

2.3. Métodos

En el desarrollo de la presente investigación se evaluó la producción de biogás de cada tratamiento, bajo lo siguiente:

- ✓ Se empleó 12 biodigestores tipo batch y 12 gasómetros a nivel de laboratorio a partir de botellas descartables de 3 L (Anexo 1).
- ✓ Para la asignación de porcentaje de sustrato en cada tratamiento, se utilizó la metodología de Balseca y Cabrera (2011), en la cual se determinó la producción

de biogás a partir de las aguas mieles y pulpa de café. Para la cuantificación de biogás se hizo por el método de desplazamiento de líquido, el cual, según Barrena *et al.*, (2007), Parajuli (2011) y Londoño (2017), consiste en conducir el biogás producido, a través de una manguera, hacia un recipiente que contenga líquido y allí, gracias a la presión del biogás sobre la superficie del líquido, éste se desplaza hacia un recipiente (Figura 14).

- ✓ Se utilizó 12 biodigestores (botellas PET descartables) con capacidad de 3 L cada uno, tipo batch. Se llenaron al 70% de su capacidad, y se los mantuvo de manera hermética con silicona para evitar la fuga de gas. Fueron cargados de acuerdo a la distribución de valores de las variables. Tiene una salida de biogás, ubicada en la tapa conectada a una manguera 0,45 cm de PVC de 1/8", que se introdujo en un gasómetro (botella de plástico descartable de 3 L), previamente calibrada y marcada cada 100 mL, llena de agua, libre de burbujas de aire y colocada en una tina de 3 L con agua, y por la parte inferior un pequeño agujero que permite la salida del agua desplazado por el gas (Figura 6).



Figura 6. Calibración de gasómetros.

Se construyó un laboratorio de campo, alejado de animales u otros seres que alteren el funcionamiento del mismo (Figura 7). El techo fue de calamina y se trazó un nivel de 1,5 m de altura para colocar los biodigestores, ello permitió que el investigador pueda tener mejor posición para la toma de datos. Todos los biodigestores fueron colocados en el laboratorio de campo, con igual acceso a la luz, temperatura y otros factores ambientales, a un mismo nivel del suelo y con igual cantidad de sustrato de acuerdo a la distribución de variables (Figura 8).



Figura 7. Construcción de laboratorio de campo.



Figura 8. Biodigestores en el laboratorio de campo.

Según Botero (1987) recomienda que antes de efectuar los tratamientos se realice una titulación, para regular el pH a un rango entre 6,5 – 7,5 que es el que necesitan las bacterias metanogénicas para trabajar. Para medición del pH se utilizó un pH -metro digital de marca Hanna, Modelo: HI 98100 (Checker Plus), autocalibrable, rango: 0,00 - 14,00 pH (Anexo 3). Se midió el pH de cada sustrato antes de realizar la carga de biodigestores. No se añadió hidróxido de sodio para no alterar el metabolismo de las bacterias dentro del sustrato y que su degradación sea de manera natural (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de pH inicial

MATERIAL	pH
Agua	8,5
Agua miel	3,9
Estiércol	7
Pulpa de café	5,2
T1	4,81
T2	6,58
T3	7,45
T4	5,14

T1, T2, T3, T4: Son tratamientos.

Los biodigestores fueron cargados de acuerdo a la distribución de variables en porcentaje en peso y volumen de cada tratamiento, el volumen utilizado por el biodigestor fue al 70% de su capacidad (Figura 7). En el caso del estiércol de ganado y pulpa de café se pesó en una balanza. Para el agua miel y agua se midió el volumen en una jarra calibrada. Se tomó en cuenta la relación 1 litro agua = 1 kg (Tabla 7).

Tabla 7. Proporción de sustrato por cada tratamiento.

Tratamiento	Pulpa de café		Agua miel		Estiércol de ganado vacuno		Agua		Capacidad útil biodigestor mL
	%	g	%	mL	%	g	%	mL	
1	70	1470	30	630	-	-	-	-	2100
2	40	840	-	-	40	840	20	420	2100
3	-	-	-	-	70	1470	30	630	2100
4	40	840	20	420	40	840	-	-	2100

Se midió la temperatura ambiente al iniciar y finalizar la recolección de datos de los gasómetros. La temperatura máxima, mínima y media registrada durante los 30 días de evaluación fue 23,00; 18,50 y 20,28 °C respectivamente durante las 07:00 horas del día. El termómetro utilizado fue de marca Hendi que mide temperaturas desde -50 °C/ +300 °C y el pH-metro utilizado fue de marca Hanna (Figura 30).

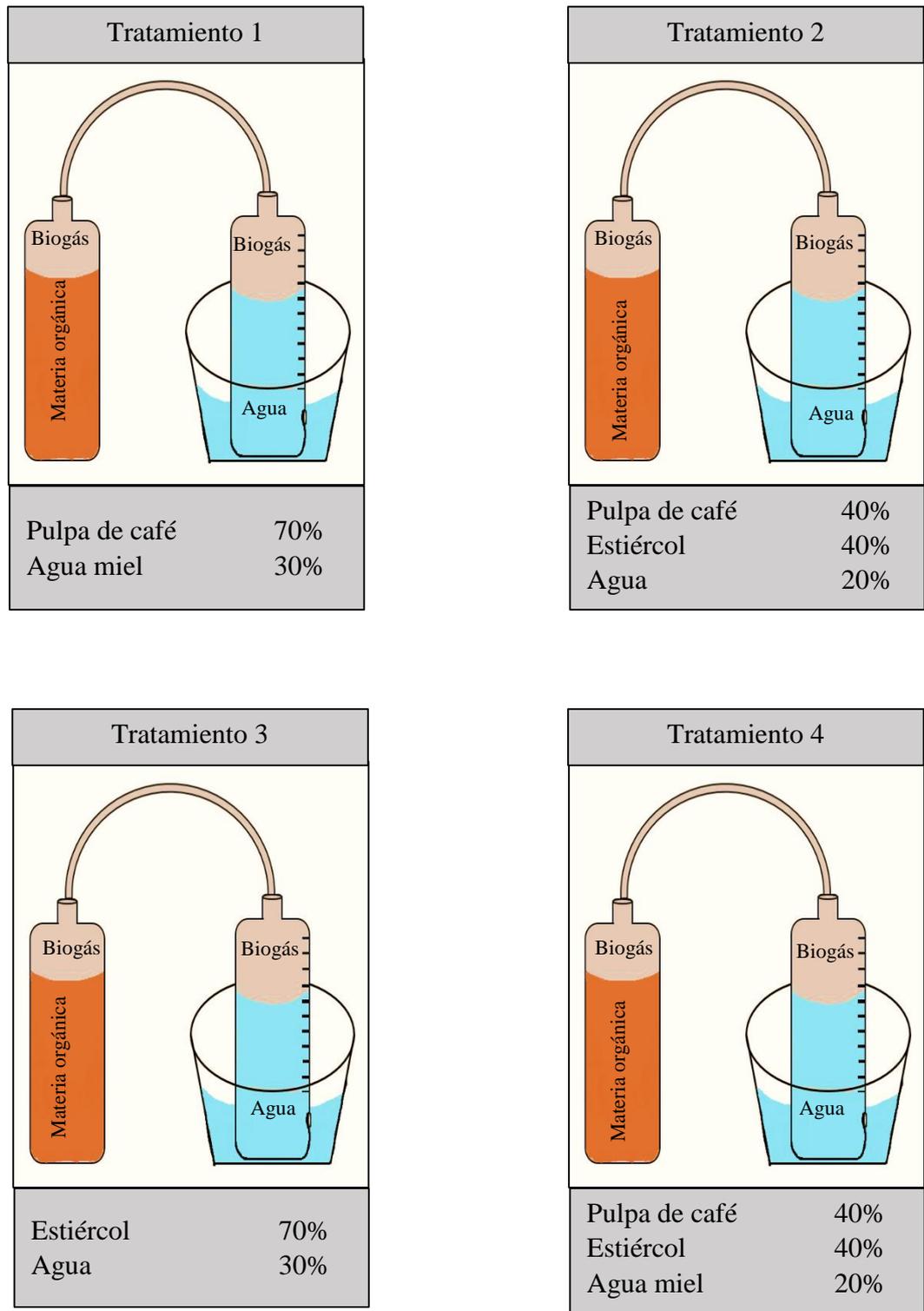


Figura 9. Equipo experimental por cada tratamiento.

En la figura 9, se muestra el equipo experimental con los porcentajes de acuerdo a la distribución de variables por tratamiento. La materia orgánica está conformada por pulpa de café, agua miel y estiércol de ganado vacuno.

2.4. Recolección de datos

Se registró todos los datos en una hoja de campo tres veces al día (07:00, 13:00 y 18:00 horas) durante 30 días que es el tiempo de retención, se midió el volumen de agua desplazado en el gasómetro y la temperatura ambiente (Tabla 8).

Tabla 8. Recolección de datos.

DIAS	T1 (mL)				T2 (mL)				T3 (mL)				T4 (mL)				t °C		
	A	B	C	PT1	A	B	C	PT2	A	B	C	PT3	A	B	C	PT4	ti	tf	t

2.5. Medición del volumen

Se realizó mediante inspección ocular. El volumen de agua desplazado en el gasómetro es equivalente al volumen de biogás producido por el equipo experimental (Figura13).

2.6. Análisis de datos

Análisis estadístico. En esta investigación se planteó un diseño experimental probabilístico completamente al azar, con 4 tratamientos y 3 repeticiones basado en la metodología de Balseca y Cabrera (2011) y Barrena *et al.*, (2007). Para analizar la diferencia de medias de producción de biogás entre los cuatro tratamientos fue ANOVA (análisis de varianza), usando el software SPSS (IBM SPSS Statistics V23.0), con el cual se determinó las diferencias entre los cuatro tratamientos en cuanto a la producción de volumen de biogás durante 30 días que es el tiempo de fermentación (Tabla 9).

III. RESULTADOS

3.1. Volumen de biogás

Se presentan los resultados promedio de la producción de biogás por cada tratamiento con 3 repeticiones con igual tiempo de fermentación de 30 días en los horarios de 07:00, 13:00, 18:00 horas del día, como horas estratégicas con la finalidad de ver la variación, producción y comportamiento del biogás según las diferentes temperaturas sobre el medio ambiente. Se midió la cantidad de gas que ha desplazado al agua por el equipo experimental durante los 30 días. Dicho volumen de agua desplazado es equivalente a la cantidad de biogás producido. El volumen recolectado en mililitros (mL) y la temperatura en grados centígrados (°C). Los datos se presentan en la Tabla 9, 11 y 12.

Donde:

T1, T2, T3, T4: son los tratamientos.

A, B, C: son las repeticiones.

PT1, PT2, PT3, PT4: volumen promedio de las repeticiones por cada tratamiento.

ti: temperatura ambiental tomada al iniciar la recolección de datos.

tf: temperatura ambiental tomada al finalizar la recolección de datos.

t: temperatura ambiental promedio de la recolección de datos.

Para el análisis final de los resultados se tomaron los datos según la lectura realizado a las 07:00 horas del día, porque en este horario, la temperatura se ha mantenido de manera más constante y el análisis de varianza y desviación estándar indican que los datos obtenidos en este horario son los más confiables para su análisis. Las variaciones en la producción de biogás en los 2 horarios siguientes se dan por el aumento de la temperatura sobre el biogás, acelerando su movimiento molecular y varié en cuanto al volumen en cada biodigestor (Anexo 2).

Según Gay-Lussac (1778), por cada aumento de temperatura de 1°C, el volumen de un gas aumenta en una cantidad aproximadamente igual a $1/273$ de su volumen a 0°C. El volumen de un gas a temperatura constante es inversamente proporcional a la presión (Boyle - Mariotte, 1662), es decir, cuando un gas se calienta, su volumen aumenta, sus partículas se separan y su densidad disminuye.

Tabla 9. Registro de datos a las 07: 00 horas.

DIAS	T1 (mL)				T2 (mL)				T3 (mL)				T4(mL)				t °C		
	N	A	B	C	PT1	A	B	C	PT2	A	B	C	PT3	A	B	C	PT4	ti	tf
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	16.7	80.0	80.0	80.0	80.0	60.0	130.0	50.0	80.0	20.4	20.5	20.5
2	0.0	0.0	0.0	0.0	85.0	75.0	85.0	81.7	85.0	70.0	75.0	76.7	80.0	260.0	115.0	151.7	19.2	19.2	19.2
3	80.0	50.0	75.0	68.3	125.0	115.0	130.0	123.3	90.0	70.0	80.0	80.0	170.0	400.0	205.0	258.3	19.0	19.5	19.3
4	120.0	80.0	40.0	80.0	160.0	220.0	250.0	210.0	120.0	70.0	80.0	90.0	350.0	690.0	310.0	450.0	19.2	19.2	19.2
5	100.0	50.0	20.0	56.7	220.0	290.0	320.0	276.7	130.0	100.0	70.0	100.0	450.0	820.0	350.0	540.0	19.4	19.4	19.4
6	100.0	50.0	30.0	60.0	200.0	300.0	340.0	280.0	130.0	110.0	80.0	106.7	550.0	930.0	360.0	613.3	20.4	20.5	20.5
7	100.0	100.0	100.0	100.0	220.0	350.0	400.0	323.3	180.0	140.0	100.0	140.0	730.0	1065.0	400.0	731.7	19.2	19.6	19.4
8	135.0	65.0	100.0	100.0	220.0	405.0	480.0	368.3	165.0	175.0	115.0	151.7	965.0	1225.0	535.0	908.3	20.2	20.6	20.4
9	110.0	60.0	80.0	83.3	200.0	350.0	410.0	320.0	190.0	170.0	110.0	156.7	1000.0	1255.0	485.0	913.3	21.0	21.2	21.1
10	170.0	70.0	100.0	113.3	295.0	405.0	480.0	393.3	265.0	260.0	190.0	238.3	1215.0	1465.0	610.0	1096.7	20.1	20.3	20.2
11	140.0	65.0	80.0	95.0	250.0	350.0	430.0	343.3	250.0	250.0	185.0	228.3	1190.0	1405.0	540.0	1045.0	21.0	21.2	21.1
12	140.0	60.0	80.0	93.3	250.0	355.0	450.0	351.7	280.0	280.0	205.0	255.0	1255.0	1425.0	545.0	1075.0	21.1	21.2	21.2
13	190.0	80.0	100.0	123.3	305.0	355.0	520.0	393.3	305.0	320.0	245.0	290.0	1355.0	1475.0	595.0	1141.7	19.5	19.8	19.7
14	250.0	130.0	130.0	170.0	385.0	395.0	600.0	460.0	420.0	445.0	360.0	408.3	1500.0	1570.0	740.0	1270.0	23.0	23.0	23.0
15	195.0	75.0	75.0	115.0	330.0	340.0	545.0	405.0	365.0	390.0	305.0	353.3	1445.0	1515.0	685.0	1215.0	21.5	22.0	21.8
16	220.0	100.0	110.0	143.3	395.0	325.0	490.0	403.3	480.0	485.0	480.0	481.7	1430.0	1420.0	730.0	1193.3	20.0	20.5	20.3
17	220.0	100.0	110.0	143.3	395.0	325.0	490.0	403.3	480.0	485.0	480.0	481.7	1430.0	1420.0	730.0	1193.3	22.0	23.0	22.5
18	190.0	160.0	110.0	153.3	315.0	315.0	570.0	400.0	500.0	580.0	620.0	566.7	1300.0	1410.0	820.0	1176.7	19.2	19.5	19.4
19	205.0	180.0	75.0	153.3	360.0	485.0	655.0	500.0	670.0	760.0	845.0	758.3	1400.0	1580.0	980.0	1320.0	20.0	20.0	20.0
20	190.0	155.0	55.0	133.3	290.0	400.0	595.0	428.3	640.0	720.0	845.0	735.0	1290.0	1405.0	855.0	1183.3	21.0	20.0	20.5
21	185.0	150.0	40.0	125.0	355.0	370.0	525.0	416.7	860.0	1025.0	1325.0	1070.0	1270.0	1315.0	850.0	1145.0	18.8	19.1	19.0
22	175.0	145.0	85.0	135.0	345.0	330.0	475.0	383.3	820.0	965.0	1235.0	1006.7	1190.0	1265.0	805.0	1086.7	18.1	20.0	19.1
23	165.0	145.0	25.0	111.7	325.0	300.0	465.0	363.3	900.0	1105.0	1490.0	1165.0	1195.0	1230.0	775.0	1066.7	21.3	21.0	21.2
24	185.0	150.0	35.0	123.3	355.0	370.0	525.0	416.7	860.0	1025.0	1325.0	1070.0	1270.0	1315.0	850.0	1145.0	21.5	21.4	21.5
25	237.0	97.0	5.0	113.0	285.0	259.0	409.0	317.7	872.0	1089.0	1421.0	1127.3	1165.0	1184.0	734.0	1027.7	18.0	19.0	18.5
26	355.0	120.0	0.0	158.3	300.0	250.0	395.0	315.0	930.0	1180.0	1615.0	1241.7	1175.0	1165.0	720.0	1020.0	19.8	20.0	19.9
27	505.0	125.0	0.0	210.0	300.0	245.0	385.0	310.0	1050.0	1370.0	1640.0	1353.3	1195.0	1145.0	720.0	1020.0	20.8	20.7	20.8
28	535.0	95.0	25.0	218.3	375.0	240.0	410.0	341.7	1255.0	1665.0	2215.0	1711.7	1330.0	1200.0	775.0	1101.7	20.1	20.3	20.2
29	540.0	210.0	0.0	250.0	395.0	220.0	410.0	341.7	1510.0	1115.0	2205.0	1610.0	1360.0	1195.0	725.0	1093.3	20.1	20.3	20.2
30	535.0	95.0	25.0	218.3	375.0	240.0	410.0	341.7	1255.0	1665.0	2215.0	1711.7	1330.0	1200.0	775.0	1101.7	20.0	20.2	20.1

3.2. Análisis estadístico del volumen de biogás producido

Se realizaron tres repeticiones de cada tratamiento para reducir el error estadístico, y se consideraron los datos obtenidos durante las 07:00 horas, durante los 30 días de evaluación. Para el procesamiento de los resultados experimentales se utilizó el software estadístico: IBM SPSS Statistics V23.0, mediante una prueba de comparación de medias.

Tabla 10. Volumen de biogás a las 07:00 horas, durante los 30 días de evaluación.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desviación estándar	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
T1	30	250,00	0,00	250,00	121,6000	10,52319	57,63788	3322,126
T2	30	483,33	16,67	500,00	334,3111	19,44464	106,50267	11342,819
T3	30	1635,00	76,67	1711,67	628,1889	98,74474	540,84723	292515,72
T4	30	1240,00	80,00	1320,00	945,4778	61,22887	335,36431	112469,22
t °C	30	4,50	18,50	23,00	20,2883	0,19162	1,04952	1,101

De la Tabla 10, el T3 (estiércol 70%, aguas 30%) arrojó el mayor valor equivalente a 1 711,67mL de biogás. El T4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%), produjo 1 320mL de biogás. El T2 (40% pulpa de café, 40% agua miel y 20% de agua), produjo 500 mL y el T1 (70% pulpa de café y 30% de agua miel), produjo 250 mL de biogás.

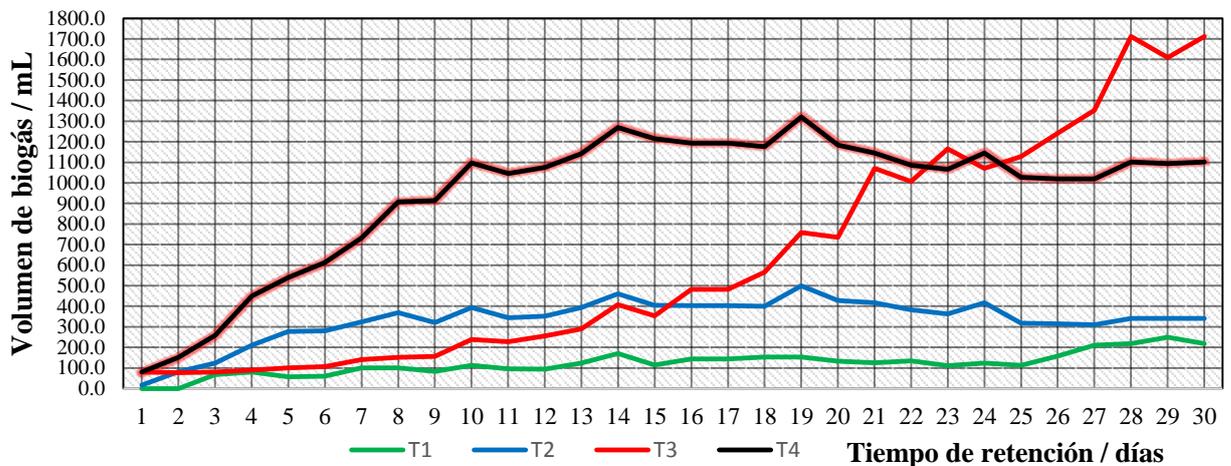


Figura 10. Comportamiento de la producción de biogás a las 07:00 horas, durante los 30 días de evaluación.

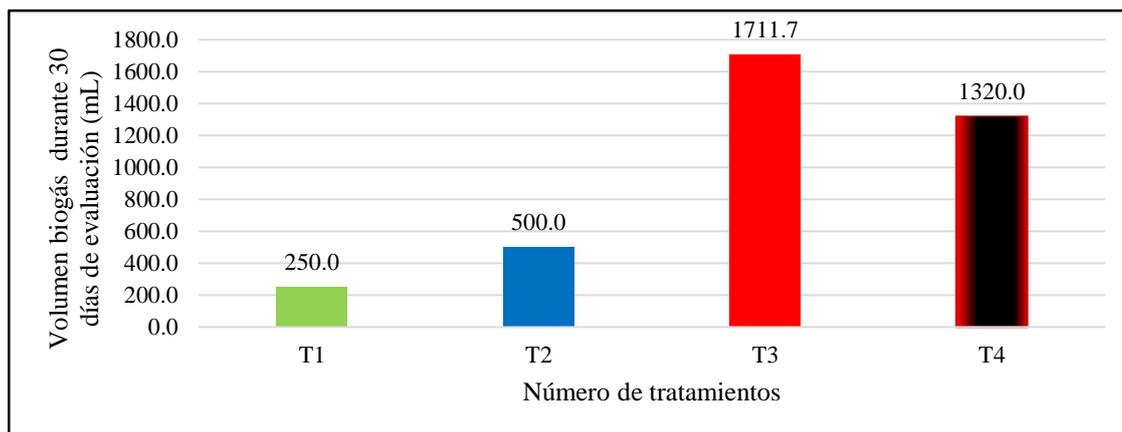


Figura 11. Volumen de biogás a las 07:00 horas, durante los 30 días de evaluación.

De la Figura 10 y 11, el T3 (estiércol 70%, aguas 30%), produjo el mayor volumen de biogás de 1 711,7mL en 28 días. El T4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%), produjo 1 300 mL de biogás en 19 días y luego comenzó a descender manteniéndose por encima de los 1 000 mL.



Figura 12. Comportamiento de la temperatura a las 07:00 horas durante los 30 días de evaluación.

De la Figura 12, la temperatura máxima se registró el día 14 de 23°C, en el cual el T4 produjo la mayor cantidad de biogás. La temperatura mínima se registró el día 25 de 18,5°C, donde la producción de biogás desciende en el T4.

IV. DISCUSIÓN

Balseca y Cabrera (2011), obtuvieron resultados expresados como producción de biogás por kilogramo de sustrato: 126,88 L de biogás por kilogramo de estiércol, 128 L de biogás por kilogramo de pulpa de café y 126,98 L de biogás por litro de aguas mieles en 47 días, donde la pulpa de café produjo mayor cantidad de biogás. La digestión anaeróbica se da a temperaturas de 30°C y 70°C, pero la mayor eficiencia de conversión de sustrato en biogás se obtiene en el rango mesofílico de 30°C a 40°C y termofílico de 55°C a 60°C. En la presente investigación, el tiempo de fermentación fue de 30 días, donde; el T3 (estiércol de ganado vacuno 70% y agua 30%), produjo el mayor volumen de biogás (1 711,7 mL). Como el objetivo es emplear pulpa de café y agua miel para producir biogás. Si se reemplaza el 40% de estiércol de ganado vacuno por pulpa de café, y en vez de agua se usa agua miel (T4), la producción de biogás disminuye en 23% (1 320 mL); sin embargo, se reduce el tiempo de fermentación a 20 días. El T2 se diferencia del T4 en que en vez de agua miel se empleó agua, lo que afectó considerablemente la producción de biogás alcanzando solamente 500 mL (62% del T4); entonces, el agua miel en vez de agua influye positivamente en la producción de biogás. El T1 se diferencia del T4 en que la mezcla no tiene estiércol de ganado vacuno, por lo que la producción de biogás fue de 250 mL (81% del T4).

Queda evidenciado que, para producir biogás, el principal sustrato es el estiércol de ganado vacuno. Si se desea utilizar la tecnología del biogás para procesar los efluentes del BHC con la finalidad de reducir su impacto ambiental, puede emplearse igual proporción de estiércol y pulpa de café, es decir 40% de cada uno y 20% restante debe ser agua miel.

El incremento de pulpa de café disminuye la producción de biogás porque el estiércol de ganado vacuno contiene más bacterias metanogénicas que aceleran el proceso de digestión, sin embargo, la pulpa de café es más rico en azúcar que permite que estas bacterias desarrollen su metabolismo con más eficiencia. Por ello, será necesario emplear como máxima cantidades iguales de pulpa de café y estiércol de ganado vacuno para compensar y/o mantener la producción de biogás, siempre que la mezcla a fermentar contenga estiércol de ganado vacuno u otras fuentes que contengan bacterias metanogénicas.

La temperatura máxima se registró a los 14 días ascendiendo a 23°C, en el cual el T4 registra un ascenso en su producción, por lo tanto, se deduce que la temperatura influyó de forma favorable en la producción de biogás al acelerar el proceso de biodigestión anaeróbica, por lo que será necesario operar los biodigestores a una mayor temperatura.

García (2014), obtuvo que la producción máxima de biogás fue de 375 mL, en un digestor de 1 750 mL que contenía 875 mL de estiércol y un tiempo de fermentación de 35 días; lo que equivale a 21,43% de biogás con respecto al volumen del digestor y 42,86% de biogás con respecto al volumen de estiércol. Así mismo Barrena *et al.*, (2007), obtuvo 195 mL de biogás en un digestor de 1 750 mL que contenía 583 mL de estiércol, a los 45 días; esto equivale a 11,14% de biogás con respecto al volumen del digestor y 33,45% con respecto al volumen del estiércol empleado. En la presente investigación, el tratamiento 4 (1 470 g de estiércol de ganado vacuno, 630 mL de agua miel) produjo el mayor volumen de biogás de 1 711,7 mL, representando el 57,06% del volumen del biodigestor (3 L) y de 81,48% con respecto al volumen del sustrato (2,1 L). De estos valores se deduce que los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación superan a lo obtenido por García (2014) en 35,63% al volumen del biodigestor y 38,62% en volumen de sustrato.

El presente estudio demostró que el T4 produjo 1 320 L de biogás a partir de 840 g de pulpa de café, 840 g de estiércol de ganado vacuno y 420 mL de agua miel de café. Estos resultados permiten tratar los efluentes del BHC con un rendimiento de producción de 63,634 L de biogás por L de pulpa de café. Por su parte Londoño (2017), obtuvo 370,8 L de biogás mediante un reactor flujo pistón (PFR), con un contenido de 61% de CH₄, 36% de CO₂ y 3% de otros gases; así como 36,1 L de lodo estabilizado, todo a partir de 268 L de pulpa de café y 114,0 L de agua, lo que indica un rendimiento de 41,52 L de biogás por L de pulpa de café. Así mismo Vera (1996), en una muestra de biogás procedente de un biodigestor de características similares a los empleados en esta investigación, el contenido de metano se encuentra entre el 55% y el 65%, el dióxido de carbono entre el 34% y el 45% y pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno.

En la presente investigación, el T4 conformado por 40% pulpa de café, 20% agua miel y 40% estiércol de ganado vacuno, la producción de biogás ocurre en menor tiempo y es la proporción adecuada que permite emplear los efluentes de BHC para producir biogás.

V. CONCLUSIONES

Con la instalación de 12 biodigestores a nivel de laboratorio, se determinó que la mezcla conformado por 40% pulpa de café, 40% de estiércol de ganado vacuno y 20% agua miel (T4), produjo 1 320 mL de biogás, representando el 77% del T3 (1 711,67 mL de biogás); sin embargo, se reduce el tiempo de fermentación a 20 días. Así mismo, en los tratamientos se aprecia que el estiércol de ganado vacuno es esencial en el rendimiento de biogás, por lo que será necesario operar biodigestores que contengan estas proporciones para dar viabilidad al presente proyecto.

La temperatura ambiental máxima y mínima promedio registrada en el laboratorio de campo fue de 23°C y 18,50°C respectivamente, en la cual se determinó que, a mayor temperatura, mayor será la producción de biogás en los tratamientos. Londoño (2017), aprovechó la pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón (PFR) en la cual la temperatura ambiente osciló entre 18°C y 27°C.

La producción de biogás a partir de las aguas mieles y pulpa de café, es una propuesta viable para sustituir la leña que emplea una familia caficultora en la cocción de alimentos, reducir la contaminación ambiental generado por los efluente del BHC, con una tecnología renovable y limpia que permitirá mejorar la calidad de vida de las personas; dando una alternativa nueva de uso y pueda emplearse en igual proporción de estiércol y pulpa de café, es decir 40% de cada uno y 20% restante debe ser agua miel de café.

VI. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, aplicar esta metodología con volúmenes más extensos de pulpa de café y aguas mieles, para evaluar composición química y rendimiento del biogás.

Para la recolección de datos se recomienda las 07:00 horas del día. Se ha demostrado que hay una variación significativa en la producción de biogás, ya que interviene factores como temperatura, presión atmosférica y otros, que alteran el comportamiento del gas en cuanto a su volumen y durante este horario los datos son más confiables para su análisis.

VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baculima, M; Rocano, G. (2015). *Estudio para la determinación de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del biogás de una granja porcina ubicada en la ciudad de Azogues*. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador.
- Balseca, D; Cabrera, J. (2011). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café*. Carrera de Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Zamorano. Honduras.
- Barrena, M; Gamarra, O; Maicelo, J. (2007). *Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento. Aporte Santiaguino*. Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo. Huaraz. Perú.
- Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*. (Estelí, Nicaragua). Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Escuela Politécnica. Universidad Carlos III de Madrid. Nicaragua.
- Botero, R; Preston T. (1987). *Biodigestores de Bajos Costos para la Producción de Combustibles y Fertilizantes a partir de Excretas*. Manual Para su Instalación, Operación y Utilización. Edición 1987.
- Boyle, M. (1995). www.saburchill.com/physics/practicals/.
- Calle, V. (1977). *Subproductos del café*. Chinchiná, Cenicafé. 84 p. (boletín N° 6).
- Chamy, R; Vivanco, E. (2007). *Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogas*. Comisión Nacional de Energía. Santiago. Chile.
- Condo, L; Pazmiño, J. (2015). *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias*. Tomo 1. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Instituto de Investigaciones. Ecuador.
- Chynoweth, D; Owens, J; Legrand, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *RenewableEnergy*, Vol. 22, No. 1-3, pp. 1-8.
- Del Real, J; Islas, J. (2010). *Biodegradación anaerobias de las aguas generadas en el despulpado del café*. Revista Colombiana de Biotecnología. Bogotá. Colombia.

- Dinsdale, R; Hawkes, F; Hawkes, D;Rodripér. (1996). *The Mesophilic and Termophilic Anaerobic Digestion of Coffee Waste and Coffee Grounds*. 30 (2), 371-377.
- FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura) (2010). Estadísticas FAO Organización de las Naciones Unidas: Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (federecafé) (2011). *Descripción del Proceso Productivo y beneficio de café*. Guía ambiental para el sector cafetero. Capítulo 6, segunda edición.
- Galindo, Y. (1998). *Caracterización de los Beneficios Húmedos de Café y estimación de sus cargas contaminantes sobre los ríos Savalich y Tarros del Municipio de San Pablo, San Marcos*. Tesis Ing. Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- García, N. (2014). *Influencia de la pulpa y agua de despulpado del café (coffea arábica) sobre la producción de biogás con estiércol de bovino*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Amazonas, Perú.
- Gómez, D; Morales, N; Adalid, J. (2006). *Producción de alcohol etílico a partir de mucílago de café*. Trabajo de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Earth.
- Guardia, Y; Noyola, A; Morgan, J. (2010). *Two-stage anaerobic digestion treating wastewater from wet processing of coffee*. En: 12th World Conference of Anaerobic Digestion, International Water Association (IWA), Guadalajara, Jalisco, México.
- Hidalgo, J; Maravilla, V; Ramírez, W. (2010). *Aprovechamiento energético del biogás en el Salvador*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". El Salvador.
- Hilbert, J. (2003). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, Inta Castelar, Morón. Argentina.
- Houbron, E; Cano, V; Reyes, L; Rustrían. (2007). *En busca de una solución sustentable para el tratamiento de los desechos del café*. Facultad de Ciencias Químicas. Campus Orizaba. Universidad Veracruzana. México.

- Houbron, E; Larrinaga, A; Rustrian, E. (2003). *Liquefaction and methanization of solid and liquid coffee wastes by two phase anaerobic digestion process*. México.
- Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (INCAITI) (1983). *Manual de construcción y operación planta de biogás*.
- Londoño, H. (2017). *Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón*. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería. Medellín. Colombia.
- López, A; Castillo, B. (2011). *Aprovechamiento de las aguas mieles para la producción de etanol y abono orgánico*. Protocolo de investigación. Universidad Nacional de Ingeniería, Sede Regional Norte, Recinto Universitario Augusto C. Sandino. Ingeniería Agroindustrial. Guatemala.
- López, A; Castillo, B. (2012). *Validación del mucílago de café para la producción de etanol y abono orgánico*. Recinto Universitario Augusto C. Sandino. Sede Regional del Norte Recinto. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.
- López, Mendieta, López. (2008). *Proceso para el tratamiento de residuos ganaderos en la isla Gran Canaria*. Recuperado el 2 de mayo de 2015 desde: <http://www.redisa.uji.es/artSim2008/tratamientoA13.pdf>.
- Martí, j. (2008) *Biodigestores familiares*. La Paz: GTZ. Bolivia.
- Molina, L. (1999). *Gastos defensivos del beneficiado de café en la zona pacífica de Nicaragua*. Nicaragua.
- Montilla, J. (2006). *Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café*. Tesis. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Manizales, Colombia.
- Palacio, F. (2007). *Estudio de la prefactibilidad de generar energía eléctrica utilizando como fuente primaria la pulpa del café que se produce en la región de Cajamarca para satisfacer las necesidades de una finca que consume 1 MWh por mes*. (Tesis de ingeniería inédita). Universidad de La Salle, Bogotá.
- Pérez, N; Castillo, R; Carballo, L; Veliz, J. (2006). *Impacto ambiental en el cultivo y procesamiento del café y su repercusión social*. Universidad de Pinar del Río, Departamento de Química. Pinar del Río, Cuba.

- Rodríguez, N. (2010). Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos, Siglo XXI: *Manejo de residuos en la agroindustria cafetera*. Cenicafé.
- Rodríguez, N. (2009). *Estudio de Un biosistema Integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia – Colombia.
- Salazar, J. (2011). *Estimación del volumen de las aguas residuales vertidos a la cuenca del Rio Entaz por Principales Plantas de Beneficio Húmedo de Café de los distritos de Villa Rica y San Luis de Shuaro en el año 2012*. Informe de prácticas. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María – Perú.
- Schutgens, G. (2010). *Tratamiento anaeróbico de aguas mieles*. Un estudio del monitoreo y posibilidades de aplicación de biogás en la finca El Socorro, Universidad Tecnológica de Delft, Facultad de Ingeniería Civil y Ciencias Geológicas. Matagalpa, Nicaragua.
- Sotolongo, J; Almarales, A; Blanco, C; Parúas, R; Chi, L; García, S. (2000). *Impacto ambiental de los residuales de café Sobre las principales cuencas de interés económico y social de la provincia Guantánamo, soluciones energéticas y medioambientales*. Delegación Territorial CITMA. Centro de Investigaciones de Energía Solar. Guantánamo, Cuba.
- Velasquez, J. (2012). *Acceso a energía eléctrica en comunidades aisladas, a partir de la producción local de biogás*. Foro de bioenergía y seguridad alimentaria. Perú.
- Zambrano, D.(1989). *Caracterización de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café*. Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE). Informe anual de actividades de la disciplina de química Industrial.
- Zambrano, D; Isaza, J. (1994). *Lavado del café en los tanques de fermentación*. CENICAFE.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Equipo experimental

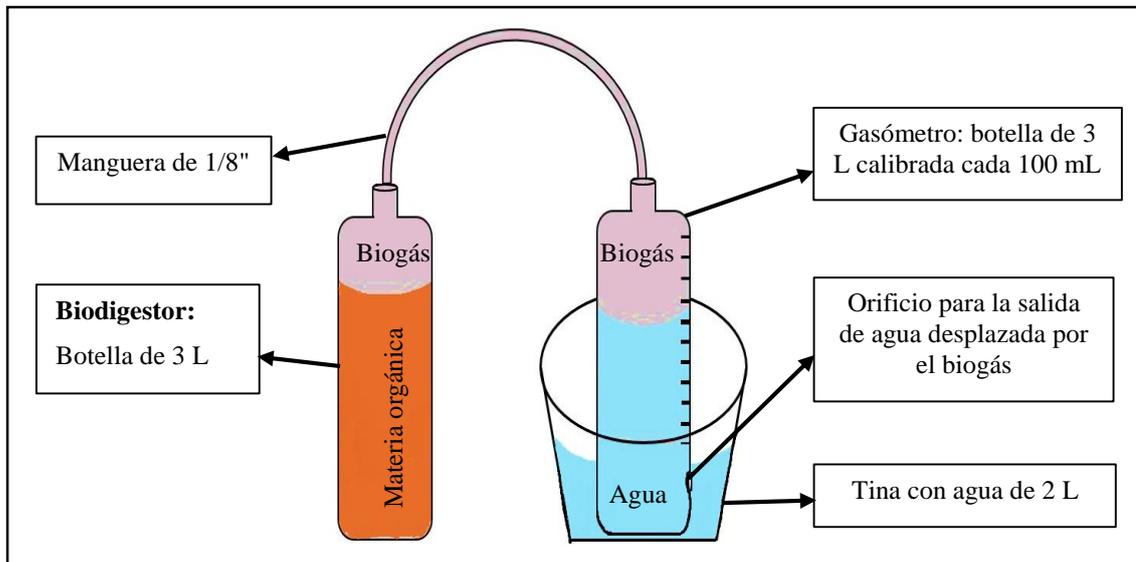


Figura 13. Esquema del equipo experimental para producir y medir el volumen de biogás.

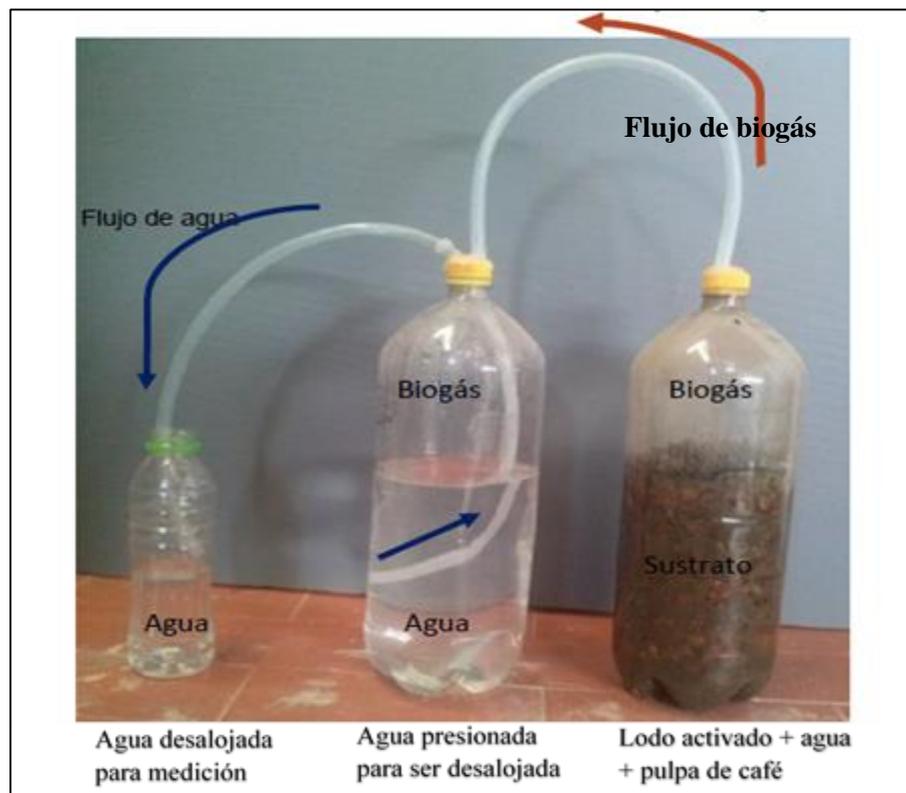


Figura 14. Modelo de reactor anaerobio discontinuo, y su respectiva cuantificación por el método de desplazamiento de líquido.

Fuente: Londoño, 2017.

Anexo 2. Lectura y análisis de datos en los horarios de 13:00 y 18:00 horas durante los 30 días de evaluación.

Tabla 11. Registro de datos a las 13: 00 horas.

DIAS	T1 (mL)				T2 (mL)				T3 (mL)				T4 (mL)				t °C		
	N	A	B	C	PT1	A	B	C	PT2	A	B	C	PT3	A	B	C	PT4	ti	tf
1	80.0	70.0	50.0	66.7	110.0	105.0	110.0	108.3	170.0	150.0	105.0	141.7	90.0	235.0	130.0	151.7	23.0	23.0	23.0
2	57.5	37.5	40.0	45.0	125.0	112.5	127.5	121.7	105.0	85.0	85.0	91.7	135.0	322.5	182.5	213.3	24.5	24.6	24.6
3	215.0	170.0	147.5	177.5	260.0	302.5	297.5	286.7	182.5	157.5	137.5	159.2	342.5	595.0	377.5	438.3	30.0	30.0	30.0
4	190.0	100.0	60.0	116.7	280.0	370.0	360.0	336.7	220.0	180.0	150.0	183.3	470.0	850.0	440.0	586.7	30.6	30.6	30.6
5	150.0	80.0	50.0	93.3	290.0	380.0	400.0	356.7	200.0	160.0	120.0	160.0	550.0	950.0	430.0	643.3	25.2	25.2	25.2
6	190.0	70.0	60.0	106.7	350.0	460.0	500.0	436.7	230.0	200.0	150.0	193.3	700.0	1100.0	500.0	766.7	25.9	25.8	25.9
7	200.0	80.0	100.0	126.7	400.0	520.0	550.0	490.0	260.0	230.0	180.0	223.3	980.0	1280.0	620.0	960.0	27.1	27.3	27.2
8	165.0	60.0	145.0	123.3	270.0	455.0	510.0	411.7	235.0	205.0	140.0	193.3	1040.0	1285.0	575.0	966.7	22.8	23.0	22.9
9	205.0	90.0	200.0	165.0	395.0	585.0	610.0	530.0	340.0	340.0	255.0	311.7	1300.0	1545.0	755.0	1200.0	27.5	27.9	27.7
10	265.0	110.0	200.0	191.7	435.0	585.0	635.0	551.7	365.0	365.0	275.0	335.0	1385.0	1620.0	770.0	1258.3	26.0	26.3	26.2
11	200.0	75.0	120.0	131.7	380.0	495.0	555.0	476.7	350.0	365.0	275.0	330.0	1350.0	1545.0	680.0	1191.7	24.0	24.2	24.1
12	280.0	125.0	200.0	201.7	495.0	570.0	690.0	585.0	430.0	465.0	350.0	415.0	1575.0	1725.0	850.0	1383.3	29.5	32.0	30.8
13	550.0	400.0	500.0	483.3	750.0	835.0	965.0	850.0	620.0	650.0	550.0	606.7	1945.0	1950.0	1125.0	1673.3	34.0	34.2	34.1
14	370.0	225.0	275.0	290.0	630.0	685.0	875.0	730.0	600.0	635.0	540.0	591.7	1830.0	1815.0	1050.0	1565.0	34.0	33.5	33.8
15	255.0	135.0	135.0	175.0	420.0	395.0	640.0	485.0	495.0	525.0	475.0	498.3	1525.0	1540.0	795.0	1286.7	30.0	29.5	29.8
16	280.0	175.0	155.0	203.3	560.0	455.0	735.0	583.3	600.0	675.0	685.0	653.3	1650.0	1565.0	935.0	1383.3	33.0	32.4	32.7
17	295.0	190.0	170.0	218.3	575.0	470.0	750.0	598.3	615.0	690.0	700.0	668.3	1665.0	1580.0	950.0	1398.3	29.0	30.0	29.5
18	270.0	135.0	65.0	156.7	370.0	380.0	585.0	445.0	580.0	635.0	725.0	646.7	1390.0	1440.0	875.0	1235.0	30.0	31.0	30.5
19	245.0	235.0	140.0	206.7	525.0	715.0	810.0	683.3	770.0	930.0	950.0	883.3	1605.0	1725.0	1190.0	1506.7	31.5	31.0	31.3
20	225.0	200.0	105.0	176.7	450.0	530.0	695.0	558.3	790.0	900.0	1035.0	908.3	1410.0	1530.0	1030.0	1323.3	23.9	24.2	24.1
21	210.0	185.0	95.0	163.3	440.0	510.0	670.0	540.0	795.0	875.0	1020.0	896.7	1395.0	1515.0	1005.0	1305.0	23.2	23.7	23.5
22	366.0	328.0	114.0	269.3	458.0	519.0	650.0	542.3	945.0	1121.0	1376.0	1147.3	1433.0	1508.0	1020.0	1320.3	22.0	22.5	22.3
23	500.0	790.0	70.0	453.3	325.0	290.0	425.0	346.7	1000.0	1240.0	1725.0	1321.7	1205.0	1220.0	775.0	1066.7	23.4	24.5	24.0
24	365.0	635.0	40.0	346.7	190.0	155.0	290.0	211.7	865.0	1065.0	1565.0	1165.0	1070.0	1085.0	640.0	931.7	23.5	24.5	24.0
25	340.0	610.0	45.0	331.7	165.0	130.0	265.0	186.7	860.0	1080.0	1565.0	1168.3	1045.0	1060.0	615.0	906.7	24.0	23.6	23.8
26	500.0	770.0	70.0	446.7	325.0	290.0	425.0	346.7	1020.0	1240.0	1725.0	1328.3	1205.0	1220.0	775.0	1066.7	24.0	25.0	24.5
27	600.0	230.0	110.0	313.3	580.0	460.0	625.0	555.0	1295.0	1630.0	2125.0	1683.3	1500.0	1470.0	1025.0	1331.7	27.2	27.2	27.2
28	614.5	244.5	124.5	327.8	594.5	474.5	639.5	569.5	1309.5	1644.5	2139.5	1697.8	1514.5	1484.5	1039.5	1346.2	27.2	27.3	27.3
29	585.5	215.5	95.5	298.8	565.5	445.5	610.5	540.5	1280.5	1615.5	2110.5	1668.8	1485.5	1455.5	1010.5	1317.2	28.0	27.3	27.7
30	614.5	244.5	124.5	327.8	594.5	474.5	639.5	569.5	1309.5	1644.5	2139.5	1697.8	1514.5	1484.5	1039.5	1346.2	28.0	28.4	28.2

Tabla 12. Registro de datos a las 18: 00 horas.

DIAS	T1 (mL)				T2 (mL)				T3 (mL)				T4 (mL)				t °C		
	N	A	B	C	PT1	A	B	C	PT2	A	B	C	PT3	A	B	C	PT4	ti	tf
1	90.0	80.0	60.0	76.7	130.0	125.0	120.0	125.0	180.0	160.0	125.0	155.0	100.0	255.0	150.0	168.3	20.0	19.8	19.9
2	115.0	75.0	80.0	90.0	165.0	150.0	170.0	161.7	125.0	100.0	95.0	106.7	190.0	385.0	250.0	275.0	23.3	23.1	23.2
3	350.0	290.0	220.0	286.7	395.0	490.0	465.0	450.0	275.0	245.0	195.0	238.3	515.0	790.0	550.0	618.3	23.5	23.3	23.4
4	300.0	270.0	180.0	250.0	460.0	500.0	530.0	496.7	250.0	210.0	150.0	203.3	600.0	950.0	550.0	700.0	24.6	24.6	24.6
5	170.0	80.0	100.0	116.7	340.0	410.0	490.0	413.3	210.0	170.0	130.0	170.0	610.0	990.0	480.0	693.3	22.8	22.7	22.8
6	300.0	210.0	210.0	240.0	460.0	590.0	620.0	556.7	280.0	250.0	180.0	236.7	880.0	1240.0	600.0	906.7	22.9	23.1	23.0
7	300.0	210.0	300.0	270.0	400.0	600.0	700.0	566.7	270.0	220.0	170.0	220.0	1100.0	1300.0	700.0	1033.3	23.7	23.9	23.8
8	175.0	60.0	130.0	121.7	310.0	475.0	540.0	441.7	250.0	215.0	155.0	206.7	1100.0	1325.0	595.0	1006.7	21.8	21.7	21.8
9	410.0	275.0	400.0	361.7	515.0	710.0	765.0	663.3	370.0	345.0	275.0	330.0	1405.0	1655.0	860.0	1306.7	24.7	24.4	24.6
10	240.0	90.0	200.0	176.7	390.0	520.0	575.0	495.0	300.0	290.0	220.0	270.0	1300.0	1530.0	675.0	1168.3	22.8	22.2	22.5
11	305.0	155.0	245.0	235.0	455.0	580.0	640.0	558.3	370.0	365.0	275.0	336.7	1435.0	1615.0	760.0	1270.0	23.7	23.0	23.4
12	500.0	400.0	450.0	450.0	620.0	700.0	850.0	723.3	480.0	550.0	380.0	470.0	1700.0	1750.0	910.0	1453.3	25.5	25.0	25.3
13	490.0	360.0	425.0	425.0	650.0	675.0	850.0	725.0	500.0	505.0	415.0	473.3	1740.0	1760.0	955.0	1485.0	25.4	25.4	25.4
14	500.0	375.0	410.0	428.3	700.0	685.0	890.0	758.3	560.0	585.0	525.0	556.7	1785.0	1770.0	1050.0	1535.0	25.0	24.5	24.8
15	270.0	155.0	160.0	195.0	500.0	435.0	730.0	555.0	530.0	585.0	600.0	571.7	1595.0	1500.0	850.0	1315.0	24.0	23.0	23.5
16	370.0	255.0	260.0	295.0	600.0	535.0	830.0	655.0	630.0	685.0	700.0	671.7	1695.0	1600.0	950.0	1415.0	24.5	24.0	24.3
17	230.0	150.0	100.0	160.0	450.0	340.0	690.0	493.3	590.0	650.0	680.0	640.0	1490.0	1440.0	800.0	1243.3	25.5	24.0	24.8
18	200.0	165.0	110.0	158.3	390.0	380.0	630.0	466.7	590.0	640.0	720.0	650.0	1365.0	1430.0	860.0	1218.3	23.5	23.0	23.3
19	360.0	350.0	290.0	333.3	600.0	650.0	805.0	685.0	740.0	825.0	925.0	830.0	1515.0	1615.0	1125.0	1418.3	25.0	24.8	24.9
20	215.0	210.0	115.0	180.0	470.0	525.0	695.0	563.3	785.0	895.0	1035.0	905.0	1400.0	1515.0	1020.0	1311.7	23.0	22.5	22.8
21	190.0	190.0	100.0	160.0	400.0	320.0	540.0	420.0	780.0	980.0	1120.0	960.0	1220.0	1290.0	800.0	1103.3	20.7	20.5	20.6
22	378.0	212.0	117.0	235.7	442.0	414.0	579.0	478.3	917.0	1139.0	1409.0	1155.0	1338.0	1367.0	899.0	1201.3	18.0	18.2	18.1
23	135.0	110.0	25.0	90.0	295.0	250.0	395.0	313.3	905.0	1135.0	1575.0	1205.0	1190.0	1135.0	720.0	1015.0	18.8	18.7	18.8
24	450.0	120.0	20.0	196.7	270.0	245.0	365.0	293.3	965.0	1245.0	1665.0	1291.7	1135.0	1190.0	730.0	1018.3	19.0	18.7	18.9
25	475.0	495.0	30.0	333.3	280.0	245.0	405.0	310.0	825.0	1005.0	1340.0	1056.7	1145.0	1175.0	715.0	1011.7	18.8	18.7	18.8
26	500.0	170.0	0.0	223.3	320.0	295.0	415.0	343.3	1015.0	1295.0	1715.0	1341.7	1185.0	1175.0	735.0	1031.7	19.0	19.6	19.3
27	575.0	90.0	30.0	231.7	370.0	230.0	390.0	330.0	1215.0	1650.0	2200.0	1688.3	1320.0	1190.0	765.0	1091.7	19.2	19.2	19.2
28	575.0	90.0	30.0	231.7	370.0	230.0	390.0	330.0	1215.0	1650.0	2200.0	1688.3	1320.0	1190.0	765.0	1091.7	19.9	19.8	19.9
29	575.0	175.0	55.0	268.3	400.0	210.0	390.0	333.3	1190.0	1650.0	2200.0	1680.0	1330.0	1190.0	765.0	1095.0	20.0	19.5	19.8
30	575.0	244.5	30.0	283.2	370.0	230.0	390.0	330.0	1215.0	1650.0	2200.0	1688.3	1320.0	1190.0	765.0	1091.7	20.0	20.0	20.0

Tabla 13. Volumen de biogás por tratamiento a las 13:00 horas, durante los 30 días de evaluación.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desviación estándar	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
T1	30	438,33	45,00	483,33	223,9889	20,9613	114,80995	13181,326
T2	30	741,67	108,33	850,00	466,9500	31,6796	173,51631	30107,908
T3	30	1606,17	91,67	1697,83	731,7111	97,2220	532,50723	283563,952
T4	30	1521,67	151,67	1673,33	1102,3278	69,7328	381,94263	145880,171
t °C	30	11,85	22,25	34,10	27,1967	0,62656	3,43180	11,777

De la Tabla 13, el T3 (estiércol 70%, agua 30%) arrojó el mayor valor equivalente a 1697,83 mL de biogás. El T4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%), produjo 1673,33 mL de biogás. La media estadística en el T4 presenta mayor valor equivalente a 1 102,3278 mL, en el T3 la media estadística es de 731,71 mL. La temperatura máxima y mínima fue de 34,1°C y 27,19 °C, respectivamente.

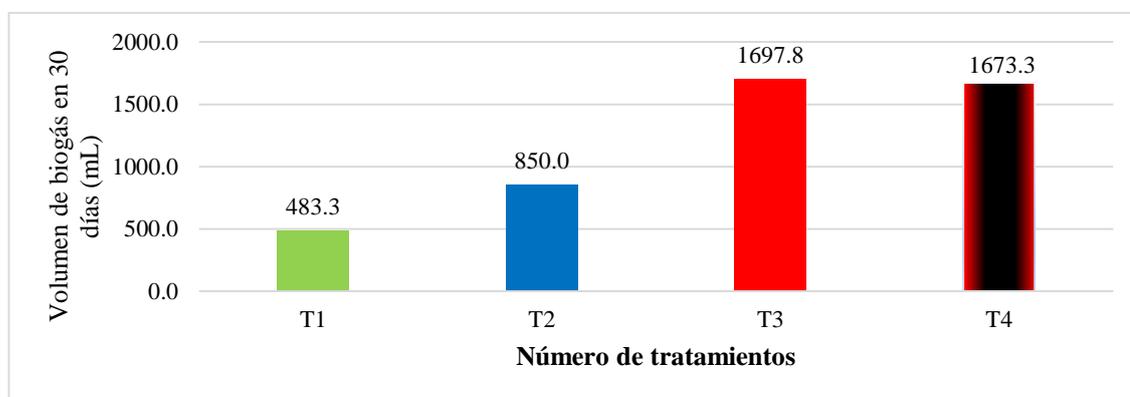


Figura 15. Volumen de biogás a las 13:00 horas.

De la Figura 15, el rendimiento de biogás en el T3 es superior en 1,44% al T4. Si se utiliza pulpa de café, estiércol de ganado vacuno en proporciones semejantes; y el agua se reemplaza por agua miel se mantendrá una buena producción de biogás para viabilidad de este proyecto. Si se utiliza solo pulpa de café y agua miel la producción de biogás descende en 71.53% al que produce el estiércol de ganado vacuno.

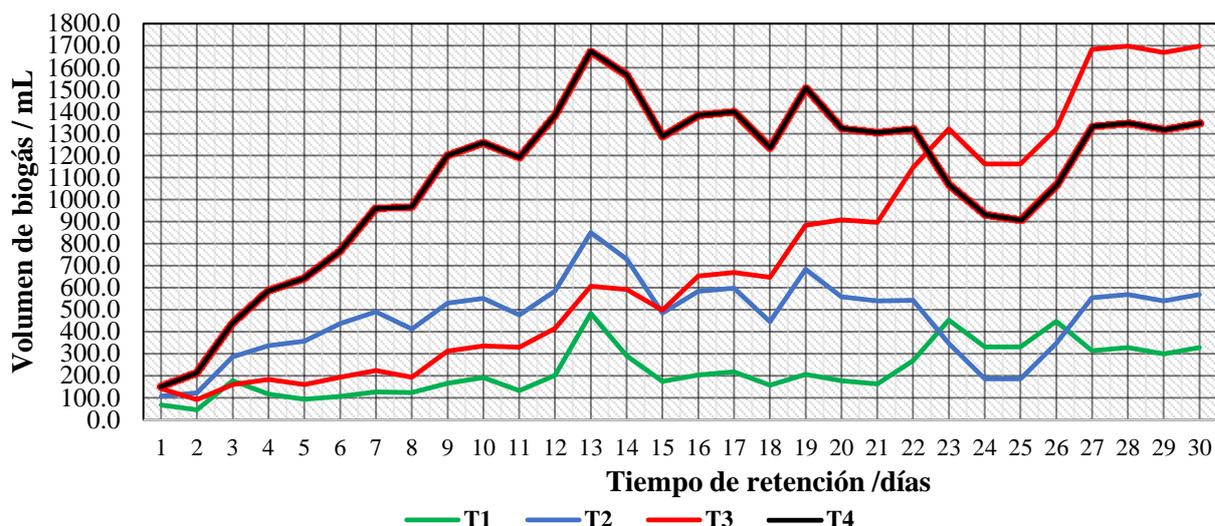


Figura 16. Comportamiento de la producción de biogás a las 13:00 horas.

De la Figura 16, el T4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%) produjo el mayor valor equivalente a 1 673,3mL de biogás en 13 días. El T3 (estiércol 70%, agua 30%) produjo 1 697,9mL de biogás en 27 días y luego comenzó a descender, manteniéndose en una producción de 900 mL. Si se utiliza pulpa de café en proporciones semejantes con estiércol de ganado, y el agua miel se reemplaza por agua miel de café, el rendimiento de biogás será en un 99% en comparación a lo que produce solo el estiércol de ganado vacuno.

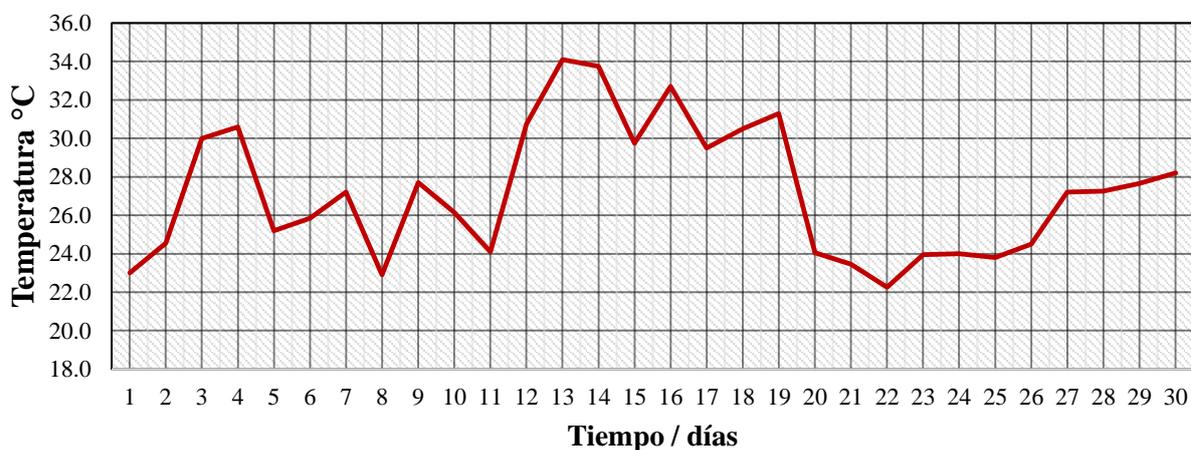


Figura 17. Comportamiento de la temperatura a las 13:00 horas.

De la Figura 17, la temperatura máxima se registró el día 13 de 34°C, en la cual el T4 produjo la mayor cantidad de biogás. La temperatura mínima se registró el día 22 de 22°C, en la cual la producción de biogás descende en el T4. El aumento de la temperatura es variable y no es muy adecuado para su análisis.

Tabla 14. Volumen de biogás por tratamiento a las 18:00 horas, durante los 30 días de evaluación.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desviación estándar	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
T1	30	373,33	76,67	450,00	236,7944	18,16007	99,46677	9893,639
T2	30	633,33	125,00	758,33	467,8333	29,72030	162,78476	26498,879
T3	30	1581,67	106,67	1688,33	733,2222	95,98571	525,73538	276397,688
T4	30	1366,67	168,33	1535,00	1076,4333	59,12648	323,84909	104878,231
t°C	30	7,30	18,10	25,40	22,1583	0,42802	2,34437	5,496

De la Tabla 14, el T3 (estiércol 70%, agua 30%) arrojó el mayor valor equivalente a 1688,33mL de biogás. El T4 (pulpa de café 40%, agua miel 20% y estiércol de ganado vacuno 40%), produjo 1 535,00mL de biogás. La media estadística en el T4 presenta mayor valor equivalente a 1 076,43 mL; el T3 fue de 733,22 mL. La temperatura máxima y mínima fue de 25, 40°C y 22,15 °C, respectivamente.

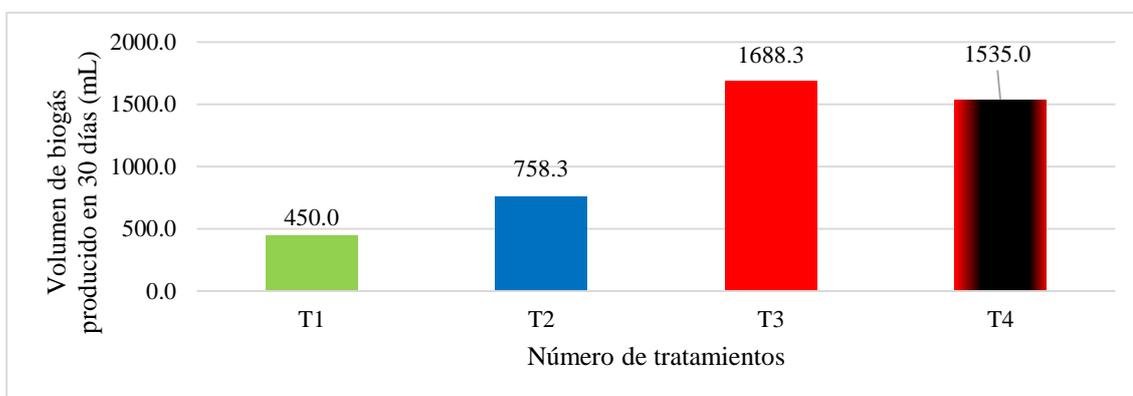


Figura 18. Volumen de biogás por tratamiento durante las 18:00 horas.

De la Figura 18, la diferencia en rendimiento de biogás en el T3 y T4 es de 9,09%. Si se utiliza solo pulpa de café y agua miel la producción disminuye en un 73,35%.

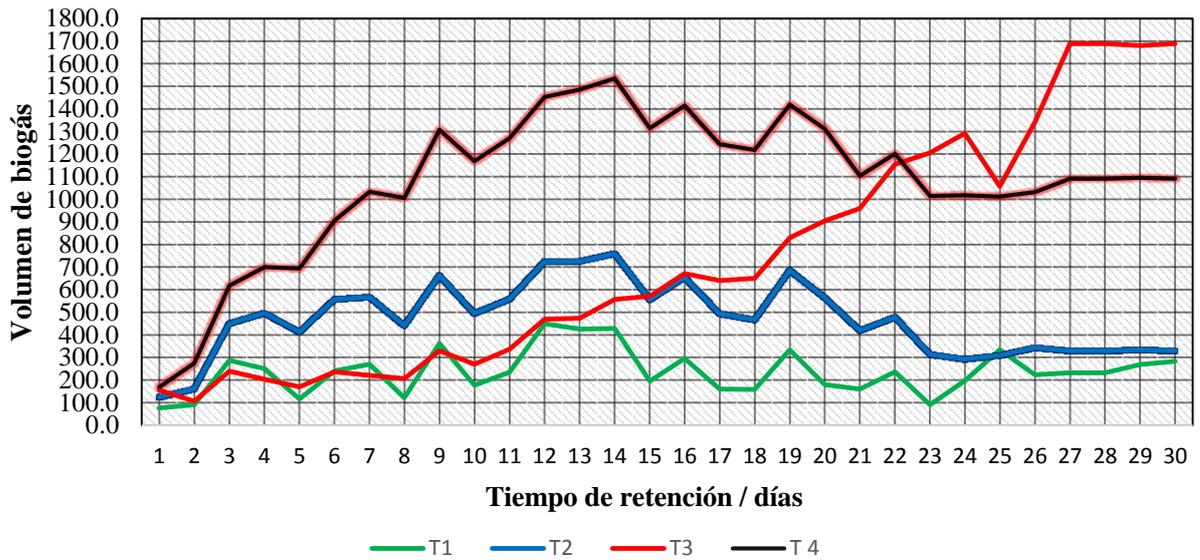


Figura 19. Comportamiento de la producción de biogás a las 18:00 horas.

De la Figura 19, la producción de biogás en este horario se diferencia por el descenso de producción de biogás a comparación con los datos obtenidos a las 13:00 horas. El T3 disminuyó en 0,99%, el T4 en 7,64%, el T2 en 5,15% y el T1 en 1,81% de rendimiento en biogás. la diferencia de temperaturas máximas es de 9°C.

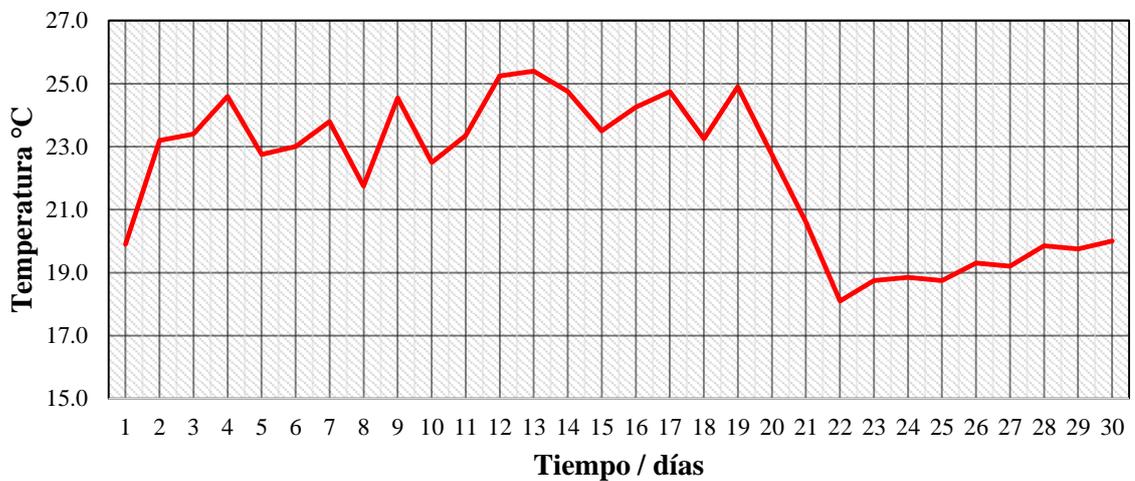


Figura 20. Comportamiento de la temperatura las 18:00 horas.

De la Figura 20, la temperatura máxima se registró el día 13 de 25,50°C, en la cual el T4 produjo la mayor cantidad de biogás. La temperatura mínima se registró el día 22 de 18°C y se mantuvo por debajo de los 21°C.

Anexo 3. Figuras del experimento



Figura 21. pH en agua de la Quebrada Copallín.



Figura 22. pH en agua miel de café.



Figura 23. pH en estiércol de ganado vacuno.



Figura 24. pH en pulpa de café.



Figura 25. pH en agua y estiércol.



Figura 26. pH en pulpa y agua miel de café.



Figura 27. Pulpa de café, estiércol y agua miel



Figura 28. Medida de pH en las mezclas



Figura 29. Balanza utilizada para la distribución de variables.



Figura 30. pH metro digital y termómetro.



Figura 31. Laboratorio de campo.



Figura 32. Recolección de datos.