

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA
DE AMAZONAS**



10 4 SEP 2014



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

INFLUENCIA DE LA PULPA Y AGUA DE DESPULPADO DEL CAFÉ (*Coffea arabica*) SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON ESTIERCOL DE BOVINO

**TESIS PARA LA OBTENCION DEL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

AUTORA: Bach. NORA DEL PILAR GARCÍA SALAZAR

ASESOR: Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

COASESOR: Ms.C. ELÍAS ALBERTO TORRES ARMAS

CHACHAPOYAS - PERÚ

2014

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

**TESIS PARA LA OBTENCION DEL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

INFLUENCIA DE LA PULPA Y AGUA DE DESPULPADO DEL CAFÉ (*Coffea arabica*) SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON ESTIÉRCOL DE BOVINO

Autor : Bach. García Salazar Nora del Pilar

Asesor : Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Coasesor : Ms.C. Elías Alberto Torres Armas

CHACHAPOYAS – PERÚ

2014

DEDICATORIA

*A Dios, a mis padres DEMETRIO y NORA
que con su amor y apoyo incondicional guían
el sendero de mi vida, como testimonio de mi
inmenso amor y eterna gratitud.*

A mis hermanos:

*ELIZABETH, ALAN, CECILIA y JUAN
PABLO, por su cariño y apoyo como
muestra de mi inmenso cariño.*

*A mi familia, a mis amigos y a todas
aquellas personas que de una forma
u otra me orientaron y motivaron
para lograr con éxito la culminación
de este trabajo, con énfasis de
amistad y cariño a Sra. Doris*

Nora

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la sabiduría y darme la oportunidad de culminar la ejecución de la presente tesis; por guiarme durante este proceso de enriquecimiento de conocimientos, por permitirme conocer y saber más sobre temas de gran importancia para mi futuro profesional.

A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por constituir la principal fuente de mi formación académica y humanística a través de los conocimientos muy bien impartidos por sus docentes.

Al Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, mi asesor de tesis y al Ms. C. Elías Alberto Torres Armas, mi coasesor, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación; al personal docente y no docente de la Universidad, así como del INDES-CES por brindarme las facilidades y el apoyo para el desarrollo de esta investigación.

A todas las personas que de una u otra manera han contribuido con el desarrollo y culminación de este trabajo.

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS

Ph.D, Dr. Hab. VICENTE MARINO CASTAÑEDA CHÁVEZ

Rector

Dr. ROBERTO JOSÉ NERVI CHACÓN

Vicerrector Académico (e)

Dr. EVER LÁZARO BAZÁN

Vicerrector Administrativo (e)

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

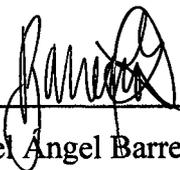
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

VISTO BUENO DEL ASESOR

El docente de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha asesorado el Proyecto y la realización de la tesis titulada INFLUENCIA DE LA PULPA Y AGUA DE DESPULPADO DEL CAFÉ (*Coffea arabica*) SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS CON ESTIÉRCOL DE BOVINO, presentada por la tesista NORA DEL PILAR GARCÍA SALAZAR, egresada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial, dando el Visto Bueno y comprometiéndome a orientarla en el levantamiento de observaciones y en la sustentación de tesis.

Se expide la presente, a solicitud de la interesada para fines que estime convenientes.

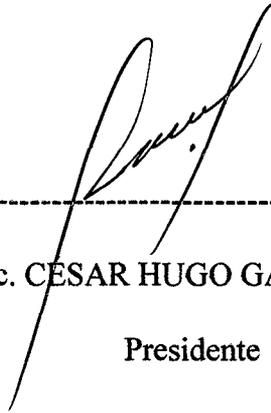
Chachapoyas, Junio de 2014



Dr. Miguel Angel Barrena Gurbillón

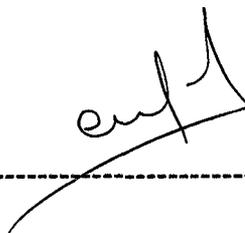
ASESOR

JURADO EVALUADOR



Ing. MSc. CESAR HUGO GARCÍA TORRES

Presidente



Ing. OSCAR MITCHEL JARA ALARCON

Secretario



Ing. WIGOBERTO ALVARADO CHUQUI

Vocal

ÍNDICE GENERAL

	Pág
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
AUTORIDADES DE LA UNTRM	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	v
JURADO EVALUADOR	vi
ÍNDICE DE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.Café.....	3
1.2.Agua de despulpado	4
1.3.Pulpa de café	5
1.4.Estiercol de vacuno	6
1.5.Digestión anaerobia.....	7
1.5.1. Etapas de la digestión anaeróbica.....	8
1.5.2. Co-digestión.....	11

1.6. Biodigestor	12
1.6.1. Tipos de biodigestores	12
1.7. Biogas.....	14
1.7.1. Usos del biogas	14
II. MATERIAL Y MÉTODOS	16
2.1. Material biológico	16
2.2. Métodos experimentales.....	16
2.2.1. Obtención de pulpa y agua de despulpado del café	16
2.2.2. Determinación de la Influencia de pulpa y agua de despulpado del café en la producción de biogás con estiércol de bovino	18
2.2.3. Preparación de biodigestores.....	18
III. RESULTADOS.....	21
3.1. Producción de biogas	21
3.2. Análisis estadístico de los factores que influyeron en la producción de biogas	22
3.3. Optimización de la producción de biogas	26
IV. DISCUSIONES.....	28
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ANEXOS.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del agua de despulpado de café.....	5
Tabla 2. Composición química de la pulpa de café	6
Tabla 3. Composición química del biogas	14
Tabla 4. Listado de artefactos que utilizan biogas	15
Tabla 5. Valor de las variables independientes a ser evaluadas con el diseño estadístico de Box-Behnken.....	19
Tabla 6. Distribución de los valores de variables según el diseño de Box-Behnken	20
Tabla 7. Producción promedio de biogas de las cuatro corridas de 15 experimentos.....	21
Tabla 8. Efectos estimados para volumen de biogas.....	22
Tabla 9. Análisis de la varianza para volumen de biogas.	23
Tabla 10. Coeficiente de regresión para volumen de biogas.....	24
Tabla 11. Resultados de la estimación para volumen de biogas	25
Tabla 12. Valores óptimos para la producción de biogas.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones de la digestión anaerobia	11
Figura 2. Modelos de biodigestores	13
Figura 3. Usos del biogas	15
Figura 4. Diagrama de flujo del beneficio del cafe	17
Figura 5. Contornos de superficie de respuesta estimada	26
Figura 6. Superficie de respuesta estimada	27

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Café (<i>Coffea arábica</i>), variedad Typica	4
Fotografía 2. Pulpa de café.....	37
Fotografía 3. Agua de despulpado.....	37
Fotografía 4. Estiércol de bovino	38
Fotografía 5. Picado de la pulpa de café	38
Fotografía 6. Pesado de la pulpa de café	39
Fotografía 7. Llenado de biodigestores	39
Fotografía 8. Instalación de biodigestores.....	40
Fotografía 9. Control de producción de biogaas	40
Fotografía 10. Producción de biogás.....	41
Fotografía 11. Producción de biogás.....	41

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se determinó la influencia de la pulpa y agua de despulpado de café (*Coffea arabica*) sobre la producción de biogas con estiércol de bovino, utilizando el diseño estadístico de Box Behnken con tres variables independientes: relación estiércol: agua, agua de despulpado de café (% volumen/ volumen de agua de despulpado de café con respecto al volumen del biodigestor) y pulpa de café (% peso/ volumen de pulpa de café con respecto al volumen de estiércol). Se emplearon como biodigestores botellas de plástico descartables de gaseosa de 1750 ml, el biogas producido se recolecto con la técnica del desplazamiento de agua, en botellas calibradas de plástico descartables de gaseosa de 500 ml, se tuvo como tiempo de fermentación 35 días. El mayor volumen de biogas producido fue de 375 ml, utilizando 875 ml de estiércol (relación estiércol: agua de 1:1), 70 ml de agua de despulpado de café (4% volumen/ volumen) y 13g de pulpa de café (3% peso/ volumen). Los resultados experimentales fueron tratados con el software Statgraphics, el cual permite predecir que se puede obtener un máximo de biogas de 275,2 ml, valor inferior al obtenido experimentalmente, cuando los valores de las variables independientes son: 875,0 ml de estiércol de bovino, 79,3361 ml de agua de despulpado de café y 13,0 g de pulpa de café, siendo los valores de la primera y la tercera variables iguales a los utilizados en la presente investigación en el experimento que produjo el mayor volumen de biogas.

Palabras Clave: Pulpa de café, agua de despulpado de café, estiércol de bovino, biogas, tiempo de fermentación.

ABSTRACT

In the present investigation the influence of pulp and water pulping coffee (*Coffea arabica*) on biogas production with cattle manure was determined using Box Behnken statistical design of three independent variables: manure : water , water coffee pulping (% v / v water pulping coffee over the digester volume) and coffee pulp (% weight / volume of coffee pulp to the volume of manure) . Digesters were used as disposable plastic bottles of 1750 ml of gas , biogas produced was collected with the technique of water displacement in bottles calibrated disposable plastic gaseosade 500 ml, had as fermentation time 35 days. The largest volume of biogas produced was 375 ml, 875 ml using manure (manure : water ratio of 1:1) , 70 ml of water pulping coffee (4% v / v) and 13g of coffee pulp (3 . % w / v) the experimental results were treated with Statgraphics software, which predicts that you can get a maximum of 275.2 ml of biogas, below the value obtained experimentally , when the values of the independent variables are: 875 , 0 ml of bovine manure , 79.3361 pulping ml water and 13.0 g of brown coffee pulp , the values of the first and the third conditions being equal to those used in the present research in the experiment produced the highest volume of biogas.

Keywords : coffee pulp , coffee pulping water , bovine manure , biogas, fermentation time.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú y sobre todo en la Región Amazonas uno de los principales cultivos es el café, que es comercializado en seco, dejando sin aprovechamiento los subproductos del proceso la pulpa y agua residual, los cuales son arrojados en los ríos, quebradas, canales de regadío o tierras de cultivo convirtiéndose en contaminantes. Otro problema que enfrenta la Región es la insuficiencia energética para satisfacer la necesidad en la zona rural.

La producción de biogas es una alternativa de interés que permite una solución a la necesidad energética, tratando residuos biodegradables tanto orgánicos como urbanos, mediante biodigestores.

En estudios realizados sobre la obtención de biogas a partir de la pulpa y agua residual de café, se evaluó la solubilización y biodegradabilidad, donde se obtuvo que las aguas residuales tienen una biodegradabilidad anaeróbica de 98,5%. 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%. La pulpa de café bajo condiciones de hidrólisis y acidogénesis presenta una solubilización de la materia orgánica de las fases sólida y líquida de hasta 70%, para un tiempo de residencia de los sólidos óptima de 20 días (Houbron *et al*, 2007).

En la biodegradación de las aguas residuales del café utilizando fluido ruminal, la biomasa es capaz de degradar 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. Se pudo comprobar que la cantidad de metano generado está en relación directa con la disminución en la DQO (Del Real e Islas, 2010).

Con estiércol de ganado vacuno, además de cofermentadores como; cáscara de papa y agua de desagüe se logró producir 195 ml de biogas en un digestor de 1750 ml que contenía 583 ml de estiércol, 35 ml de agua de desagüe, y 79g de cáscara de papa, siendo la relación 1:2 (estiércol: agua) la que produjo mayor volumen de biogas, a los 45 días (Barrena *et al*, 2007).

Para evaluar el potencial de producción de biogas a partir de estiércol de ganado, pulpa de café y aguas mieles; se realizaron 12 pruebas con 4 repeticiones por cada tratamiento de las siguientes proporciones: T1 = mezcla de 40 % pulpa de café, 20 % aguas mieles y 40 % estiércol; T2 = mezcla de 40 % pulpa de café, 20 % agua y 40 % estiércol; T3 = 30 % agua y 70 % estiércol. Después de un tiempo de retención de 47 días, se obtuvieron los siguientes resultados expresados como producción de biogas vs. Kilogramo de sustrato: 126.88 l de biogas por kilogramo de estiércol, 128 l de biogas por kilogramo de pulpa de café y 126.98 l de biogas por litro de aguas mieles; con un DQO removido de -17 % para el T1, 18 % para el T2 y 69 % para el T3. (Balseca, Cabrera, 2011).

En el estudio preliminar de la producción de biogas a partir de la digestión anaerobia del mucilago del café utilizando lodo estiércol de cerdo como inóculo, se obtuvo que esta depende de la relación inóculo/sustrato (RIS) y las condiciones de operación, seleccionándose la RIS 2 como favorable para el aprovechamiento del sustrato con una producción de 2770,8 ml, un rendimiento de 0,73 m³ CH₄/ Kg SV de sustrato adicionado y una remoción de sólidos volátiles de 52,1% a temperatura de 39°C y pH 7 (Quintero, Rondón, 2012).

Debido a que existen pocos estudios relacionados con el aprovechamiento de los residuos del beneficio del café (pulpa y agua de despulpado) para la obtención de biogas, en nuestra región, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivos:

- Evaluar diferentes mezclas de estiércol, agua de despulpado y pulpa de café para producir biogas.
- Determinar los valores óptimos de las variables para la mayor producción de biogas.

1.1. Café

El café (*Coffea arabica*), es el más difundido. El fruto del cafeto es una drupa, comúnmente llamada cereza, de forma subglobosa, de color rojo al llegar a su madurez, y que alcanza, según la especie o variedad, de 8 a 15 mm de largo. Cada fruto maduro está constituido por un exocarpio o capa roja; un mesocarpio carnudo, de color blanco amarillento (pulpa) y dos granos ovoides unidos por su faz plana. Cada grano está protegido por dos envolturas, la primera o endocarpio es delgada y de textura esclerosa (pergamino); la segunda, o perís pera o tegumento seminal, es una tela finísima (película plateada) ciertas veces, adherida al grano, gris amarillento a gris-pizarra según las variedades, el modo de preparación, el medio y el tiempo de conservación (Toledo, 2003).



Fotografía 1. Café (*Coffea arabica*) variedad Typica.

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

1.2. Agua de despulpado

En el proceso de beneficiado por vía húmeda, la etapa que sigue al despulpado es la remoción de mucílago. Por tratarse de un material gelatinoso insoluble en agua, es necesario solubilizarlo para convertirlo en un material de fácil remoción en el lavado. Para esto, es necesario forzarlo a su degradación mediante la fermentación natural, en tanques de madera, concreto, ladrillo, plástico, etc.; en períodos de tiempo que van de 6 a 48 horas, luego por medio de la inmersión, y paso de una corriente de agua, se eliminan la miel que circunda el pergamino así como las sustancias solubles formadas durante la fermentación, obteniéndose así el agua residual (Toledo, 2003).

En la Tabla 1 se presenta la composición química del agua de despulpado del café (Del Real e Islas, 2010)

Tabla 1. Composición química de agua de despulpado de café

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

Fuente: Del Real e Islas, 2010.

1.3. Pulpa de café

La pulpa de café se obtiene durante el beneficiado húmedo del café al separarse por medio de la despulpadora, la corteza o mesocarpio del grano. Representa el 40% del peso total del fruto por lo que se considera uno de los desechos más importantes del beneficiado.

Cuando la pulpa se extrae del beneficio posee del 75-80% de humedad, esto expresa la dificultad de su manejo y su disposición constituye un problema de contaminación que en la mayoría de los países productores de café no se ha resuelto de manera satisfactoria: en busca de deshacerse de forma rápida y fácil es arrojada a ríos y quebradas que, en muchos casos, son fuente de abastecimiento de agua potable, de uso

doméstico o agrícola, representando un grave peligro para la salud humana y para el medio ambiente (Toledo, 2003). En la Tabla 2 se presenta la composición química de la pulpa del café.

Tabla 2. Composición química de la pulpa de café

<i>Componente</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
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.

1.4. Estiércol de vacuno

El estiércol de vacuno o purines 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).

Se caracterizan por:

- ✓ Un alto contenido de materia orgánica y sólidos suspendidos
- ✓ Un alto contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo
- ✓ La presencia de minerales como cobre y zinc
- ✓ Un alto contenido de microorganismos patógenos de origen fecal

1.5. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogas, que es una mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros compuestos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos: residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (MINERGIA/PNUD/FAO/GEF, 2011).

En muchos ambientes anóxicos (anaerobios) los precursores inmediatos del metano son el H_2 y el CO_2 que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariotas. Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2 . Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración. Además, el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos (Carrillo *et al*, 2003).

1.5.1. Etapas de la digestión anaeróbica

Según estudios bioquímicos y microbiológicos realizados, citados en el Manual del Biogas por MINERGIA/PNUD/FAO/GEF (2011), dividen el proceso de digestión anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

a) Hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

b) Etapa fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa

del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

c) Etapa acetogénica

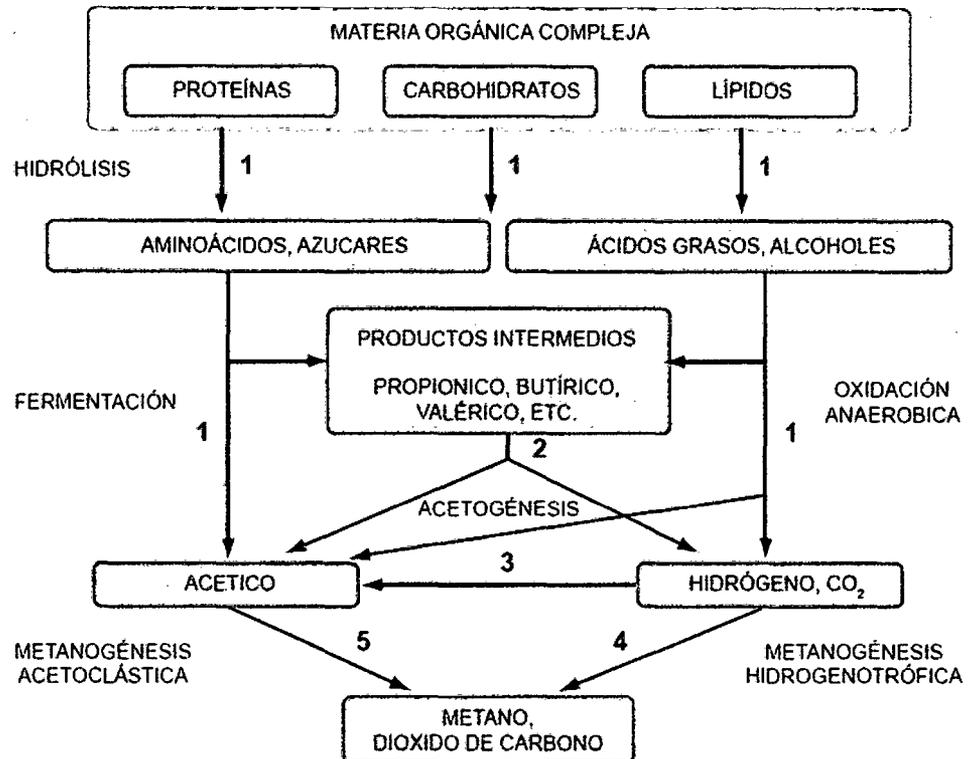
Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

d) Etapa metanogénica

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

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formiato, metanol y algunas metilaminas.

Un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcinay Methanotherix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.



*Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1. Proceso de reacciones de la digestión anaerobia

Fuente: Pavlostathis; Gómez, G. (1991) citado por MINERGIA/PNUD/FAO/GEF. (2011).

1.5.2. Co-digestión

Co-digestión anaerobia es la fermentación anaerobia de dos o más sustratos que se complementan químicamente, aumentando la estabilidad, la producción de biogas y el equilibrio del proceso. Dentro de las tecnologías de digestión anaeróbica se debe considerar la codigestión de diferentes tipos de sustratos orgánicos, ya que permite aprovechar la sinergia de las mezclas de diferentes sustratos, así como compensar las carencias de cada uno de ellos por separado. Asimismo, cuando el sustrato

orgánico presenta una baja biodegradabilidad es necesario un pre tratamiento de la materia prima para optimizar la producción de biogas (Unión Europea, *et al*, 2010).

1.6. Biodigestor

Un biodigestor es un sistema cerrado que toma ventaja de la digestión anaeróbica y que transforma biomasa o materia orgánica degradable, en biogas y/o fertilizantes. En principio, todos los materiales orgánicos pueden ser fermentados; sin embargo, solo sustratos líquidos u homogéneos pueden ser considerados para plantas de biogas simples. Entre estos se encuentran heces y orina de ganado, cerdos, aves, aguas negras, desechos vegetales, residuos de cosechas, entre otros. Aguas servidas de industrias de procesamiento de alimentos pueden ser utilizados también si este sustrato es homogéneo en su forma líquida. La producción máxima de biogas dada una cantidad de materia cruda, depende directamente del tipo de sustrato. Normalmente, el biogas 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).

1.6.1. Tipos de biodigestores

La siguiente clasificación es según el periodo de alimentación (Salazar *et al*, 2010):

- 1. Sistema discontinuo**, conocido también como de carga fija ya que se carga sólo una vez en forma total y luego se cierra herméticamente por unos 20 o 50 días. Se descarga después que deje de producir gas. Son pequeños y generalmente se emplean cilindros de 200 litros.

2. **Sistema semicontinuo**, son pequeños o de mediana escala, de uso urbano o rural. Presenta buena eficiencia de producción de biogas diaria. Los modelos que destacan en este sistema son el tipo Hindú, el tipo Chino y otro de menor costo del tipo manga de polietileno.

3. **Sistema continuo**, tienen flujo constante de biomasa activa en su interior. Son grandes sistemas sofisticados, que emplean equipos comerciales para alimentarlos, darles calefacción, agitación y control.

En la Figura 2 se muestra algunos modelos de biodigestores. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, se tiene el modelo Hindú, Chino, de geomembrana y planta de biometano

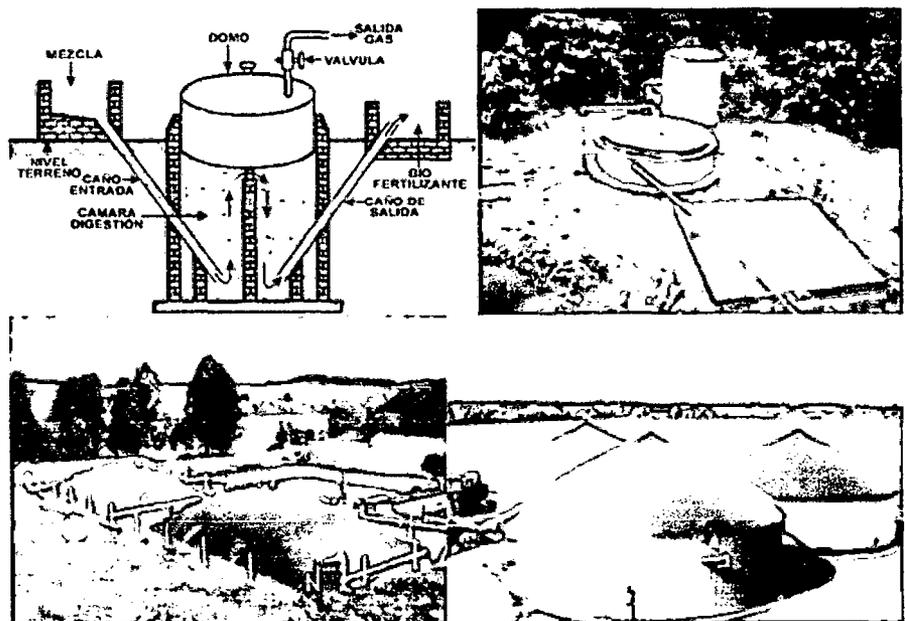


Figura 2. Modelos de biodigestores.

1.7. Biogas

El biogas es un gas combustible formado en su mayoría por metano (CH₄) y por dióxido de carbono (CO₂), aparte de contener pequeñas cantidades de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono y trazas de sulfuro de hidrógeno (H₂S), el cual le proporciona un olor característico a azufre. La llama producida por el biogas 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).

En la Tabla 3 se presenta la composición química del biogas según Hidalgo *et al*, (2010)

Tabla 3. Composición química del biogas

Composición del biogas	
<i>Componente</i>	<i>Porcentaje %</i>
Metano (CH ₄)	54 – 70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	27 – 45
Nitrógeno (N ₂)	0.5 – 3
Hidrógeno (H ₂)	1 – 10
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	0.1

Fuente: Hidalgo *et al*, 2010.

1.7.1. Usos del biogas

En principio el biogas puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. (Bautista, 2010). En la Figura 3 se muestra el resumen de las posibles aplicaciones.

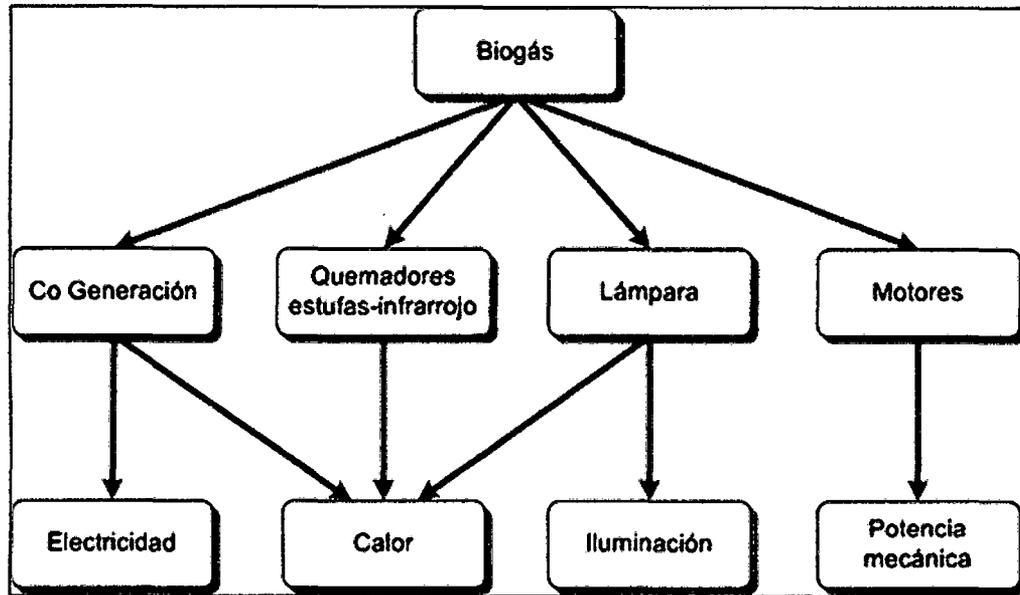


Figura 3. Usos del biogás

En la Tabla 4 se muestra un listado de los principales artefactos que utilizan biogás juntamente a consumo medio y su eficiencia (Bautista, 2010).

Tabla 4. Listado de artefactos que utilizan biogás

ARTEFACTO	CONSUMO	RENDIMIENTO (%)
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 – 60
Lámpara de gas (60 W)	120 – 170 l/h	30 – 50
Frigorífico de 100 L	-30 – 75 l/h	20 – 30
Motor a gas	0,5 m ³ /kWh o Hph	25 – 30
Quemador de 100 kW	2m ³ /h	80 – 90
Cogenerador	1kW elect. 0,5 m ³ /kWh 2kW térmica	Hasta 90

Fuente: Bautista, 2010.

II. MATERIAL Y METODOS

2.1. Material biológico

Se utilizó la pulpa y el agua de despulpado obtenidos en el proceso de beneficiado del café de la variedad Typica, procedente del distrito de Mendoza, provincia de Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas; y estiércol de bovino obtenido del Camal Municipal de la ciudad de Chachapoyas, provincia Chachapoyas, Región Amazonas.

2.2. Métodos experimentales

En el desarrollo de la presente investigación se estudió la influencia de la pulpa y agua de despulpado de café con estiércol de bovino sobre la variable respuesta que fue la producción de biogas.

2.2.1. Obtención de pulpa y agua de despulpado del café

Para la obtención de estos subproductos del café se realizó las siguientes operaciones: despulpado, fermentación y lavado.

- a. **Despulpado:** las cerezas del café recién cosechadas fueron sumergidas en agua con la finalidad de remover granos dañados, frutos verdes, hojas, ramas, que se separaron por flotación; las piedras y tierra se separaron por decantación. Enseguida los frutos fueron vertidos en la despulpadora a través de la cual los granos despulpados van por una canaleta para ser recogidos en un balde y la pulpa va cayendo por detrás hacia el exterior para ser recogidas en un balde. Este proceso no debe exceder las 8 horas luego de recolectadas las cerezas del café.

- b. **Fermentación:** los granos recién despulpados están cubiertos por una capa mucilaginosa la cual fue removida por acción bioquímica en el tanque de fermentación por un periodo de 12 a 24 horas.
- c. **Lavado:** se eliminan los residuos de mucílago de los granos así como las sustancias solubles formadas durante la fermentación, obteniéndose así el agua residual.

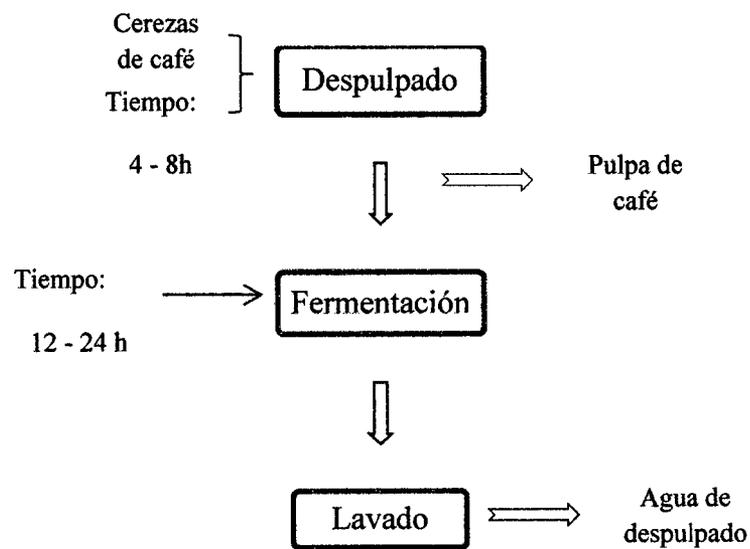


Figura 4. Diagrama de flujo del beneficio del café.

2.2.2. Determinación de la influencia de pulpa y agua de despulpado del café en la producción de biogas con estiércol de bovino

En el presente trabajo de investigación se determinó la influencia de pulpa y agua residual del café en la producción de biogas con estiércol de bovino. Se utilizó el diseño estadístico de Box-Behnken que está formado por diseños factoriales 2^k y diseños de bloques incompletos (Montgomery, 2004).

2.2.3. Preparación de biodigestores

Se utilizó como biodigestores botellas de plástico descartables de gaseosa de 1750 ml.

1. Las botellas fueron cargadas con la mezcla de componentes que se calcularon de acuerdo a la distribución de valores de las variables.
2. Se taparon las botellas con tapones de jebe microporoso atravesados por una manguera de PVC de $\frac{1}{4}$ ".
3. La manguera se introdujo en una botella de plástico descartable de $\frac{1}{2}$ l, previamente calibrada y marcada cada 10 ml, llena de agua, libre de burbujas de aire y colocada invertida en una tina con agua, sujeta con liga a un soporte de fierro.
4. Tiempo máximo de fermentación: 35 días.

Para el procesamiento de los resultados experimentales se utilizó el software estadístico: STATGRAPHICS

En la Tabla 5 se presenta el valor de las variables independientes evaluadas con el diseño estadístico de Box-Behnken, adaptado de Barrena *et al.* (2007). La relación

estiércol: agua 1:1 significa que el 50% del volumen del digestor estará ocupada por el estiércol, para la relación 1:2 corresponde el 33,3% al estiércol y para 1:3 el estiércol representa el 25%. Para el agua de despulpado de café, los porcentajes significan el volumen de esta agua con respecto a 100 ml de volumen del digestor. Los porcentajes de pulpa de café empleados corresponden al peso de este correspondiente con respecto a 100 ml de estiércol.

Tabla 5. Valor de las variables independientes a ser evaluadas con el diseño estadístico de Box-Behnken.

Concentración	Relación Estiércol: agua		Agua de despulpado de café {%(vol/vol)}		Pulpa de café {%(peso/vol)}	
Alta(+)	1:1	875ml	6	105ml	9	79g
Media(0)	1:2	583ml	4	70ml	6	35g
Baja(-)	1:3	438ml	2	35ml	3	13g

Fuente: Adaptado de Barrena *et al.*, 2007.

En la Tabla 6 se muestra la distribución de los valores de las variables independientes según el diseño de Box – Behnken (Montgomery, 2004).

Tabla 6. Distribución de los valores de variables según el diseño de Box-Behnken

Numero de experimento	Variables		
	X1	X2	X3
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	-	+
11	0	+	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fuente: Diseño y análisis de experimentos. (Montgomery, 2004).

III. RESULTADOS

3.1. Producción de biogas

En la Tabla 7 se presentan los resultados promedio de la producción de biogas de las cuatro corridas de 15 experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, siendo para cada una el mismo tiempo de fermentación de 35 días.

Tabla 7. Producción promedio de biogas de las cuatro corridas de 15 experimentos.

N° EXPERIMENTO	VARIABLES			Volumen de biogas (ml)	Orden de producción
	X1 (ml estiércol)	X2 (ml Agua de despulpado)	X3 (g pulpa de café)		
1	438	35	35	40	4
2	438	105	35	15	6
3	875	35	35	55	3
4	875	105	35	40	4
5	438	70	13	0	10
6	438	70	79	40	4
7	875	70	13	375	1
8	875	70	79	25	5
9	583	35	13	10	7
10	583	35	79	160	2
11	583	105	13	7,5	8
12	583	105	79	7,5	8
13	583	70	35	40	4
14	583	70	35	7,5	8
15	583	70	35	5	9

Fuente: Elaboración propia

El mayor valor de estiércol con el valor intermedio de agua de despulpado y con el menor valor de pulpa de café, permiten producir mayor volumen de biogas.

3.2. Análisis estadístico de los efectos que influyeron en la producción de biogas

En la Tabla 8 se presenta cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo.

Tabla 8. Efectos estimados para volumen de biogas.

Promedio	17,2942 +/- 60,7672
A: Estiércol	68,9759 +/- 64,7487
B: Agua de despulpado	-60,3949 +/- 66,6383
C: Pulpa	-71,3081 +/- 64,777
AA	56,5054 +/- 107,584
AB	9,66074 +/- 87,0609
AC	-186,145 +/- 84,7388
BB	-54,186 +/- 93,1339
BC	-79,6185 +/- 87,103
CC	128,906 +/- 107,289

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se presenta que cero de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 9. Análisis de la varianza para volumen de biogas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A: Estiércol	9062,63	1	9062,63	1,13	0,3355
B: Agua de despulpado	6559,55	1	6559,55	0,82	0,4063
C: Pulpa	9677,37	1	9677,37	1,21	0,3211
AA	2202,95	1	2202,95	0,28	0,6219
AB	98,3323	1	98,3323	0,01	0,9160
AC	38535,2	1	38535,2	4,83	0,0794
BB	703,22	1	2703,22	0,34	0,5859
BC	6672,41	1	6672,41	0,84	0,4026
CC	11528,2	1	11528,2	1,44	0,2834
Error Total	39929,3	5	7985,86		
Total corregida	131143,0	14			

R-cuadrado = 69,5529 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 14,7482 %

Error Estándar de Est. = 89,3636

Error absoluto de la media = 43,7654

Estadístico Durbin-Watson = 2,39866 (P=0,1093)

Autocorrelación residual Lag 1 = -0,228076

Fuente: Elaboración propia

04 SEP 2014



En la Tabla 10 se presenta los coeficientes de regresión de cada uno de los efectos para la ecuación del modelo ajustado.

Tabla 10. Coeficiente de regresión para volumen de biogás

Constante	-176,08
A: Estiércol	-0,0696129
B: Agua de despulpado	3,40437
C: Pulpa	4,36121
AA	0,000591776
AB	0,000631627
AC	-0,0129079
BB	-0,0221167
BC	-0,0344669
CC	0,0591856

Fuente: Elaboración propia

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de biogás} = & -176,08 - 0,0696129 \cdot \text{Estiércol} + 3,40437 \cdot \text{Agua} + \\ & 4,36121 \cdot \text{Pulpa} + 0,000591776 \cdot \text{Estiércol}^2 + 0,000631627 \cdot \text{Estiércol} \cdot \text{Agua} - \\ & 0,0129079 \cdot \text{Estiércol} \cdot \text{Pulpa} - 0,0221167 \cdot \text{Agua}^2 - 0,0344669 \cdot \text{Agua} \cdot \text{Pulpa} + \\ & 0,0591856 \cdot \text{Pulpa}^2 \end{aligned}$$

Siendo los valores de las variables especificados en sus unidades originales.

En la Tabla 11 se presenta información sobre los valores de Volumen de biogás que se han generado usando el modelo ajustado, la Tabla incluye:

- (1) el valor observado de Volumen de biogás (si hay)
- (2) el valor pronosticado de Volumen de biogás utilizando el modelo ajustado
- (3) 95,0% límites de confianza para la respuesta media.

Tabla 11. Resultados de la estimación para volumen de biogás

Fila	Observados Valor	Ajustados Valor	Inf. 95,0% CL para la Media	Sup. 95,0% CL para la Media
1	40,0	-6,25399	-195,755	183,247
2	15,0	-49,7701	-239,271	139,731
3	55,0	115,109	-94,393	324,612
4	40,0	90,9147	-118,588	300,417
5	0,0	18,0938	-159,763	195,951
6	40,0	132,93	-62,5464	328,407
7	375,0	273,214	77,5525	468,876
8	25,0	15,7616	-202,234	233,757
9	10,0	42,609	-147,035	232,253
10	160,0	113,536	-95,9238	322,995
11	7,5	58,5829	-131,062	248,227
12	7,5	-29,7275	-239,187	179,732
13	40,0	17,5	-115,127	150,127
14	7,5	17,5	-115,127	150,127
15	5,0	17,5	-115,127	150,127

Fuente: Elaboración propia

3.3. Optimización de la producción de biogás

En la Tabla 12 se muestra la combinación de los niveles de factores que maximizan el volumen de biogás por encima de la región indicada.

Tabla12. Valores óptimos para la producción de biogas.

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
A:Estiércol	438,0	875,0	875,0
B:Agua de despulpado	35,0	105,0	79,3361
C:Pulpa de café	13,0	79,0	13,0

Fuente : Elaboración propia

Esto significa que 875 ml de estiércol, 79,3361 ml de agua de despulpado y 13 g de pulpa de café son los valores óptimos para maximizar la producción de biogas a obtener, dando como resultado 275,2 ml de biogas.

En la Figura 5 se muestra los contornos de la superficie de respuesta estimada manteniendo constante la variable pulpa de café en 13 g, donde se aprecia que se obtendrá como volumen máximo de biogas 275,2 ml.

Contornos de Superficie de la Respuesta Estimada

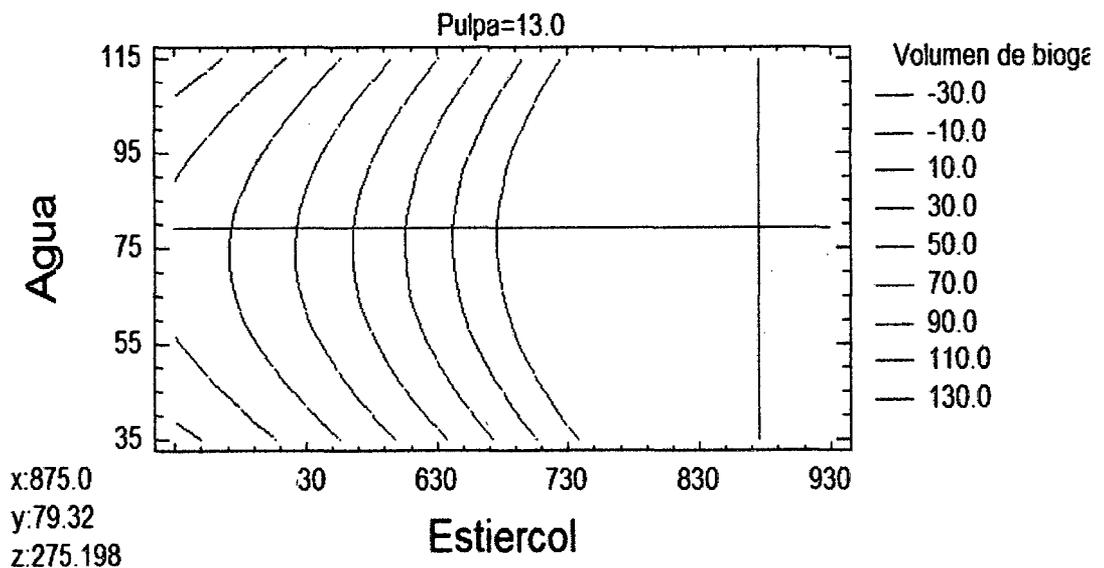


Figura 5. Contornos de superficie de la respuesta estimada.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de la superficie de respuesta estimada, a partir de la ecuación de regresión del modelo ajustado a los datos experimentales. Se lee claramente que se obtendrá 275,2 ml de biogas cuando se utilice 875 ml de estiércol, 79,3361 ml de agua de despulpado de café y manteniendo constante la variable pulpa de café en 13g.

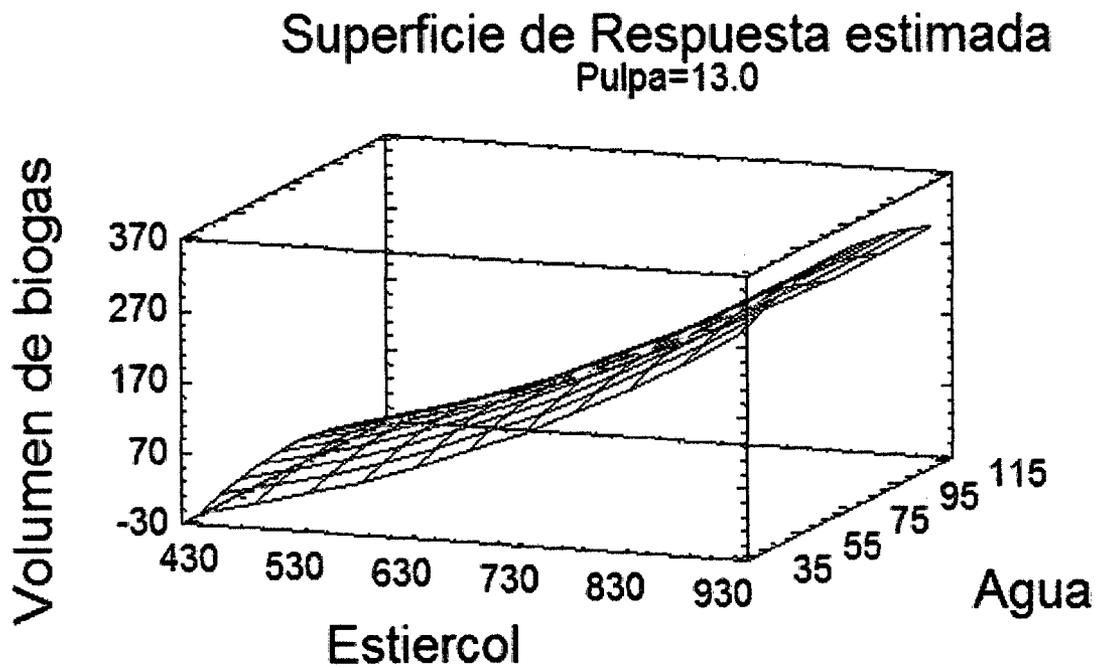


Figura 6. Superficie de respuesta estimada manteniendo constante la variable pulpa de café en 13g. Volumen máximo de biogas: 275,2 ml.

IV. DISCUSION

Según los resultados promedio mostrados en la Tabla 7, los valores de las variables del experimento 7 produjeron mayor cantidad de biogas (375 ml), seguido en orden decreciente por los experimentos 10 (160 ml) y 3 (55 ml); manteniéndose de esta manera la tendencia de las cuatro corridas experimentales, siendo el porcentaje de producción de biogas con respecto al máximo de 375 ml fue de 42,67% y 14,67%, respectivamente.

La producción máxima de biogas obtenida en el presente trabajo de investigación fue de 375 ml, en un digestor de 1750 ml que contenía 875 ml de estiércol y un tiempo de fermentación de 35 días; lo que equivale a 21,43% de biogas con respecto al volumen del digestor y 42,86% de biogas con respecto al volumen de estiércol. Barrena *et al.* (2007), obtuvo 195 ml de biogas en un digestor de 1750 ml que contenía 583 ml de estiércol, a los 45 días; esto equivale a 11,14% de biogas con respecto al volumen del digestor y 33,45% con respecto al volumen del estiércol empleado. De estos valores se deduce que los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación superan a lo obtenido por Barrena *et al.* (2007), en 10.29 puntos porcentuales con respecto al volumen de digestor y en 9.41 puntos porcentuales con respecto al volumen del estiércol utilizado. Asimismo Belseca y Cabrera (2011) obtuvieron 126,88 l de biogas por kilogramo de estiércol, a los 47 días, en digestores de 18,92 l.

En la presente investigación, se ha determinado que con el mayor volumen de estiércol empleado, que fue la variable más influyente, cuyo valor fue de 875 ml, que represento el 50% del volumen del biodigestor, se produce más biogas. Sin embargo, el incremento de pulpa de café disminuye la producción de biogas, por lo que será necesario trabajar con el

menor valor de esta variable que fue de 13g y represento el 3% (peso/ volumen) con respecto al volumen del estiércol empleado.

Asimismo, cuando se reduce la cantidad de estiércol, el incremento de pulpa de café lo compensa para mantener la producción de biogas (experimentos 10 y 6).

De otro lado, el valor más bajo de agua de despulpado empleado (35 ml), favorece la producción de biogas (experimentos 1, 3, 9 y 10). Esto se corrobora porque en todos los experimentos donde se mantuvo el valor de estiércol y de pulpa de café, el incremento de agua de despulpado redujo la producción de biogas (1 y 2, 3 y 4, 9 y 11, 10 y 12).

El análisis de los resultados obtenidos con el software Statgraphics permite predecir que se puede obtener un máximo de biogas de 275,2 ml, valor inferior al obtenido experimentalmente, cuando los valores de las variables independientes son: 875,0 ml de estiércol de bovino, 79,3361 ml de agua de despulpado de café y 13,0 g de pulpa de café (Tabla 12); siendo los valores de la primera y tercera variables iguales a los empleados en la presente investigación el experimento que produjo el mayor volumen de biogas. Esto ratifica lo mostrado en la Tabla 9, donde se especifica que ninguna de las variables tiene mayor influencia en este bioproceso.

Los resultados de la presente investigación también son una demostración que el sistema de producción de biogas permite procesar pulpa y agua de despulpado de café con lo que se contribuirá a reducir su poder contaminante u serán convertidos, además de biogas en abonos orgánicos (biol y biosol) para aplicación directa a los cultivos.

V. CONCLUSIONES

1. La máxima producción de biogas de 375 ml se ha obtenido a partir de 875 ml de estiércol de ganado vacuno (relación estiércol: agua de 1:1; 1/2 del volumen del digestor), 70 ml de agua de despulpado de café (4% volumen/volumen de agua de despulpado de café con respecto al volumen del digestor) y 13g de pulpa de café (9% peso/volumen de pulpa de café con respecto al volumen de estiércol).
2. El valor alto de la relación estiércol: agua empleado de 1:1 ha producido mayor volumen de biogas que las relaciones menor (1:3) e intermedia (1:2).
3. Un mayor volumen de agua de despulpado, no aporta a la mayor producción de biogas.
4. Con respecto a la pulpa de café, los mayores volúmenes de biogas se han producido empleando la cantidad más baja propuesta para esta investigación que fue de 13g.
5. Si se disminuye la cantidad de estiércol, se puede incrementar la cantidad de pulpa de café para mantener la producción de biogas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Instalar biodigestores para producir biogas en los lugares de beneficio del café en la provincia de Rodríguez de Mendoza, para dar un tratamiento a los efluentes (pulpa y agua de despulpado), lo que contribuirá a reducir la contaminación de fuentes de agua.
2. Producir biogas a mayor escala con los valores óptimos de cada variable, en los lugares de beneficio del café en la provincia de Rodríguez de Mendoza, donde se genera abundante pulpa y agua de despulpado de café. El biogas producido puede ser empleado como combustible ecológico para mejorar el proceso de despulpado disminuyendo costos en horas/hombre. Los otros efluentes sólido (biosol) y líquido (biol) del digestor son excelentes fertilizantes para uso en agricultura ecológica u orgánica.

VII. REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- 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.
- Carrillo, L; Sosa, A; Galindo, A; Bocourt, R. 2003. Metanogénesis ruminal: aspectos generales y manipulación para su control. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Tomo 41.
- Centro Tecnológico: AINIA. Departamento de Calidad y Medio Ambiente. 2011. Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. Valencia. España.

- 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.
- Chiriboga, O. 2010. Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezcla de desechos de procesadoras de frutas. Colegio de Ciencias e Ingeniería, El Politécnico. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador.
- Del Real, J.; Islas, J. 2010. Biodegradación anaerobias de las aguas generadas en el despulpado del café. Revista Colombiana de Biotecnología. Bogotá. Colombia.
- 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.
- Houbron, E.; Cano, V.; Reyes, L. y E. 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.
- 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. Estelí. Nicaragua.

Ministerio de Energía; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Global Environment Facility (MINERGIA/PNUD/FAO/GEF). 2011. Manual del biogás. Santiago de Chile. Chile.

Montgomery, Douglas C. 2004. Diseño y Análisis de Experimentos. 2^{da} Edición. Editorial LIMUSA WILEY. México.

Quinteros, M; Rondón, Y. 2012. Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión del mucilago de café utilizando lodo estiércol de cerdo como inóculo. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

Rodríguez, N; Zambrano, D. 2010. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. CENICAFE. Colombia.

Toledo, C. 2003. Proyecto de beneficiado ecológico de café en aldea Plan de Sánchez, Rabinal, Salamá, Baja Verapaz. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Unión Europea: Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Programa: Cooperación Transfronteriza España – Portugal, Junta de Extremadura: Consejería de industria, energía y medio ambiente, 2010. Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, en el marco del Proyecto de Cooperación transfronteriza

España-Portugal-Altercexa, para el apoyo al cambio climático a través del fomento de las energías renovables en Extremadura, Alentejo y Centro. España

Salazar, J; Amusquivar, C; Llave, J y C, Rivasplata. 2012. Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna. E.A.P. de Física, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna. Perú.

ANEXOS

ANEXO A

TABLAS DE DATOS OBTENIDOS EN CORRIDAS REALIZADAS DURANTE EL PROCESO DE OBTENCION DE BIOGAS

En la Tabla A1 se presentan los resultados de la producción de biogas de la primera corrida de 15 experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, siendo el tiempo de fermentación de 35 días.

Tabla A1: Producción de biogas de la primera corrida de 15 experimentos.

N° EXPERIMENTO	VARIABLES			Volumen de biogás (ml)
	X1 (ml estiércol)	X2 (ml Agua de despulpado)	X3 (ml pulpa de café)	
1	438	35	35	10
2	438	105	35	5
3	875	35	35	30
4	875	105	35	20
5	438	70	13	0
6	438	70	79	25
7	875	70	13	130
8	875	70	79	30
9	583	35	13	10
10	583	35	79	170
11	583	105	13	0
12	583	105	79	10
13	583	70	35	50
14	583	70	35	5
15	583	70	35	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla A2 se presentan los resultados de la producción de biogas de la segunda corrida de 15 experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, siendo el tiempo de fermentación de 35 días.

Tabla A2: Producción de biogas de la segunda corrida de 15 experimentos.

N° EXPERIMENTO	VARIABLES			Volumen de biogás (ml)
	X1 (ml estiércol)	X2 (ml Agua de despulpado)	X3 (ml pulpa de café)	
1	438	35	35	30
2	438	105	35	10
3	875	35	35	5
4	875	105	35	10
5	438	70	13	0
6	438	70	79	50
7	875	70	13	350
8	875	70	79	10
9	583	35	13	5
10	583	35	79	120
11	583	105	13	5
12	583	105	79	5
13	583	70	35	0
14	583	70	35	5
15	583	70	35	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla A3 se presentan los resultados de la producción de biogas de la tercera corrida de 15 experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, siendo el tiempo de fermentación de 35 días.

Tabla A3: Producción de biogas de la tercera corrida de 15 experimentos.

N° EXPERIMENTO	VARIABLES			Volumen de biogás (ml)
	X1 (ml estiércol)	X2 (ml Agua de despulpado)	X3 (ml pulpa de café)	
1	438	35	35	20
2	438	105	35	5
3	875	35	35	60
4	875	105	35	50
5	438	70	13	0
6	438	70	79	20
7	875	70	13	400
8	875	70	79	5
9	583	35	13	10
10	583	35	79	100
11	583	105	13	5
12	583	105	79	0
13	583	70	35	5
14	583	70	35	5
15	583	70	35	5

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla A4 se presentan los resultados de la producción de biogas de la cuarta corrida de 15 experimentos realizados en el presente trabajo de investigación, siendo el tiempo de fermentación de 35 días.

Tabla A4: Producción de biogas de la cuarta corrida de 15 experimentos.

N° EXPERIMENTO	VARIABLES			Volumen de biogás (ml)
	X1 (ml estiércol)	X2 (ml Agua de despulpado)	X3 (ml pulpa de café)	
1	438	35	35	50
2	438	105	35	20
3	875	35	35	50
4	875	105	35	30
5	438	70	13	0
6	438	70	79	30
7	875	70	13	220
8	875	70	79	20
9	583	35	13	10
10	583	35	79	150
11	583	105	13	10
12	583	105	79	5
13	583	70	35	30
14	583	70	35	10
15	583	70	35	5

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B

DATOS PROMEDIOS DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL Y HUMEDAD REGISTRADOS DURANTE LOS 35 DÍAS DE FERMENTACION EN LAS CUATRO CORRIDAS

En la Tabla B1 se presentan los datos promedio de la temperatura ambiental y humedad registrados durante los 35 días de fermentación de las cuatro corridas de 15 experimentos realizadas durante el proceso de la producción de biogas.

Tabla B1: Datos promedio de temperatura ambiental y humedad registrados durante los 35 días de fermentación de las cuatro corridas.

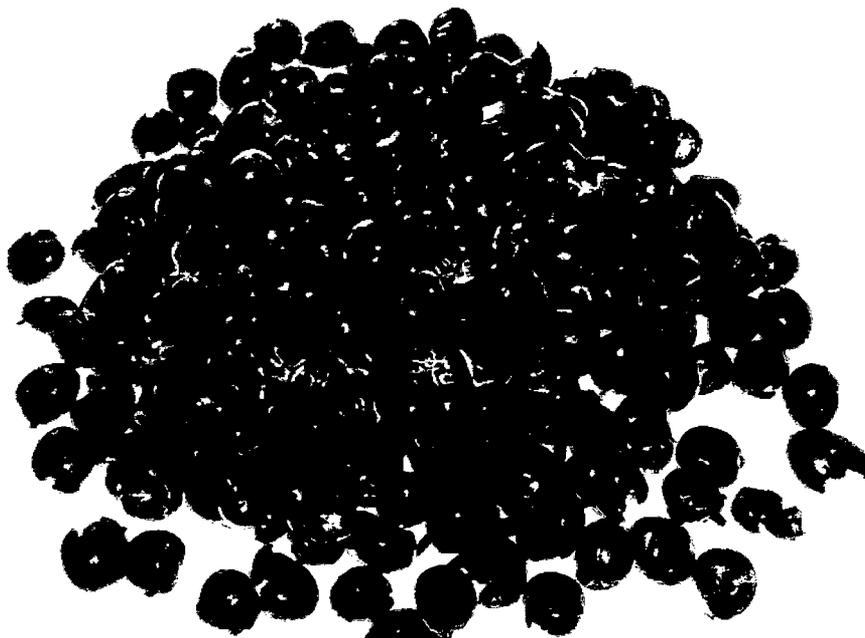
DIA	T°			H°		
	T°	MAX	MIN	H°	MAX	MIN
1	19,55	24.9	13,1	61.5	90.5	46.5
2	21,35	24.9	13,1	60	90.5	46.5
3	21,05	24.9	13,1	64.5	90.5	46.5
4	19,75	24.9	13,1	71.5	90.5	46.5
5	19,2	24.9	12,7	68	90.5	43
6	22,7	24.9	12,7	58	90.5	43
7	21	24.9	12,7	66	90.5	43
8	19,8	24.9	12,7	71.5	90.5	43
9	20,5	24.9	12,7	71.5	90.5	43
10	20,15	24.9	12,3	76	90.5	43
11	18,5	24.9	12,7	75.5	91	43
12	19,8	24.95	12,7	72	91	43
13	19,2	24.65	12,7	68.5	91	43
14	19,95	24.95	12,5	66.5	91	43
15	20,35	24.9	12,55	70.5	91	43
16	20,7	24.9	12,55	66.5	91	43

17	21,75	24.9	12,55	66.5	91	43
18	21,7	24.9	12,55	69.5	91	43
19	20,2	24.9	12,55	70	91	43
20	20,1	24.9	12,55	72.5	91	43
21	21	24.9	12,55	69.5	91	43
22	21,15	24.9	12,55	65.5	91	43
23	21,3	24.9	12,55	64	91	43
24	20,35	24.9	12,55	66	91	43
25	20,6	24.9	12,55	69.5	91	43
26	21,8	24.9	12,55	69	91	43
27	20,95	24.9	12,55	65.5	91	43
28	21,25	24.9	12,55	65	91	43
29	21,2	24.9	12,55	67.5	91	43
30	21,6	24.9	12,55	64.5	91	43
31	21,45	24.9	11	60.5	91	38.5
32	21,8	24.9	11	63.5	91	38.5
33	20,8	24.9	11	64.5	91	38.5
34	19,9	24.9	11	65.5	91	38.5
35	19,4	24.9	11	66	91	35

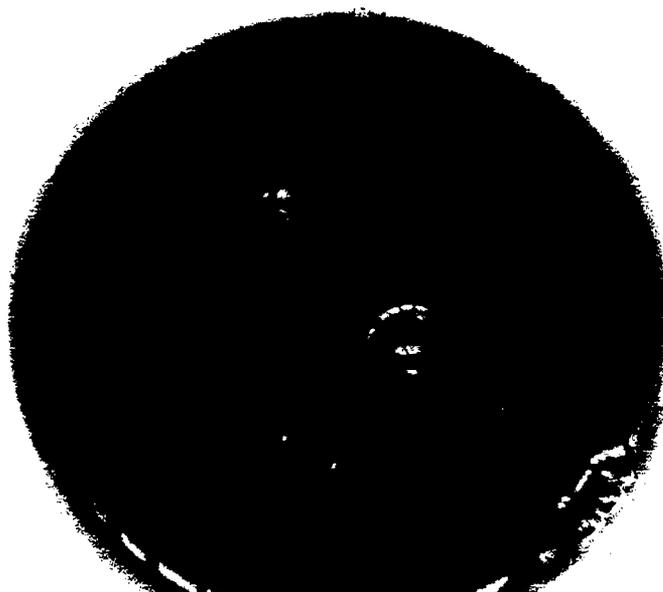
Fuente: Elaboración propia

ANEXO C

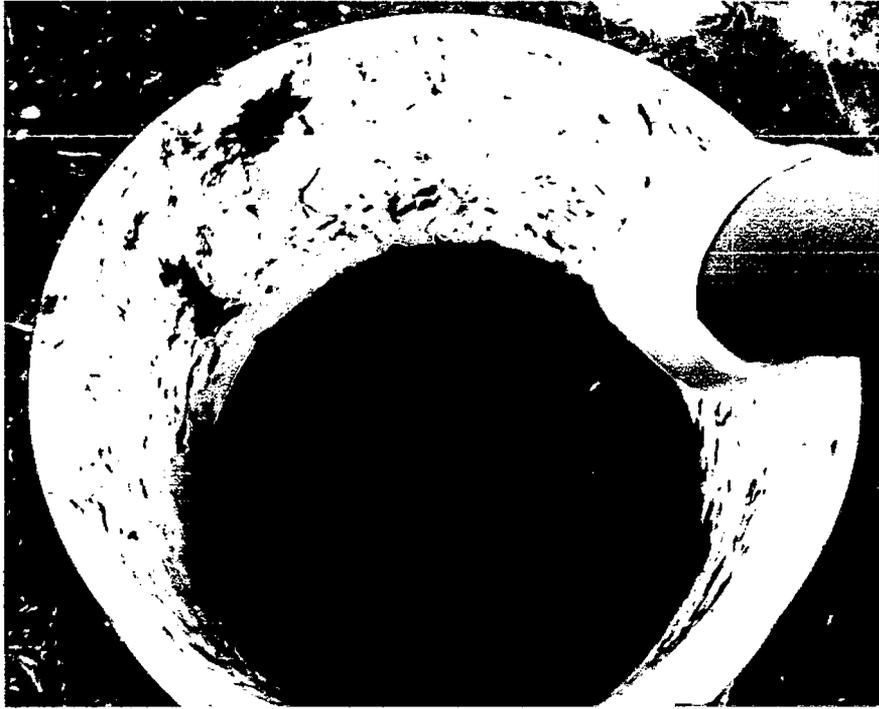
FOTOGRAFIAS



Fotografía 2. Pulpa de café.



Fotografía 3. Agua de despulpado de café.



Fotografía 4. Estiércol de bovino.



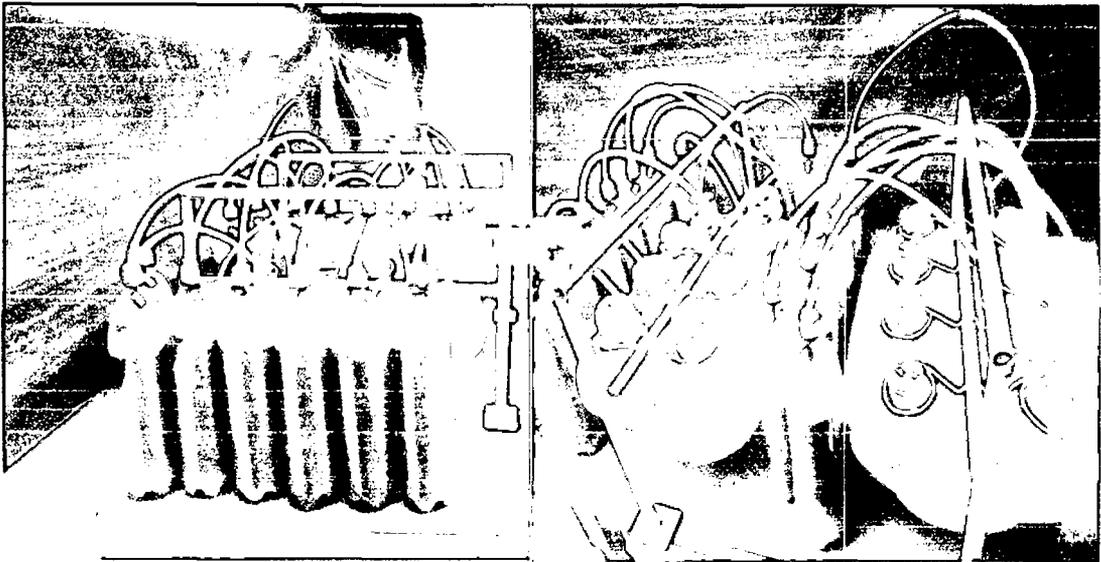
Fotografía 5. Picado de la pulpa de café.



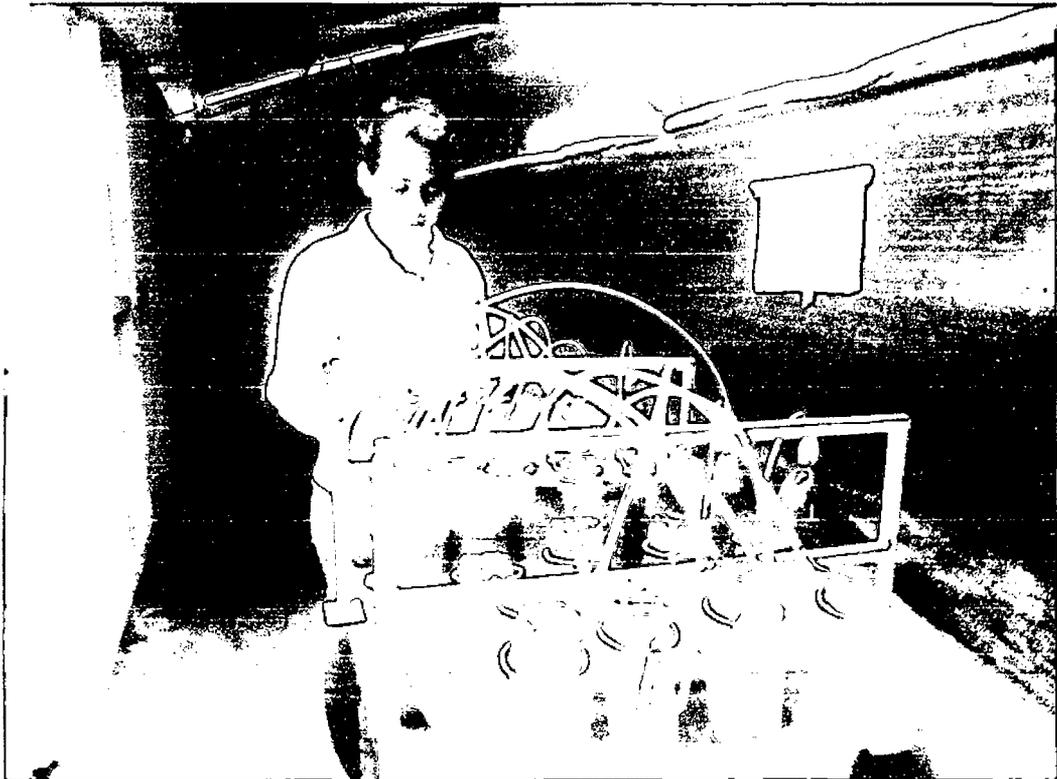
Fotografía 6. Pesado de pulpa de café.



Fotografía 7. Llenado de biodigestores.



Fotografía 8. Instalación de biodigestores.



Fotografía 9. Control de producción de biogás.



Fotografía 10. Producción de biogás.



Fotografía 11. Producción de biogás.