

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



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

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL**

**INFLUENCIA DEL ESTIÉRCOL DE CERDO Y LOS
EFLUENTES DEL PROCESO HÚMEDO DEL CAFÉ,
SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE
LABORATORIO**

Autora: Bach. Maryori Steissy Valderrama Ruiz

Asesor: Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Registro:.....

CHACHAPOYAS – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A Dios, por sus bendiciones e iluminar mi camino, y brindarme la fuerza necesaria para lograr uno de mis grandes propósitos que es ser profesional.

A mis abuelos Georgina y Segundo, por su motivación a seguir adelante y a quienes prometí que terminaría mis estudios.

A mis padres Oscar y Marcela, por su apoyo y amor incondicional, que me enseñaron desde pequeña a luchar para alcanzar mis metas.

A mi familia que es lo más grande que Dios me ha dado, por su apoyo moral y espiritual, que de una u otra forma estuvieron a mi lado apoyándome para lograr alcanzar mi meta de ser profesional.

A todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de esta investigación, a todos ellos les agradezco desde el fondo de mi alma.

MARYORI

AGRADECIMIENTO

A Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

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

Al Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, por su valiosa guía y asesoramiento para la realización de la presente tesis.

A todos los que me brindaron su ayuda en este proyecto.

MARYORI

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

**DR. POLICARPIO CHAUCA VALQUI
RECTOR**

**DR. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**DRA. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

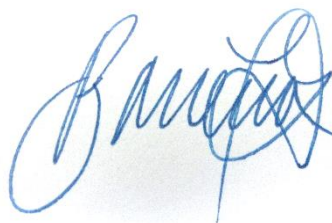
**LIC. JOSÉ LUIS QUISPE OSORIO
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **Influencia del estiércol de cerdo y los efluentes del proceso húmedo del café, sobre la producción de biogás a nivel de laboratorio**; de la Bachiller en Ingeniería Ambiental: Maryori Steissy Valderrama Ruíz, de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 23 de marzo de 2021.



Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Asesor

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Dr. Ricardo Edmundo Campos Ramos
Presidente



Ing. Juan Alberto Romero Moncada
Secretario



Ing. Wildor Gosgot Ángeles
Vocal

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-0

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

INFLUENCIA DEL ESTIÉRCOL DE CERDO Y LOS EFLUENTES DEL PROCESO HÚMEDO DEL CAFÉ, SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A NIVEL DE LABORATORIO

presentada por el estudiante ()/egresado MARYORI STESSY VALDEERRAMA RUIZ

de la Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL


con correo electrónico institucional stessy_lovez@hotmail.com

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:


- La citada Tesis tiene 25 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor () / igual al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 30 de ABRIL del 2021

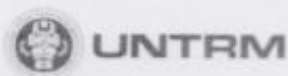

SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-0

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

INFLUENCIA DEL ESTIÉRCOL DE CERDO Y HED. ELEMENTOS DEL PROCESO HÚMEDO
DEL CAFÉ, SOBRE LA PRODUCCIÓN DE PICOPÁS A NIVEL DE LABORATORIO

presentada por el estudiante ()/egresado MARYORI STEISSY VALDERAMA RUIZ

de la Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL

con correo electrónico institucional steissy_loves@hotmail.com

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 25 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor () / igual al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 30 de ABRIL del 2021.

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS	iv
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	v
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	vi
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	14
II. MATERIAL Y MÉTODOS	17
2.1. Ubicación del área de estudio	17
2.2. Sustratos	17
2.3. Construcción del equipo experimental	18
2.4. Carga de los biodigestores.....	19
III. RESULTADOS.....	22
3.1. Temperatura ambiente	22
3.2. Producción de biogás.....	22

3.3. Optimización de la producción de biogás utilizando el diseño estadístico de Box – Behnken	23
IV. DISCUSIÓN	25
V. CONCLUSIONES	29
VI. RECOMENDACIONES	30
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
ANEXOS	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de las variables independientes.....	19
Tabla 2. Distribución de valores de las variables según Box-Behnken.....	20
Tabla 3. Valores de las variables para cada experimento según Box-Behnken.	20
Tabla 4. Producción de biogás a nivel de laboratorio.	23
Tabla 5. Valores óptimos de las variables para maximizar el volumen de biogás.....	24
Tabla 6. Temperatura ambiente promedio en el Distrito de Bagua.	34
Tabla 7. Registro de producción de biogás por cada corrida.....	35
Tabla 8. Coeficiente de regresión para el volumen de biogás	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Digestión anaeróbica de materia orgánica.....	15
Figura 2. Ubicación del sitio de experimentación.....	17
Figura 3. Pulpa de café (A) y aguas mieles (B).	17
Figura 4. Estiércol de cerdo.....	18
Figura 5. Equipo experimental a nivel laboratorio.	19
Figura 6. Llenado de los biodigestores de acuerdo a las variables (estiércol de cerdo (A), agua miel (B) y pulpa de café (C))......	21
Figura 7. Biodigestores conectados a su respectivo gasómetro.	21
Figura 8. Temperatura ambiente durante los 25 días de evaluación.....	22
Figura 9. Superficie de respuesta estimada.	24

RESUMEN

La presente investigación se realizó en Bagua, Amazonas, cuyo objetivo fue evaluar la influencia del estiércol de cerdo y los efluentes del proceso húmedo del café (agua miel y pulpa de café), sobre la producción de biogás en laboratorio; para proponer una alternativa de tratamiento y reducir su impacto ambiental. Se empleó 15 botellas descartables de 3 L como biodigestores y 15 gasómetros de 500 mL calibrados cada 50 mL, ambos conectados con manguera. El biogás producido se midió por desplazamiento de agua, con un tiempo de fermentación de 25 días y diseño estadístico de Box-Behnken con tres repeticiones. Cada biodigestor fue llenado de acuerdo a las variables relación estiércol-agua de 1:3, 1:4 y 1:5; agua miel en 2 mL, 4 mL y 6 mL correspondiente a un porcentaje del volumen del biodigestor y pulpa de café 3 g, 6 g y 9 g que es un porcentaje del estiércol empleado; la variable dependiente fue volumen de biogás producido por cada experimento. Con agua potable reposada de un día para otro, se completó a 3 L el volumen de cada biodigestor. La mayor producción de biogás fue 1660 mL con el tratamiento 8, relación estiércol: agua (1:3), que equivale a 750 mL de estiércol de cerdo, 120 mL de agua miel y 36 g de pulpa de café. El programa Statgraphics 5.0 predice un máximo de biogás de 1752,35 mL con 749,91 mL de estiércol de cerdo, 60 mL de agua miel y 15,02 g de pulpa de café.

Palabras Clave: Agua miel, pulpa de café, biodigestor, Box-Behnken.

ABSTRACT

This research was carried out in Bagua, Amazonas, whose objective was to evaluate the influence of pig manure and the effluents of the wet coffee process (honey water and coffee pulp), on the production of biogas in the laboratory; to propose an alternative treatment and reduce its environmental impact. 15 disposable 3 L bottles were used as biodigesters and 15 gasometers of 500 mL calibrated every 50 mL, both connected with a hose. The biogas produced was measured by water displacement, with a fermentation time of 25 days and a statistical design of Box-Behnken with three repetitions. Each biodigester was filled according to the manure-water ratio variables of 1: 3, 1: 4 and 1: 5; honey water in 2 mL, 4 mL and 6 mL corresponding to a percentage of the volume of the biodigester and coffee pulp 3 g, 6 g and 9 g, which is a percentage of the manure used; the dependent variable was the volume of biogas produced by each experiment. With drinking water settled overnight, the volume of each biodigester was completed to 3 L. The highest biogas production was 1660 mL with treatment 8, manure: water ratio (1: 3), which is equivalent to 750 mL of pig manure, 120 mL of honey water and 36 g of coffee pulp. The Statgraphics 5.0 program predicts a biogas maximum of 1752.35 mL with 749.91 mL of pig manure, 60 mL of honey water, and 15.02 g of coffee pulp.

Keywords: Honey water, coffee pulp, biodigester, Box-Behnken.

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo, las actividades humanas generan grandes cantidades de residuos orgánicos que son desechados sin tratamiento alguno, provocando un grave problema de contaminación ambiental (Sánchez & Vizcón, 2017). Las actividades agrícolas y ganaderas se han convertido en un factor contaminante, siendo una de las principales causantes de la emisión de gases a la atmósfera (CH_4 , CO_2 y N_2O), perjudicando a los ecosistemas naturales y a la humanidad (Costantini et al., 2018). Sin embargo, la actividad cafetalera es de gran importancia por los grandes beneficios económicos, pero a la vez origina alteraciones ambientales por el proceso húmedo del café (Urquijo, 2016). Este proceso consta de las siguientes etapas: recepción del fruto, despulpado (obteniendo como residuo la pulpa de café), fermentación del mucílago, lavado del grano (generando como efluente las aguas mieles), secado y finalmente el almacenamiento para su comercialización (Rolz, 2016). La mayor contaminación por este proceso es en las etapas del despulpado y lavado del grano, por la acumulación de la pulpa y la carga orgánica en el agua residual (Acosta & García, 2019). Estos efluentes, comúnmente son vertidos en las mismas fincas cafetaleras y a los cuerpos de agua más cercanos, representando un alto riesgo para el entorno, generando así la eutrofización y alteración de las fuentes receptoras de agua (Abumalé, 2018).

Por otro lado, la crianza de porcinos provoca graves impactos ambientales por la generación de excretas, contaminando las fuentes hídricas, suelos y aire (Cárdenas et al., 2019). Muchas veces el manejo de estos residuos es inadecuado por la falta de conocimiento de los porcicultores (Osejos et al., 2018). Sin embargo, el estiércol porcino es un recurso valioso que puede ser usado como abono orgánico para fertilizar los campos de cultivo posibilitando desarrollar actividades productivas sustentables (Moreno & Cadillo, 2018). Asimismo, puede ser empleado para generar energía en forma de biogás, favoreciendo además el crecimiento económico del establecimiento y reduce los problemas de contaminación (Osejos et al., 2018).

Por ello; se debe buscar soluciones para la optimización del tratamiento de los residuos, trayendo a su vez beneficios económicos como la producción de energía limpia (Giubi, Bernal & Cañete, 2019). Una alternativa de solución es la digestión anaerobia que permite procesar los residuos orgánicos a través de un proceso biológico sin presencia de oxígeno, generando principalmente biogás (Acarley & Quipuzco, 2020), compuesto mayormente

por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros componentes en menor proporción (Navarro et al., 2017).

La digestión anaerobia consta de cuatro etapas consecutivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Parra, 2015; Moraes, Zaiat & Bonomi, 2015). En la hidrólisis, los polímeros orgánicos (carbohidratos, proteínas y lípidos), se convierten en monómeros (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga). En la acidogénesis, los monómeros son metabolizados por las bacterias acidogénicas, obteniéndose productos intermedios (alcoholes, propiónico, butírico, valérico, etc.). En la acetogénesis, los productos generados en la acidogénesis se convierten en compuestos precursores del biogás (ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono). Finalmente, en la metanogénesis, se obtiene el biogás, por medio de dos grupos de bacterias metanogénicas, los metanógenos hidrogenotróficos, que utilizan hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano (CH_4) y los metanógenos acetotróficos que convierten el acetato en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

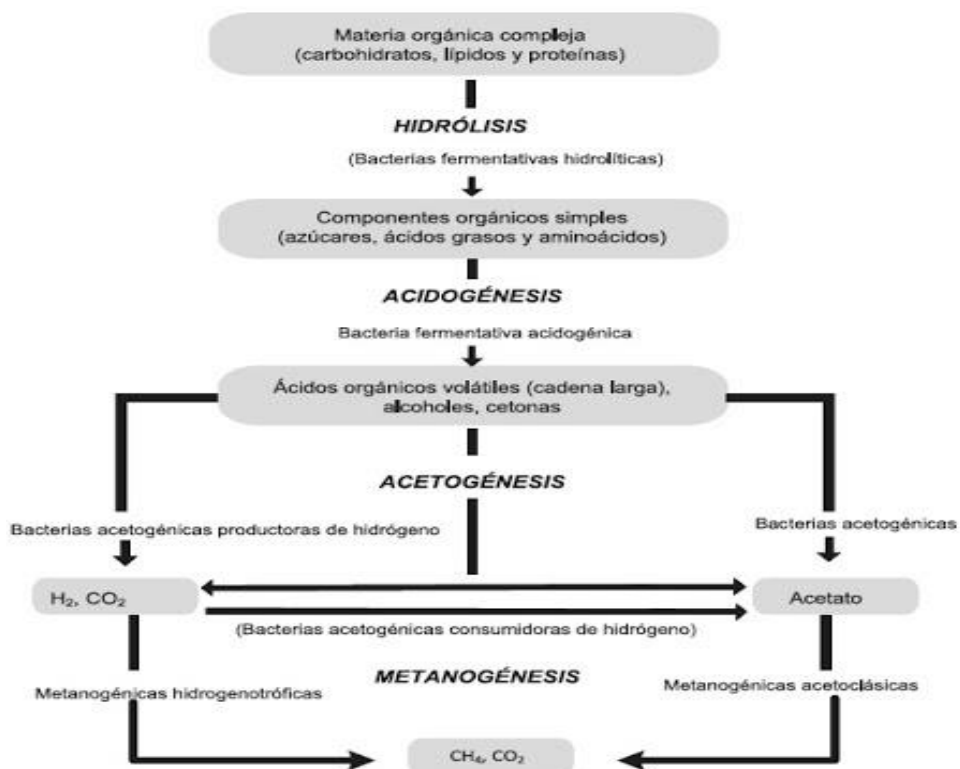


Figura 1. Digestión anaeróbica de materia orgánica.

Fuente: Moraes, Zaiat & Bonomi (2015).

La producción de biogás es influenciada por la temperatura ambiente como único parámetro ambiental, porque a mayor temperatura menor será el tiempo de descomposición anaeróbica y viceversa (Barrena et al., 2019).

Jimenez & García (2020), evaluaron la producción de biogás a partir de estiércol de porcino y pulpa de café, en biodigestores cilíndricos de PVC de 1,20 m de altura y 1 m de diámetro, con tres tratamientos: 60 % estiércol de ganado porcino y 40 % cáscara de café, produjo 0,142336 m³ de biogás, siendo éste el tratamiento más eficaz. Asimismo, Olano (2018), empleó biodigestores de plástico de 3 litros para producir biogás a partir de aguas mieles, pulpa de café y estiércol de bovino, utilizando cuatro tratamientos con tres repeticiones, durante 30 días con una temperatura de 17°C a 36°C; siendo más eficiente el tratamiento 4 compuesto por 40% pulpa de café, 40% estiércol de bovino y 20% agua miel; que produjo 1320 mL de biogás en menor tiempo. García (2014), utilizó el diseño estadístico de Box-Behnken para determinar la producción de biogás en un tiempo de retención de 35 días, cuyo rendimiento máximo fue de 375 mL de biogás con las proporciones de 875 mL de estiércol, 70 mL de agua de despulpado de café y 13 g de pulpa de café.

La presente investigación tuvo como finalidad evaluar la influencia del estiércol de cerdo y los efluentes del proceso húmedo del café, sobre la producción de biogás a nivel de laboratorio, mediante el diseño estadístico de Box-Behnken.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en la Av. 28 de Julio N° 801, distrito de Bagua, situado a una altura de 429 msnm, una latitud 5°38'18"S longitud 78°32'19"O, provincia de Bagua, departamento de Amazonas.

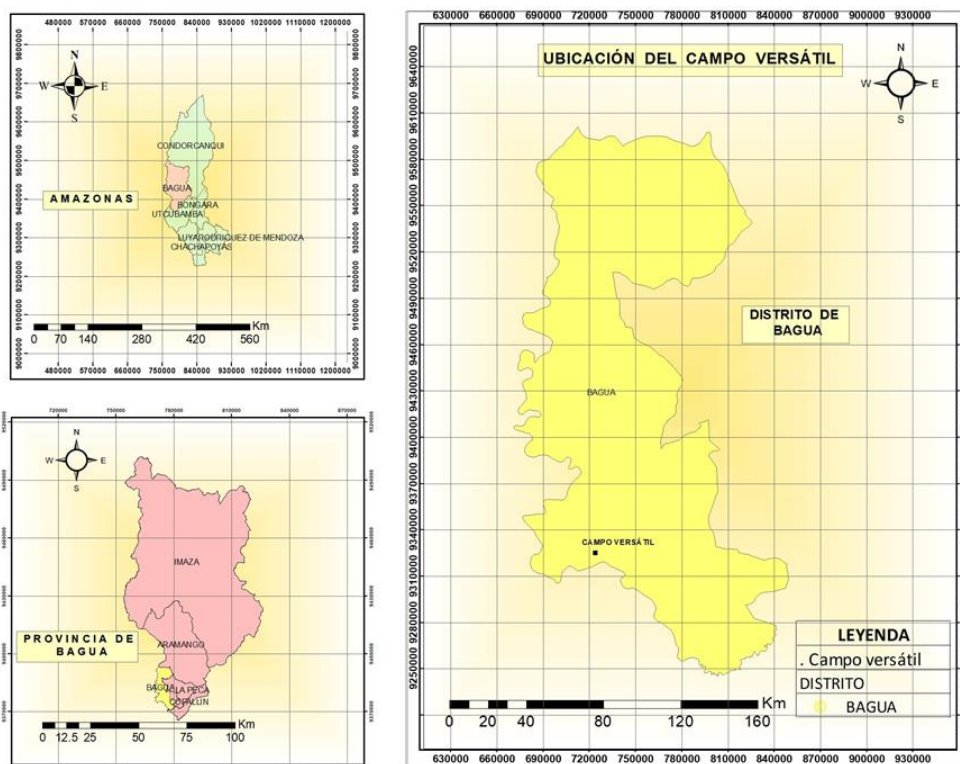


Figura 2. Ubicación del sitio de experimentación.

2.2. Sustratos

La pulpa de café (Figura 3A) y las aguas mieles (Figura 3B) fueron proporcionadas por caficultores del distrito de Copallin, Provincia Bagua, y se recolectaron en bolsa plástica y balde plástico, respectivamente.

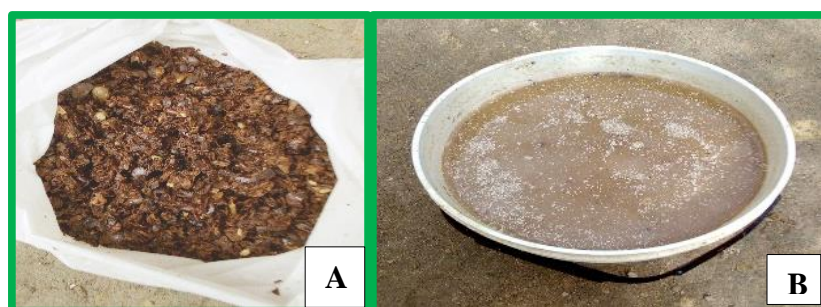


Figura 3. Pulpa de café (A) y aguas mieles (B).

El estiércol de cerdo fue recolectado en el Centro Poblado de Chiriaco, Distrito Cajaruro, Provincia Utcubamba; para luego ser trasladado al lugar donde se realizaron los experimentos. Los sustratos fueron recolectados un día antes para evitar su descomposición antes de comenzar el experimento. La pulpa de café fue empleada como cofermentador para demostrar que la basura orgánica también contribuye a la producción de biogás.



Figura 4. Estiércol de cerdo.

2.3. Construcción del equipo experimental

Se construyó un equipo experimental con botellas descartables de plástico PET (envases de gaseosas) para los biodigestores y para los gasómetros, como el empleado por Barrena et al. (2019). Botellas de 3 L se emplearon para cada uno de los 15 biodigestores y se numeraron de manera consecutiva del 1 al 15. Botellas de 500 mL, calibradas cada 50 mL con una probeta, se emplearon como colectores de biogás o gasómetros y también se numeraron de manera consecutiva del 1 al 15, los gasómetros se llenaron con agua, libres de burbujas, se los colocó boca abajo en una tina con agua (Figura 5) y se los sujetó a un soporte de fierro para que se mantengan en esa posición. Cada biodigestor cargado con la mezcla correspondiente al tratamiento a evaluar, se conectó a su respectivo gasómetro con una manguera de PVC de $\frac{1}{4}$ pulgada, para ello se hizo un orificio en la tapa de los biodigestores por el que se pasó la manguera y se selló con silicona líquida para evitar la fuga del biogás, esta manguera se introdujo por la boca del gasómetro. De esta manera, el biogás producido saldrá del biodigestor, se conducirá por la manguera y desplazará al agua contenida en el gasómetro; esta técnica permitirá medir el volumen de biogás producido en cada biodigestor, que a su vez corresponde a cada tratamiento en evaluación.

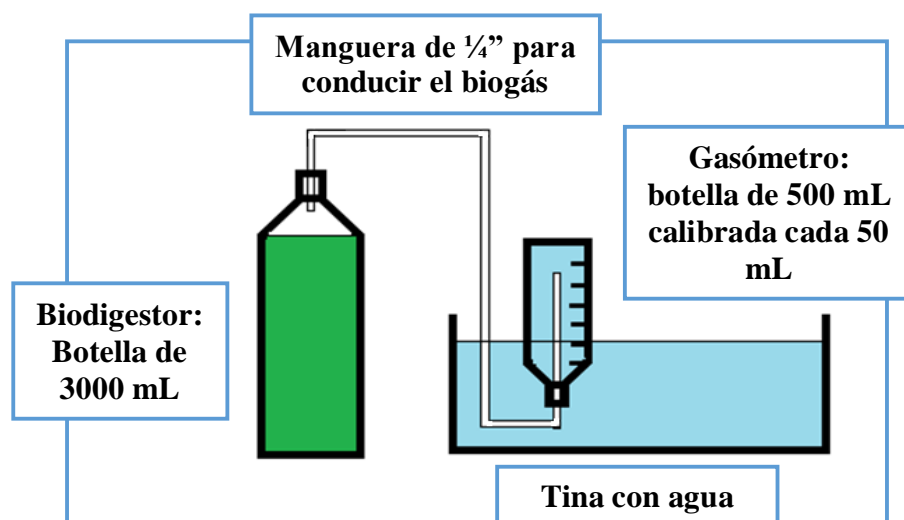


Figura 5. Equipo experimental a nivel laboratorio.

Fuente: Barrena et al. (2019).

2.4. Carga de los biodigestores

Los valores de las variables independientes mostrados en la Tabla 1: relación estiércol de cerdo: agua, agua miel y pulpa de café; fueron empleados para llenar los biodigestores de acuerdo a la distribución de la Tabla 2, aplicando el análisis Box-Behnken (Barrena et al., 2019). El valor de agua miel empleado es un porcentaje del volumen del biodigestor y el valor de pulpa de café corresponde a un porcentaje del estiércol empleado. Con agua potable reposada de un día para otro, se completó a 3 L el volumen de cada biodigestor.

Tabla 1. Valores de las variables independientes.

Concentración	Relación Estiércol: agua		Agua miel		Pulpa de café	
Alta (+)	1:3	750 mL	6%	180 mL	9%	67,5 g
Media (0)	1:4	600 mL	4%	120 mL	6%	36,0 g
Baja (-)	1:5	500 mL	2%	60 mL	3%	15,0 g

Fuente: Adaptado de Barrena et al. (2019).

Los valores de las variables (Tabla 3) para cada experimento se asignaron en base a la distribución de la Tabla 2, con los valores alto (+), medio (0) y bajo (-) de la Tabla 1.

Tabla 2. Distribución de valores de las variables según Box-Behnken.

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

Tabla 3. Valores de las variables para cada experimento según Box-Behnken.

Experimento	Variables		
	Estiércol (mL)	Agua miel (mL)	Pulpa de café (g)
1	750	180	67,5
2	750	180	36,0
3	750	120	67,5
4	600	180	67,5
5	750	180	15,0
6	750	60	67,5
7	500	180	67,5
8	750	120	36,0
9	600	120	36,0
10	600	60	15,0
11	500	60	36,0
12	750	120	15,0
13	500	120	67,5
14	600	60	67,5
15	500	60	15,0



Figura 6. Llenado de los biodigestores de acuerdo a las variables (estiércol de cerdo (A), agua miel (B) y pulpa de café (C)).



Figura 7. Biodigestores conectados a su respectivo gasómetro.

III. RESULTADOS

3.1. Temperatura ambiente

Durante los 25 días de evaluación del proceso anaeróbico de la materia orgánica en los biodigestores, se midió y registró la temperatura ambiente con termómetro analógico, a las 06:00 am, 12:00 m y 06:00 pm, con una temperatura mínima promedio de 20,7°C el día 5 y de 30°C como máximo, en el día 4. En este tiempo, se realizaron tres corridas de 15 experimentos cada una, a temperatura ambiente promedio de 23°C.

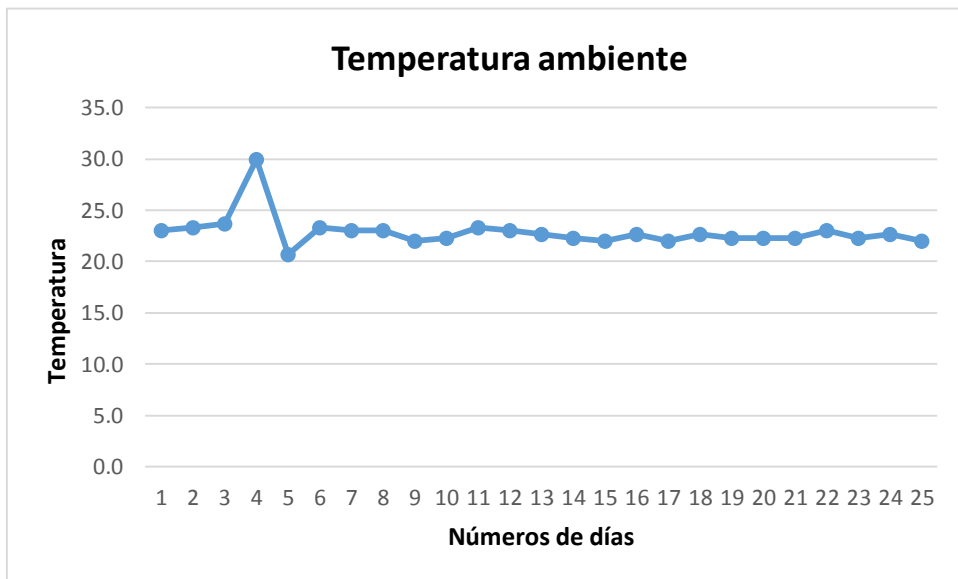


Figura 8. Temperatura ambiente durante los 25 días de evaluación.

3.2. Producción de biogás

La evaluación de la producción de biogás se hizo en tres corridas en 15 tratamientos durante 25 días cada una. Cada 5 días se leyó el volumen de biogás en cada uno de los gasómetros calibrados. La mayor producción de biogás fue de 1660 mL y se obtuvo con el tratamiento 8, teniendo una relación estiércol: agua (1:3), utilizando 750 mL de estiércol de cerdo 120 mL de agua miel y 36 g de pulpa de café. La menor producción de biogás fue de 330 mL y se obtuvo con el tratamiento 9, teniendo una relación estiércol: agua (1:4), utilizando 600 mL de estiércol de cerdo, 120 mL de agua miel y 36 g de pulpa de café.

Tabla 4. Producción de biogás a nivel de laboratorio.

Experi- mento	Variables			Producción de biogás (mL)				
	Estiércol de cerdo (mL)	Agua miel (mL)	Pulpa de café (g)	5 días	10 días	15 días	20 días	25 días
1	750	180	67,5	70	140	230	320	450
2	750	180	36,0	60	130	210	300	410
3	750	120	67,5	100	200	320	440	530
4	600	180	67,5	320	650	980	1170	1300
5	750	180	15,0	90	180	300	420	560
6	750	60	67,5	110	410	710	790	930
7	500	180	67,5	80	180	290	400	510
8	750	120	36,0	490	970	1460	1570	1660
9	600	120	36,0	40	100	180	250	330
10	600	60	15,0	0	30	70	110	360
11	500	60	36,0	80	170	270	310	720
12	750	120	15,0	230	500	780	950	1130
13	500	120	67,5	180	360	550	750	890
14	600	60	67,5	40	195	365	535	735
15	500	60	15,0	20	60	110	170	600

3.3. Optimización de la producción de biogás utilizando el diseño estadístico de Box – Behnken

Según se muestra en la tabla 4, usando el software Statgraphics, la ecuación de regresión del modelo ajustado de los datos del estadístico R-Cuadrado, explica que un 35,77% de la variabilidad de volumen de biogás, es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes. Además, existe cero efectos que tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza al 95%. Con los coeficientes de regresión para la producción de biogás, se obtuvo la ecuación de regresión del modelo ajustado a los datos:

$$\text{Volumen de biogás} = -609,453 - 1,68146*A - 7,11481*B + 80,6216*C + 0,00768485*A^2 - 0,00510962*A*B - 0,116643*A*C - 0,00974698*B^2 + 0,169091*B*C - 0,250703*C^2$$

Donde:

A: Estiércol de cerdo

B: Agua miel

C: Pulpa de café

Tabla 5. Valores óptimos de las variables para maximizar el volumen de biogás.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Estiércol de cerdo	500,0	750,0	749,911
Agua miel	60,0	180,0	60,0
Pulpa de café	15,0	67,5	15,0208

Según la Tabla 5, la combinación de niveles en los factores que maximizan el volumen de biogás, da como resultado 1752,35 mL.

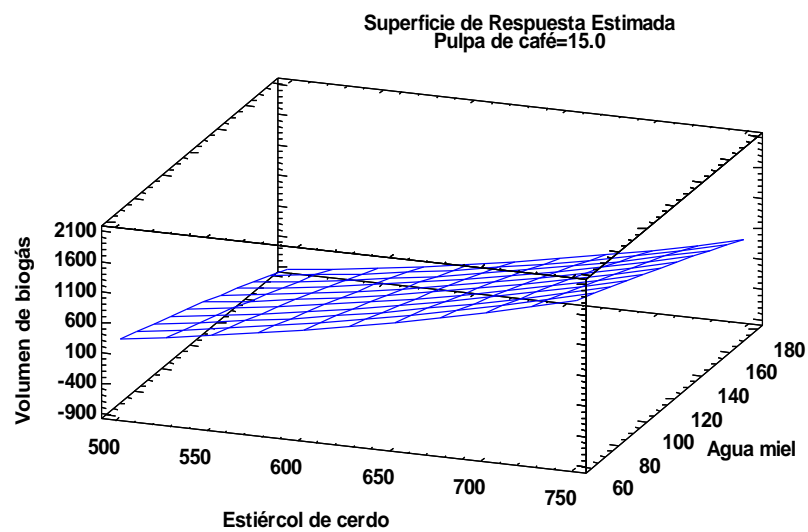


Figura 9. Superficie de respuesta estimada.

Según figura 9, la superficie de respuesta estimada es con respecto a la ecuación del modelo ajustado donde se mantuvo constante el valor de la pulpa de café en 15 g.

IV. DISCUSIÓN

Las condiciones climáticas tropicales favorecen enormemente al proceso anaerobio dentro de un biodigestor, a mayor temperatura se produce una mayor descomposición de los sustratos orgánicos reduciendo el tamaño de moléculas complejas que requiere el sistema (Reyes, 2016); por ello, la temperatura ambiente es uno de los parámetros más influyentes en el proceso de digestión anaerobia para producir biogás (Lache, et al., 2016). En la presente investigación, la temperatura ambiente promedio en que operó el sistema experimental fue entre 20,7 y 30°C, alcanzando las condiciones a las que Cardozo, Gornitzky & Nosal (2009), manifiestan que ocurre el funcionamiento de las bacterias mesófilas (20-45°C). Asimismo, Olano (2018), produjo biogás entre los 17 y 36°C, a diferencia de García (2014), que operó su digestión anaerobia entre los 18,5 y 22,7 °C.

Si se mantiene el valor alto de estiércol (750 mL, relación estiércol:agua 1:3) y se incrementa el agua miel y la pulpa de café a sus valores máximos (180 mL, 6%; y 67,5 mL, 9%, respectivamente), disminuye considerablemente la producción de biogás (Exp. 1).

La disminución de estiércol de cerdo, manteniendo constante en sus valores medios la cantidad de agua miel y pulpa de café (4% y 6%, Exp. 8 y 9), disminuye drásticamente la producción de biogás; similar tendencia se muestra con los valores altos de agua miel y pulpa de café (6% y 9%, Exp. 4 y 7), demostrándose que el estiércol es el principal componente para producir biogás. Sin embargo, el agua miel y la pulpa de café aportan a la producción de biogás (Exp. 4) en reemplazo del estiércol, por lo que puede reducirse el estiércol e incrementar el agua miel y la pulpa de café.

Si se emplea el valor alto de estiércol (750 mL, relación 1:3) con el valor bajo de agua miel (60 mL, 2%, Exp. 6) pero se mantiene alta la cantidad de pulpa de café (67,5 g, 9%); se aprecia que se incrementa la producción de biogás con respecto a los Exp. 1 y 3, en los que se empleó los valores alto (180 mL, 6%) y medio (120 mL, 4%) de agua miel, respectivamente. En consecuencia, si se disminuye la cantidad de agua miel de 180 a 120, se incrementa la producción de biogás en 1,2 veces y si se disminuye a 60 mL (2%), se incrementa en 2,1 veces con respecto al primero y en 1,8 veces con respecto al segundo.

Similar tendencia se presenta cuando se emplea el valor medio de estiércol (600 mL, relación 1:4) con el valor bajo de agua miel (60 mL, 2%, Exp. 10 y 14) pero se mantiene alta la cantidad de pulpa de café (67,5 g, 9%); se aprecia que se incrementa la producción de biogás en 2,1 veces con respecto al Exp. 10 en el que se empleó el valor bajo (15,0 g, 3%) de pulpa de café. En consecuencia, si se incrementa la cantidad de pulpa de café de 15,0 a 67,5 g, se incrementa la producción de biogás.

Si se emplean los valores altos de estiércol (750 mL, relación 1:3) y agua miel (180 mL, 6%) pero se va disminuyendo la cantidad de pulpa de café de 67,5 g (9%) a 36,0 g (6%) y 15,0 g (3%); se aprecia que se incrementa la producción de biogás (Exp. 1, 2 y 5).

Considerando los experimentos 1, 7, 3 y 13; si el estiércol baja de su valor alto a su valor bajo (750 mL, 1:3 a 500 mL, 1:5) y el agua miel baja de su valor alto a su valor medio (180 mL, 6%; a 120 mL, 4%), manteniendo constante y en su valor alto a la pulpa de café (67,5 g, 9%), la producción de biogás aumenta de 450 hasta 890 mL, llegando a ser casi el doble. Esto también se puede apreciar en el experimento 4. Por lo tanto, la pulpa de café puede compensar la disminución del estiércol y contribuir a la producción de biogás.

Si se emplean los valores altos de estiércol (750 mL, 1:3) con el valor intermedio de agua miel (120 mL, 4%) pero se disminuye la cantidad de pulpa de café de 67,5 g (9%) a 36,0 g (6%); se aprecia que se incrementa la producción de biogás en 3,1 veces (Exp. 3 y 8). Sin embargo, si se disminuye la pulpa de café a su valor bajo (15,0 g, 3%, Exp. 12), la producción de biogás es el 68% de la producción con el uso del valor intermedio (36,0 g, 6%, Exp. 12) pero es 2,04 veces mayor al valor producido empleando el valor alto de pulpa de café (67,5 g, 9%, Exp. 3). Similar tendencia se aprecia en los experimentos 14 y 11 con el valor bajo de agua miel (60 mL, 2%). En consecuencia, el 4,8% de pulpa de café (36 g) respecto al estiércol empleado (750 mL) en el experimento 8, combinado con 120 mL de agua miel que corresponde al 4% del volumen del biodigestor, son los valores de las variables que han producido el mayor volumen de biogás (1660 mL).

El experimento 9, que tuvo los valores medios (0) de todas las variables, produce menos biogás (330 mL) que cuando se usan los valores altos (+) de todas las variables (Exp. 1: 450 mL), siendo ambos menores al resultado del experimento 15 (600 mL), donde se empleó los valores bajos (-) de todas las variables. El mayor volumen de biogás (1660

mL) obtenido en el experimento 8 fue con los valores alto (+) para estiércol de cerdo, medio (0) para agua miel y medio (0) para pulpa de café.

Con respecto a los valores de las variables (+, 0, 0) que permitieron producir el mayor volumen de biogás (Exp. 8: 1660 mL); si sólo se incrementa el valor del agua miel (+), se reduce tremendamente la producción de biogás (Exp. 2: 410 mL), mientras que si sólo se incrementa el valor de la pulpa de café (+), la producción de biogás se reduce a 530 mL (Exp. 3). En consecuencia, el agua miel influye menos sobre el incremento de la producción de biogás.

El valor medio o bajo de pulpa de café favorece la producción de biogás, siempre que se combinen con valor alto de estiércol y valor medio de agua miel (Exp. 8 y 12). Los valores altos de agua miel y pulpa de café compensan la disminución del estiércol (Exp. 4).

En la presente investigación, el máximo volumen de biogás producido fue 1660 mL en un digester de 3000 mL, correspondiente al tratamiento 8 con los valores de las variables (+, 0, 0) compuesto por 750 mL de estiércol de cerdo (25% del volumen del biodigester), 120 mL de agua miel (4% del volumen del biodigester) y 36 g de pulpa de café (6%(p/v) del volumen de estiércol empleado) en un tiempo de 25 días, donde el 55,33 % corresponde al biogás respecto al volumen del biodigester y 2,21 veces respecto al volumen del estiércol. Barrena (2019), obtuvo un máximo volumen de 195 mL de biogás en 45 días, en un digester de 1750 mL que contenía 583 g de estiércol de vacuno, equivalente al 11,14% de biogás respecto al volumen del biodigester y 33,45 % (0,33 veces) respecto al volumen de estiércol. García (2014), obtuvo 375 mL de biogás en un digester de 1750 mL que contenía 875 mL de estiércol de vacuno con tiempo de retención hidráulica de 35 días; correspondiendo al 21,43% de biogás respecto al volumen del digester y 42,86% (0,43 veces) de biogás respecto al volumen de estiércol. De estos resultados se deduce que la presente investigación supera a lo obtenido por Barrena (2019), en 44,19 puntos porcentuales respecto al volumen de biodigester y 1,88 veces respecto al volumen del estiércol utilizado, a García (2014), en 33,9 puntos porcentuales respecto al volumen del biodigester y 1,78 veces respecto al estiércol utilizado.

Según los resultados obtenidos, se predice que el volumen máximo de biogás será de 1752,35 mL con los valores óptimos de las variables: relación estiércol: agua 1:3 (749,911 mL de estiércol de cerdo), 60 mL de agua miel (2%(v/v) respecto al volumen del biodigestor); 15,02 g de pulpa de café (3%(p/v) respecto al volumen de estiércol de cerdo empleado). Es decir, los valores +, -, - de las variables independientes, producirán el máximo volumen de biogás, que en la presente investigación representa el 5,56% del volumen máximo obtenido experimentalmente con el Tratamiento 8, cuyas variables tuvieron los valores +, 0, 0.

V. CONCLUSIONES

El tratamiento de estiércol de cerdo y efluentes del proceso húmedo de café mediante la digestión anaerobia es factible para producir biogás en la ciudad de Bagua, influenciada por la temperatura en un rango de 20,7 °C a 30 °C, alcanzando las condiciones mesofílicas, donde las bacterias metanogénicas desarrollan la transformación de la materia orgánica en biogás.

La producción máxima de biogás de las distintas combinaciones de los sustratos a nivel de laboratorio fue 1660 mL, correspondiente al tratamiento 8 con las proporciones de 750 mL de estiércol de cerdo (relación estiércol: agua 1:3), 120 mL agua miel (4%(v/v) respecto al volumen del biodigestor) y 36 g de pulpa de café (6%(p/v) del volumen de estiércol empleado), en un tiempo de fermentación de 25 días.

La relación óptima de las variables independientes para maximizar la producción de biogás es estiércol: agua de 1:3, asociada con 2% (v/v) de agua miel (2 mL por cada 100 mL de mezcla en el biodigestor) y 3% (p/v) de pulpa de café (3 g por cada 100 mL de estiércol) para obtener 1752,35 mL de biogás, influyendo con mayor proporción el estiércol de cerdo. Parte del estiércol se puede reemplazar por pulpa de café, ya que contiene azúcares y permite que las bacterias metanogénicas desarrollen su metabolismo con más eficiencia.

VI. RECOMENDACIONES

Aplicar el presente estudio para producir biogás en un mayor tiempo de retención, manteniendo la temperatura a condiciones mesofílicas y evaluando constantemente la producción para conocer su comportamiento

Implementar un sistema a escala piloto en referencia a la ecuación de regresión del modelo ajustado para verificar los resultados predichos por el software Statgraphics.

Producir biogás en mayor escala empleando valores de las variables correspondientes al tratamiento 8: relación estiércol de cerdo: agua 1:3), agua miel (4%(v/v) respecto al volumen del biodigestor) y pulpa de café (6%(p/v) del volumen de estiércol empleado), en un tiempo de fermentación de 25 días. Proceso que contribuirá a reducir el impacto ambiental del estiércol de cerdo y de los efluentes del proceso húmedo del café.

Realizar un análisis de la composición del biogás producido como metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico para determinar su calidad.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abumalé Cruz, S. (2018). *“Diseño y evaluación de biorreactores EGSB para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales del estado de Chiapas [Tesis de doctorado, Universidad de ciencias y arte de Chiapas]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12753/421>
- Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de agua miel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7-16. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.01>
- Acosta Fernández, R. A., & García Murcia, Y. (2019). *Procesamiento de café en cereza y riesgos ambientales asociados a la contaminación de fuentes hídricas: Estudio de caso Análisis comparativo del proceso de beneficio seco y húmedo tradicional en fincas productoras del municipio de San Gil (Santander)*. Medio ambiente y desarrollo regional. Obtenido de <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01508>
- Barrena Gurbillón, M. Á., Maicelo Quintana, J. L., Gamarra Torres, O. A., Oliva Cruz, S. M., Leiva Espinoza, S. T., Taramona Ruíz, L. A., . . . Ordinola Ramírez, C. M. (2019). *Biogás: Producción y aplicaciones*. Obtenido de <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1841>
- Cárdenas Giler, E. V., Maldonado Erazo, J. M., Valdez Silva, R. A., Sarduy Pereira, L. B., & Diéguez Santana, K. (2019). La producción más limpia en el sector porcino: Una experiencia desde la Amazonía ecuatoriana. *Análes Científicos*, 80(1), 76-91. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7292840>
- Cardozo, F., Gornitzky, C., & Nosal, C. P. (2009). *Energías renovables para el desarrollo rural*. (I. N. (INTA), Ed., & C. d. familiar, Trad.) Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-energia_renovable.pdf
- Costantini, A. O., Pérez, M. G., Busto, M., González, F. A., Cosentino, V. R., Romaniuk, R. I., & Taboada, M. Á. (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. 68(5), 47-54. Obtenido de <http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2018/11/4-Costantini-cei68-5-5.pdf>
- García Salazar, N. D. (2014). *Influencia de la pulpa y agua de despulpado del café (Coffea arabica) sobre la producción de biogás con estiércol de bovino [Tesis*

- pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza*]. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1006>
- Giubi, J., Bernal, M., & Cañete, F. (Diciembre de 2019). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el Hospital de Clínicas: Un estudio preliminar. *Anales de la Facultad de Ciencias Médicas*, 52(3), 53-58. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.18004/anales/2019.052.03.53-058>
- Jimenez Aranda, C. E., & García Calle, E. (2020). *Eficacia del empleo de estiércol de ganado porcino y cáscara de café, en la producción de biogás y digestatos líquidos, Jaén, Cajamarca [Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/281>
- Lache Muñoz, A., Paéz, A., Bernal Vélez, D., & Quintero Garzón, D. (2016). Estabilización de temperatura en un digester anaerobio tipo UASB alimentado con residuos bovinos y lodos. *Revista de investigación.*, 9(2), 69-83. Obtenido de <https://doi.org/10.29097/2011-639X.55>
- Moraes, B., Zaiat, M., & Bonomi, A. (Julio-diciembre de 2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción+limpia*, 10(2). Obtenido de Moraes, Bruna; Zaiat, Marcelo; Bonomi, Antonio;: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/905>
- Moreno Ayala, L., & Cadillo Castro, J. (2018). Uso del estiércol porcino sólido como abono orgánico en el cultivo del maíz chala. *Anales Científicos*, 79(2), 415 - 419. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v79i2.914>
- Navarro Puyuelo, A., Reyero, I., Moral, A., Bimbela, F., & Gandía, L. (2017). Rutas y retos para la valorización de biogás. *Avances: Investigacion en Ingenieria*, 14(1), 211-224. Obtenido de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/1299>
- Olano Requelme, E. (2018). *Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (Coffea arabica) en el Distrito de Copallín, Bagua-Amazonas,2017 [Tesis de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza]*. Repositorio Institucional. Obtenido de

<http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1637/Olano%20Requime%20Edil.pdf?sequence=1>

- Osejos Merino, M., Jaramillo Véliz, J., Merino Conforme, M., Quimis Gómez, A., & Alcívar Cobeña, J. (22 de Abril de 2018). Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la Granja EMAVIMA Jipijapa – Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 4(1), 709-733. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6657430>
- Parra Huertas, R. A. (Julio-Diciembre de 2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de las aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción+limpia*, 10(2), 142-159. Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/905>
- Reyes Aguilera, E. A. (Enero-Marzo de 2016). Producción de biogás a partir de biomasa. *Revista Científica de FAREM-Estelí*.(17), 11-22. Obtenido de <https://doi.org/10.5377/farem.v0i17.2610>
- Rolz Asturias, C. (2016). *Re-ingeniería del proceso húmedo del café para aumentar su productividad*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://biblioteca.galileo.edu/tesario/handle/123456789/471>
- Sánchez Portilla, F., & Vizcón Toledo, R. (Setiembre-Diciembre de 2017). La Codigestión de Residuos Orgánicos: una contribución energética, ambiental y de salud humana. *Ingeniería Energética*, 38(3), 213-223. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v38n3/rie08317.pdf>
- Urquijo, E. J. (27 de Mayo de 2016). Identificación de impactos ambientales relacionados con el proceso del beneficio húmedo del café en la vereda de Tres Esquinas - Huila - Colombia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10654/15205>

ANEXOS

Tabla 6. Temperatura ambiente promedio en el Distrito de Bagua.

Día	Temperatura			Promedio
	06:00 am	12:00 m	06:00 pm	
1	21	25	23	23.0
2	20	26	24	23.3
3	22	24	25	23.7
4	26	37	27	30.0
5	21	21	20	20.7
6	21	24	25	23.3
7	20	24	25	23
8	21	25	23	23
9	21	23	22	22
10	19	24	24	22.3
11	21	24	25	23.3
12	21	24	24	23
13	21	23	24	22.7
14	21	24	22	22.3
15	19	23	24	22
16	21	24	23	22.7
17	19	24	23	22
18	21	23	24	22.7
19	20	24	23	22.3
20	21	23	23	22.3
21	20	23	24	22.3
22	21	24	24	23
23	20	23	24	22.3
24	21	24	23	22.7
25	20	23	23	22
				22.9

Tabla 7. Registro de producción de biogás por cada corrida.

Trata- miento	Variables			Repeticiones -5 días (03/10/2019)				Repeticiones - 10 días (08/10/2019)				Repeticiones - 15 días (13/10/2019)				Repeticiones - 20 días (18/10/2019)				Repeticiones - 25 días (23/10/2019)			
	Estiercol (mL)	Agua miel (mL)	Pulpa de café (g)	R1	R2	R3	Rtotal	R1	R2	R3	Rtotal	R1	R2	R3	Rtotal	R1	R2	R3	Rtotal	R1	R2	R3	Rtotal
1	750	180	67,5	0	70	140	70.00	20	190	210	140.00	60	290	340	230.00	100	410	450	320.00	250	540	560	450.00
2	750	180	36,0	0	110	70	60.00	40	220	130	130.00	80	340	210	210.00	100	530	270	300.00	150	660	420	410.00
3	750	120	67,5	20	160	120	100.00	70	270	260	200.00	70	460	430	320.00	160	580	580	440.00	160	730	700	530.00
4	600	180	67,5	810	100	50	320.00	1370	330	250	650.00	1740	660	540	980.00	1900	860	750	1170.00	1900	1080	920	1300.00
5	750	180	15,0	0	150	120	90.00	40	280	220	180.00	70	430	400	300.00	90	600	570	420.00	160	710	810	560.00
6	750	60	67,5	0	250	80	110.00	50	1010	170	410.00	240	1330	560	710.00	270	1390	710	790.00	330	1390	1070	930.00
7	500	180	67,5	170	0	70	80.00	370	20	150	180.00	470	120	280	290.00	500	240	460	400.00	580	370	580	510.00
8	750	120	36,0	810	460	200	490.00	1500	1010	400	970.00	1980	1500	900	1460.00	2010	1640	1060	1570.00	2010	1790	1180	1660.00
9	600	120	36,0	0	40	80	40.00	10	120	170	100.00	20	240	280	180.00	30	320	400	250.00	50	400	540	330.00
10	600	60	15,0	0	0	0	0.00	20	20	50	30.00	30	60	120	70.00	70	80	180	110.00	80	180	820	360.00
11	500	60	36,0	220	0	20	80.00	390	0	120	170.00	460	100	250	270.00	500	150	280	310.00	520	750	890	720.00
12	750	120	15,0	400	140	150	230.00	1010	240	250	500.00	1170	560	610	780.00	1300	760	790	950.00	1420	900	1070	1130.00
13	500	120	67,5	450	40	50	180.00	820	120	140	360.00	1160	220	270	550.00	1350	430	470	750.00	1480	590	600	890.00
14	600	60	67,5	20	70	30	40.00	405	100	80	195.00	555	300	240	365.00	675	520	410	535.00	695	1060	450	735.00
15	500	60	15,0	40	20	0	20.00	100	60	20	60.00	100	120	110	110.00	110	210	190	170.00	160	810	830	600.00

Tabla 8. Coeficiente de regresión para el volumen de biogás

Coeficiente	Estimado
constante	-609.453
A:Estiércol de cerdo	-1.68146
B:Agua miel	-7.11481
C:Pulpa de café	80.6216
AA	0.00768485
AB	-0.00510962
AC	-0.116643
BB	-0.00974698
BC	0.169091
CC	-0.250703