



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MEDIO AMBIENTE**

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO MEDIANTE
DIGESTOR ANAEROBIO TIPO BATCH EN AGUAS RESIDUALES
AGROINDUSTRIALES DE DESTILERÍA (VINAZA)**

AUTORAS:

**GARCÍA SALAZAR MICHELLE STEFANY
INTRIAGO ZAMBRANO SANDY PAMELA**

TUTOR:

ING. JULIO LOUREIRO SALABARRÍA, M.SC.

CALCETA, ABRIL 2019

DERECHOS DE AUTORÍA

García Salazar Michelle Stefany e Intriago Zambrano Sandy Pamela, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Michelle S. García Salazar

Sandy P. Intriago Zambrano

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

ING. Julio Loureiro Salabarría, M.Sc, certifica haber tutelado el proyecto **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO MEDIANTE DIGESTOR ANAEROBIO TIPO BATCH EN AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES DE DESTILERÍA (VINAZA)**, que ha sido desarrollada por García Salazar Michelle Sefany e Intriago Zambrano Sandy Pamela, previo la obtención del título en Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

ING. JULIO LOUREIRO SALABARRÍA, M.Sc

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO MEDIANTE DIGESTOR ANAEROBIO TIPO BATCH EN AGUAS RESIDUALES AGROINDUSTRIALES DE DESTILERÍA (VINAZA)**, que ha sido propuesto, desarrollado y sustentada por García Salazar Michelle Stefany e Intriago Zambrano Sandy Pamela, previa la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

Ing. Carlos Villafuerte, Mg. C.A

MIEMBRO

Ing. Jorge B. Cevallos Bravo, MSC.

MIEMBRO

Ing. Carlos Delgado Villafuerte, Mg. C.A.

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad y en la cual he forjado mis conocimientos profesionales día a día.

De todo corazón les agradecemos a nuestras familias, por ser la parte motivadora y brindarnos apoyo emocional, psicológico y económico para poder presentar un excelente trabajo al servicio de las demás personas interesadas en este tema.

A nuestro tutor el Ing. Julio Loureiro por aportar con sus conocimientos y experiencia y lograr presentar un trabajo íntegro y eficaz al entendimiento de la sociedad académica.

Agradecemos a los miembros del tribunal, que son parte de esta investigación ya que mediante sus aportes, ideas y correcciones se logró redactar un buen trabajo.

En fin, agradecemos a cada una de las personas, que con sus ideas aportaron directa o indirectamente a la presentación de esta tesis.

MICHELLE S. GARCÍA SALAZAR

SANDY P. INTRIAGO ZAMBRANO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, los cuales me han dado la fortaleza que en ocasiones me falta y el ejemplo para siempre pensar que puedo ser mejor de lo soy.

MICHELLE S. GARCÍA SALAZAR

DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas por iluminarme en cada paso para la elaboración de este trabajo.

A mis padres por todo el apoyo brindado en todos estos años de esfuerzo y dedicación para que yo cumpla mi meta, por sus consejos y buenos deseos, porque con tesón me inculcaron excelentes valores que hoy reflejan en mí, la persona que soy gracias a ellos. Los amo con el alma.

A mis hermanos Edgar, Cristian y Candy, que sean parte de este logro importante en mi vida, especialmente a mi hermana Cindy, porque es como un ángel para mí y me impulsa a ser mejor persona cada día. Los quiero mucho.

A mis abuelitos por estar ahí conmigo, por quererme y darme sus consejos valiosos para mi vida, a mi abuelito José que desde el cielo me cuida.

Por último, a mí por tener paciencia y sobrellevar obstáculos presentados a lo largo de la realización del trabajo.

SANDY P. INTRIAGO ZAMBRANO

CONTENIDO GENERAL

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. INDUSTRIA AZUCARERA PARA LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ARTESANAL ...	4
2.2. RESIDUOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIALES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA	4
2.3. VINAZA.....	5
2.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA VINAZA	5
2.3.2. IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR LA VINAZA.....	6
2.3.3. NUEVAS ALTERNATIVAS PARA MITIGAR IMPACTOS OCASIONADOS POR LA VINAZA.....	7
2.4. BIODIGESTIÓN.....	7
2.4.1. BIODIGESTION O DIGESTIÓN AEROBIA	7
2.4.2. BIODIGESTION O DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	7
2.5. FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA ...	8
2.5.1. SUSTRATO	13
2.5.2. INÓCULO	14
2.6. ACTIVIDAD MICROBIANA.....	14
2.7. ETAPAS O NIVELES TRÓFICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	15
2.8. RELACIONES ECOLÓGICAS DE LAS BACTERIAS METANOGENICAS Y SULFOREDUCTORAS	17
2.9. BIODIGESTOR.....	18
2.9.1. TIPOS DE BIODIGESTORES	18
2.10. SISTEMA DISCONTINUO: TIPO BATCH	19
2.11. COMPOSICIÓN DE BIOGÁS	20
2.11.1. MÉTODO DE PURIFICACIÓN DE GASES.....	21
2.11.2. MÉTODO DE CUANTIFICACIÓN DEL BIOGÁS	22
MARCO REFERENCIAL.....	23
2.12. CONCENTRACIÓN DEL INÓCULO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	23
2.13. MÉTODOS ANALÍTICOS	24
2.13.1. SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES.....	24
2.13.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	25
2.13.3. pH.....	26
2.14. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.....	26
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO	27
3.1. UBICACIÓN.....	27
3.2. DURACIÓN	27
3.3. VARIABLES EN ESTUDIO.....	27
3.4. FACTOR EN ESTUDIO	27
3.5. NIVELES	27
3.6. VARIABLES A MEDIR.....	27
3.7. TRATAMIENTOS	27
3.8. DISEÑO EXPERIMENTAL	28
3.9. UNIDAD EXPERIMENTAL	28
3.10. PROCEDIMIENTO	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. FASE I. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	35
4.2. FASE II. ADAPTACIÓN DEL INÓCULO QUE SERÁ UTILIZADO EN LOS TRATAMIENTOS ANAEROBIOS.....	35
4.3. FASE III. TRATAMIENTO ÓPTIMO MEDIANTE DIGESTORES ANAEROBIOS.	36
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
5.1. CONCLUSIONES.....	44
5.2. RECOMENDACIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA	45

CONTENIDO DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 2.1. Caracterización de la vinaza de varios autores.....	6
Cuadro 2.2. Rangos de Temperatura y tiempo de fermentación anaerobia (Vásquez y Riveros, 2013).....	8
Cuadro 2.3. Tiempo de retención según la materia prima (Hilbert, 2006).....	11
Cuadro 2.4. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico (FAO, 2011).....	12
Cuadro 2.5. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos (Lara, 2016)....	12
Cuadro 2.6. Bacterias aisladas en cada etapa metabólica en el reactor anaerobio (Lorenzo y Obaya, 2005).....	17
Cuadro 2.7. Composición media de biogás de distintos residuos orgánicos (Salomon y Silva, 2009).....	20
Cuadro 2.8. Intervalo de medida para determinación de DQO.....	25
Cuadro 3.9. Descripción de las unidades experimentales.....	28
Cuadro 3.10. Ubicación satelital de la destilería.....	28
Cuadro 3.11. Parámetros y sus técnicas de determinación.....	29
Cuadro 3.12. Condiciones de operación del reactor Elaborado por: García e Intriago (2018).....	29
Cuadro 3.13. Parámetros y sus técnicas de determinación.....	32
Cuadro 3.14. Condiciones de operación del digestor. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	32
Cuadro 3.15. Control de las unidades experimentales. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	33
Cuadro 3.16. Variables de control de las unidades experimentales.....	33
Cuadro 4.17. Caracterización del sustrato antes de ser usado en el tratamiento.....	35
Cuadro 4.18. Caracterización del inóculo seleccionado.....	36
Cuadro 4.19. Producción de biogás y composición de metano (García e Intriago, 2018).....	37
Cuadro 4.20. ANOVA.....	43
Cuadro 4.21. Tukey HSDa Biogás.....	43
Cuadro 4.22. Tukey HSDa Metano.....	43
Figura 2.1. Proceso para obtener alcohol etílico de la caña de azúcar de licores artesanales.....	4
Figura 2.2. Procesos bioquímicos y fisicoquímicos considerados en el modelo de digestión anaerobia (FAO, 2011).....	8
Figura 2.3. Rangos de operación estable para el pH y la alcalinidad durante el proceso de digestión anaerobia (Arrieta, 2016).....	10
Figura 2.4. Análisis cualitativo de la actividad microbiana (Levenspiel, 2004).....	14
Figura 2.5. Crecimiento celular en un medio ambiente adecuado y uniforme (Lettinga, 2004).....	15
Figura 2.6. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia (FAO, 2011).....	16
Figura 2.7. Diseño de un biodigestor tipo BATCH.....	20
Figura 2.8. Esquema para la medición de volumen del CH ₄	22
Figura 2.9. Diseño de la salida del biogás con manguera en forma de "Y".....	23
Figura 3.10. Mapa de ubicación de la destilería.....	29
Figura 3.11. Sistema de control de temperatura con soporte de aluminio. Escala S/E. Elaborado por García e Intriago (2018).....	30
Figura 3.12. Esquema del sistema de adaptación de inóculo. Elaborado por García e Intriago (2018).....	31
Figura 3.13. Esquema del sistema de adaptación de inóculo. Elaborado por García e Intriago (2018).....	34
Gráfico 4.1. Adaptación del inóculo. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	36
Gráfico 4.2. Variación de la producción la SV (g/L) vs metano producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	38
Gráfico 4.3. Variación de la producción la DQO (g/L) vs metano producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	39
Gráfico 4.4. Variación de la producción la SV (g/L) vs biogás producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	40
Gráfico 4.5. Variación de la producción la DQO (g/L) vs biogás producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).....	41

RESUMEN

En la industria azucarera los efluentes líquidos del proceso de producción de etanol, como la vinaza, tienen potencial para ser empleado en digestión anaerobia por la cantidad de materia orgánica que contiene.

En esta investigación se realizó un diseño experimental DCA-unifactorial a escala laboratorio entorno a la concentración de SV con 5 niveles y 3 repeticiones. En un total de 15 digestores BATCH se introdujo inóculo y la concentración deseada de vinaza en dilución como sustrato durante 21 días.

El propósito es de evaluar la producción de biogás y metano en relación al contenido de SV y DQO. Se determinó que el tratamiento (T₅) tuvo una mayor producción de biogás de 2,87 L y metano 1,52 L, representando el 51,9% de su composición. Esto se debe a que el inóculo fue adaptado previamente con vinaza concentrada.

Se demostró que la vinaza puede ser aprovechada por su potencial para producir biogás además de que el tratamiento contribuye a la disminución del impacto ambiental que provoca la industria azucarera.

PALABRAS CLAVE

Digestión anaerobia, vinaza, inóculo, biogás, metano.

ABSTRACT

In the sugar industry, the liquid effluents from the ethanol production process, such as vinasse, have the potential to be used in anaerobic digestion due to the amount of organic matter it contains.

In this investigation an experimental DCA-unifactorial design was performed at laboratory scale around the SV concentration with 5 levels and 3 repetitions. In a total of 15 batch digesters, inoculum and the required concentration of vinasse in dilution as substrate were introduced for 21 days.

The purpose is to evaluate the production of biogas and methane in relation to the SV and COD content. It was determined that the treatment (T₅) had a higher production of biogas of 2.87 L and methane 1.52 L, representing 51.9% of its composition. This is because the inoculum was previously adapted with concentrated vinasse.

It was demonstrated that vinasse can be use due to its potential to produce biogas and that the treatment contributes to the reduction of the environmental impact caused by the sugar industry

KEY WORDS

Anaerobic digestion, vinasse, inoculum, biogas, methane

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los residuos agroindustriales aumentan de forma constante a causa del crecimiento poblacional y su gran demanda (Dommond *et al.*, 2011). Cada día, las plantas procesadoras industriales crecen y con esto se incrementan los desechos generados (Chiriboga, 2010).

En Ecuador, también existen este tipo de problemas. Como país productor de caña de azúcar, aprovecha sus recursos produciendo etanol a partir de las destilerías de alcohol (Galindo, 2016). El alcohol producido en la fermentación contiene una gran cantidad de impurezas, por lo que es sometido a varias etapas de separación por destilación. Estos productos de impureza más pesados pasan a formar parte de las aguas residuales, denominada vinaza (Rennola *et al.*, 2007), y tienen un gran impacto ambiental por su alto contenido orgánico, ya que posee una elevada cantidad de demanda química (40000 mg/litro) y bioquímica de oxígeno (12000 mg/litro) (Salazar, Sánchez y Aucatoma, 2009).

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador estima que por cada litro de alcohol que se produce se generan alrededor de 10 litros de vinaza (CINCAE, 2013). Según datos del Ministerio de Industrias y Productividad en el Ecuador se producen anualmente un aproximado de 51'000.000 litros de alcohol (Ponce, 2011), por lo que es responsable de casi el 70% de la contaminación a la fauna y flora ocasionada por las destilerías (Cobos & Ortiz, 2007). En el año 2008 se generaron aproximadamente 1'300.000 toneladas de bagazo, 140.000 toneladas de cachaza, 35.000 toneladas de ceniza y 510.000 m³ de vinaza (CINCAE, 2013).

Por tanto, es necesario dar una gestión adecuada a estos residuos mediante la determinación de su composición, propiedad y cantidad que se genera, de forma que pueda definir la tecnología más apropiada para su conveniencia y crear alternativas de reutilización para amortiguar el impacto ambiental que estos residuos provocan (Dommond *et al.*, 2011; Gavilanes, 2014).

Según González, Pérez, Wong-Villarreal, Mendoza, Yáñez (2015) se pueden aprovechar estos residuos del sector agroindustrial mediante la tecnología de la digestión anaerobia, siendo utilizados con frecuencia en el proceso de la co-digestión y que involucra la transformación de los mismos en biogás.

Ante la situación planteada, se formula la siguiente interrogante:

¿Cómo incide el uso del tratamiento anaerobio de la vinaza en la remoción de contaminantes orgánicos?

1.2. JUSTIFICACIÓN

En el campo de la industria azucarera los efluentes líquidos del proceso de producción de etanol o destilerías tienen potencial para ser empleado en la producción de biogás (Lorenzo, Chanfón, Pereda, 2013).

Craveiro y Rocha (1986), citado por Guevara (1999) mencionan la necesidad de disminuir el contenido orgánico de estos efluentes como la vinaza considerando a la fermentación anaerobia como alternativa de tratamiento, puesto que reduce la DQO y DBO de las vinazas, convirtiéndolas en biogás, principalmente en metano (CH₄).

Desde el punto de vista ambiental, la “metanización”, mitigaría el impacto ambiental y posibilita su aplicación agrícola por el contenido valioso de nutrientes inorgánicos presentes en los lodos residuales del tratamiento (Moraes, Zaiat y Bonomi, 2015; Valeiro et al., 2017).

Desde el punto de vista legal, Ecuador presenta su Código Orgánico del Ambiente (COA, 2018), en donde expresa en su artículo 225: políticas de gestión integral de residuos y desechos, como el “...fomento de la investigación, desarrollo y uso de las mejores tecnologías disponibles que minimicen los impactos al ambiente y la salud humana” (literal 6). Además, existe una normativa de calidad ambiental de efluentes al recurso agua, que establece requisitos de calidad ambiental para descargas industriales por destilación de efluentes que deben ser cumplidas (TULSMA, 2015).

Desde el punto de vista económico, el biogás captado representa también un valor agregado al sistema de tratamiento de la vinaza, ya que es sustituto del

gas natural por lo que puede ser usado para generar vapor y electricidad. Este tratamiento cumple con los requisitos de una alternativa sustentable ya que optimiza la producción de biocombustibles (Moraes, Zaiat y Bonomi, 2015).

Por estas razones planteadas, el proyecto tiene como propósito evaluar la producción de biogás de la vinaza, mediante tratamiento anaerobio, como forma de aprovechamiento de este efluente producto de destilerías.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de metano mediante digestor anaerobio tipo BATCH en aguas residuales agroindustriales de destilería (vinaza).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el sustrato utilizado en el tratamiento de digestión anaerobia.
- Adaptar el inóculo que será utilizado en los tratamientos anaerobios.
- Determinar el tratamiento óptimo mediante digestores anaerobios.

1.4. HIPÓTESIS

El tratamiento anaerobio en digestor tipo batch aplicado en aguas residuales agroindustriales de destilería (vinaza) contribuye a una mayor producción de metano.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. INDUSTRIA AZUCARERA PARA LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL ARTESANAL

La industria azucarera es un sector económico dedicado a la siembra, cosecha y procesado de la caña de azúcar (Calderón, 2016).

El proceso inicia con el producto cosechado y una vez limpio va al trapiche para obtener jugo de caña. Este líquido conocido como guarapo, pasa por un proceso de fermentación que dura 48 horas con el objeto de perder completamente el azúcar. Después, continúa con la etapa de destilación en el alambique, en donde se somete a evaporación para obtener el etanol. Estos vapores pasan por un brazo o refrigerante y, por último, pasa a ser recolectado en un recipiente (El Telégrafo, 2017).

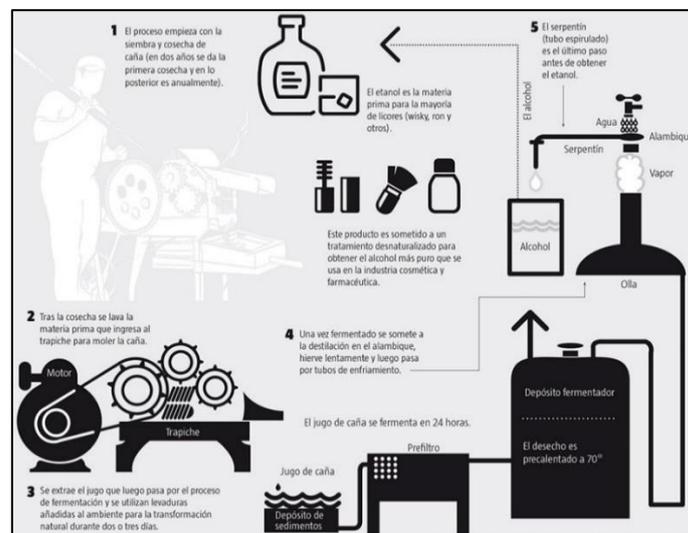


Figura 2.1. Proceso para obtener alcohol etílico de la caña de azúcar de licores artesanales.

2.2. RESIDUOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIALES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

De acuerdo con la clasificación de Basanta *et al.*, (2007) citado por Valeiro *et al.*, (2017), pueden clasificarse según su procedencia en:

- **Bagazo:** residuo fibroso que queda luego de la extracción del jugo luego del proceso de fabricación de azúcar a partir de caña.
- **Vinaza:** residuo de la producción de alcohol en las destilerías.
- **Cachaza** o torta de filtro: es un subproducto proveniente de la filtración de jugo en filtros rotativos durante la molienda.

2.3. VINAZA

La vinaza es un material líquido que resulta de la producción de alcohol etílico, sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de caña (López, 2013). Es de color café oscuro, con pH ácido y temperatura de 107°C aproximadamente. Su calidad está relacionada con el contenido residual de azúcar que, a su vez, causa un proceso de putrefacción tan pronto como la vinaza es descargada, liberando gases fétidos que convierten en un entorno desagradable (Salomon y Silva, 2009).

La generación de vinaza en la destilería va a ser directamente proporcional a la producción de alcohol. Por cada litro de alcohol producido se genera de 10 a 15 L de vinaza (Valeiro *et al.*, 2017).

2.3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA VINAZA

La composición química de la vinaza va a depender de las características del suelo, la variedad de la caña de azúcar, el período de cosecha y el proceso industrial utilizado para la producción de etanol (Salomon y Silva, 2009).

La carga orgánica depende de la materia prima utilizada en la producción, la DQO puede llegar hasta 50000 - 115000 mg/l (López, 2013). Al tener un alto contenido orgánico, aun en estado diluido, resulta factible poder usarlas para producir biogás (Guevara, 1999).

La vinaza sale de la columna de destilación con una temperatura de alrededor de 90°C y pH entre 3 y 4. Constituye 94-97% de agua, Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , melanoidinas y cantidades residuales de azúcar, alcohol, y componentes volátiles como cloroformo, pentaclorofenol, fenol y cloruro de metileno, y la cantidad de estas sustancias depende de la materia prima y del proceso de producción de etanol (Ferreira *et al.*, 2011) .

De acuerdo con Freire y Cortez (2000), y Moraes *et al.* (2015), se presenta una compilación de los principales parámetros para la caracterización de la vinaza de diferentes materias primas, que los autores han coleccionado de distintas literaturas:

Cuadro 2.1. Caracterización de la vinaza de varios autores.

Materia prima	Parámetros*									Referencias
	pH	DQO	DBO	N	P	K	SO ₄ ²⁻	ST ^a	SV ^b	
Jugo de caña de azúcar	3.7-4.6	15-33	6-16	0.15-0.7	0.10-0.21	0.009-0.20	0.60-0.76	23.7	20	Freire y Cortez (2000)
	7.9	15-33	6-17	0.2-0.7	0.0004-0.1	1.0-1.7	0.2-0.3	24	20	Moraes <i>et al.</i> , (2015)
	n.d.	30	n.d.	0.52	0.25	1.4	0.46	n.d.	1.8	
	n.d.	31.3	17.1	0.41	0.11	1.5	n.d.	21.1	15.6	
	n.d.	23.4	n.d.	0.28	0.04	0.6	0.44	n.d.	n.d.	
	n.d.	30.4 ± 8.2	16.7 ± 3.4	0.63 ± 0.32	0.13 ± 0.11	2.0 ± 1.2	1.4 ± 1.4	n.d.	n.d.	
Melaza de caña de azúcar	4.2-5.0	65	25	0.45-1.6	0.10-0.29	3.74-7.83	6.40	81.5	60	Freire y Cortez (2000)
	9.5	65	25	0.5-1.6	0.04-0.13	3.1-6.5	2.2	82	60	Moraes <i>et al.</i> , (2015)
	n.d.	52	n.d.	0.77	0.04	2.5	1.2	n.d.	n.d.	
	n.d.	84.9 ± 30.6	39.0 ± 10.8	1.23 ± 0.63	0.19 ± 0.35	5.1 ± 3.1	3.5 ± 2.5	n.d.	n.d.	
	1.0	42	11.3	0.07	0.2	2.3	1.3	158	n.d.	
Mezclado	4.4-4.6	19.8	45	0.48-0.71	0.09-0.20	3.34-4.60	3.70-3.73	52.7	40	Freire y Cortez (2000)
	n.d.	32.6	n.d.	0.46	0.05	1.2	0.89	n.d.	n.d.	Moraes <i>et al.</i> , (2015)
	8.3	45	20	0.5-0.7	0.004-0.1	2.8-3.8	1.3	53	13	
	n.d.	31.5	n.d.	0.37	0.024	1.3	0.15	n.d.	3.7	

a*Todos los parámetros se encuentran en (g/L), excepto pH.

^aSólidos Totales (ST)

^bSólidos Volátiles (SV)

n.d. = no determinado

2.3.2. IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR LA VINAZA.

La vinaza posee un alto contenido de materia orgánica que constituye como un material altamente contaminante si es descargado de forma directa a un cuerpo de agua (López, 2013). Su poder contaminante puede ser cien veces más que las aguas residuales domésticas (Salomon y Silva, 2009).

Para las últimas décadas, la mayor destrucción de vinazas ha sido en la aplicación de cultivos de caña de azúcar a manera de fertilizante, una práctica conocida como fertirrigación. Esta práctica no ha sido bien establecida porque aplican de forma indiscriminada a los suelos y no toma en cuenta los impactos potenciales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero, lixiviación de sulfato de sodio, generación de malos olores y contaminación de agua subterránea (Salomon y Silva, 2009; Guzmán, 2013).

2.3.3. NUEVAS ALTERNATIVAS PARA MITIGAR IMPACTOS OCASIONADOS POR LA VINAZA

Se están desarrollando nuevos estudios para descubrir formas de tratamiento y/o eliminación de la vinaza. Salomón y Silva (2009) expresan algunos:

- Biodigestión de la vinaza.
- Combustión de la vinaza y generación de calor después de la concentración por evaporación.
- Reciclaje de vinaza durante el proceso de fermentación con el objetivo de reducir su cantidad (problema muy complicado que afecta el metabolismo bacteriano).
- Uso directo de la vinaza para la alimentación del ganado o para la producción de la levadura luego de haber sido tratada.
- Uso de la vinaza como aditivo para material de construcción.

2.4. BIODIGESTIÓN

2.4.1. BIODIGESTION O DIGESTIÓN AEROBIA

Procesos realizados por diversos grupos de microorganismos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular (Peralta y Varea, 2017). En este tipo de digestión, el lodo se expone al aire libre y se descompone (MAE, 2015).

2.4.2. BIODIGESTION O DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es un proceso que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, en donde trabajan un gran número de microorganismos en serie o en serie-paralelo que degradan la materia orgánica en sucesivas etapas (Lorenzo y Obaya, 2005). La digestión anaerobia es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. En todas estas etapas intervienen las denominadas bacterias metanogénicas (López, 2013).

El funcionamiento de la digestión anaerobia refleja dos etapas fundamentales: el arranque y operación del sistema. El arranque es el proceso donde se adaptan los microorganismos anaeróbicos a condiciones de operación del digestor (ambiente anaeróbico, pH, temperatura) y a las características del sustrato. La operación consiste en mantener tales condiciones para evitar la

inhibición de los microorganismos, y se manifiesta en el rendimiento del digester (Nakasima *et al.*, 2017).

2.5. FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Este proceso se determina en gran medida por las condiciones en las que se desarrolla el proceso, por lo que resulta de especial importancia el control de dichas condiciones. A continuación, se procede a describir los parámetros de control más relevantes que conllevan una influencia reseñable en el proceso:

Temperatura:

Es uno de los parámetros fisicoquímicos más importantes que afecta directamente el desarrollo del proceso de digestión anaerobia. De acuerdo al rango en el cual se realiza el proceso, se presenta la influencia directa de la temperatura sobre la razón máxima de crecimiento (μ_{\max}) de los microorganismos metanógenos (Cendales, 2011).

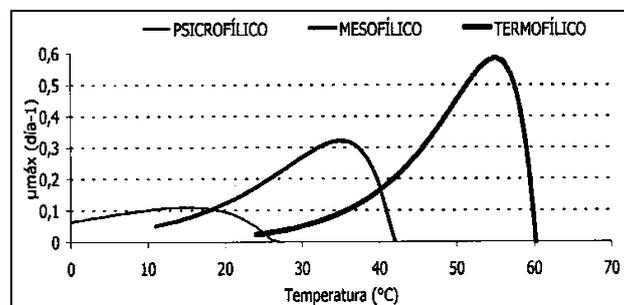


Figura 2.2. Procesos bioquímicos y fisicoquímicos considerados en el modelo de digestión anaerobia (FAO, 2011).

Existen tres rangos de temperatura establecidos para el desarrollo del proceso (Vásquez y Riveros, 2013):

- Digestión Psicofílica: La producción de gas varía de una estación a otra dependiendo de la temperatura atmosférica, tiene las ventajas de que sus estructuras son simples y de baja inversión.
- Digestión Mesofílica: La descomposición de la carga es más lenta que la Termofílica, pero con menos consumo de energía.
- Digestión Termofílica: Se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y corto tiempo de retención, tiene buenas características de desinfección

Cuadro 2.2. Rangos de Temperatura y tiempo de fermentación anaerobia (Vásquez y Riveros, 2013).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo
Psicofílica	4-10 °C	15-18 °C	25-30 °C

Mesofílica	15-20 °C	34-38 °C	40-45 °C
Termofílico	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C

Relación carbono/nitrógeno:

Es uno de los factores determinantes en la producción de metano ya que si esta relación es de valores bajos el riesgo por exceso de nitrógeno se incrementa y por ende la inhibición del proceso, mientras que valores altos indican deficiencia de nitrógeno para la síntesis de la biomasa.

Específicamente la relación para el estiércol de especies bovinas, producido por especies bovinas, porcinas y avícolas es de 20, mencionando que los valores de C/N entre 20-30 presentan valores positivos e incrementan el rendimiento y el potencial de metano por lo que estos residuos son capaces por si solos de mantener el proceso de digestión anaerobia, las elevadas relaciones de SV/ST garantizan disponibilidad de materia biodegradable para la producción de metano (Montenegro et al., 2016)

Alcalinidad:

Cuando el pH de un sistema anaeróbico está operando dentro de los rangos permitidos, es controlado principalmente por la alcalinidad natural dentro de la biodigestión. La síntesis de materia orgánica libera amoníaco, cada mol de nitrógeno orgánico genera un equivalente de alcalinidad. Mediante una reacción bioquímica el amoníaco reacciona con el dióxido de carbono para producir bicarbonato de amonio, el cual contribuye a la alcalinidad del sistema. Cuando los AGV comienzan a acumularse en el reactor anaeróbico, estos son neutralizados por la alcalinidad presente en el reactor y mantienen el pH estable (FAO, 2011).

Potencial de hidrogeno (pH):

La digestión anaerobia puede ser alterada por cambios en los niveles de pH que se encuentran fuera de rango. La regulación del pH en el rango deseado se logra agregando regularmente a la mezcla materiales alcalinos, tales como cal o cenizas (Silva, 2008).

El intervalo de pH ideal para la digestión anaerobia es de neutro a ligeramente básico (de 6.6 a 7.6), siendo el pH neutro el más óptimo (Arrieta, 2016).

El pH va a ser un parámetro fundamental para el desarrollo de la máxima actividad por los microorganismos que se identifican en cada una de las fases:

- Microorganismos hidrolíticos pH entre 7,2 y 7,4
- Microorganismos acetogénicos pH entre 7 y 7,2
- Microorganismos metanogénicos pH entre 6,5 y 7,5.

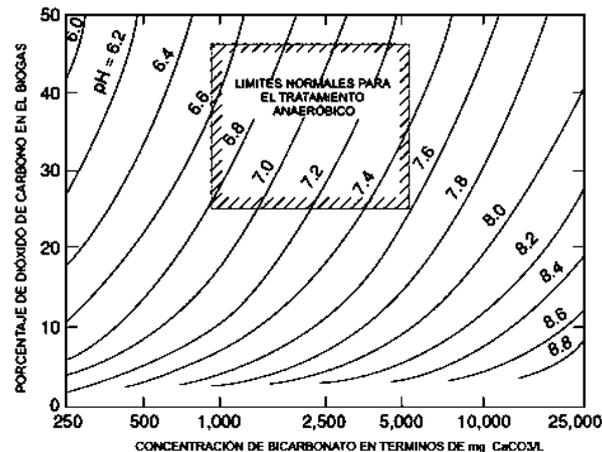


Figura 2.3. Rangos de operación estable para el pH y la alcalinidad durante el proceso de digestión anaerobia (Arrieta, 2016).

Aristizábal (2015) menciona que se debe conocer la cantidad aproximada de base (NaOH) que debe ser agregada para neutralizar y en el caso de la vinaza, lo necesario para aumentar su pH. Por lo general, si la vinaza ronda los 4,5 de pH, se debería adicionar cerca de 4,6g de Hidróxido de sodio (NaOH) puro para que un litro de vinaza alcance el valor del pH del agua (neutro).

Nutrientes:

Los nutrientes en la degradación anaerobia de residuos mixtos o mezclas de aguas residuales, están disponibles en cantidades ilimitadas. La adición de elementos de traza como el níquel o el cobalto estimula los procesos anaerobios (Alvarado, 2017).

Las cantidades requeridas de estos macro nutrientes en un proceso de digestión anaerobia son dependientes de las poblaciones de microorganismos presentes y del tipo de sustrato que se degrade (Cendales, 2011). Por otra parte, una relación equilibrada de nutrientes en el sustrato evita una utilización incompleta de sustratos (Álava, 2018).

Tiempo de retención hidráulica (TRH) y velocidad de carga orgánica:

Es el periodo medio de permanencia de un sustrato en el digestor, que permite el desarrollo de la población bacteriana y del proceso de producción de biogás (Esteban, 2016).

El límite mínimo de los T.R. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor (Hilbert, 2006).

Cuadro 2.3. Tiempo de retención según la materia prima (Hilbert, 2006).

Materia prima	Tiempo de retención
Estiércol bovino líquido	20 - 30
Estiércol porcino líquido	15 - 25
Estiércol líquido líquido	20 - 40

Por otro lado, la velocidad de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen del digestor y tiempo. Valores bajos de VCO implican baja concentración de sustrato y/o elevado tiempo de retención. Un incremento en la velocidad de carga orgánica implica la reducción en la producción de biogás por unidad de materia orgánica.

Inhibición y Toxicidad:

En la composición del material existen inhibidores que impiden la fermentación metánica, por lo que se deberá llevar un control exhaustivo en laboratorio de la biomasa para evitar problemas (Esteban, 2016).

Por otro lado, el oxígeno, concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas, además de metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos, inhiben la digestión anaeróbica (Abreu y Acosta, 2005). Se presentan a continuación ciertos valores de concentraciones de inhibidores comunes, estos valores se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias anaeróbicas presentan la capacidad de adaptarse después de un período de tiempo a condiciones que en un principio las afectaba severamente.

Cuadro 2.4. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico (FAO, 2011).

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO ₂	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción de sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla son distintos y se lo debe considerar ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos, por tanto, puede afectar la eficiencia y producción de gas (Lara, 2016).

Cuadro 2.5. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos (Lara, 2016).

Materias primas	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4- 56.2
Porcinos	15.0- 49.0
Aves	26.0- 92.0
Caprinos	83.0- 92.0
Ovejas	32.0- 45.0
Conejos	34.7- 90.8
Equinos	19.0- 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas Secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.8- 90.0
Paja arroz	88.8- 82.6
Leguminosas	60.0- 80.0
Tubérculos	10.0- 20.0
Hortalizas	10.0- 15.0

Relación inóculo-sustrato (RIS):

Esta relación se expresa en función de la cantidad de sólidos volátiles en el inóculo por la concentración de sólidos volátiles adicionados en el sustrato. En la digestión anaerobia la relación I/S se presenta como un parámetro

operacional muy relevante para especificar el potencial de biometanización de cualquier residuo (Galarza y Gutiérrez, 2013).

Agitación:

La agitación permite la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios "muertos" sin actividad biológica (Carhuancho, 2012).

Se recomienda una agitación intermitente manual diaria, en el caso de que no exista un sistema mecanizado para su agitación (Galarza y Gutiérrez, 2013).

2.5.1. SUSTRATO

También conocida como biomasa, es cualquier materia orgánica que proviene de desechos animales o vegetales, colocados en un contenedor, que pueden ser convertidos en energía. Sea de forma pura o mezclado, permite el desarrollo de los organismos, desempeñando un papel de soporte (Donado, 2014; Apolo, 2015). Se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos (FAO, 2011).

En términos generales, se pueden clasificar los sustratos en cuatro clases: en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO) (FAO, 2011).

La naturaleza y composición química del sustrato puede influir en la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa, por lo que se establece un equilibrio que fácilmente puede alterarse cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones (Flotats *et al.*, 2001).

Las vinazas han sido estudiadas de diferentes maneras: tratamientos aerobios, en suelo, humedales construidos, oxidación avanzada; pero la digestión anaerobia sigue siendo la mejor alternativa para su tratamiento porque este sustrato presenta una cantidad elevada de materia orgánica biodegradable. Efluentes con relaciones DBO/DQO de 0.4-0.6 son considerados como biodegradables y la vinaza presenta una relación mayor a 0.5 (Gil, 2012).

2.5.2. INÓCULO

Para que se produzca la digestión anaerobia, se necesita que el sustrato reúna los microorganismos que posibiliten la biodegradación, mismos que se encuentran en el inóculo. Por tanto, el inóculo es la suspensión de gran cantidad de microorganismos que se transfieren a un sustrato para inocularlos; tienen una capacidad de crecer e invadir rápidamente. Se pueden utilizar excretas de animales, o del mismo ser humano (Guevara, 1999; BioDic, 2017)

2.6. ACTIVIDAD MICROBIANA

Levenspiel (2004) determina que la actividad microbiana durante la fermentación anaerobia se observan procesos distintivos: un período de inducción; de crecimiento; estacionario y la muerte de las células.

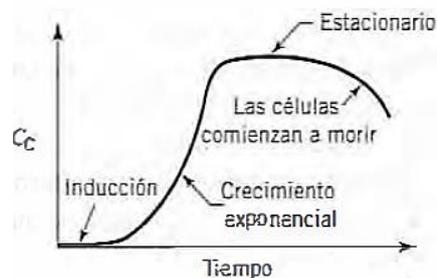


Figura 2.4. Análisis cualitativo de la actividad microbiana (Levenspiel, 2004).

Si el alimento es adecuado, los microbios comen, se multiplican y en el proceso se produce un material desecho o residual, R . Los microbios necesitan un tiempo para adaptarse a su nuevo ambiente para después crecer exponencialmente; el tiempo de inducción o retardo dependerá del resultado del “choque” que sufren las células al encontrarse en el nuevo entorno. En símbolos: $A \xrightarrow{C} C + R$. En ocasiones la presencia del producto R inhibe la acción de las células, aunque haya aún alimento disponible. La velocidad de crecimiento de las células luego del tiempo de inducción está dada por Monod como: $r_C = \frac{k C_A C_C}{C_A + C_M}$; siendo C_M la concentración de A cuando las células se reproducen a la mitad de su velocidad máxima (Levenspiel, 2004).

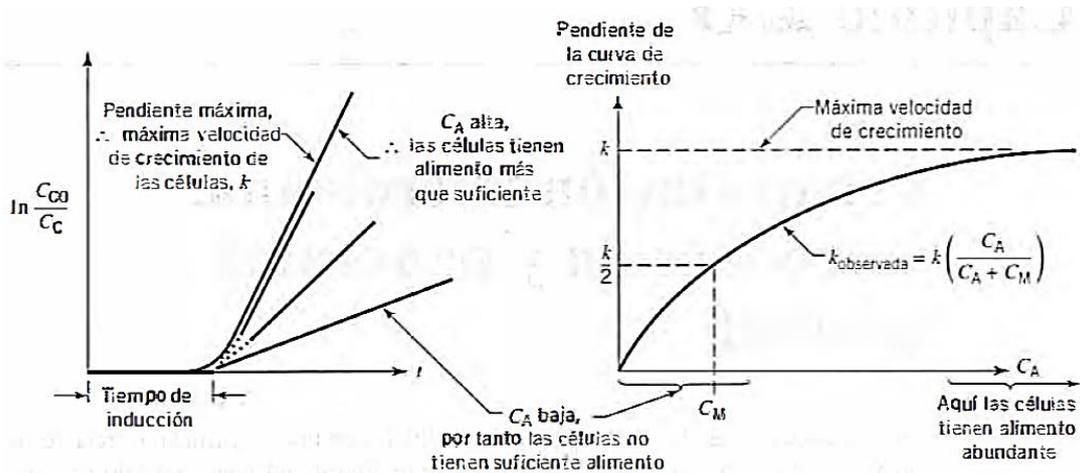


Figura 2.5. Crecimiento celular en un medio ambiente adecuado y uniforme (Lettinga, 2004).

2.7. ETAPAS O NIVELES TRÓFICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia comprende un proceso complejo ya que posee una gran cantidad de reacciones bioquímicas y de microorganismos involucrados en ellas, ocurriendo muchas de estas reacciones de forma simultánea (FAO, 2011). A esta complejidad se le suma las distintas líneas de fermentación, en base a la presencia de un sustrato u otro, dada por los microorganismos con diferentes entradas y salidas de energía, con variaciones en termodinámicas y cinéticas (Viquez, 2011).

El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica está dividido en cuatro fases:

- Hidrólisis.
- Etapa acidogénica o fermentativa.
- Etapa acidogénica.
- Etapa metanogénica.

El proceso de digestión anaerobia involucra un consorcio de microorganismos de todos los dominios (archaea, bacteria y eukarya). Pavlostathis y Giraldo-Gómez (1991), esquematizado por la FAO (2011) presentaron el siguiente esquema de reacciones junto a los productos intermedios generados:

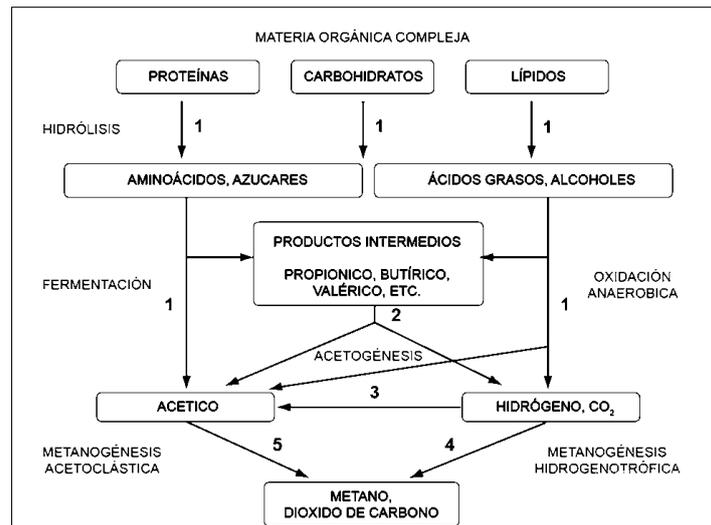


Figura 2.6. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia (FAO, 2011).

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

1. Bacterias fermentativas.
2. Bacterias acetogénicas que producen hidrógeno.
3. Bacterias homoacetogénicas.
4. Aqueas metanogénicas hidrogenotróficas.
5. Arqueas metanogénicas acetoclásticas.

Ahring (2003) simplifica el proceso dividiendo en tres grupos funcionales de microorganismos: bacterias hidrolizadoras y fermentativas; bacterias acetogénicas, consumidoras de hidrógeno y archeas metanogénicas. El rendimiento de un digestor anaeróbico depende de manera crítica de la actividad concertada de estas poblaciones microbianas; por consiguiente, la mayor infravaloración del comportamiento de los consorcios microbianos en los sistemas puede facilitar la mejora de la tecnología de digestión anaerobia (Lee *et al.*, 2010).

Metanogénesis: La reacción bioquímica más lenta del sistema será el factor limitante del biodigestor. Speece (1983) y Gould (1971) citado por Viquez (2011) concuerdan en que la metanogénesis es el factor limitante de la digestión anaerobia y que para obtener mejores resultados se debe atender con mayor atención en esta etapa. En este proceso están presentes microorganismos del dominio archaea, organismos estrictamente anaerobios con sensibilidad al oxígeno. Los metanógenos poseen características fisiológicas únicas como la baja tasa de crecimiento, alta susceptibilidad a las

condiciones externas y espectro limitado de utilización del sustrato (Lee *et al.*, 2010).

Montalvo (2000) citado por Lorenzo y Obaya (2005), presenta las bacterias aisladas en un reactor anaerobio:

Cuadro 2.6. Bacterias aisladas en cada etapa metabólica en el reactor anaerobio (Lorenzo y Obaya, 2005).

Fase no metanogénica (acidogénica)	
ANAERÓBICOS FACULTATIVOS	ANAERÓBICOS ESTRICTOS
Lactobacillus	Bacteroides
Spirillum	Clostridium
Klebsiella	Bifidobacterium
Actinomyces	Sphaerophorus
Vibrio	Fusobacteriumn
Corynebacterium	Veillonella
Bacillus	Peptococcus
Micrococcus	Deulfovibrio
Pseudomonas	
Alcaligenes	
Sarcina	
Aerobacter	
Fase Metanogénica	
ANAERÓBICOS EXTREMOS	
	Methanobacterium
	Methanococcus
	Methanospirillum
	Methanobrevibacter
	Methanomicrobium

2.8. RELACIONES ECOLÓGICAS DE LAS BACTERIAS METANOGÉNICAS Y SULFOREDUCTORAS

La función de las arqueas metanogénicas se distinguirán por el tipo de sustrato disponible. Estos microorganismos constituyen el grupo biológico que determina el mayor o menor éxito del proceso dada su baja velocidad de crecimiento y que requiere de estrictos requisitos como el pH, además de ser sensible, por inhibición, a la presencia de oxígeno molecular (Lorenzo y Obaya, 2005).

Guevara (1999) considera que hay tres condiciones básicas para tener una metanogénesis adecuada: anaerobiosis estricta, condiciones reductoras rigurosas (<-33mV) y ausencia (o cantidades limitadas) de aceptores minerales finales (sulfatos, nitratos) que favorezcan otras vías de competencia con la metanogénesis.

Si en el medio anaerobio, el sustrato posee en su composición una cantidad mayor de 160 mg/l de sulfuros se desarrollarán con gran intensidad las bacterias formadoras de sulfuro de hidrógeno (H_2S), también llamadas sulfobacterias, como es el caso de *Desulfovibrio desulfuricans*, por lo que las bacterias metanógenas se inhiben (Lorenzo y Obaya, 2005).

2.9. BIODIGESTOR

Un biodigestor es un reactor hermético o impermeable, dentro del cual se deposita el sustrato, que puede ser cualquier material orgánico a fermentar como excrementos de humanos y animales, purines, hojas, pasto, frutas y desechos vegetales; agregando agua a la mezcla. En este contenedor cerrado se produce la descomposición anaeróbica, obteniendo el biogás y biofertilizante o biol (Ávila, 2018)

2.9.1. TIPOS DE BIODIGESTORES

Según Hillbert (2006), se han desarrollado diversos tipos de biodigestores de acuerdo a la aplicación de gas, la caracterización del material a ser digerido, a las exigencias en cuanto a niveles de descontaminación a lograr y a la relación costo-inversión-beneficiario.

Carga	Sistema discontinuo BATCH	Se caracterizan porque el sustrato se carga una sola vez, es utilizado para degradar materias primas sólidas (García y Gómez, 2016).
	Sistema semicontinuo o fed-BATCH	Se refiere a aquellos procesos de cultivos a los que se les abastece un flujo de sustrato de manera continua, constante o no, sin que exista una corriente de salida del cultivo o mosto fermentado (Strat, 2018).
	Sistema continuo	En este sistema se incorporan corrientes, para alimentar nutrientes y retirar productos (se agrega medio fresco y se retira exceso de células del reactor), este proceso se realiza continuamente (Gutiérrez y Guzmán, 2016).
Intensidad de mezcla	Mezcla completa	Presenta una abertura de alimentación y un flujo uniforme y una agitación perfecta, se busca que el sustrato en fermentación se mezcle en forma total, por esta misma razón la salida presenta la misma composición y características que el fluido que se encuentra dentro del reactor (López y Borzacconi, 2009).
	Mezcla	En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en

	parcial o nula	los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (Hillbert, 2006).
Manejo del sustrato	Contacto anaeróbico	En estos digestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inóculo (Hillbert, 2006).
	UASB	Este tipo de digestor es especialmente apto para el tratamiento de desechos agroindustriales como la vinaza, no admite partículas insolubles.
	Lecho fluidizado	Es un reactor de película fija, puesto que la biomasa suspendida tiende a lavarse del sistema debido a la alta velocidad del flujo ascendente. No presenta problemas de obstrucción y proporciona una mejor difusión del sustrato dentro de la biopelícula (FAO, 2011).
	Filtro anaeróbico	Estos reactores se usan de manera vertical, en su interior poseen un medio fijo donde se adhieren las bacterias y así evita su pérdida, que disminuyen notablemente los TRH. Existen dos tipos flujo ascendente y de flujo descendente (Hillbert, 2006).
Manejo bioquímico	Una etapa	Todos los tipos de digestores vistos hasta este momento se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de la digestión anaeróbica se cumplen en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones (Hillbert, 2006).
	Dos etapas	Estos sistemas consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Se ha aplicado para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc (FAO,2011).

2.10. SISTEMA DISCONTINUO: TIPO BATCH

Este tipo de biodigestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir biogás, pero no se descarga completamente, se retira solo cierta cantidad, esto con el fin de producir el biogás de las cargas subsecuentes en menos tiempo, debido a la presencia de la mezcla ya fermentada y por consecuencia se acelera la obtención del biogás, a esta mezcla fermentada se le llama inoculante o Bioabono (Vásquez

y Riveros, 2013). Son fáciles de construir y son también ideales a nivel de laboratorio por si se desea evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla (Vásquez y Riveros, 2013).

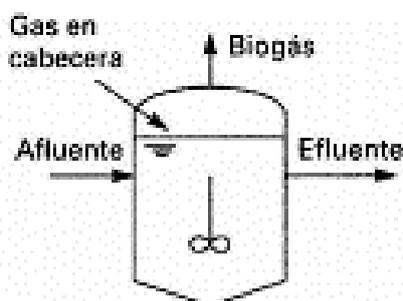


Figura 2.7. Diseño de un biodigestor tipo BATCH

Según el “Manual de Biogás” presentado por la FAO en el 2011, existen ventajas de este tipo de sistemas frente a los convencionales continuos:

- La biomasa se encuentra en un estado dinámico de abundancia y escasez de sustrato, simulando de mejor manera el estado fisiológico natural de los microorganismos.
- Presenta una gran flexibilidad de operación, pudiendo lograrse la adaptación de la biomasa a un determinado tipo de sustrato.
- La etapa de sedimentación se realiza dentro del mismo reactor por lo que no es necesario una unidad aparte.
- La operación puede llevarse a cabo sin recirculación de sólidos ni de líquido, a menos que ésta se utilice como agitación.
- Permite un mejor control del proceso y una mejor calidad del efluente, ya que la descarga puede ser llevada a cabo cuando el efluente presenta los estándares requeridos.

2.11. COMPOSICIÓN DE BIOGÁS

Es el producto principal de la digestión anaerobia, donde parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en una mezcla de CO₂, hidrógeno, metano, sulfuro de hidrógeno y trazas de otros elementos (Ferrer y Pérez, 2010).

Cuadro 2.7. Composición media de biogás de distintos residuos orgánicos (Salomon y Silva, 2009).

Gases	Porcentaje (%v/v)
-------	-------------------

Metano (CH ₄)	40-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-40
Nitrógeno (N)	0.5-2.5
Oxígeno (O)	0.1-1
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0.1-0.5
Amoniaco	0.1-0.5
Monóxido de carbono (CO)	0-0.1
Hidrógeno (H)	1-3

Existen inconvenientes por la posibilidad de bajos rendimiento neto de metano en la producción de biogás (calidad del metano) debido a la alta generación de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. Esto puede ser causado por la composición de los residuales sustratos y la falta de adaptación a los cambios por parte de los grupos microbianos o inóculo y sus relaciones ecológicas (Ferrer y Pérez, 2010).

La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente se encuentra alrededor de los 350 l/kg de sólidos degradables (Lorenzo y Obaya, 2005). Las vinazas tienen un importante contenido de DQO, pero la producción de biogás se da óptimamente dentro de un rango de DQO (4000 a 8000), por lo que se hace necesario diluir 1:10 esta vinaza para utilizarla en la producción de biogás, y sin duda llevar a un pH aproximadamente neutro (Guevara, 1999).

2.11.1. MÉTODO DE PURIFICACIÓN DE GASES

Remoción de CO₂: Debido al interés por conocer el volumen de metano generado, el biogás es llevado a una trampa de CO₂, que puede ser una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH) o de sodio (NaOH) (López, 2011; Vaquerano *et al.*, 2016) con pH mayor que 12, en un rango de 15-20 g/L (Torres y Pérez, 2010) , donde el CO₂ es absorbido y el volumen de gas metano desplazará un volumen igual de la solución alcalina. Esta metodología exige un montaje y seguimiento muy cuidadoso. El volumen que se desplaza fuera de la botella de solución alcalina va a equivaler al volumen de biogás generado por el sistema (Díaz, *et al.*, 2002).

Este proceso es básico para determinar la composición del metano, entendiendo que de igual manera existirán otros gases presentes en el biogás con concentraciones casi insignificantes (Vaquerano *et al.*, 2016).

Estos métodos de lavado con soluciones acuosas para eliminar el CO_2 también son aplicables para eliminar el H_2S . Después, puede ser pasado por otras soluciones para remover el hidrógeno y oxígeno y de esta manera conseguir determinar el volumen del metano, de forma más pura, que sería la composición volumétrica restante (López, 2011).

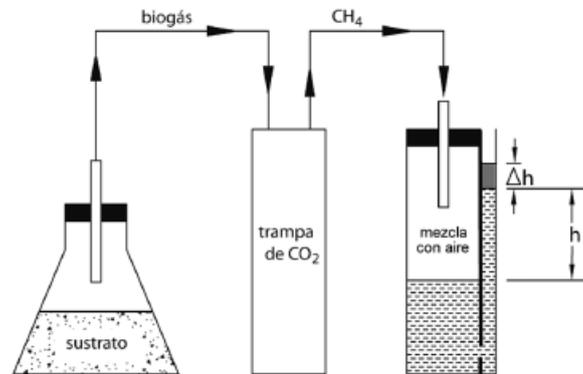


Figura 2.8. Esquema para la medición de volumen del CH_4

Remoción de H_2S : Los métodos para eliminar el Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) consisten en la absorción del mismo a partir de óxido de hierro (Díaz, 2008).

Se utilizan limallas de hierro colocadas en columnas de purificación que se encuentran humedecidas de forma discontinua con agua el cual reaccionará con el biogás para formar sulfuro de hierro, un compuesto no gaseoso (Viquez, 2010). La presencia del H_2S en el biogás, puede ser corrosivo si se desea usar el biogás como un biocombustible afectando a los motores, sistema de transportes o equipo consumidor final.

2.11.2. MÉTODO DE CUANTIFICACIÓN DEL BIOGÁS

López (1999), citado por Pacheco (2016) menciona que existen varios métodos para conocer la generación de biogás en la digestión anaerobia. Estos métodos son: el método volumétrico, el método por indicador de combustión de gas, y el método por análisis cromatográfico.

Método volumétrico: Desarrollado por Dennis y Nichols en 1929, y Haldane y Graham en 1935 (López, 2011). Es el método más usado (Pacheco, 2016) y consiste en registrar la medida del volumen de biogás por una solución de hidróxido de sodio o potasio para remover el CO_2 para remover el hidrógeno y medirlo en forma volumétrica el metano CH_4 restante (López, 2011).

Método por indicador de combustión de gas: Desarrollado por Yant y Berger (1936). Se basa en el equilibrio en que se presenten el metano en la solución con la presión parcial del mismo en su fase gaseosa dentro de la misma solución, donde la presión parcial del metano es determinada como un indicador de combustión de gas (López, 2011).

Jemmet (2011) menciona que en la salida del biogás se debe colocar una manguera en forma de “Y”, para medir, en una salida, la presencia de metano por quema de combustión, y la otra salida almacenar el biogás.

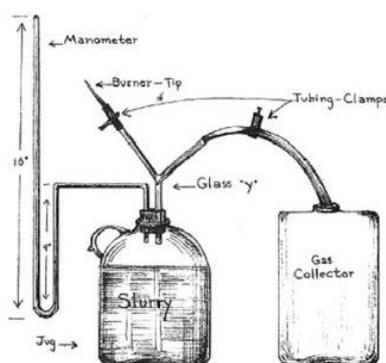


Figura 2.9. Diseño de la salida del biogás con manguera en forma de “Y”.

Método por análisis cromatográfico: implementa un sistema equipado con un detector de la conductividad térmica. Para ello, se introduce en dos o más columnas por donde se hace circular el gas que se desea analizar. Las columnas poseen sustancias que separan el CO, N₂, H₂, O₂, para su posterior detección; este método ha sido estandarizado por American Public Health Association APHA (1975), citado por López (2011).

MARCO REFERENCIAL

2.12. CONCENTRACIÓN DEL INÓCULO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Según Torres y Pérez (2010), mencionan que para los procesos anaerobios que se garantice agitación se recomiendan concentraciones de inóculo entre 2.0 a 5.0 gSV /L y los que se realizan sin agitación la concentración recomendada debe variar entre 1.0 y 1.5 gSV /L. El inóculo deberá ser caracterizado previamente en términos de los Sólidos Volátiles Totales (gSV /L).

$$V_{\text{lodo}} = \frac{V_{\text{mezcla}} * C_{\text{fija}}}{C_{\text{inicialLODO}}} \quad [1]$$

Donde:

- V_{lodo} : volumen de lodo a adicionar
- V_{mezcla} : volumen total de reacción o de mezcla
- C_{fija} : concentración fijada (1.0-5.0 gSV /L)
- $C_{\text{inicialLODO}}$: concentración de SVT inicial del lodo

2.13. MÉTODOS ANALÍTICOS

2.13.1. SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES

Los sólidos totales (ST) engloban a todas las partículas que se encuentran tanto disueltas como en suspensión dentro de una muestra. Los sólidos volátiles (SV) son el porcentaje de sólidos orgánicos que, en teoría, se convertirán en metano y que están presentes en la misma muestra de sólidos totales que pueden eliminarse por volatilización (FAO, 2011; Rey, 2014)

El método para su determinación está descrito en el Standard Methods for the Examination for the Examination of Water & Wasterwater (American Public Health Association, 2012) en el que menciona:

- Pesar una cápsula de porcelana en la balanza analítica (Peso A).
- Agregar el volumen de muestra.
- Calentar la muestra preparada en el horno a 103-105°C durante una hora.
- Guardar la cápsula en el desecador.
- Se procede a pesar (Peso B) y llevar a la mufla para la incineración, durante 15 minutos a 550°C.
- Sacar la muestra de la mufla y dejar que disminuya su temperatura al aire. Depositarlo dentro del desecador hasta que alcance su temperatura ambiente.
- Pesar la cápsula después del proceso. (Peso C)

El cálculo se realiza mediante las siguientes fórmulas matemáticas:

$$ST (mg) = \frac{B-C}{\text{Volumen muestra}} \times 1000 \quad [2]$$

$$SV (mg) = \frac{C-A}{\text{Volumen muestra}} \times 1000 \quad [3]$$

Donde:

- A= Peso de la cápsula vacía (mg).
- B= Peso de cápsula + muestra antes de ignición (mg)
- C= Peso de cápsula + muestra después de ignición (mg)

2.13.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Según APHA, 2012. Solución A + Solución B (MERCK):

Método: La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación, se determina fotométricamente la concentración de iones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ amarillos no consumidos de los iones Cr^{3+} verdes.

Técnica: De acuerdo con el intervalo de medida deseado, pipetear la solución A y la solución B, en una cubeta vacía (exenta de rayaduras e impurezas orgánicas) y mezclar. A continuación, se mencionan los intervalos de medida para la determinación de DQO:

Cuadro 2.8. Intervalo de medida para determinación de DQO				
Intervalo de medida (mg/l) de DQO	4.0-40.0	10-150	100-1500	500-10000
Solución A	0,30 ml	0,30 ml	0,30 ml	2,20 ml
Solución B	2,85 ml	2,85 ml	2,30 ml	1,80 ml

- Luego de mezclar, agitar por balanceo para poner en suspensión el sedimento formado del fondo de la cubeta.
- Según el intervalo verter la muestra preparada, 3mL (100-1500) o 1mL (500-10000), mediante la pipeta de embolo sobre el reactivo en la pared interna de la cubeta de reacción mantenida inclinada.
- Cerrar firmemente la cubeta con tapa enroscada.
- Calienta la cubeta 120 min a 148°C en el termoreactor precalentado.
- Sacar del termoreactor la cubeta caliente y colocarla en el soporte para cubetas para que se enfríe.
- Al cabo de 10 min agitar la cubeta por balanceo y para enfriarla a temperatura ambiente volver a colocarla en el soporte para cubetas (tiempo de enfriamiento mínimo 30 minutos).
- Medir la muestra de medición en el fotómetro MERCK.

2.13.3. pH

Según González (2014), se debe disponer de un potenciómetro, debidamente calibrado, introduciéndolo directamente a la muestra, proporcionando el resultado, una vez determinado el valor de pH se lava con agua destilada y secado con papel absorbente.

A fin de evitar la inhibición de los microorganismos metanogénicos, semanalmente fue controlado el pH, corrigiéndolo con Hidróxido de Sodio (NaOH) en los casos necesarios para mantenerlo en un rango cercano a la neutralidad (pH 7) hasta alcanzar la estabilidad.

En el caso de estos tratamientos, se toma volumen determinado de vinaza (a la que se le ha medido previamente el pH) y se añade el hidróxido de sodio (NaOH), agitando hasta llegar a pH entre 6.8- 7.0. Se anotan los volúmenes consumidos en la neutralización. Luego, se calcula el consumo del reactivo para el volumen de vinaza contenido en el birreactor (Merido y Valderrama, 2017).

2.14. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Se determina el porcentaje de remoción de materia orgánica que tuvo el tratamiento anaerobio se aplicó la siguiente ecuación (Chernicharo, 2007):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100 \quad [4]$$

DQO_i: Demanda química de oxígeno inicial.

DQO_f: Demanda química de oxígeno final.

La siguiente ecuación utiliza los sólidos volátiles como indicadores del proceso de la digestión (Guevara, 1999):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{SV_{entrada} - SV_{salida}}{SV_{entrada}} \times 100 \quad [5]$$

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

El presente proyecto se realizó en los laboratorios de Agroindustria, de la ESPAM MFL. Se encuentra situado a $0^{\circ} 49' 35,166''$ latitud sur y $80^{\circ} 11' 11,496''$ latitud oeste.

La Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”, se localiza en el sitio Limón, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Está situada geográficamente entre las coordenadas $0^{\circ} 49' 27,9''$ latitud sur; $80^{\circ} 10' 47,2''$ longitud oeste, altitud de 14,5 msnm.

3.2. DURACIÓN

El proyecto de año tuvo una duración de 9 meses después de la aprobación del proyecto de titulación.

3.3. VARIABLES EN ESTUDIO

Variable Independiente: Producción de metano.

Variable dependiente: Tratamiento anaerobio.

3.4. FACTOR EN ESTUDIO

El factor en estudio considerado para el proceso de digestión anaerobia fue el porcentaje de dilución de la vinaza.

3.5. NIVELES

10%, 20%, 30%, 40%, 100%.

3.6. VARIABLES A MEDIR

Producción de biogás y metano.

3.7. TRATAMIENTOS

Se realizaron cinco tratamientos con tres repeticiones cada uno, teniendo un total de 15 unidades experimentales.

3.8. DISEÑO EXPERIMENTAL

Diseño experimental	DCA-unifactorial				
Número de tratamientos	5				
Número de repeticiones	3				
Factor	Porcentaje de dilución de la vinaza				
Nivel	10%	20%	30%	40%	100%
Tratamiento (T)	1	2	3	4	5
Nomenclatura (réplica)	T ₁ R ₁	T ₂ R ₁	T ₃ R ₁	T ₄ R ₁	T ₅ R ₁
	T ₁ R ₂	T ₂ R ₂	T ₃ R ₂	T ₄ R ₂	T ₅ R ₂
	T ₁ R ₃	T ₂ R ₃	T ₃ R ₃	T ₄ R ₃	T ₅ R ₃

3.9. UNIDAD EXPERIMENTAL

Cuadro 3.9. Descripción de las unidades experimentales

Unidades experimentales NOMENCLATURA	INÓCULO (I)		SUSTRATO (S)	
	Volumen (L)	Concentración (g SV/L)	Volumen (L)	Dilución SV(%v/v)
T ₁	0,84	2	1,26	10%
T ₁	0,84	2	1,26	10%
T ₁	0,84	2	1,26	10%
T ₂	0,84	2	1,26	20%
T ₂	0,84	2	1,26	20%
T ₂	0,84	2	1,26	20%
T ₃	0,84	2	1,26	30%
T ₃	0,84	2	1,26	30%
T ₃	0,84	2	1,26	30%
T ₄	0,84	2	1,26	40%
T ₄	0,84	2	1,26	40%
T ₄	0,84	2	1,26	40%
T ₅	0,84	2	1,26	100%
T ₅	0,84	2	1,26	100%
T ₅	0,84	2	1,26	100%

3.10. PROCEDIMIENTO

3.10.1. FASE I. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Actividad 1. Toma de muestra del sustrato.

Se tomó una muestra de las aguas residuales (vinaza) obtenido de una destilería ubicada en la comunidad Mocarita, en el cantón Junín (Cuadro 3.10). Para su manejo y recolección de muestra, se consideró las siguientes Normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN): la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98 y NTE INEN 2176:98.

Cuadro 3.10. Ubicación satelital de la destilería

COORDENADAS	
X	Y
590579,44	9899528,42



Figura 3.10. Mapa de ubicación de la destilería.

Actividad 2. Análisis del laboratorio.

Se caracterizó la vinaza en el Laboratorio de Química Ambiental y Suelos, de acuerdo con “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2012):

Cuadro 3.11. Parámetros y sus técnicas de determinación

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA
Temperatura (T)	°C	Standard Methods 2550B
pH		Standard Methods 4500-H+ B
Sólidos totales (ST)	g/L	Standard Methods 2540D
Sólidos volátiles (SV)	g/L	Standard Methods 2540E
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	g/L	Standard Methods 5220C
Sulfatos (SO ₄)	g/L	Standard Methods 4500

3.10.2. FASE II. ADAPTACIÓN DEL INÓCULO QUE SERÁ UTILIZADO EN LOS TRATAMIENTOS ANAEROBIOS.

Actividad 3. Adaptación del inóculo.

Para realizar la adaptación del inóculo se fundamentó en la metodología de Guevara (1999). Se instalaron 8 reactores (R), utilizando botellas plásticas de 1,35 litros, desinfectadas con hipoclorito de sodio de acuerdo a Camacho (2017).

Las condiciones y características que se estipularon fueron:

Cuadro 3.12. Condiciones de operación del reactor Elaborado por: García e Intriago (2018)

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL DIGESTOR			

Tipo de reactor	BATCH		Vásquez y Rivero (2013)
Tipo de digestión	anaerobia		Lorenzo y Obaya (2005)
Volumen total	1,35	L	-
Volumen de biogás (26% v/v)	0,35	L	-
Volumen mezcla E+A (74% v/v)	1	L	Guevara (1999)
Volumen de estiércol (E)	0,2	L	Guevara (1999)
Volumen de agua (A)	0,8	L	Guevara (1999)
CONDICIONES INICIALES FIJAS			
Temperatura	32	°C	Sanabria, Durán y Gutiérrez (2012)
Fermentación	Mesofílico		Vásquez y Rivero (2013)
Tiempo de fermentación	21	días	Bermúdez <i>et al.</i> (2000)
Agitación	manual		Galarza y Gutiérrez (2013)
pH controlado	6,5 - 8		Aristizábal (2015)

En cada uno de los reactores se preparó 200 g de estiércol vacuno, obtenido del hato bovino de la ESPAM, y se disolvió hasta un volumen total de 1000 mL con agua destilada.

Permaneció durante 3 semanas herméticamente cerrado y fueron controlados a 30 ± 1 °C de temperatura en condiciones mesofílicas (Sanabria, Durán y Gutiérrez, 2012; Vásquez y Riveros, 2013).

Para ello, se ubicaron los reactores en una caja hecha de vidrio (Figura 3.11) donde se dispuso un foco de 200 watts y se controló con la ayuda de un termómetro para condicionar a la temperatura deseada.

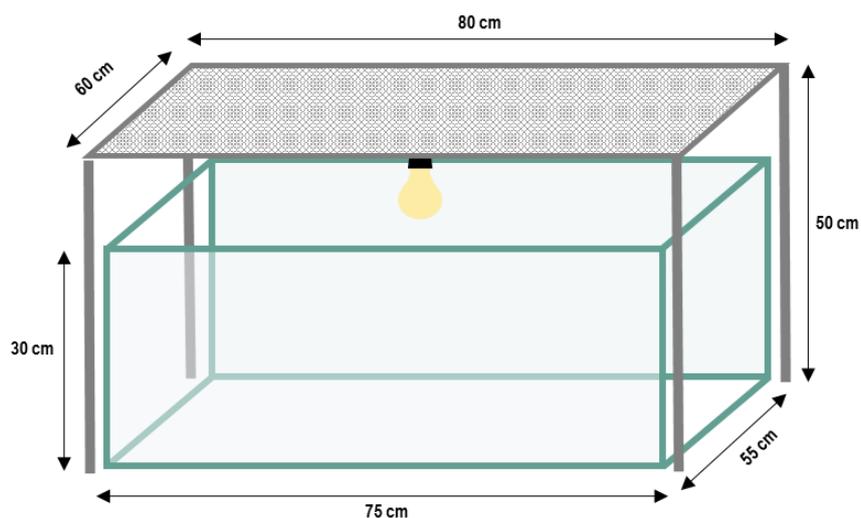


Figura 3.11. Sistema de control de temperatura con soporte de aluminio. Escala S/E. Elaborado por García e Intriago (2018)

El pH de la vinaza concentrada tomada de la destilería fue controlado con hidróxido de sodio para que esté entre un rango de 6,5 - 7,5 o que coincide con lo expuesto por Aristizábal, (2015).

Luego del tiempo establecido, se agregó a cada reactor 40 mL de la vinaza concentrada con la ayuda de una inyección (Figura 3.12). Después de 3 días se procedió a agregar 60 mL de vinaza concentrada y se replicó el proceso con 100 mL más.

Se realizó agitación manual, dos veces al día, durante 1 minuto de acuerdo a lo planteado por Galarza y Gutiérrez (2013).

Cada reactor tiene una vía (Figura 3.12) el cual, con la ayuda de una inyección se puede extraer el biogás y ser registrado el volumen del mismo mediante el método volumétrico (Pacheco, 2016).

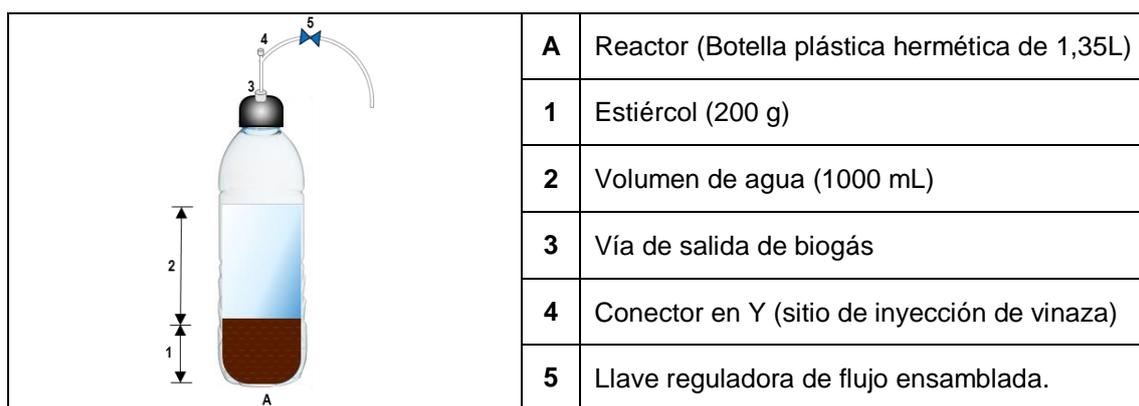


Figura 3.12. Esquema del sistema de adaptación de inóculo. Elaborado por García e Intriago (2018)

Para realizar la medición del volumen de biogás generado se dispuso un montaje en un soporte metálico dispuesto como segundo piso (Figura 3.11); en ello se colocaron botellas de 500 mL con agua donde ingresaría el biogás producido por cada digestor y desplazaría el agua a la probeta.

Para medir el metano se realizó el método de purificación para remover el CO_2 y el H_2S del biogás, en base a lo estipulado por los autores Torres y Pérez (2010) y Víquez (2010).

Actividad 4. Selección del inóculo.

De los 8 reactores se eligió el reactor más apropiado en base a los siguientes criterios:

- Producción de biogás.
- Producción de metano.

Actividad 5. Análisis del laboratorio.

Del reactor seleccionado, se caracterizó el inóculo adaptado previamente, en el Laboratorio de Química Ambiental y Suelos, de acuerdo con “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2012):

Cuadro 3.13. Parámetros y sus técnicas de determinación

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA
Temperatura (T)	°C	Standard Methods 2550B
pH		Standard Methods 4500-H+ B
Sólidos totales (ST)	g/L	Standard Methods 2540D
Sólidos volátiles (SV)	g/L	Standard Methods 2540E
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	g/L	Standard Methods 5220C

3.10.3. FASE III. TRATAMIENTO ÓPTIMO MEDIANTE DIGESTORES ANAEROBIOS.

Actividad 6. Preparación de las unidades experimentales.

Se prepararon 15 digestores de acuerdo al diseño experimental en base a la metodología adaptada de los autores Lorenzo y Obaya (2005) y Vásquez y Rivero (2013). Las condiciones y características que se estipularon fueron:

Cuadro 3.14. Condiciones de operación del digestor. Elaborado por: García e Intriago (2018)

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL DIGESTOR			
Tipo de reactor	BATCH		Vásquez y Rivero (2013)
Tipo de digestión	anaerobia		Lorenzo y Obaya (2005)
Volumen total	3	L	-
Volumen de biogás (30% v/v)	0,9	L	-
Volumen mezcla I:S (70% v/v)	2,1	L	-
Volumen de inóculo (I)	0,84	L	-
Volumen de sustrato (S)	1,26	L	-
CONDICIONES INICIALES FIJAS			
Concentración de inóculo	2	g SV /L	Torres y Pérez (2010)
Temperatura	32	°C	Sanabria, Durán y Gutiérrez (2012)
Fermentación	Mesofílico		Vásquez y Rivero (2013)
Tiempo de fermentación	21	días	Bermúdez <i>et al.</i> (2000)
Agitación	manual		Galarza y Gutiérrez (2013)
pH controlado	6,5 - 8		Aristizábal (2015)

Una vez caracterizados el sustrato e inóculo, se agregó el volumen de acuerdo a las condiciones de operación del digestor (Cuadro 3.14):

- El volumen del inóculo adaptado que se adicionó fue calculado en base a la concentración requerida (2 gSV /L), metodología basada de Torres y Pérez (2010) y mencionada en el marco referencial.

- El volumen del sustrato fue dado de acuerdo al porcentaje de dilución de concentración de la vinaza. Los porcentajes de la vinaza diluida son 10%, 20%, 30%, 40% y 100% para T₁, T₂, T₃, T₄ y T₅ respectivamente, considerando al T₅ como vinaza pura o concentrada.
- El volumen requerido de agua para diluir la vinaza fue determinado en base a la fórmula de volumetría (Díaz, 1997):

$$V_1 C_1 = V_2 C_2 \quad [6]$$

V₁= Volumen de la vinaza que se necesitaría (L).

C₁= Concentración de la vinaza una vez caracterizada (gSV /L).

V₂= Volumen total que ocupa el sustrato (vinaza) en el digestor (1,26 L).

C₂= Concentración de la vinaza de acuerdo al diseño experimental (gSV /L).

Actividad 7. Control de las unidades experimentales.

Cada 7 días se extrajo una muestra por cada unidad experimental en estudio.

Cuadro 3.15. Control de las unidades experimentales. Elaborado por: García e Intriago (2018)

MUESTRA	ETAPAS	TIEMPO (días)
1°	Inicio de proceso	1
2°	Tratamiento en proceso	7
3°	Tratamiento en proceso	14
4°	Fin de proceso	21

Para controlar SV y DQO, cada 7 días se tomó 3 muestras por cada tratamiento, con un total de 60 muestras durante el tiempo del proceso de fermentación; de esta manera se llevó un control de las variables a medir en este estudio.

Además, se midió diariamente el volumen de gas y metano mediante el método volumétrico y de purificación (Cuadro 3.16) para conocer el volumen acumulado que produjo cada tratamiento durante el tiempo determinado.

Cuadro 3.16. Variables de control de las unidades experimentales

VARIABLES	METODOLOGÍA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
SV	Standard Methods 2540E	APHA (2012)
DQO	Standard Methods 5220D	APHA (2012)
Biogás*	Método volumétrico	Pacheco (2016)
Metano*	Método de purificación de biogás para remoción CO ₂ y H ₂ S.	Torres y Pérez (2010); Víquez (2010)

*Estas variables fueron controladas diariamente.

Actividad 8. Elaboración de los digestores.

Los digestores fueron construidos de la siguiente manera:

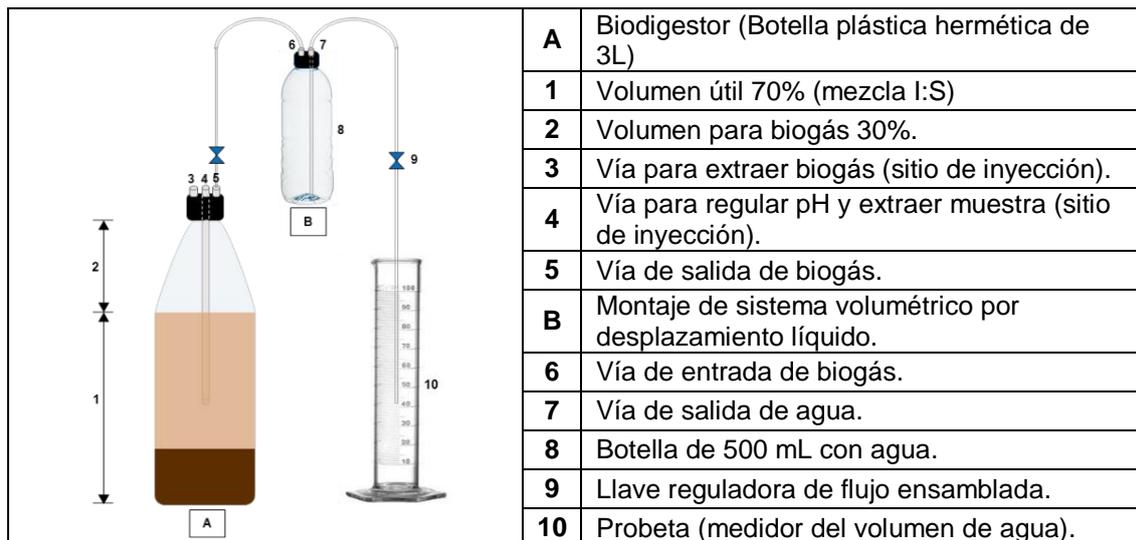


Figura 3.13. Esquema del sistema de adaptación de inóculo. Elaborado por García e Intriago (2018)

Todos los digestores y demás materiales usados fueron desinfectados con hipoclorito de sodio (Camacho, 2017) antes de su operación. Se realizó el mismo control de pH (Aristizábal, 2015) y temperatura usando la caja de vidrio (Figura 3.11), mencionados en la fase anterior.

Se realizó agitación manual, dos veces al día, durante 1 minuto (Galarza y Gutiérrez, 2013).

Actividad 9. Análisis estadísticos

Se utilizó el software Microsoft Excel para representar de manera gráfica los resultados de las variables de control.

El análisis estadístico de los resultados de los tratamientos se realizó mediante el Software IBM SPSS Statistics utilizando el Análisis de Varianza para la valoración de las medias y la prueba de comparación múltiple de medias de acuerdo con el criterio de Tukey (HSD) para establecer diferencias significativas ($p < 0,05$). De esta manera se establece cuál es el tratamiento óptimo.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. FASE I. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO UTILIZADO EN EL TRATAMIENTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

El cuadro 4.17 presenta los datos obtenidos de la caracterización de la vinaza, mismo que coincide con valores similares a otros estudios (Bermúdez *et al.*, 2000; Moraes *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2017), lo que considera que el sustrato está en rangos típicos por su naturaleza.

Cuadro 4.17. Caracterización del sustrato antes de ser usado en el tratamiento

PARÁMETROS	UNIDADES	SUSTRATO
pH		3,25
T	°C	25,3
DQO	g/L	41,6
ST	g/L	21,97
SV	g/L	19,18
SO ₄	mg/L	273

Además, se muestra un elevado contenido de sulfatos de 273 mg/L. De este resultado se deriva la hipótesis de que puede desarrollarse con gran intensidad las bacterias formadoras de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el medio anaerobio debido a la cantidad sustentable de sulfatos a menos que se disminuya la concentración existente en el medio. Este valor es considerado un punto importante debido a que excede los 160 mgSO₄/L que los autores Lorenzo y Obaya (2005) consideran como límite, por lo que las bacterias metanógenas tienden a inhibirse durante el proceso y la producción de biogás sería menor, así como su poder calórico (Lorenzo *et al.*, 2013).

4.2. FASE II. ADAPTACIÓN DEL INÓCULO QUE SERÁ UTILIZADO EN LOS TRATAMIENTOS ANAEROBIOS.

De los 8 reactores que fueron adaptados, se identificó mediante el Gráfico 4.1 que el reactor R5 tuvo mayor producción de biogás de 3,91 L, de los cuales 3,15 L era metano, lo que da una concentración aproximada de metano de 81%.

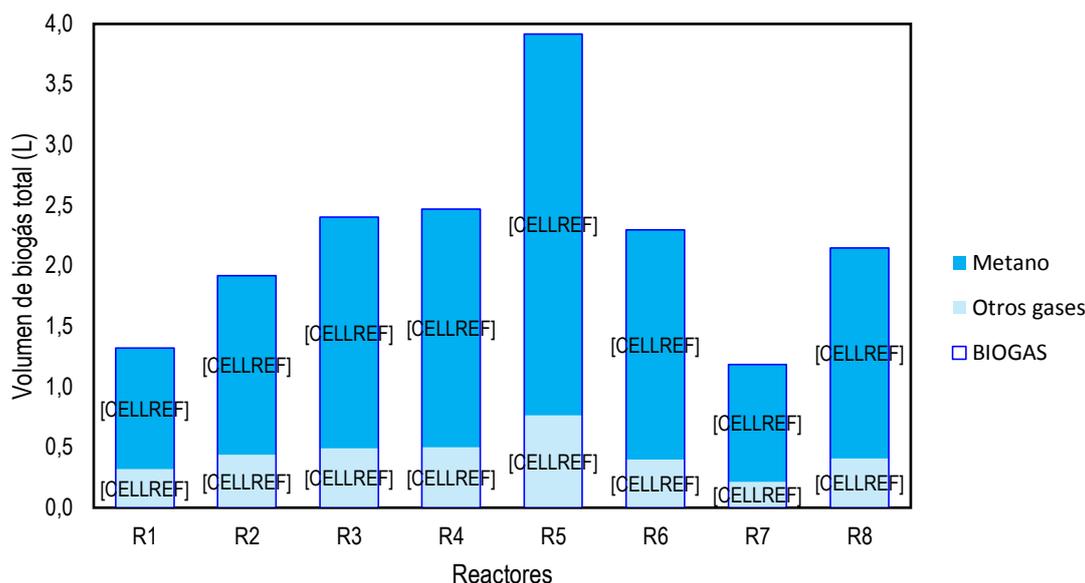


Gráfico 4.1. Adaptación del inóculo. Elaborado por: García e Intriago (2018).

De acuerdo a los autores Deublein y Steinhauser (2008) la calidad del biogás está directamente relacionada con una mayor cantidad de metano (CH_4) que de CO_2 y otros gases, además de que son los productos principales en la reacción bioquímica de la digestión anaerobia. Debido a ello y, por ser el reactor con mayor actividad microbiana, fue el R5 el inóculo seleccionado para ser caracterizado y así ser usado en cada uno de los tratamientos.

Cuadro 4.18. Caracterización del inóculo seleccionado

PARÁMETROS	UNIDADES	INÓCULO
pH		6,71
T	°C	29
DQO	g/L	25
ST	g/L	21,34
SV	g/L	17,67

4.3. FASE III. TRATAMIENTO ÓPTIMO MEDIANTE DIGESTORES ANAEROBIOS.

De los valores diarios de biogás obtenidos de los 15 digestores se resumen el promedio de valor acumulado por cada tratamiento y se lo presenta en el Cuadro 4.19.

El Tratamiento T_1 obtuvo el mayor porcentaje de CH_4 (57,4%), sin embargo, se recolectó mayor volumen de biogás en el Tratamiento T_5 , resultando también mayor volumen de metano. Por lo cual, el tratamiento que mayor producción de biogás produjo fue el T_5 con un valor de 2,87 L y se debe a la mayor cantidad

de materia orgánica contenida en comparación con los otros tratamientos (Sánchez *et al.*, 2016).

En cuanto a la composición de metano se aprecia que el tratamiento con mayor producción fue el T₅ con 1,52 L, correspondiente al 52,9% de metano. Esto se explica debido a la presencia de sulfuro de hidrógeno dentro de la composición del biogás ya que la vinaza contiene niveles de sulfatos considerables y dependerá de la concentración en que se presente (Lorenzo *et al.*, 2013).

Cuadro 4.19. Producción de biogás y composición de metano (García e Intriago, 2018).

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Biogás total (L)	1,72	1,21	1,85	1,88	2,87
Metano (L)	0,99	0,60	0,84	1,02	1,52

En el Gráfico 4.2, se observa la disminución de la concentración de SV (g/L) por cada tratamiento a medida que el volumen de metano (L) aumentaba. Se puede determinar que es una relación inversamente proporcional, debido a los SV removidos representan la cantidad materia orgánica necesaria para producir metano.

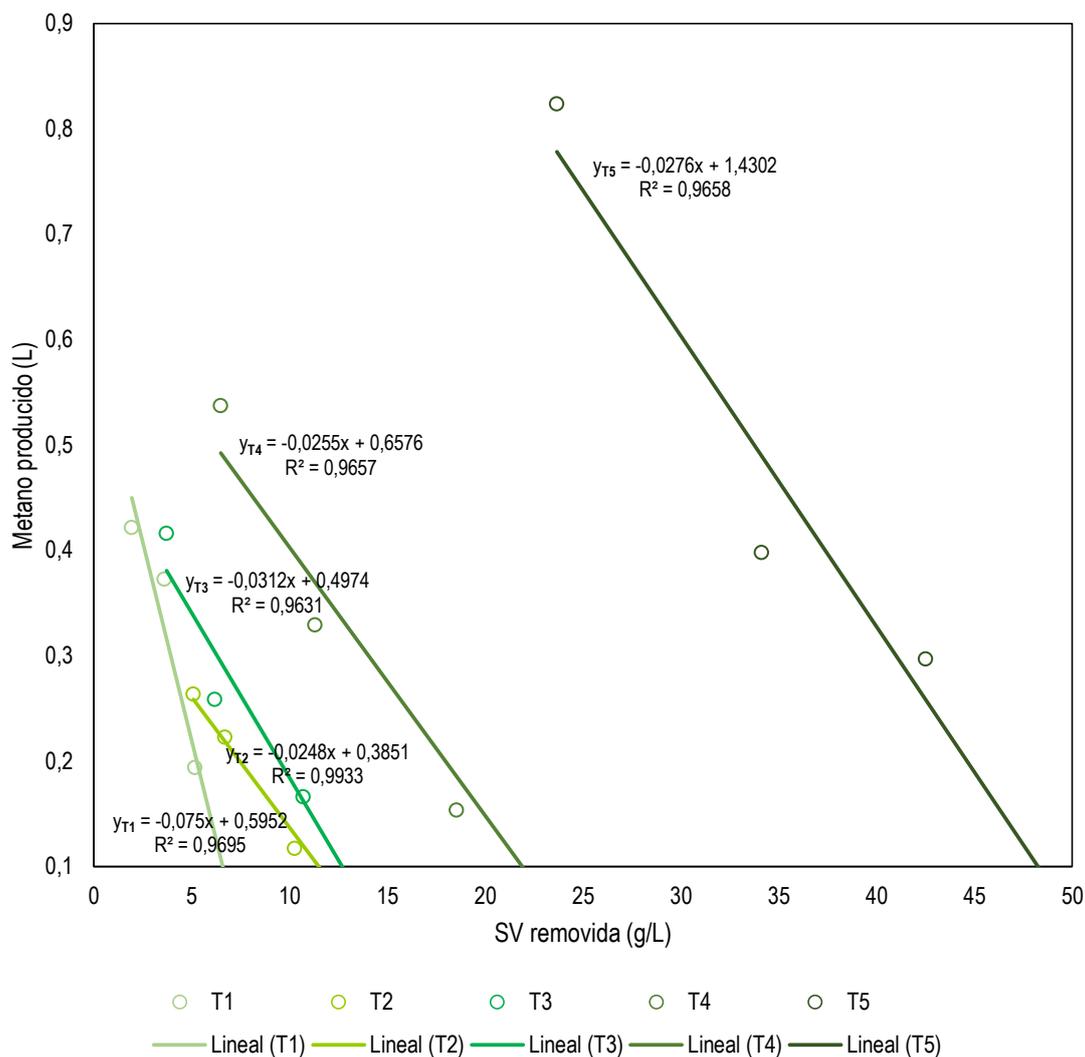


Gráfico 4.2. Variación de la producción la SV (g/L) vs metano producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).

En el Gráfico 4.3 se puede contrastar el aumento del volumen de metano (L) generado por tratamiento a medida que disminuye la cantidad de DQO (g/L). Se determina que la producción de metano acumulado es equivalente a la DQO que ha sido degradada por tratamiento aplicado a partir de las condiciones iniciales (López, Borzacconi y Passeggi, 2017).

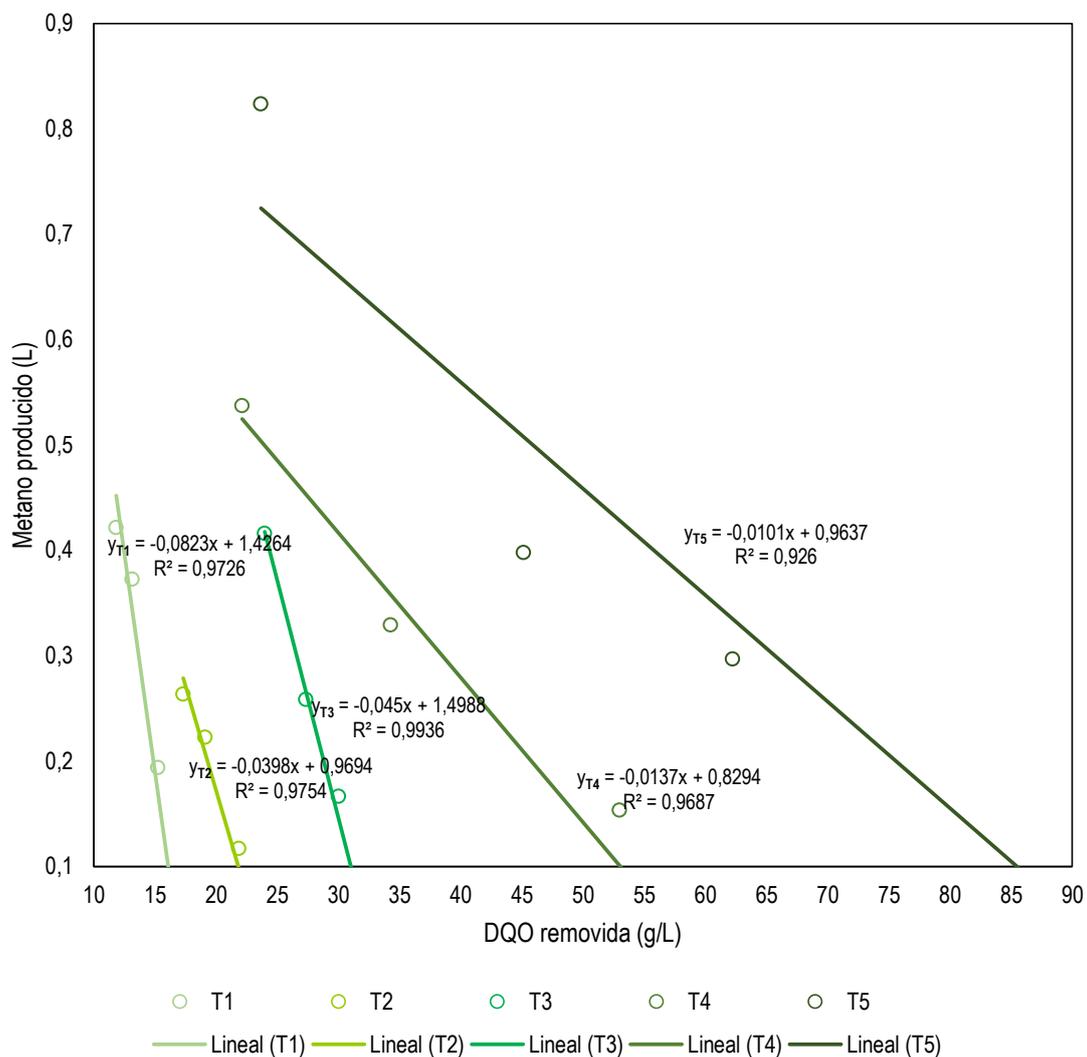


Gráfico 4.3. Variación de la producción la DQO (g/L) vs metano producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).

El comportamiento descrito por tratamiento en el Gráfico 4.4 con respecto a SV es similar al comportamiento con respecto a la DQO observada en el Gráfico 4.5.

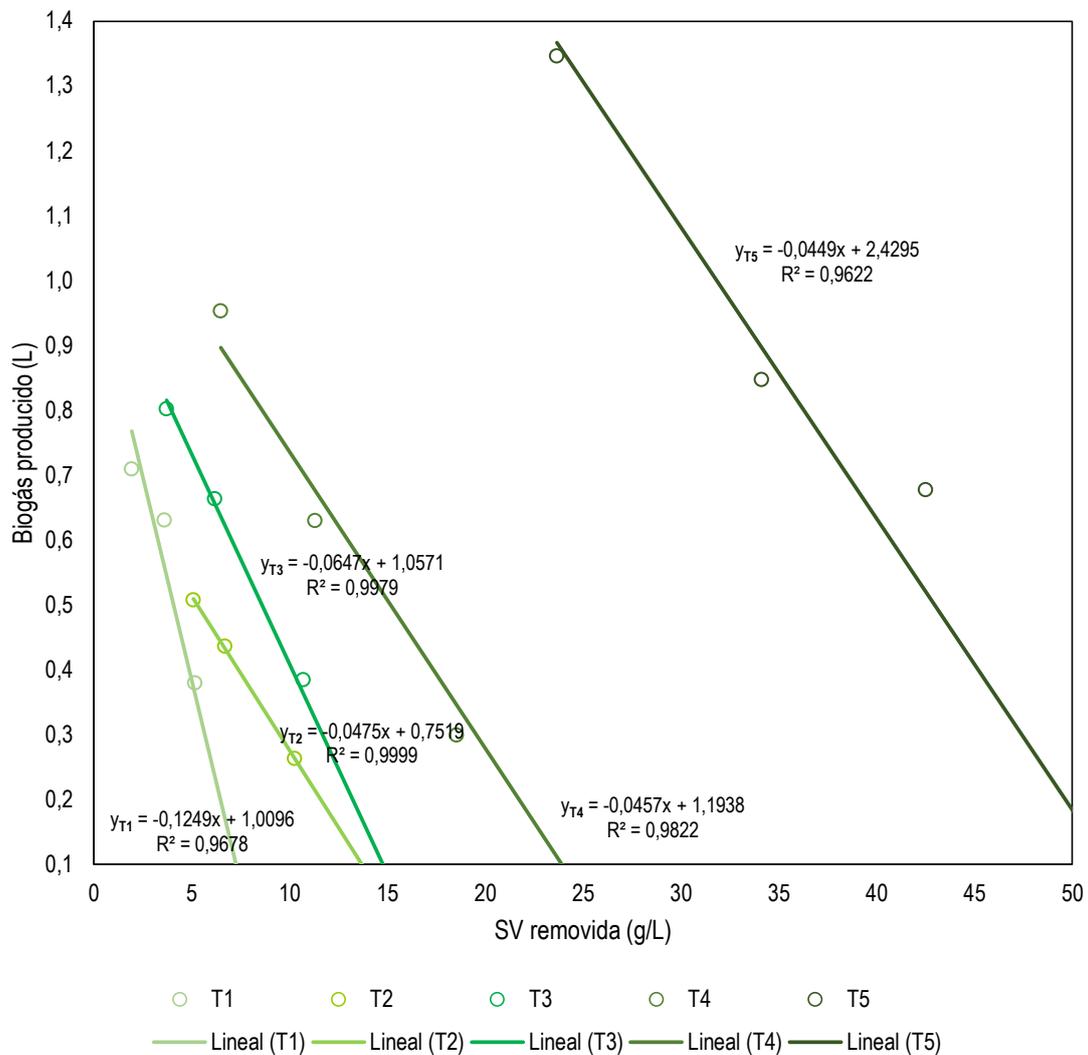


Gráfico 4.4. Variación de la producción la SV (g/L) vs biogás producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).

De acuerdo a Sánchez *et al.*, (2016), esto se debe a que ambos son proporcionales a la materia orgánica que puede ser convertida a biogás.

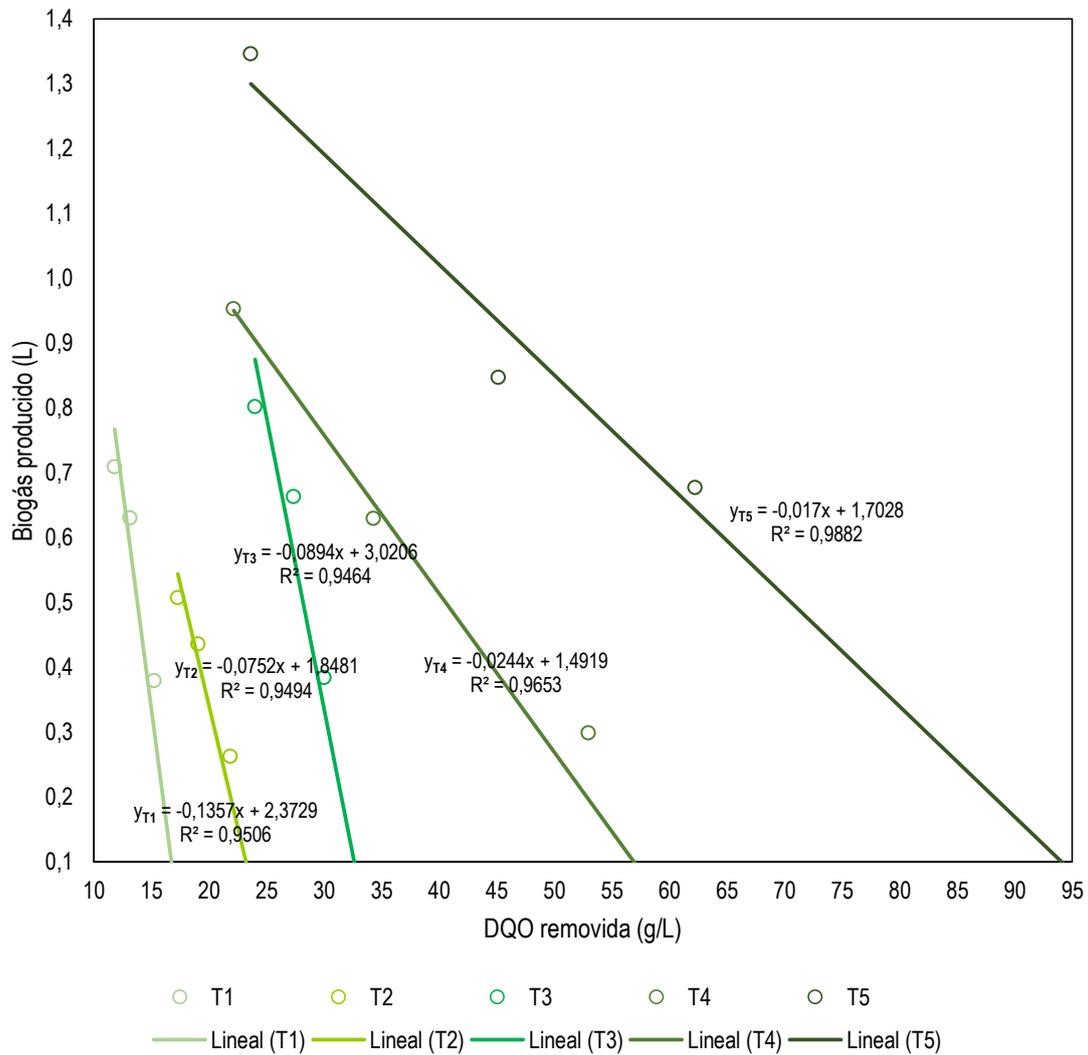


Gráfico 4.5. Variación de la producción la DQO (g/L) vs biogás producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza. Elaborado por: García e Intriago (2018).

De acuerdo a Martínez (2005) el ajuste lineal por el método de R cuadrados en los cuatro gráficos presentados, determina que $0 < R^2 < 1$. Se considera que la relación entre las variables X y Y es lineal, en base a la información determinada del diseño experimental, y que este modelo es adecuado para describir la relación que existe entre estas variables.

Del T₁ se puede inferir que tenía un grado de contaminación menor que los demás tratamientos por poseer mayor dilución de agua. Se conoce que el T₅ posee vinaza concentrada, por lo que tiene mayor carga orgánica; ha tenido una notable disminución de su contenido tanto en SV y DQO, misma que es atribuida a la hidrólisis del residuo y a la liberación de ácidos durante la etapa acidogénica (Appels *et al.*, 2008).

Puede afirmarse, respecto a la hipótesis planteada, que la vinaza puede ser tratada por reactores anaerobios, y que la biomasa puede aclimatarse y trabajar con sus niveles altos de concentración (López, Borzacconi y Passeggi, 2017), generando así una mayor producción de metano.

Por otra parte, pese que el inóculo ha pasado por un proceso de adaptación, la dilución con agua que se aplicó en algunos de los tratamientos hace que disminuya la concentración de SV lo que influye en el crecimiento de los microorganismos por lo que se considera una de las razones del menor aumento microbiológico (Mundhenke, Müller y Schwedes, 2001) así como de la producción de biogás y metano.

En los tratamientos hubo problemas operativos, pero no asociados al comportamiento del reactor, sino a la presencia de fugas u obstrucciones, además de posible inhibición. No está claro el factor clave de inhibición, pero el principal inconveniente para el tratamiento del agua residual está asociado al trabajar con vinaza cruda. Sin embargo, es recomendable trabajar con el agua residual de esta manera una vez adaptado el inóculo puesto que el uso del agua en reactores a gran escala trae consecuencias importantes en los costos asociados al volumen del reactor y a la necesidad de contar con este recurso para dilución (Chernicharo, 2007; López, Borzacconi y Passeggi, 2017). Lo que si debe resaltarse es la elección del agente neutralizante, ya que en el presente trabajo se usó Hidróxido de Sodio, pero existen otros tipos de menor costo y fácil acceso.

Análisis de Varianza del Diseño Experimental.

El Cuadro 4.20 presenta el análisis de varianza, en donde se puede observar los resultados reportados entre las variables a medir.

De cada tratamiento se determina que hay un efecto significativo sobre la producción de biogás y metano debido a que el valor p es menor que 0,05, lo que representa que cada tratamiento influye de forma distinta respecto a otro ($T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4 \neq T_5$) debido a que responde a un comportamiento condicionado en su operación inicial, esta interpretación concuerda con lo expuesto por los autores Sanabria, Durán y Gutiérrez (2012).

Cuadro 4.20. ANOVA

Factor		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Producción de biogás (mL)	Between Groups	4371240,400	4	1092810,100	6,589	,007
	Within Groups	1658497,333	10	165849,733		
	Total	6029737,733	14			
Producción de metano (mL)	Between Groups	1353940,400	4	338485,100	6,976	,006
	Within Groups	485195,333	10	48519,533		
	Total	1839135,733	14			

De acuerdo con la prueba de Tukey (HSD) mostrada en el Cuadro 4.21 se puede determinar que el tratamiento 5 (T_5) presenta los mejores resultados en cuando a la producción de biogás.

Cuadro 4.21. Tukey HSD^a Biogás

TRATAMIENTO	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Tratamiento 2	3	1205,33	
Tratamiento 1	3	1717,67	
Tratamiento 3	3	1848,33	1848,33
Tratamiento 4	3	1880,67	1880,67
Tratamiento 5	3		2868,67
Sig.		,319	,071

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.

De acuerdo con la prueba de Tukey (HSD) mostrada en el Cuadro 4.22, se puede establecer que el tratamiento 5 (T_5) presentó los mejores resultados en cuando a la producción de metano, y que el tratamiento 4 también mostró resultados satisfactorios.

Cuadro 4.22. Tukey HSD^a Metano

TRATAMIENTO	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Tratamiento 2	3	602,33	
Tratamiento 3	3	840,00	
Tratamiento 1	3	987,33	987,33
Tratamiento 4	3	1019,00	1019,00
Tratamiento 5	3		1517,00
Sig.		,216	,085

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La caracterización de la vinaza presentó rangos típicos de su naturaleza, tiene un pH de 3,25; DQO de 41,6 g/L; SV de 19,18 g/L y posee un contenido de sulfatos notable de 273 mg/L, lo que significa un posible factor a influir en los tratamientos en cuanto la producción y calidad de biogás por la presencia de sulfuro de hidrógeno en su composición.
- Se adaptó el inóculo con un porcentaje de producción de biogás de 81%, lo que determina una gran actividad microbiana.
- El tratamiento óptimo de acuerdo al diseño experimental en base a su producción de biogás y metano fue el T₅ el cual contenía niveles altos de concentración de vinaza, lo que influyó que existiera una mayor actividad microbiana y mayor producción de biogás (2,9 L).
- De acuerdo al análisis de varianza existen significancia entre cada tratamiento, lo que significa que responde a un comportamiento de acuerdo a la condición de operación inicial.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio más profundo acerca del uso de la vinaza como sustrato para poder aplicarlo como prueba piloto en la industria azucarera para producción de alcohol.
- Emplear un sistema automatizado para las variables de Temperatura y pH, de esta manera existirá un mejor control.
- Aplicar un mejor sistema de elaboración de digestores para evitar fugas u obstrucciones que provoquen un bajo rendimiento en la producción de gas.
- Se recomienda emplear el método de cromatografía de gases en vez del volumétrico para llevar a cabo la determinación del porcentaje de metano en las muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Y; Abreu, M. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1. ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 39(1). 35-48. Recuperado de: www.redalyc.org
- Alvarado, C. 2017. Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la terminal zona 4. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt>
- American Public Health Association (APHA-AWWA-WEF). 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22va ed.
- Apolo, A. 2015. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo. Recuperado de: <https://repositorio.usfq.edu.ec>
- Appels, L; Baeyens, J; Degréve, J; Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science, 34,755-781. Doi: 10.1016/j.pecs.2008.06.002
- Aristizábal, C. 2015. Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. Revista Ing. USBMed, 6 (2), 37. Recuperado de: www.revistas.usb.edu.co
- Arrieta, W. 2016. Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Recuperado de: <https://pirhua.udep.edu.pe>
- Avila, M. 2018. Biogás de residuos agropecuarios en la región de los ríos. Recuperado de: <https://www.goredelosrios.cl>
- Bermúdez, R; Hoyos, J; Rodríguez, S. 2000. Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 16, 3, 103-107. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/>
- BioDic. 2017. Definición de inóculo. Recuperado de: <https://www.biodic.net>
- Camacho, R. 2017. Evaluación del estiércol de vaca como inóculo en la digestión anaerobia termófila de residuos sólidos urbanos. Información Tecnológica, 28(3), 30, doi: 10.4067/S0718-07642017000300004
- Cendales, E. 2011. Producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co>
- Chernicharo, C. 2007. Anaerobic Reactors. Recuperado de: <https://www.iwapublishing.com>

- Chiriboga, O. 2010. Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezclas de desechos de procesadoras de frutas. Recuperado de: <http://repositorio.usfq.edu.ec>
- CINCAE. 2013. Utilización de subproductos de la caña de azúcar y de la industria alcoholera ecuatoriana para uso en la fertilización en los cultivos de caña. El Triunfo, Guayas. Recuperado de: <http://cincae.org/>
- COA. 2018. Código Orgánico del Ambiente. Quito. EC. Recuperado de: <http://www.ambiente.gob.ec>
- Cobos, Y; Ortiz, E. 2007. Evaluación del Impacto Ambiental producido por el tratamiento anaerobio por vinaza. Recuperado de: <http://repositorio.uis.edu.com>
- Deublein, D y Steinhauser, A. 2008. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com>
- Díaz, J. 1997. Aspectos básicos de Bioquímica Clínica. Madrid, España. 1era ed. Editorial Ediciones Díaz de Santos.
- Díaz, M. 2008. Eliminación del sulfuro de hidrógeno en el biogás. Recuperado de: <http://www.cubasolar.cu>
- Díaz, M; Espitia, S; Molina, F. 2002. Digestión anaerobia. Recuperado de: <http://www.uneditorial.net>
- Donado, T. 2014. Evaluación de tres sustratos para la producción de Hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*). Recuperado de: <http://recursosbiblio.url.edu.gt>
- Dormond, H; Rojas, A; Boschini, C; Mora, G; Sibaja, G. 2011. Evaluación preliminar de la cáscara de banano maduro como material de ensilaje, en combinación con pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*). CR. Revista INTERSEDES, 7, 18. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/>
- El Telégrafo. 2017. Las bebidas artesanales se producen sin metanol. Recuperado de: <https://www.eltelegrafo.com>
- Esteban, C. 2016. Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Recuperado de: <https://riunet.upv.es>
- FAO, 2011. Manual de biogás. Recuperado de: www.fao.org
- Ferreira, L; Aguiar, M; Messias, T. 2011. Evaluation of sugar-cane vinasse treated with *Pleurotus sajor-caju* utilizing aquatic organisms as toxicological indicators. *Ecotoxicol Environ Saf*, 74,132-137. Recuperado de: <http://www.scielo.br>

- Ferrer, Y; Pérez, H. 2010. Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás, Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar, 43(1), 10-17. Recuperado de: redalyc.org.
- Flotats, X; Campos, L; Palatsi, J; Bonmatí, X. 2001. Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu>
- Freire, W; Cortez, L. 2000. Vinaza de caña de azúcar. Recuperado de: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/>
- Galarza, M; Gutiérrez, M. 2013. Evaluación del potencial de biometanización en el lactosuero. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.usb.edu.co>
- Galindo, R. 2016. Sistematización de la experiencia, producción de aceite de piñón para plan piloto de generación eléctrica en Galápagos. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/>
- García, A; Gómez, J. 2016. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Recuperado de <http://repository.uamerica.edu.co>
- Gavilanes, I. 2014. Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Chimborazo. EC. Recuperado de: <http://dspace.umh.es/>
- González, A. 2014. Viabilidad medioambiental, energética, y económica de la biometanización de residuos provenientes de la industria agroalimentaria en Extremadura. Recuperado de: <http://dehesa.unex.es>
- González, M; Pérez, S; Wong, A; Bello, R; Yañez, G. 2015. Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. Revista Argentina de Microbiología, 47, 229. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com>
- Guevara, L. 1999. Caracterización y digestión anaeróbica de vinazas destiladas del Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.esepoch.edu.ec>
- Gutiérrez, C; Guzmán, D. 2016. Propuesta de diseño de un sistema continuo para un Fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio. Recuperado de <http://repository.uamerica.edu.co>
- Guzmán, L. 2013. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DE ETANOL ANHIDRO EN MEZCLAS CON GASOLINA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec>
- Hilbert, J. 2006. Manual del Biogás. Recuperado de <https://civilgeeks.com>

- Lara, M. 2016. Diseño de un biodigestor para la producción de biogás generado por las excretas de ganado vacuno, en el criadero Jersey Chugllin. Recuperado de: <http://dspace.espoch.edu.ec>
- Lee, C; Kim, J; Shin, S; O'Flaherty, V; Hwang, S. 2010. Quantitative and qualitative transitions of methanogen community structure during the BATCH anaerobic digestion of cheese-processing wastewater. Recuperado de: <https://link.springer.com>
- Levenspiel, O. 2004. Ingeniería de las reacciones químicas. Oregon, Estados Unidos. 3era ed. Editorial Limusa Wiley.
- López, G. 2011. Método no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia. Recuperado de: cidc.udistrital.edu.co
- López, I; Borzacconi, L. 2009. Introducción al diseño de reactores. Recuperado de <https://www.fing.edu.uy>
- López, I; Borzacconi, L; Passeggi, M. 2017. Anaerobic Treatment of sugar cane vinasse: Treatability and real-scale operation. Doi: 10.1002/jctb.5493
- López, M. 2013. Producción de biogás a partir de la biodigestión anaeróbica de la "vinaza" generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas bajar los gases invernaderos. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec>
- Lorenzo, Y; Chanfón, J; Pereda, I. 2013. Estudio de la digestión anaerobia mediante el ensayo de actividad metanogénica empleando vinazas con diferentes contenidos de sulfatos. ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar, 47, 46. Recuperado de: redalyc.org.
- Lorenzo, Y; Obaya, M. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. Redalyc, 1, 36. Recuperado de: www.redalyc.org
- Machado, W; Marquetti, F; Molina, F. Gusils, C; Quaia, E. 2016. Caracterización de lodos como inoculantes para un reactor anaeróbico para el tratamiento de vinaza. Revista industrial y agrícola de Tucumán, 93(2), 13-17. Recuperado de: www.scielo.org.ar
- Martínez, E. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario Jurídico y Económico Escurialense, 321 -324. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/>
- Merido, M; Valderrama, J. 2017. Influencia de la temperatura y DQO en el tratamiento anaeróbico de vinazas de Catarvio Rum Company usando un birreactor UASB. Recuperado de: <http://dspace.unitru.edu.pe>

- Ministerio del Ambiente. (2015). Introducción de Biodigestores en Sistemas Agropecuarios en el Ecuador. Un aporte a la mitigación y adaptación al cambio climático. Recuperado de www.ambiente.gob.ec
- Montenegro, K; Rojas, A; Cabeza, I; Hernández, M. 2017. Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. Revista Scielo. 29 (2). 29-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- Moraes, B; Zaiat, M; Bonomi, A. 2015. Anaerobic digestión of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 44, 888 -900. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/>
- Mundhenke, Müller y Schwedes, 2001. Influence of the VS-Content in Digested Sludge on Anerobic Degradation. Chemical engineering technology 24 (6). 635-637. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com>
- Nakasima, M; Taboada, P; Aguilar, Q, Velázquez, N. 2017. Adaptación de inóculos durante el arranque de la digestión anaerobia con residuos sólidos orgánicos. Información tecnológica, 28(1), 200. Doi: 10.4067/S0718-07642017000100020
- Neto, A. 2016. Estado da Arte da Vinhaça. Sao Paulo. BR. Recuperado de: www.unica.com.br
- Pacheco, S. 2016. Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco. Tesis. Ing. Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.CO. p 35.
- Calderón, A. 2016. Evolución de la industria azucarera en la República Dominicana. Recuperado de: <https://medium.com>
- Peralta, J; Varea, L. 2017. Digestión Aerobia. Recuperado de <https://sistemamid.com>
- Pérez. Y; Pérez, O; Zumalacarregui, L. Caracterización química, física y microbiológica de dos vinazas cubanas. Revista EIA, 14, 29-43. Recuperado de: www.researchgate.net
- Ponce, M. 2011. Aprovechamiento de levadura recuperada de la fermentación en destilería. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec>
- Rennola, L; Yépez, C; Bullón, J; Salazar, F. 2007. Tratamiento de las aguas residuales de una destilería mediante el uso de coagulantes y membranas. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 30. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ve>
- Rey, L. 2014. Obtención de biogás a partir de codigestión anaerobia de microalgas y fangos de EDAR. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu>

- Rivas, O; Faith, M; Guillén, R. 2009. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. 23(1). P 39-46.
- Ruiz, I; Álvarez, J; Soto, M. 2002. El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. ResearchGate, 15-41. Recuperado de: <https://www.researchgate.net>
- Salazar, M; Sánchez, M; Aucatoma, B. 2009. Uso de cachaza descompuesta y porcentaje de sustitución de fertilizante químico en un lote del ingenio Valdez. Centro de Investigación de la caña de azúcar del Ecuador, 1. Recuperado <https://cincae.org/>
- Salomon, K; Silva, E. 2009. Estimate of the electric energy generation potential for different sources of biogas in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, 1101-1103. Doi: 10.1016/j.biombioe.2009.03.001
- Sanabria, Durán y Gutiérrez. 2012. Comparación de dos métodos de medición de actividad metanogénica específica en reactores anaerobios aplicados al tratamiento de vinazas. Revista Ingeniería y Región, 9, 77-78. Recuperado de: <https://www.journalusco.edu.co>
- Sánchez, C; Patiño, M; Alcántara, J; Reyes, Y; Pérez, M; Ortiz, E. 2016. Determinación de potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32(2), 191- 198. Doi: 10.20937/RICA.2016.32.02.05
- Silva, J. 2008. Tecnología del biogás. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org>
- Strat, F. 2018. Teoría de cultivo por lote alimentado. Recuperado de <https://kupdf.net>
- Torres, P; Pérez, A. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 9, 5-14. Recuperado de: www.redalyc.org
- TULSMA. 2015. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. Recuperado de: <http://extwprlegs1.fao.org>
- Valeiro, A; Portocarrero, R; Ullivarri, E; Vallejo, J. 2017. Los residuos de la Industria Sucro-alcoholera Argentina. EEA INTA, 3-9. Recuperado de: <https://inta.gob.ar>
- Vaquerano, N; Salazar, T; Porras, M. Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. Revista Tecnología en marcha, 86 – 96. Recuperado de: www.revistas.tec.ac.cr

Vásquez, N. y Riveros, D. 2013. Diseño y construcción de un prototipo biodigestor tipo mixto para la producción y almacenamiento de gas metano. Recuperado de <https://docplayer.es>

Viquez, 2010. Remoción de sulfuro de hidrógeno($H_2S_{(g)}$) / Ácido sulfhídrico ($H_2S_{(aq)}$) en el biogás. ECAG,53, 18. Recuperado de: <http://nebula.wsimg.com>

Viquez, J. 2011. ¿Por qué la excreta porcina produce biogás con mayor concentración de metano, en comparación con la bovina? ECAG. 55, 71 – 72. Recuperado de: <http://nebula.wsimg.com>

ANEXOS

SV (g/L)							
Tratamiento	Repetición	Tiempo (día)				Disminución	% Remoción
		1	7	14	21		
T1	R1	7,16	5,24	3,52	1,46	5,7	79,6%
T1	R2	8,85	6,75	4,36	2,59	6,26	70,7%
T1	R3	7,52	3,57	2,96	1,75	5,77	76,7%
T2	R1	16,48	9,77	4,98	3,88	12,6	76,5%
T2	R2	15,29	11,56	9,14	6,75	8,54	55,9%
T2	R3	15,68	9,47	6,02	4,68	11	70,2%
T3	R1	16,49	10,75	7,23	5,89	10,6	64,3%
T3	R2	16,88	11,34	5,47	3,65	13,23	78,4%
T3	R3	15,07	10,05	5,89	1,66	13,41	89,0%
T4	R1	19,69	18,69	9,69	7,42	12,27	62,3%
T4	R2	43,03	20,77	15,91	6,75	36,28	84,3%
T4	R3	18,16	16,17	8,33	5,32	12,84	70,7%
T5	R1	60,33	43,52	35,71	24,13	36,2	60,0%
T5	R2	50,64	42,58	37,2	26,23	24,41	48,2%
T5	R3	45,64	41,52	29,55	20,63	25,01	54,8%

DQO (g/L)							
Tratamiento	Repetición	Tiempo (día)				Disminución	% Remoción
		1	7	14	21		
T1	R1	17,2	15,8	13,3	12	5,2	30,2%
T1	R2	24,7	22	19,7	17,6	7,1	28,7%
T1	R3	9,2	8	6,5	5,9	3,3	35,9%
T2	R1	25,6	22,4	16,7	14,2	11,4	44,5%
T2	R2	27,4	26,2	25,4	23,8	3,6	13,1%
T2	R3	18,8	17	15,2	14	4,8	25,5%
T3	R1	31,6	28,5	25,9	24	7,6	24,1%
T3	R2	32,6	27,5	23,5	17,5	15,1	46,3%
T3	R3	34,9	34,1	32,7	30,5	4,4	12,6%
T4	R1	54,6	50,6	38,9	16	38,6	70,7%
T4	R2	55,7	48,8	38,3	24	31,7	56,9%
T4	R3	62,9	59,6	25,7	26,5	36,4	57,9%
T5	R1	106	67	55,3	23,3	82,7	78,0%
T5	R2	102	56,4	30,4	20,3	81,7	80,1%
T5	R3	93,2	63,4	49,8	27,4	65,8	70,6%

Volumen de biogás producido (L)						
Tratamiento	Repetición	Tiempo (día)				Total
		1	7	14	21	
T1	R1	0	0,423	0,78	0,8	2,003
T1	R2	0	0,364	0,6	0,675	1,639
T1	R3	0	0,349	0,51	0,652	1,511
T2	R1	0	0,249	0,368	0,45	1,067
T2	R2	0	0,236	0,453	0,55	1,239
T2	R3	0	0,302	0,486	0,522	1,31
T3	R1	0	0,437	0,734	0,902	2,073
T3	R2	0	0,264	0,456	0,55	1,27
T3	R3	0	0,451	0,798	0,953	2,202
T4	R1	0	0,368	0,779	1,358	2,505
T4	R2	0	0,306	0,62	0,799	1,725
T4	R3	0	0,223	0,489	0,7	1,412
T5	R1	0	0,758	0,856	1,199	2,813
T5	R2	0	0,653	0,894	1,767	3,314
T5	R3	0	0,62	0,789	1,07	2,479

Volumen de metano producido (L)						
Tratamiento	Repetición	Tiempo (día)				Total
		1	7	14	21	
T1	R1	0	0,21	0,46	0,47	1,14
T1	R2	0	0,198	0,42	0,411	1,029
T1	R3	0	0,173	0,237	0,383	0,793
T2	R1	0	0,106	0,199	0,229	0,534
T2	R2	0	0,119	0,255	0,31	0,684
T2	R3	0	0,125	0,213	0,251	0,589
T3	R1	0	0,176	0,237	0,491	0,904
T3	R2	0	0,114	0,223	0,316	0,653
T3	R3	0	0,208	0,315	0,44	0,963
T4	R1	0	0,173	0,456	0,767	1,396
T4	R2	0	0,189	0,284	0,449	0,922
T4	R3	0	0,098	0,247	0,394	0,739
T5	R1	0	0,309	0,386	0,729	1,424
T5	R2	0	0,326	0,439	1,037	1,802
T5	R3	0	0,254	0,368	0,703	1,325