

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de biogás por digestión anaeróbica a partir de
vinaza y estiércol vacuno a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentado por Gabriela Alejandra
Alvarado Jiménez para optar al grado académico de Licenciada
en Ingeniería Química

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de biogás por digestión anaeróbica a partir de
vinaza y estiércol vacuno a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentado por Gabriela Alejandra
Alvarado Jiménez para optar al grado académico de Licenciada
en Ingeniería Química

Guatemala,

2023

Vo. Bo.

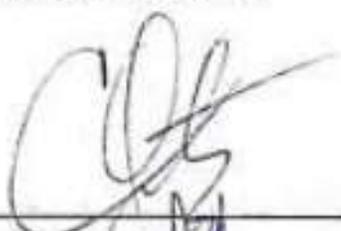
(f) Carlo Martínez

Lic. Carlo Martínez

Terna examinadora

(f) Carlo Martínez

Lic. Carlo Martínez

(f) 

MSc. Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

(f) 

Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de enero de 2023

PREFACIO

Este trabajo de graduación es una propuesta de aprovechamiento de residuos generados por la industria ganadera y los Ingenios Azucareros, para evitar la contaminación de suelos y fuentes de agua por los valores elevados de DQO y DBO en la vinaza proveniente como desecho en el proceso de destilación de bioetanol; y a su vez, evitar la contaminación ambiental provocada por emisiones de metano por la fermentación del estiércol vacuno. Debido a que la vinaza contiene una alta carga orgánica, se pretende comprobar la factibilidad técnica y económica del uso de esta como sustrato y estiércol vacuno como inóculo en la producción de biogás, como fuente de energía para Ingenios azucareros.

Como estudiante de Ingeniería Química, la motivación de este trabajo se basa mejorar las prácticas de producción para reducir los niveles de contaminación en el país y proponer procesos ambientalmente sostenibles. Debido a que es una experimentación a nivel laboratorio, será necesario realizar más estudios para escalar el proceso en los ingenios azucareros productores de bioetanol en Guatemala.

Agradezco:

A Dios por todas las bendiciones y sabiduría para llevar a cabo este trabajo

A mi padre por el apoyo y asesoría a lo largo de todo el trabajo

A mi madre por el apoyo, amor y comprensión

A mis hermanos por su cariño y compañía

A mi asesor por apoyarme y guiarme en este trabajo

A mis catedráticos por apoyarme y compartirme sus conocimientos

A mis amigos por escucharme y apoyarme

A mi Woody por ser mi inspiración

CONTENIDO

PREFACIO	ii
LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS	3
A. GENERAL.....	3
B. ESPECÍFICOS	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MELAZA EN GUATEMALA	4
B. GENERALIDADES DE LA VINAZA.....	5
C. FERTIRRIEGO CON VINAZA.....	8
D. GENERALIDADES DEL ESTIÉRCOL VACUNO	9
E. PRODUCCIÓN DE METANO.....	10
F. DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	12
1. ETAPA NO METANOGÉNICA	13
2. ETAPA METANOGÉNICA.....	13
G. CONDICIONES PARA LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	13
1. TEMPERATURA	14
2. INÓCULO	14
3. HUMEDAD.....	14
4. PH	14
H. NUTRIENTES DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA	14
I. INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	16

1.	METALES PESADOS	17
2.	SULFUROS Y SULFATOS	17
3.	ÁCIDOS GRASOS DE CADENA CORTA.....	17
4.	ÁCIDOS GRASOS DE CADENA LARGA	17
5.	NITRÓGENO AMONICAL.....	18
J.	TIEMPO DE DIGESTIÓN	18
K.	RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN.....	19
L.	RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO.....	20
M.	REACCIONES MICROBIANAS	21
1.	FASE DE RETARDO O FASE DE LATENCIA	21
2.	FASE DE ACELERACIÓN	22
3.	FASE DE CRECIMIENTO EXPONENCIAL.....	22
4.	FASE DE DESACELERACIÓN.....	22
5.	FASE ESTACIONARIA.....	22
6.	FASE DE TRANSICIÓN	22
7.	FASE DE MUERTE	22
N.	CINÉTICA DE PRODUCCIÓN DE METANO.....	23
O.	EVALUACIÓN TÉCNICA	24
P.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	25
1.	INDICADOR BENEFICIO-COSTO.....	25
V.	ANTECEDENTES	26
A.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZA MUNDIAL	26
B.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZA EN GUATEMALA	26
VI.	METODOLOGÍA	28
A.	MATERIALES.....	28
1.	REACTIVOS.....	28
2.	CRISTALERÍA.....	28
3.	EQUIPOS Y MATERIALES.....	28

B.	MÉTODO	29
1.	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA.....	29
2.	CARACTERIZACIÓN DE VINAZA.....	29
3.	DIGESTIÓN ANAERÓBICA	31
4.	ANÁLISIS DE PRODUCTOS	33
5.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS TÉCNICO/ECONÓMICO.....	34
VII.	RESULTADOS.....	35
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	38
IX.	CONCLUSIONES.....	43
X.	RECOMENDACIONES.....	44
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
XII.	ANEXO	50
A.	BALANCES DE MASA.....	50
B.	DATOS ORIGINALES DEL EXPERIMENTO	52
C.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	62
D.	DATOS CALCULADOS DEL EXPERIMENTO.....	68
E.	PLANOS DEL EQUIPO.....	80
F.	GRÁFICOS E IMÁGENES DEL PROCESO.....	81
XIII.	MODELO CINÉTICO DEL REACTOR	85
XIV.	GLOSARIO	91

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Capacidad instalada y datos de producción de productores de bioetanol y vinaza en Guatemala.....	4
Cuadro 2. Características fisicoquímicas de la vinaza a partir de diferentes fuentes.	6
Cuadro 3. Producción anual y composición teórica del estiércol de ganado vacuno.	10
Cuadro 4. Tipos de residuos orgánicos según su origen para la digestión anaeróbica.	15
Cuadro 5. Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones y condiciones.	19
Cuadro 6. Parámetros de los biodigestores de Ingenio Magdalena.	26
Cuadro 7. Resultados de caracterización de vinaza concentrada.	35
Cuadro 8. Producción total promedio de biogás en cada relación.	35
Cuadro 9. Eficiencia de la producción de biogás de cada relación.	36
Cuadro 10. Calidad de biogás obtenido por cada relación inóculo-sustrato.	37
Cuadro 11. Análisis económico de la producción de biogás de cada relación.	37
Cuadro 12. Balance de masa promedio de cada relación.	51
Cuadro 13. Registro de pH de vinaza concentrada.	52
Cuadro 14. Registro de corridas de humedad de vinaza concentrada.	52
Cuadro 15. Registro de pesos y volumen de probeta, para la densidad de vinaza concentrada.	52
Cuadro 16. Ajuste de pH inicial de vinaza concentrada con hidróxido de sodio.	53
Cuadro 17. Datos medidos para la obtención de ST y SV de vinaza por el método gravimétrico. ..	53
Cuadro 18. Datos medidos para la obtención de ST y SV de sobrenadante por el método gravimétrico.	53
Cuadro 19. Solución de Hidróxido de Sodio al 10% desplazada en sistema reactor-purificador del blanco.	54
Cuadro 20. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:50. ..	55
Cuadro 21. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:25. ..	57
Cuadro 22. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:75. ..	58
Cuadro 23. Costos y cantidad de materia prima para operación.	60
Cuadro 24. Entradas y salidas de sistemas reactor-purificador.	61
Cuadro 25. Densidad por corrida de vinaza concentrada.	68
Cuadro 26. Sólidos totales, fijos y volátiles en muestra de vinaza cruda.	68
Cuadro 27. Sólidos totales, fijos y volátiles en muestra de vinaza cruda.	68
Cuadro 28. Biogás producido teórico para cada relación de inóculo/sustrato.	69
Cuadro 29. Biogás producido en el tiempo de digestión del blanco (relación 50:0 m/v).	69

Cuadro 30. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:50 m/v.	70
Cuadro 31. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:25 m/v.	72
Cuadro 32. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:75 m/v.	73
Cuadro 33. Biogás producido promedio de la digestión en cada una de las relaciones.	75
Cuadro 34. Eficiencias de biodigestores en relación con el contenido de SV.	76
Cuadro 35. Entradas y salidas de sistemas reactor-purificador.	77
Cuadro 36. Resumen estadístico de producción de biogás en cada relación.	77
Cuadro 37. Análisis ANOVA de un factor para la producción de biogás.	77
Cuadro 38. Resumen estadístico de la eficiencia de digestión en cada relación.	78
Cuadro 39. Análisis ANOVA de un factor para la eficiencia de digestión en cada relación.	78
Cuadro 40. Producción de biogás teórica para cada relación inóculo/sustrato y porcentaje de error.	78
Cuadro 41. Costo de inversión por reactor y sistema de purificación de biogás.	79
Cuadro 42. Costos y cantidad de materia prima totales por reactor para operación.	79
Cuadro 43. Ventas, costo y relación costo-beneficio para cada relación.	79
Cuadro 44. Producción experimental de biogás en relación con los sólidos volátiles del sustrato.	88
Cuadro 45. Parámetros cinéticos del modelo de producción de metano en cada relación.	89
Cuadro 46. Predicción de producción de biogás con el modelo cinético en cada relación y porcentaje de error.	89
Cuadro 47. Modelo cinético para cada relación de inóculo/sustrato.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de disposición de vinazas.....	7
Figura 2. Esquema del proceso de aplicación de vinaza en campos de caña de azúcar.....	9
Figura 3. Ruta metabólica de metanogénesis a partir de glucosa.....	11
Figura 4. Etapas de la degradación anaeróbica de materia orgánica.	12
Figura 5. Relación de sólidos volátiles promedio de diferentes inóculos.	16
Figura 6. Fases de crecimiento microbiano en reactores tipo batch.	23
Figura 7. Matriz eléctrica nacional de noviembre 2018 a junio 2019.	27
Figura 8. Sistema de medición de biogás producido por desplazamiento líquido.....	32
Figura 9. Sistema de producción, recolección y purificación de biogás.....	33
Figura 10. Producción promedio de biogás en cada relación y el blanco.	36
Figura 11. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador del blanco.....	50
Figura 12. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:50... 50	50
Figura 13. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:25... 51	51
Figura 14. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:75... 51	51
Figura 15. Diagrama y dimensiones del sistema reactor-purificador.	80
Figura 16. Sistema reactores para adaptación de inóculo en condiciones ambientales.	81
Figura 17. Determinación de sólidos volátiles para cálculo de eficiencia.	81
Figura 18. Determinación de humedad de vinaza.	82
Figura 19. Adición de sustrato en los reactores.	82
Figura 20. Sistemas de reactor-purificador para producción de biogás.....	82
Figura 21. Producción acumulada de biogás del blanco (relación inóculo/sustrato 50:0 m/v).	83
Figura 22. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:50 m/v. 83	83
Figura 23. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:25 m/v. 84	84
Figura 24. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:75 m/v. 84	84
Figura 25. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:50 m/v al modelo cinético.	85
Figura 26. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:25 m/v al modelo cinético.	86
Figura 27. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:25 m/v al modelo cinético.	87

RESUMEN

Con el objetivo de aprovechar la vinaza como sustrato y estiércol vacuno como inóculo, para la producción de biogás a partir de digestión anaeróbica, se armó un sistema de digestión anaeróbica con recolección y purificación de desplazamiento de Hidróxido de Sodio al 10%, en condiciones ambientales. Se instalaron 13 reactores para realizar la evaluación técnica y económica del proceso, empleando 3 relaciones de inóculo-sustrato en cuadruplicado: 50:50, 50:25 y 50:75 m/v. Para esto, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de la vinaza, para lo que se obtuvo un pH de 4.01 ± 0.00020 , una densidad de 1.19 ± 0.022 g/mL, una humedad de $61.9\% \pm 0.0020$, una cantidad de sólidos volátiles (SV), fijos (SF) y totales (ST) del sustrato de 0.322 ± 0.02 ppm, 0.139 ± 0.01 ppm y 0.461 ± 0.03 ppm, respectivamente, a una temperatura de 19.7°C . Todos los valores de caracterización del sustrato se encuentran dentro del rango esperado.

Después de añadir la vinaza en las debidas relaciones, se midió la cantidad de hidróxido de sodio desplazado cada 24 horas, hasta observar la disminución de producción de biogás. Después de 6 semanas de digestión (1104 horas), se obtuvo una producción promedio de 1202.34 ± 10 mL de biogás en la relación 50:50 m/v, 856.85 ± 10 mL en la relación 50:25 m/v y 748.34 ± 10 mL en la relación 50:75 m/v. Se observó una producción acelerada con una tendencia creciente, siendo la relación 50:50 la que mostró una mayor producción. Según el análisis ANOVA de un factor, la relación no influye significativamente en la producción de biogás promedio.

Para el análisis técnico, se determinó que la eficiencia de digestión promedio de cada relación: $91.14 \pm 0.0699\%$ para la relación 50:50 m/v, $97.24 \pm 0.0002\%$ para la relación 50:25 m/v y $94.42 \pm 0.0001\%$ para la relación 50:75 m/v. Según el análisis ANOVA de un factor, la relación sí influye significativamente en la eficiencia de digestión promedio. Por lo tanto, la relación mayor rendimiento promedio es la de 50:25 m/v debido a la cantidad limitada de sustrato. Además, se midió la calidad del biogás en cada relación y la que presentó mayor calidad fue la de 50:50 m/v. Para el análisis económico, se obtuvo que la relación costo-beneficio de los reactores empleados es de 0.25 para la relación 50:50, 0.18 para la relación 50:25 y 0.16 para la relación 50:75. Al ser una relación menor a 1, se determinó que el índice de rendimiento por unidad invertida es bajo, por lo que se recomienda tomar en cuenta los beneficios ambientales y económicos dentro de la industria.

A pesar de que la relación C/B es menor a 1, se concluye que la relación recomendable para maximizar la producción de biogás es la de 50:50 m/v; y la relación recomendable para reducir costos y aumentar la eficiencia de digestión es la de 50:75 m/v, bajo las condiciones de operación dadas

I. INTRODUCCIÓN

El incremento poblacional mundial genera la necesidad del aumento en la producción de alimentos. Del alimento generado por el sector agrícola, 40 % es de origen animal. Desde el punto de vista ambiental, la industria pecuaria tiene un alto impacto en el calentamiento global por la generación de contaminantes atmosféricos o vertidos al suelo y agua (Pinos et al., 2012).

Algunos gobiernos, principalmente de los países industrializados y algunos en desarrollo, han establecido regulaciones sobre el uso, manejo y tratamiento de excretas ganaderas para que su impacto ambiental sea el menor posible. Estas regulaciones permiten analizar y restringir las emisiones por estiércol ganadero en las operaciones de ganadería intensiva en EE.UU., Canadá, Argentina, Chile, Colombia y México (Pinos et al., 2012).

Los impactos ambientales generados por el estiércol vacuno están relacionados con el nitrógeno y el fósforo, que provocan la eutrofización en el agua, ocasionando un crecimiento acelerado de algas y otras plantas acuáticas, generando trastornos negativos en el equilibrio de las poblaciones acuáticas. Además, otro impacto es la acidificación de suelos y aguas, afectando el desarrollo de los ecosistemas (Martínez, 2017).

Por otro lado, en la producción de bioetanol a partir de melaza, se obtiene la vinaza como subproducto de alto contenido orgánico. Sin embargo, su carga de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y de Demanda Química de Oxígeno (DQO), convierte a la vinaza en un subproducto altamente contaminante, especialmente si se descarta directamente en fuentes de agua (Martínez, 2017).

En el área de biotecnología, los procesos biológicos utilizados para el tratamiento de este tipo de desechos, es la digestión anaeróbica para la remoción de materia orgánica. La metanización o degradación anaeróbica de los efluentes, es una tecnología muy eficiente para remover la carga de las Vinazas. Permite remover más de 90% de su DBO, aunque solo un 70% de su DQO (Demanda Química de Oxígeno) (Martínez, 2017).

Por lo tanto, en este trabajo se aprovecharán estos desechos para la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica a nivel laboratorio. De esta forma, se analizarán las propiedades fisicoquímicas de la vinaza para la caracterización del sustrato. Finalmente, se realizará un análisis técnico y económico de costo-beneficio de producción de biogás a partir de vinaza, para evaluar la eficiencia de producción empleando el residuo de destilería de bioetanol como sustrato.

II. JUSTIFICACIÓN

Durante la destilación de bioetanol a partir de la fermentación de melaza, se genera vinaza como residuo. La vinaza es un líquido viscoso de carácter ácido compuesto de nitrógeno, óxido de potasio, anhídrido fosfórico, materia orgánica como carbohidratos, proteína cruda y otros elementos en menor cantidad. La relación en volumen de producción de vinaza en relación con el alcohol etílico es de 10 a 1, por lo que se generan grandes cantidades de este subproducto durante la destilación (Arroyo, 1988).

Actualmente, la vinaza se utiliza como biofertilizante debido a su alto contenido de potasio y como combustible líquido en calderas. Sin embargo, al utilizarlo como fertilizante, la carga de DBO y DQO sigue siendo elevada, por lo que existe un riesgo ambiental. Por otro lado, al utilizarla como combustible líquido, la cantidad de calor generada no es significativa porque su poder calorífico es bajo (17.12 MJ/litro, 2.5 veces menor al del bunker) (Muñoz, 2014; Santiago, 2016). Por lo que, al tener alta carga orgánica, puede ser utilizada como sustrato para la producción de biogás por digestión anaeróbica, lo cual resolvería los inconvenientes de utilizarla como biofertilizante o biocombustible; sin embargo, este campo no ha sido estudiado a detalle en Guatemala.

Por otro lado, el estiércol vacuno representa un contaminante de suelos, agua y ambiente por la generación de gases de efecto invernadero (GEI). Según el Inventario Nacional de GEI en Guatemala del 2005, las emisiones de GEI de la industria ganadera, por fermentación entérica, fermentación de estiércol y uso de suelos, son del 9.3% y tienen un incremento anual del 8.5%; esto debido al alto contenido de bacterias metanogénicas contenidas dentro del sistema digestivo del rumen y en el estiércol de este (Juárez et al., 2019). Debido a estas características, el estiércol vacuno figura como uno de los mejores inóculos para la producción de biogás por digestión anaeróbica y permite reducir el impacto medioambiental del mismo.

En este trabajo, se aprovechará la vinaza y el estiércol vacuno para producir metano a partir de digestión anaeróbica. Debido a que, en la mayoría de los casos se utiliza melaza para producir biogás, se determinará la eficiencia de producción empleando vinaza como sustrato, para verificar si es conveniente aprovechar este subproducto de la destilación de bioetanol para la obtención de metano.

III. OBJETIVOS

A. GENERAL

Aprovechar la vinaza como sustrato y estiércol vacuno como inóculo, para la producción de biogás a partir de digestión anaeróbica.

B. ESPECÍFICOS

1. Analizar las propiedades fisicoquímicas de la vinaza, mediante pruebas de pH, humedad, temperatura, sólidos totales, sólidos volátiles y densidad, para la caracterización del sustrato.
2. Realizar una evaluación técnica de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno y vinaza, para determinar la eficiencia de producción.
3. Realizar un análisis económico de costo-beneficio de la producción de biogás a partir de estiércol vacuno y vinaza, para determinar la factibilidad económica del empleo de vinaza como sustrato.

IV. MARCO TEÓRICO

A. PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MELAZA EN GUATEMALA

Guatemala es el país productor de etanol más grande a nivel centroamericano, con cinco destilerías con una capacidad instalada total de 65 millones de galones de etanol por año. Las destilerías producen etanol a partir de un subproducto de la producción de azúcar: melaza. De la producción total, el 90% es exportado a Europa y Estados Unidos para ser empleado como carburante, y el 10% restante es empleado en Guatemala para la preparación de bebidas (MEM, 2020).

Actualmente, las empresas productoras de alcohol a partir de melaza son: Ingenio Magdalena (Alcoholes MAG), Ingenio Pantaleón (Bio-etanol), Ingenio Magdalena y Madre Tierra (Servicios Manufactureros), Ingenio Palo Gordo (Palo Gordo) e Ingenio Tululá (Destiladora de Alcoholes y Rones DARSA). A continuación, se despliega la capacidad instalada, días de operación y producción anual de bioetanol y vinaza de cada uno de los productores de bioetanol en Guatemala, tomando un promedio de 13.5 L de vinaza generada por cada litro de bioetanol producido (Lopez, s.f.):

Cuadro 1. Capacidad instalada y datos de producción de productores de bioetanol y vinaza en Guatemala.

Destilería	Capacidad instalada de bioetanol (L/día)	Días de operación	Producción anual de bioetanol (L)	Producción anual de vinaza (L)
Palo Gordo	120,000	150	18,000,000	243,000,000
Servicios Manufactureros	20,000	330	39,600,000	534,600,000
Alcoholes MAG	300,000	150	45,000,000	607,500,000
DARSA	250,000	310	77,500,000	1,046,250,000
Bioetanol	200,000	150	30,000,000	405,000,000

Fuente: (Superintendencia de Bancos de Guatemala, 2011).

B. GENERALIDADES DE LA VINAZA

La vinaza es una sustancia marrón, viscosa, de naturaleza ácida. También es conocida como restilo o grapa. La vinaza es un residuo generado durante la destilación de alcohol a partir de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de caña. Se obtienen 800 L de vinaza por tonelada de caña. Cuando se recupera de los alambiques, se presenta con un color pardo claro y en contacto con oxígeno, sufre un proceso de oxidación y se oscurece. Debido a su carácter ácido, tiene propiedades corrosivas (Superintendencia de Bancos de Guatemala, 2011).

Es una mezcla de materia orgánica, potasio y otros elementos en menor cantidad; a temperatura ambiente, es fluida, de color café-pardo oscuro, y su composición depende de las características de la melaza, el método de fermentación y la levadura empleada. Debido a esto, en la vinaza se encuentra una gama amplia de compuestos orgánicos: alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos y azúcares (Subirós, 2000).

Durante la producción de bioetanol, el volumen de vinaza obtenido es de 12 a 15 litros por cada litro de etanol producido; dicho dato es un promedio estimado que puede cambiar dependiendo al tipo de fermentación empleado. Debido a su alta carga orgánica, la vinaza presenta una demanda elevada de oxígeno, lo cual la convierte en un residuo altamente contaminante si se dispone directa o indirectamente a un cuerpo de agua. Su contenido de DQOs (Demanda Química de Oxígeno soluble) y DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) para 10% de sólidos, son 116000 y 41200 mg/L, respectivamente; por lo tanto, debe ser tratada antes de ser eliminada (Lopez, s.f.).

Como se mencionó anteriormente, las vinazas pueden variar sus características fisicoquímicas de acuerdo con la materia prima utilizada, por lo tanto, para utilizar la vinaza, debe ser previamente caracterizada con pruebas de laboratorio (Guevara, 1999). A continuación, se despliegan las características fisicoquímicas de las vinazas obtenidas de diferentes fuentes (ver Cuadro 2):

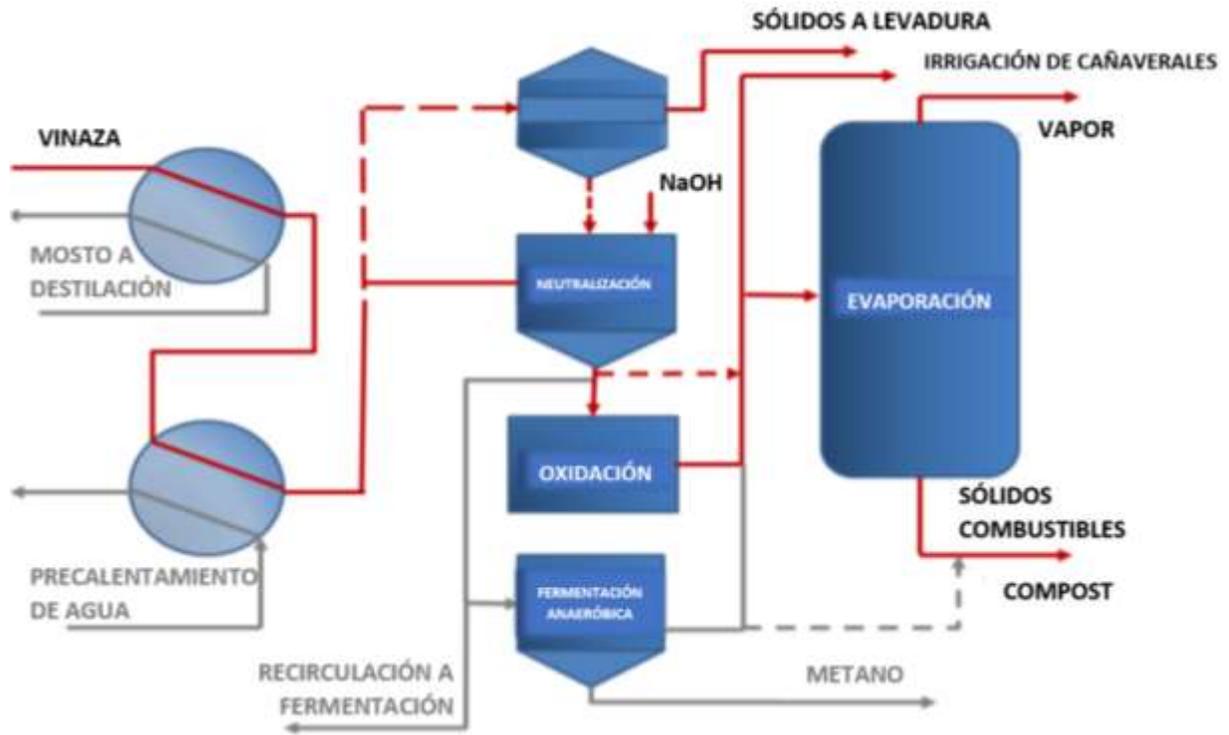
Cuadro 2. Características fisicoquímicas de la vinaza a partir de diferentes fuentes.

Parámetro/Fuente	Melaza de caña	Jugo de caña	Melaza de remolacha	Residuos de papa	Residuos de maíz
pH	4.0-5.0	3.7-4.6	4.8-5.2	4.7-5.3	4.7-5.3
Densidad	1.15 – 1.25	1.0-2.0	1.0-2.0	1.0-2.0	1.0-2.0
Temperatura (°C)	80-100	80-100	80-100	80-100	80-100
DQO (kg/m ³)	65	15-33	45-50	57.3	102
Humedad (%)	60-95	70-95	50-65	60-95	60-95
Sólidos totales (mg/L)	<500	23700	48000-63000	50000	63500
Sólidos volátiles (mg/L)	<500	20000	40000-49000	41000	60000
Sólidos fijos (mg/L)	<500	3700	8000-14000	9000	3500
Nitrógeno (mg/L N)	450-1610	150-700	790-940	830	1000
Fósforo (mg/L P ₂ O ₅)	100-290	10-210	275	1145	1374
Sulfatos (mg/L SO ₄ ⁻²)	6400	600-700	600-700	600-700	600-700
Relación Carbono/Nitrógeno	16-16.3	19.7-21.1	6	6.1	9.1

Fuente: (Guevara, 1999).

La vinaza, a pesar de ser un residuo, presenta características favorables que la convierten en un subproducto valioso para diferentes aplicaciones dentro de las industrias productoras de bioetanol. Puede ser recuperada para alimentación animal, fertilización de suelos, combustible líquido y, además, debido a su alto contenido de carbohidratos residuales y otros compuestos biodegradables, puede ser empleada como sustrato en la fermentación anaeróbica para la producción de biogás (Muñoz, 2016).

Figura 1. Diagrama de disposición de vinazas.



Fuente: (Muñoz, 2016).

Empleando el proceso de evaporación de vinazas, se puede recuperar la cantidad de agua en forma de vapor, que posteriormente es empleada para el riego de cañaverales. Además, los sólidos residuales, debido a su alto contenido de nutrientes, pueden manejarse como compost para el cultivo de caña (ver Figura 1) (Muñoz, 2016).

Además, como se muestra en la Figura 1, el calor sensible en la vinaza proveniente de la destilación de bioetanol es aprovechado para calentar agua del proceso mediante operaciones de transferencia de calor. Por otro lado, la vinaza se puede someter a procesos de neutralización, oxidación y evaporación, para producir metano a partir de la digestión anaeróbica de bacterias metanogénicas (Muñoz, 2016).

Otra alternativa, es la utilización de las vinazas como combustible líquido directo, aprovechando el poder calorífico para la generación de energía térmica o eléctrica. Sin embargo, es una técnica poco empleada en la industria debido a que se requiere concentrar la vinaza hasta un 65% de sólido y su poder calorífico es 17.12 MJ/L, el cual es 2.5 veces menor al del bunker (Muñoz, 2016).

Por lo tanto, las principales aplicaciones de las vinazas van orientadas a la biofertilización de cañaverales, compostaje, combustible líquido mezclado con bunker y metanización. Se considera que la producción de biogás a partir de vinaza genera resultados favorables en el aprovechamiento térmico de este combustible para la generación de vapor y, por consiguiente, la generación de electricidad (Muñoz, 2016). El objetivo de estas aplicaciones es tratar este desecho altamente contaminante con métodos más económicos que el tratamiento químico tradicional, el cual representa un costo total de $Q35.2/m^3$; para la cantidad de vinaza generada en Guatemala anualmente de $2,836,350 m^3$ (ver Cuadro 1), los costos de operación anuales serían de $Q99,839,520.00$ (Carhuas & Velazquez, 2018).

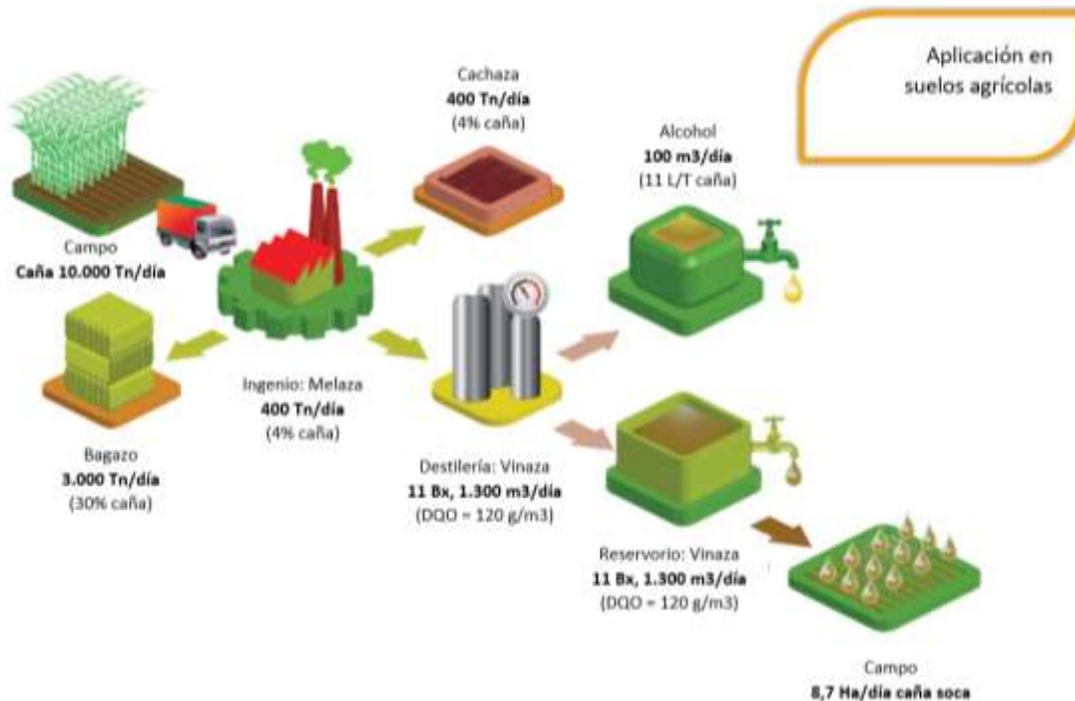
C. FERTIRRIEGO CON VINAZA

En los ingenios, la vinaza es empleada para la producción de metano (Ingenio Magdalena) y para fertirriego de los campos productivos de caña de azúcar. Para ser utilizada como fertilizante, se realizan mediciones anuales del contenido de potasio en los campos de caña para determinar la necesidad de añadir vinaza a los mismos. Cuando se excede el 8% de saturación de potasio, se toma la decisión de no colocar vinaza hasta regular el balance calcio/potasio en la tierra (Villatoro, 2015). En la Figura 2, se muestra el diagrama de aplicación de vinaza a los suelos agrícolas, como ejemplificación de la metodología general.

La vinaza se aplica por gravedad a través de canales. Empleando esta técnica, se ha aumentado de un 10 al 15% la producción de caña de azúcar. Sin embargo, requiere un control adecuado de la saturación de potasio en los suelos porque puede resultar en consecuencias perjudiciales para la fertilidad de estos. En un estudio realizado en el Ingenio Tululá se determinó que, en un periodo de siete años (2008-2014), hubo un incremento significativo de las concentraciones de potasio. Esto tuvo como consecuencia una disminución de Calcio y Magnesio, alterando las relaciones Ca:Mg y K:Ca+Mg, indicando la reducción de fertilidad del suelo (Villatoro, 2015).

Por otro lado, por el alto contenido de DBO y DQO dentro de la vinaza (ver Cuadro 2), existe el riesgo de contaminar los acuíferos cercanos al área de riego. En dado caso, la alta demanda de oxígeno en el agua impide su generación normal y afecta la vida acuática por la escasez de oxígeno en el medio. Por lo tanto, para emplear la vinaza como fertilizante, se debe implementar metodologías de uso sostenible de vinaza y de monitoreo constante de suelos y posibles efectos adversos, como la contaminación de acuíferos cercanos (Villatoro, 2015).

Figura 2. Esquema del proceso de aplicación de vinaza en campos de caña de azúcar.



Fuente: (Villatoro, 2015)

D. GENERALIDADES DEL ESTIÉRCOL VACUNO

En el sistema digestivo de los rumiantes, se cuenta con poblaciones simbióticas de microorganismos metanogénicos. Al comer, en el rumen se da una hidrólisis enzimática de polímeros, seguido de la acidogénesis y acetogénesis, en donde se procesa la materia orgánica para liberar hidrógeno molecular, dióxido de carbono y acetato. Finalmente, los microorganismos metanogénicos dan lugar a la metanogénesis para formar metano y dióxido de carbono (en la ruta acetoclástica) o metano a partir de hidrógeno molecular y dióxido de carbono (en la ruta hidrogenotrófica). En las explotaciones comerciales se busca limitar el proceso de metanogénesis en las vacas para que el alimento suministrado se transforme en carne o leche, en lugar de metano que se pierde del sistema (Food & Agriculture Org., 2019).

El estiércol consiste en una mezcla de heces, orina y cama de los animales, que puede ser manejado y almacenado como sólido. Además, dependiendo de las condiciones y alimentación del animal, puede contener serrín, virutas de madera, productos químicos o restos de los alimentos del ganado y agua procedente de los bebederos. El estiércol vacuno contiene bacterias metanogénicas y es fuente de elementos nutritivos como nitrógeno, fósforo y potasio. Sin embargo, la composición del estiércol depende de múltiples factores, como se describe a continuación:

- Tipo de ganado: Ganado de engorde y de crecimiento para reposición.
- Alimentación: Diferentes dietas según el destino del animal.
- Condiciones ambientales: Adición de agua de lluvia o de limpieza.
- Duración y condiciones de almacenado: El estiércol puede tener pérdidas de nutrientes por lavado, gasificación y filtración en suelos.

El estiércol puede ser empleado para compostaje o para la producción de biogás. A continuación, se describen las características generales y teóricas del estiércol vacuno:

Cuadro 3. Producción anual y composición teórica del estiércol de ganado vacuno.

Estiércol	Producción (kg/año)	Materia seca (g/kg)	Materia orgánica (g/kg)	Nitrógeno (g/kg)	Fósforo (g/kg)	Potasio (g/kg)
Purín de ganado vacuno	20200	95	68	4.4	0.9	4.2

Los microorganismos metanogénicos en el estiércol vacuno, al estar en condiciones extremas (ausencia total de oxígeno), presentan una reproducción lenta y son altamente sensibles a los cambios bruscos en el ambiente, por ejemplo, de pH y temperatura. Se ha demostrado que los microorganismos son flexibles en sistemas psicrófilicos y mesófilicos, de forma que es aplicable a nivel industrial. En temperaturas de 9 a 23°C, el estiércol de ganado presenta un rendimiento de biogás cercano 0.92 m³ de metano por m³ de reactor al día y 0.21 m³ de CH₄/ kg de SV (Piñeros-Castro, 2014).

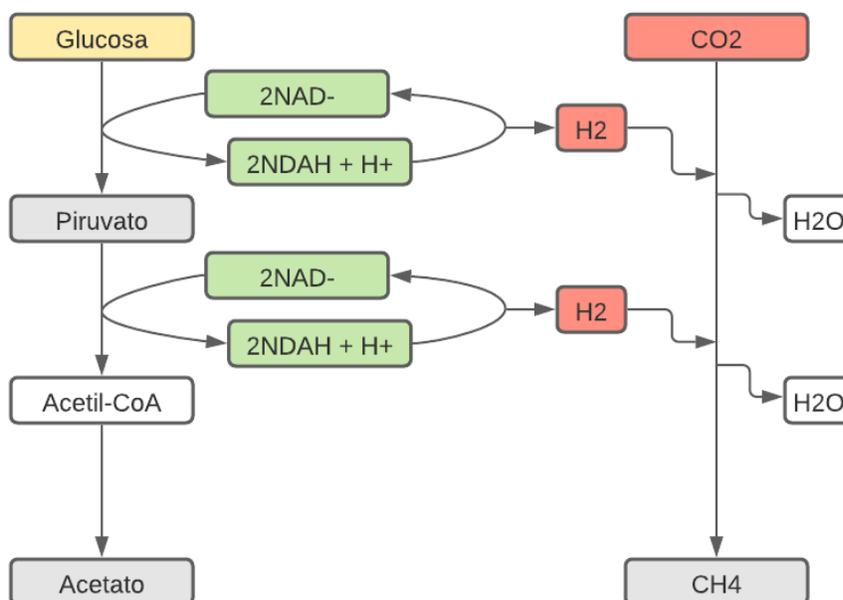
E. PRODUCCIÓN DE METANO

El metano es un gas incoloro e inodoro que se produce a partir de la descomposición de materia orgánica. Las bacterias metanogénicas son microorganismos procariontes que están distribuidos en la naturaleza en ambientes anoxigénicos o anaerobios, es decir, en ausencia de oxígeno. Estas pertenecen al dominio Archaea, y es el único grupo metabólico capaz de obtener energía de compuestos carbonados e hidrógeno y así, producir metano (Acuña et al., 2008).

Según Yoandy (2010), “La metanogénesis tiene lugar mediante una serie exclusiva de reacciones en las que intervienen coenzimas. En el crecimiento autótrofo de los metanógenos, la reducción de CO₂ depende de la donación de electrones por el dihidrógeno y en algunas especies el aporte lo realiza el formiato, el CO y algunos alcoholes orgánicos. Mediante la vía del acetyl- CoA el

CO₂ es reducido a formilo, y luego a metileno y metilo, previa activación, transferencia y deshidratación por enzimas que contienen las coenzimas metanofurano, metanopterina y F420, respectivamente. El grupo metilo se transfiere a una enzima que contiene CoM y el complejo es reducido a metano por el sistema metil reductasa, donde están implicadas F420 y CoB” (ver Figura 3).

Figura 3. Ruta metabólica de metanogénesis a partir de glucosa.



Fuente: (Yoandy, 2010).

Las bacterias metanogénicas pueden desarrollarse en temperaturas de 38-75°C y, en procesos biotecnológicos, pueden ser aprovechadas para producción de metano en biorreactores para la descomposición de lodos, basura orgánica, estiércol de cerdo, estiércol vacuno, gallinaza y otros desechos orgánicos. Los resultados de los sistemas anaerobios son estables debido a que 3% de la materia orgánica es convertida en masa celular y 97% es convertida en metano y dióxido de carbono, por lo que la eficiencia de producción de biogás es elevada (Acuña et al., 2008).

El metano puede ser producido por la reducción directa de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) dentro del sistema metanogénico. Por lo general, la fuente de materia orgánica son aguas residuales, por lo que la carga de DQO es elevada y se alcanza una remoción del 71-97%, aproximadamente. Sin embargo, considerando la fuente, el sustrato puede presentar un alto contenido de sulfatos, especialmente si es melaza o sus derivados, ocasionando una reducción en el rendimiento neto de metano producido (Yoandy, 2010).

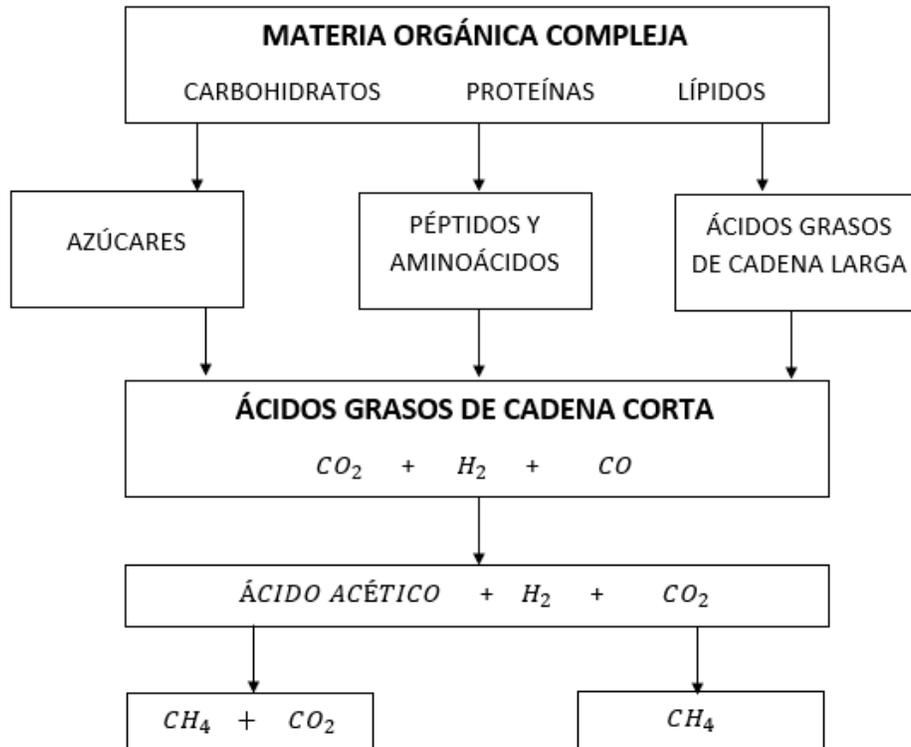
Las bacterias metanogénicas presentan una gran variedad de aplicaciones biotecnológicas y aportan a la reducción de residuos altamente contaminantes. Además, son empleadas para el aprovechamiento de desechos para la producción de metano y, por consiguiente, electricidad. Sin embargo, la composición química del sustrato debe ser considerada para la elección de un buen inóculo, tomando en cuenta el porcentaje de sulfatos u otros contaminantes que pueden inhibir o reducir la producción de metano (Acuña et al., 2008).

F. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que consiste en la transformación de materia orgánica en metano y dióxido de carbono en mayor relación, y otros gases en menor cantidad. La materia orgánica, al ser susceptible a ser biodegradada, puede generar un incremento de las células microbianas como resultado de la actividad metabólica (Mejía, 1996).

Este proceso ha sido estudiado ampliamente para la generación de biogás a partir de diferentes fuentes como lodos, desechos orgánicos, aguas residuales, entre otros. En el desarrollo de este proceso, se han establecido dos etapas consecutivas: no metanogénica y metanogénica (ver Figura 4) (Mejía, 1996).

Figura 4. Etapas de la degradación anaeróbica de materia orgánica.



Fuente: (Mejía, 1996)

1. Etapa no metanogénica

En esta fase, la materia orgánica se transforma en compuestos más simples de ácidos grasos de cadena corta que, posteriormente, son empleados como sustrato en la etapa metanogénica. Así, se identifican dos subetapas: una hidrólisis y la acidogénesis. Durante esta etapa, se tienen tres tipos de bacterias: hidrolíticas que solubilizan extracelularmente los polímeros orgánicos para obtener azúcares y ácidos grasos de cadena larga, acidogénicas que fermentan los compuestos de la fase anterior para producir ácidos grasos de cadena corta, hidrógeno y dióxido de carbono, y finalmente, las bacterias acetogénicas que transforman los ácidos grasos de la fase anterior en ácido acético, el cual es empleado como sustrato en la etapa metanogénica (Mejía, 1996).

2. Etapa metanogénica

En esta fase, como su nombre lo indica, el principal producto es el metano. Los productos obtenidos de las fases anteriores en la etapa no metanogénica, son empleados como sustrato para los microorganismos que se desarrollan en la etapa metanogénica. El mecanismo es el siguiente: los ácidos volátiles formados durante la fase no metanogénica, son metabolizados por las bacterias metanogénicas para la producción de una mezcla de gases con alto contenido de metano y dióxido de carbono, conocida como biogás (Mejía, 1996).

G. CONDICIONES PARA LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Para realizar un proceso de digestión anaeróbica adecuado, se deben tomar en cuenta las condiciones favorables para la producción de biogás. Dichas condiciones abarcan temperatura, tipo de sustrato, tipo de inóculo, inhibidores, humedad y pH. Además, es de suma importancia que la digestión sea en un recipiente o reactor impermeable y hermético para evitar el ingreso de oxígeno al sistema, lo cual inhibiría a las bacterias metanogénicas que requieren un medio anaeróbico para su crecimiento (Guevara, 1999).

1. Temperatura

A mayor temperatura, mayor producción de biogás. Sin embargo, la temperatura óptima es de 35°C (para microorganismos mesófilos) y los límites máximos permisibles son de 15°C-45°C (para microorganismos psicrófilos y mesófilos) (Guevara, 1999).

2. Inóculo

El inóculo debe ser seleccionado de forma que asegure la presencia de bacterias metanogénicas para realizar la biodegradación (Guevara, 1999).

3. Humedad

Un exceso o falta de humedad podría perjudicar la producción de biogás. Por lo general, se recomienda que la cantidad de agua sea entre 85 - 90% del peso total, aunque dependerá del tipo de materia prima que se emplee (Guevara, 1999).

4. pH

El medio adecuado para el desarrollo de microorganismos requiere un pH neutro o levemente alcalino, entre 7 y 8.5 (Guevara, 1999).

H. NUTRIENTES DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La composición química y el tipo de sustrato son factores que afectan directamente la eficiencia de producción de biogás dentro de un biodigestor. Dicho sustrato, por lo general, son residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal y doméstico, debido a su alto contenido de materia orgánica biodegradable. A continuación, se muestra un listado de ejemplos de residuos orgánicos según su origen:

Cuadro 4. Tipos de residuos orgánicos según su origen para la digestión anaeróbica.

Origen	Tipos
Animal	Estiércol, orina, camas, residuos mataderos, residuos de pescados.
Vegetal	Malezas, pajas, forraje en mal estado, rastrojos de cosechas.
Humano	Aguas residuales, residuos domésticos.
Agroindustriales	Melazas, vinazas, suero de leche, residuos de semillas, orujos, salvado de arroz.
Forestales	Cortezas, ramas, hojas, vástagos.
Cultivos acuáticos algas	Algas marinas, malezas acuáticas y jacintos.

Fuente: (Varnero, 2011)

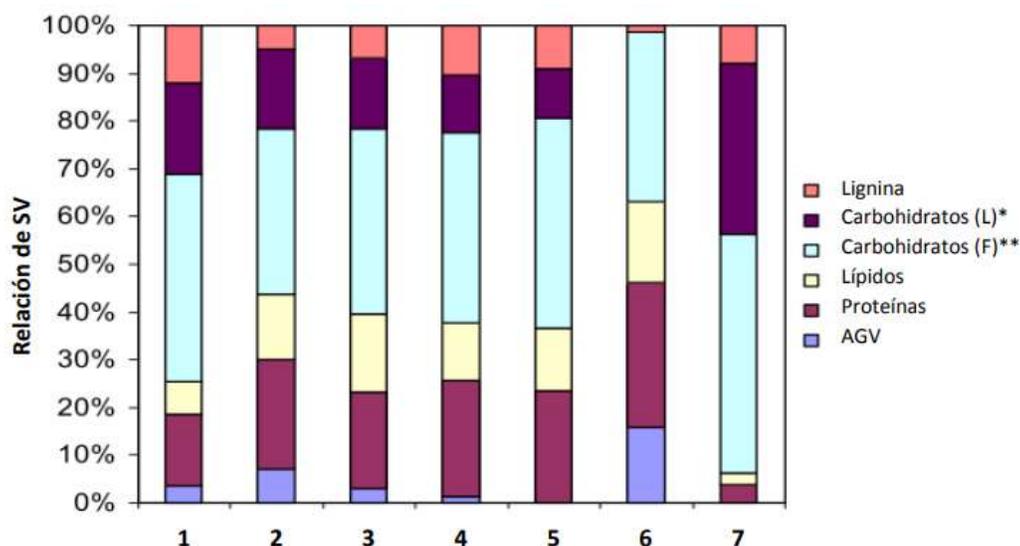
Para la síntesis de biomasa, se requiere la presencia de micronutrientes, como lo son las trazas de minerales, macronutrientes como nitrógeno y fósforo y energía, que en este caso es el carbono. Al referirse a una digestión anaeróbica, la cantidad de nutrientes necesarios es mucho mayor que los procesos aeróbicos, resultando en una mayor producción de biomasa. La cantidad de sustrato y nutrientes que ingresa a un biodigestor puede ser determinada por la demanda química de oxígeno (DQO) presente en la materia prima alimentada.

Se recomienda emplear al menos una relación de 25:1 de carbono-nitrógeno y una relación de 30:1 para aumentar la producción dentro del reactor. Además, se considera necesario tener alta carga orgánica (0.8-1.2 kg DQO/SVS día) para incrementar el biogás producido. Al exceder estos valores, el resultado será una disminución en la producción de biogás como resultado de la falta de nitrógeno en el medio, por ser consumido rápidamente. Por otro lado, al tener valores menores al óptimo, tiende a generar un medio tóxico para las bacterias metanogénicas por la acumulación de amoníaco y la elevación del pH del medio a valores mayores a 8 (Carneiro, 2005; Gerardi, 2003; Monnet, 2003).

El proceso de metanogénesis y los sistemas enzimáticos requieren micronutrientes específicos para convertir el acetato en metano. Dichos micronutrientes son: cobalto, hierro, níquel y sulfuros. Para tener las condiciones óptimas de producción, se recomienda tener 0.2% DQO de hierro, 0.01% DQO de cobalto, 0.001% de níquel y 0.2% de sulfuros (Córdova, 2016).

Los residuos con mayor cantidad de nutrientes para el crecimiento de microorganismos son los estiércoles y lodos cloacales. Sin embargo, el estiércol contiene agua y compuestos recalcitrantes no biodegradables anaeróbicamente y carbohidratos de degradación lenta, por lo que la producción de metano por unidad de sólidos volátiles es menor. Los inóculos que presentan mayor rendimiento en la producción de metano son los que tienen un mayor contenido de proteínas y lípidos, como el estiércol de cerdo (Córdova, 2016).

Figura 5. Relación de sólidos volátiles promedio de diferentes inóculos.



Inóculos: 1) estiércol de ganado fresco, 2) estiércol de cerdos de engorde, 3) estiércol de cerdas, 4) fracción sólida de los estiércoles de cerdo centrifugados, 5) la fracción sólida obtenida de la precipitación química de los estiércoles, 6) fracción líquida tratada previamente con una centrífuga de decantación y 7) el trigo de la paja. Donde: *Lentamente degradables, **Fácilmente degradables.

I. INHIBIDORES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

En presencia de sustancias tóxicas o condiciones no favorables, se da la inhibición del crecimiento microbiano en un proceso de digestión anaeróbica. Algunos de los inhibidores que pertenecen a esta categoría son: metales pesados, cianuro, fenoles y compuestos halogenados. Por otro lado, la inhibición se puede dar por un exceso de sustrato en el medio por la formación elevada de subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Algunos de los inhibidores que pertenecen a esta categoría son: sulfuro, amoníaco y ácidos de cadena larga. La inhibición se da cuando alguna de estas sustancias tóxicas se encuentra en una concentración significativa. Si la concentración es reducida, puede darse la aclimatación de microorganismos al medio tóxico o puede servir como estimulantes del proceso (Córdova, 2016).

1. Metales pesados

La presencia de cationes de los metales puede llegar a ser favorable al estar en bajas concentraciones dentro del reactor. Los metales deben ser controlados porque estos, debido a no ser biodegradables, pueden acumularse en el reactor hasta alcanzar concentraciones tóxicas para los microorganismos en el medio. El orden de toxicidad de los metales pesados, de mayor a menor, es: Níquel, Cobre, Cromo (IV), Cr (III), Plomo y Zinc. Sin embargo, en presencia de sulfuros, los metales forman un precipitado de sulfuros de metal insolubles y así, el medio puede tolerar altas concentraciones de metal (Córdova, 2016).

2. Sulfuros y sulfatos

La inhibición por sulfuros se da en los siguientes niveles: primaria en donde las bacterias metanogénicas compiten con las bacterias sulfato-reductoras por el acetato e hidrógeno; la secundaria es la susceptibilidad de las bacterias metanogénicas al sulfuro en su forma no ionizada, por la desnaturalización de las proteínas ocasionada por la difusión libre a través de la membrana celular (Córdova, 2016).

3. Ácidos grasos de cadena corta

Durante la hidrólisis y fermentación de la degradación anaeróbica, la materia orgánica se convierte en compuestos de bajo peso molecular, incluyendo ácidos grasos de cadena corta (2 a 6 Carbonos) y ácidos grasos volátiles (como ácido acético, propiónico, butírico, valérico, caproico, entre otros). Estos ácidos, al en su forma no disociada, ocasionan inhibición del proceso porque provocan una reducción de pH al fluir a través de la membrana celular en la que se disocian. La medición de concentración de dichos ácidos, puede servir como un indicador experimental del estado del experimento (Khanal, 2008).

4. Ácidos grasos de cadena larga

Durante la degradación de grasas y lípidos, se obtienen ácidos grasos de cadena larga (8 a 18 Carbonos), como el ácido cáprico, caprílico, láurico y oleico. A concentraciones ácidos grasos de cadena larga mayores a 500 g/L, se produce un efecto sinérgico entre ácidos que causa toxicidad en un digestor anaeróbico, porque al adherirse a la pared celular de las bacterias, interfieren en el transporte de nutrientes de forma permanente. Las bacterias que más se ven afectadas por la presencia de estos inhibidores son las acetoclásticas y termófilas, en comparación con las metanogénicas y mesófilas (Córdova, 2016).

5. Nitrógeno amoniacal

La presencia de amoníaco dentro de un biodigestor puede ser favorable para el crecimiento microbiano a concentraciones controladas. A bajas concentraciones, el nitrógeno inorgánico puede ser alimentado como sustrato o ser producido en la degradación biológica, como amonio y amoníaco libre. Sin embargo, el amoníaco libre en concentraciones elevadas, puede penetrar las membranas celulares y alterar el equilibrio de protones, ocasionando un efecto inhibitorio. A concentraciones de amoníaco de 4.051-5.734 mg/L, la actividad de las bacterias metanogénicas disminuye en un 56.5% (Gerardi, 2003).

La inhibición por nitrógeno amoniacal depende de las condiciones del sistema: ph, temperatura y concentraciones. Por lo tanto, la inhibición puede ser autocorregida dentro del mismo reactor al controlar dichos parámetros, para aumentar la concentración de ácidos grasos volátiles y así formar iones amonio, que tienen un menor efecto inhibitorio sobre el sistema (Gerardi, 2003).

J. TIEMPO DE DIGESTIÓN

Las bacterias requieren de un determinado tiempo para degradar la materia orgánica y generar producto. La velocidad de degradación depende de los nutrientes en el medio, la presencia de inhibidores y las condiciones de operación, siendo la temperatura altamente influyente en el comportamiento de la reacción; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás.

Debido a la naturaleza de la reacción, uno de los inconvenientes de la digestión anaeróbica es que presenta una baja velocidad de crecimiento de microorganismos, de forma que requiere tiempos de retención elevados que van desde los 15 a 55 días. El tiempo de retención (TRH) es el que transcurre entre la carga y descarga de un sistema, es decir, el tiempo en el que el inóculo consume el sustrato para la generación de biogás. A continuación, se muestra el tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones:

Cuadro 5. Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones y condiciones.

Tiempo de retención hidráulico (TRH)	Características	Región
30-40 días	Clima tropical con regiones planas	Indonesia, Venezuela, América Central
40-60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos	India, Filipinas, Etiopía
60-90 días	Clima templado con inviernos fríos	China, Corea, Turquía

Fuente: (Varnero, 2011)

En el tiempo de digestión en operación por lotes, por lo tanto, se toma en cuenta el tiempo de adaptación del inóculo (de 7 a 10 días) y el tiempo de retención hidráulica. En caso de operación semicontinua (con carga diaria), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor, por la siguiente relación (Varnero, 2011):

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

Como se mencionó anteriormente, la temperatura tiene un impacto significativo en los tiempos de retención. La selección de una mayor temperatura genera una disminución en los tiempos de retención requeridos y, por consiguiente, el volumen necesario de reactor será menor. En este experimento, al operar a temperatura ambiente (región mesófila), se tendrán tiempos de adaptación de 10 días y tiempos de retención promedio de 35 días, para tener un tiempo de digestión de 45 días y así, observar el comportamiento de producción de biogás a lo largo del tiempo (Varnero, 2011).

K. RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN

El rendimiento es la relación o relación entre el resultado obtenido y los medios empleados para alcanzar el mismo. En otras situaciones, el rendimiento puede ser expresado como un porcentaje de la relación entre el resultado obtenido y el esperado o teórico. Dicho porcentaje, permite representar numéricamente el rendimiento de algún proceso. Para calcularlo, se emplea la Ecuación 1 (Quezada, 2016).

$$\text{Porcentaje de rendimiento (\%)} = \frac{\text{rendimiento real}}{\text{rendimiento teórico}} \times 100$$

El rendimiento real puede ser determinado mediante la diferencia de Sólidos Volátiles totales (SV) en la mezcla desde el inicio de la digestión hasta el final de esta. Los sólidos volátiles totales son un indicador de la cantidad de materia orgánica en la muestra. La materia orgánica, al ser el sustrato para el crecimiento de microorganismos, disminuye dentro del biodigestor con el tiempo, al operar tipo batch (Microlab Industrial, s.f.). Por lo tanto, el rendimiento de la digestión anaeróbica se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Eficiencia (\%) = \frac{SV_{entrada} - SV_{salida}}{SV_{entrada}} \times 100$$

La materia orgánica cargada al digestor, compuesta de agua y una fracción sólida (sólidos totales), define el comportamiento de la digestión. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos en el sustrato y, por lo tanto, puede verse afectada la eficiencia y producción de biogás. Según Varnero (2011), “experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales”.

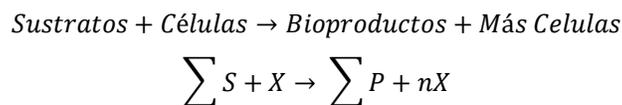
L. RELACIÓN INÓCULO/SUSTRATO

La relación inóculo/sustrato (S/I) es un factor clave para la optimización del proceso de digestión anaeróbica. A pesar de que en la literatura se mencionan diferentes valores recomendables, estos oscilan dependiendo de las características del sustrato y del inóculo, además del tipo de unidades usadas para su determinación (DQO del sustrato por SV del inóculo, SV del sustrato por SV del inóculo o un porcentaje másico en sustrato e inóculo). La teoría recomienda definir, para cada sustrato e inóculo, la relación que garantice la mayor producción de metano. Los rangos de valores recomendables oscilan entre menos de 0.5 a 1 y, las relaciones superiores a 2 pueden presentar problemas de inhibición por altas concentraciones de ST o ácidos grasos volátiles. Por lo tanto, para realizar un análisis de la relación de inóculo/sustrato, se recomienda emplear las relaciones de: 0.25, 1 y 1.5 (Parra et al., 2014).

Por lo tanto, en este experimento, se propone emplear las relaciones de inóculo/sustrato de 50:50, 50:75 y 50:25. De esta forma, se busca operar el equipo en las condiciones óptimas determinadas experimentalmente (50% de carga másica de sustrato, descrita anteriormente), y variar significativamente la carga orgánica en el medio, para determinar las condiciones óptimas de operación del digestor anaeróbico de estiércol vacuno empleando vinaza como sustrato.

M. REACCIONES MICROBIANAS

En una reacción microbiana, los microorganismos presentan un crecimiento poblacional y del tamaño celular, dependiendo de las condiciones del medio. Los microorganismos consumen los nutrientes del ambiente en el que se encuentran para la producción de energía y para la biosíntesis de productos que pueden ser de alto valor comercial e industrial (Córdova, 2016). La masa microbiana aumenta con el tiempo como se describe en la siguiente reacción general:



En términos generales, el crecimiento microbiano se rige por una reacción autocatalítica en la que la velocidad de crecimiento (μ) depende de la concentración celular. La digestión anaeróbica es un tipo de reacción microbiana conocida como “fermentación bacteriana”. Durante esta fermentación, interfieren una cierta cantidad de especies que pueden tener diferentes velocidades específicas de crecimiento (μ), por lo que los análisis de cinética para la DA representa el crecimiento de todas las especies bacterianas involucradas, considerando las etapas de crecimiento microbiano en reactores tipo batch (Córdova, 2016).

El crecimiento de la biomasa sigue una curva de típica en siete fases: (1) fase de latencia o fase de retardo, (2) fase de aceleración, (3) fase de crecimiento exponencial o logarítmica, (4) fase de desaceleración, (5) fase estacionaria, (6) fase de transición y (7) la fase de muerte. El comportamiento gráfico de estas etapas se muestra en la Figura 6.

1. Fase de retardo o fase de latencia

Esta fase inicia en la inoculación y representa el periodo en que las células se adaptan al medio, al ambiente y las condiciones dentro del reactor. Es decir, en esta fase los microorganismos no se multiplican, únicamente se adaptan, por lo que la velocidad específica de crecimiento es cero ($\mu=0$). Los factores que influyen en el tiempo que toma esta fase son: concentración de nutrientes (una concentración baja puede presentar una fase de latencia larga), la edad del inóculo (las bacterias jóvenes, activas y previamente adaptadas al medio y condiciones de crecimiento, reducen el tiempo de retardo) (Córdova, 2016).

2. Fase de aceleración

En esta fase se describe un periodo de transición entre la fase de latencia y la fase de crecimiento exponencial, en donde se observa un gran aumento en la concentración microbiana en un periodo de tiempo pequeño (Córdova, 2016).

3. Fase de crecimiento exponencial

En esta fase, se observa un rápido aumento en la concentración microbiana, incrementando la masa celular y densidad del número de células siguiendo un comportamiento exponencial con el tiempo; este fenómeno es ocasionado por la multiplicación de células adaptadas al medio de cultivo. Durante esta fase, todos los componentes de las células crecen a la misma velocidad, de forma que la composición promedio de las células y la velocidad de crecimiento específica es constante (Córdova, 2016).

4. Fase de desaceleración

En esta fase se describe un periodo de transición entre la fase de crecimiento exponencial y la fase estacionaria. Consiste en la disminución del crecimiento microbiano por el agotamiento de nutrientes en el medio o debido a la acumulación de subproductos tóxicos. De esta forma, ocurre un desbalance en el crecimiento, cambiando el tamaño y la composición celular en un período muy corto de tiempo (Córdova, 2016).

5. Fase estacionaria

En esta fase, la densidad celular permanece constante debido a que existe un equilibrio entre la velocidad de crecimiento y la velocidad de mortandad celular. Al alcanzar la fase estacionaria, se da la formación de metabolitos secundarios y no hay crecimiento neto en la población, por lo que la velocidad específica retorna se vuelve cero ($\mu=0$) (Córdova, 2016).

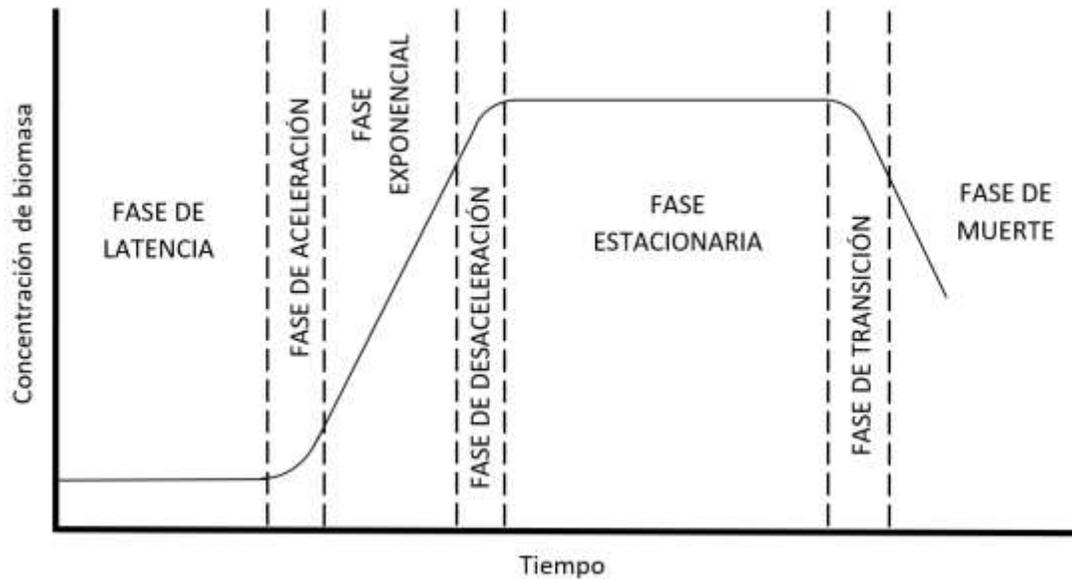
6. Fase de transición

En esta fase se describe un periodo de transición entre la fase estacionaria y la fase de muerte. Por lo general, esta zona no se encuentra claramente delimitada, por lo que dependerá del comportamiento de la reacción microbiana (Córdova, 2016).

7. Fase de muerte

En esta fase, las células comienzan a morir a una velocidad de mortandad mayor a la velocidad de crecimiento específica. Esto se debe al agotamiento de recursos en el medio, por lo que los microorganismos utilizan nutrientes liberados al medio por lisis celular. De esta forma, la densidad celular disminuye con el tiempo de forma gradual (Córdova, 2016).

Figura 6. Fases de crecimiento microbiano en reactores tipo batch.



Fuente: (Córdova, 2016)

N. CINÉTICA DE PRODUCCIÓN DE METANO

La cinética de producción de metano consiste en definir un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de la reacción en términos del consumo de sustratos o de la producción de biogás/metano. En una digestión anaeróbica, la obtención de un modelo cinético puede contribuir para identificar el comportamiento de los microorganismos bajo diferentes condiciones como pH, temperatura, sólidos totales, sólidos volátiles, etc.; de esta forma, es posible llevar a cabo el diseño de reactores para el proceso (Córdova, 2016).

Para determinar el modelo del reactor, se debe considerar el tipo de operación de este. En un reactor tipo batch, no hay interacción de masa con el ambiente, de forma que no hay corrientes de entrada y salida. El proceso consiste en añadir los sustratos, nutrientes e inóculos al comienzo del ciclo y el biogás producido queda atrapado dentro del equipo para ser descargado al finalizar el proceso de fermentación bacteriana. Los procesos de digestión anaeróbica tienden a ser analizados por el consumo de sustrato o la producción de biogás/metano a lo largo del tiempo. En la bibliografía hay una serie de modelos propuestos para este tipo de procesos, los más utilizados son: modelo de primer orden (modelo de Roediger) y la ecuación modificada de Gompertz, que describe la producción de metano sigmoideal. A continuación, se describe el modelo de primer orden (Córdova, 2016).

El modelo de Roediger corresponde a una cinética de primer orden para la hidrólisis de la materia orgánica particulada, que no considera la fase de latencia. De esta forma, la producción de metano acumulado se describe con la siguiente ecuación:

$$B(t) = B_o(1 - e^{-kt})$$

Donde B(t) representa la producción acumulada de metano al día t de digestión (mL/mg SV), B_o es la producción potencial de metano del sustrato (mL/mg SV), K representa la velocidad de producción de metano (constante de desintegración de primer orden) (1/día) y t es el tiempo (días).

Para aplicar este modelo se toman en cuenta las siguientes suposiciones: 1) la disponibilidad de sustrato es el factor limitante, 2) la hidrólisis gobierna el proceso global, 3) debido a que no considera la fase de latencia, es aplicable únicamente en casos de que no haya un retardo significativo en la producción de metano (Córdova, 2016). Los parámetros cinéticos de k y B_0 deben ser obtenidos mediante un ajuste de los datos experimentales al modelo propuesto anteriormente. Para esto, se pueden emplear softwares como Berkeley Madonna, colocando un valor de referencia de B_0 de:

$$B_o = \frac{(B_{sustrato+inóculo} - B_{inóculo}) (mL)}{SV_{sustrato} (mg)}$$

Donde $B_{sustrato+inóculo}$ y $B_{inóculo}$ corresponden a los mL de biogás acumulado al final de la reacción de la mezcla inóculo/sustrato y del inóculo, respectivamente. Y $SV_{sustrato}$ corresponde a los sólidos volátiles del sustrato (Córdova, 2016).

O. EVALUACIÓN TÉCNICA

La evaluación técnica de proyectos o procesos consiste en determinar la factibilidad de la ejecución del proceso, considerando todos los aspectos técnicos relacionados como: tecnología, costo, ingeniería, tiempo, proceso de producción, tamaño y capacidad del equipo, entre otros (Guatibonza & Leguizamon, 2016). Para este trabajo, la evaluación técnica toma en cuenta: eficiencia de digestión de reactores, calidad de biogás, producción de biogás; evaluando 3 relaciones diferentes para realizar la propuesta de una relación óptima. Este análisis va acompañado de un análisis de cinética para modelar el comportamiento de la reacción, además de una evaluación económica para determinar la factibilidad económica de la DA empleando estiércol vacuno como inóculo y vinaza concentrada como sustrato.

P. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica es un proceso que consiste en determinar la factibilidad económica de algún proyecto de inversión, contemplando el valor del dinero a través del tiempo. Para esto, se utilizan diferentes herramientas de cálculo como: valor actual neto, tasa interna de rendimiento, relación beneficio-costos, período de recuperación de la inversión y el análisis de sensibilidad (Gómez, s.f.).

1. Indicador beneficio-costos

Es un indicador que señala la utilidad generada por un proyecto con el costo de inversión para su implementación. El resultado de la relación beneficio-costos, es un índice de rendimiento obtenido por cada unidad invertida (Gómez, s.f.). Dicho índice, se calcula con la Ecuación 2.

$$\text{Relación B/C} = \frac{\text{Beneficios obtenidos}}{\text{Costos incurridos}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para la toma de decisiones, se tienen las siguientes opciones:

- i. Relación B/C menor a 1, se rechaza el proyecto.
- ii. Relación B/C igual a 1, la decisión de invertir es indiferente.
- iii. Relación B/C mayor a 1, se acepta el proyecto.

V. ANTECEDENTES

A. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZA MUNDIAL

La vinaza se considera como la mayor fuente de contaminación en la industria de producción de etanol a partir de la caña de azúcar. A pesar de que se utiliza como fertilizantes, puede tener efectos negativos en los suelos y, además, contiene una cantidad reducida de macronutrientes y micronutrientes. La producción de biogás a partir de la vinaza tiene beneficios tanto económicos como medioambientales. Actualmente, se producen 22.4 Gigalitros de vinaza en todo el mundo, que tienen el potencial de producir 407.68 Gigalitros de biogás, de forma que se considera como una importante fuente de energía renovable (Parsae et al., 2019).

La producción de biogás a partir de vinaza ha sido aplicada por ingenios en Brasil, Cuba, Ecuador, entre otros países. En Ecuador, se han realizado estudios de la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de estiércol de vaca con vinaza diluida; sin embargo, los estudios han demostrado que la eficiencia de los biodigestores aumenta al realizar la adaptación del inóculo con vinaza concentrada, siendo de un 24% con vinaza diluida y 70% con la adaptación mencionada (Guevara, 1999).

B. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE VINAZA EN GUATEMALA

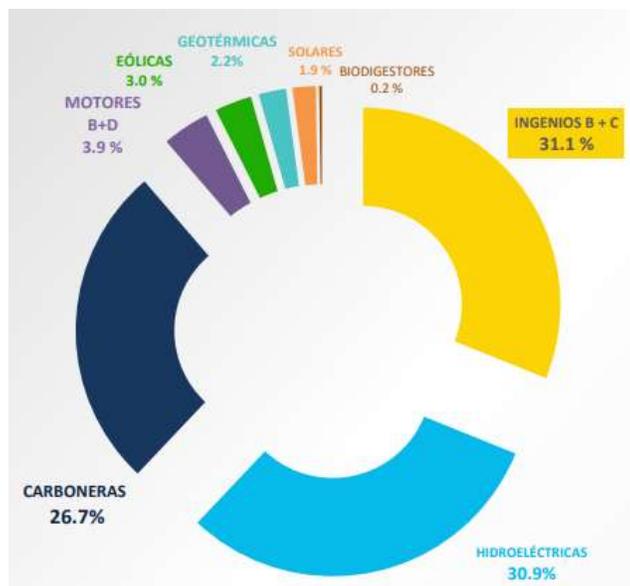
En Guatemala, la vinaza es empleada para fertirriego de los campos de caña, en la mayoría de los casos. El Ingenio Magdalena es la excepción porque emplean vinaza diluida como sustrato alimentado a sus biodigestores. En este, cuentan con 4 digestores con las dimensiones que se muestran en el Cuadro 5, con un volumen útil de 27000 m³ y una producción diaria de biogás de 75000 m³.

Cuadro 6. Parámetros de los biodigestores de Ingenio Magdalena.

Parámetro	Valor
Diámetro	68 m
Altura	7 m
Volumen útil	27000 m ³
Producción de biogás	75000 m ³ /día
Material	Acero inoxidable

En la matriz eléctrica nacional de Guatemala, el 31.1% de la demanda eléctrica del país proviene de los ingenios, superando a las hidroeléctricas con un 30.9% y carboneras con un 26.7%. Sin embargo, las energías renovables representan un 7.3% de la matriz energética nacional y de esta, los biodigestores cubren 0.2% (ver Figura 7), por lo que se podría aprovechar esta área en Guatemala (Cengicaña, 2019).

Figura 7. Matriz eléctrica nacional de noviembre 2018 a junio 2019.



Fuente: (Cengicaña, 2019).

VI. METODOLOGÍA

A. MATERIALES

1. Reactivos
 - a. Estiércol de ganado de engorde fresco
 - b. Agua destilada
 - c. Vinaza
 - d. Hidróxido de sodio
 - e. Buffer 7, 4 y 10 para potenciómetro
2. Cristalería
 - a. Pipetas de 1, 2, 5 y 10 ml
 - b. Recipiente con acople de aguja hipodérmica
 - c. Probetas graduadas de 100 ml
 - d. Vasos de precipitado
 - e. Crisoles
 - f. Beaker de 250 ml
 - g. Beaker de 100 ml
 - h. Beaker de 500 ml
 - i. Balón aforado de 1000 ml
3. Equipos y materiales
 - a. Mangueras
 - b. Corchos
 - c. Pajillas de polipropileno
 - d. Potenciómetro
 - e. Balanza analítica
 - f. Termómetro
 - g. Estufa con agitador
 - h. Guantes
 - i. Mufla
 - j. Balanza de medición de humedad
 - k. Equipo de medición de gases Dräger X-am 8000
 - l. Recipientes PET para reactores.

B. MÉTODO

1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA

Cálculo del tamaño de muestra. Realizar el cálculo del tamaño de muestra utilizando la ecuación desconociendo el tamaño de la población que se muestra a continuación:

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2}$$

Donde:

Z = nivel de confianza (2.58 que equivale al 99% de confianza)

P = probabilidad de éxito o proporción esperada (generalmente 95%)

Q = probabilidad de fracaso (generalmente 5%)

D = precisión (error máximo admisible en términos de proporción, generalmente 30%)

2. CARACTERIZACIÓN DE VINAZA

Realizar la caracterización de la vinaza utilizando los siguientes métodos: medición de pH por método potenciométrico, medición de humedad por pérdida de peso en una balanza de medición de humedad a 120°C, temperatura con un termómetro, sólidos totales por el método gravimétrico, sólidos volátiles por el método gravimétrico de volatilización y densidad.

Medición de pH (método 9040 C). Seguir el método de medición de pH que se describe a continuación:

1. Limpiar el electrodo con agua desmineralizada empleando una piseta.
2. Calibrar el potenciómetro utilizando los buffer de pH: 4, 7 y 10.
3. Limpiar nuevamente el electrodo con agua desmineralizada empleando una piseta.
4. Colocar la muestra de vinaza en un Beaker.
5. Sumergir el electrodo dentro de la muestra y mantenerlo estable. Si la temperatura varía más de 2°C del buffer, realizar nuevamente la calibración.
6. Anotar el pH y la temperatura de medición.
7. Repetir medición para las otras muestras en cuadruplicado.
8. Limpiar el electrodo con agua desmineralizada empleando una piseta y sumergir en la solución buffer para proteger el electrodo.

(METHOD 9040C, 2004)

Medición de humedad (método según Manual MB120 Moisture Analyzer). Seguir el método de medición de humedad que se describe a continuación:

1. Limpiar la bandeja de muestras con una brocha especial.
2. Encender la balanza medidora de humedad.
3. Seleccionar la temperatura de 120°C para muestras líquidas viscosas, según la Tabla A-1 en el anexo del manual del equipo.
4. Ingresar 10 g de muestra en la bandeja y cerrar el equipo.
5. Iniciar la medición.
6. Anotar el valor de humedad y tiempo final.
7. Apagar el equipo y limpiar la bandeja.

(Ohaus, s.f.)

Medición de densidad (método AST D4052-22). Seguir el método de medición de densidad que se describe a continuación:

1. Pesar una probeta de 10 mL vacía en una balanza analítica ($Peso_{probeta}$).
2. Colocar 10 mL de muestra de vinaza en la probeta (vol).
3. Pesar la probeta con muestra en una balanza analítica ($Peso_{probeta+muestra}$).
4. Realizar el cálculo de densidad empleando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{Peso_{probeta+muestra} - Peso_{probeta}}{vol}$$

(ASTM D4052-22, 2022)

Sólidos totales (ST). Empleando el método gravimétrico estándar AOAC (1990) para la medición de sólidos totales, seguir los pasos que se describen a continuación:

1. Pesar un crisol (W_1), previamente llevado a peso constante, y añadir 15 mL de muestra (sobrenadante inicial y final).
2. Evaporar hasta casi sequedad empleando una estufa a 300°C y luego, secar en horno durante 10 minutos a 105°C.
3. Colocar en una desecadora durante 15 minutos para que se enfríe la muestra y pesar (W_2).
4. La cantidad de sólidos totales se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{W_2 - W_1}{vol}$$

Sólidos volátiles (SV). Empleando el método gravimétrico estándar AOAC (1990) para la medición de sólidos volátiles, seguir los pasos que se describen a continuación:

1. Después de realizar la prueba de sólidos totales, colocar el crisol en una mufla a 550°C por 20 minutos.
2. Colocarlo en un horno a 105°C durante 10 minutos para reducir gradualmente la temperatura.
3. Finalmente, enfriar durante 15 minutos en un desecador y pesar la cápsula (W3).
4. La cantidad de sólidos volátiles se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$SV = \frac{W_2 - W_3}{vol}$$

(Helrich, 1990)

3. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Preparación del inóculo. Realizar la preparación del inóculo como se describe a continuación:

1. Pesar 800 g de estiércol vacuno dentro de un recipiente
2. Añadir agua destilada hasta llegar a 4000 mL de inóculo.
3. Colocar 250 mL de la solución de inóculo a cada reactor (los 12 reactores y el blanco).
4. Adaptar el inóculo durante 3 semanas herméticamente a temperatura ambiente.

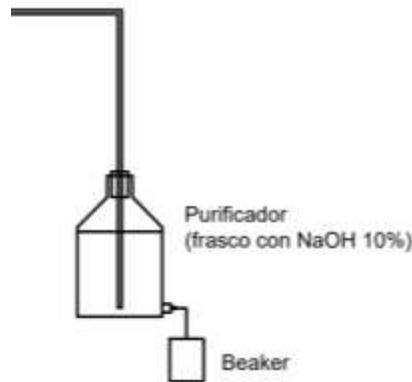
Preparación del sustrato. Realizar la preparación del sustrato como se describe a continuación:

1. Medir el pH inicial de la vinaza concentrada.
2. Regular el pH de la vinaza concentrada a 7.4-7.8 con una solución de NaOH al 10%.

Preparación de solución sensor. Realizar la preparación de la solución sensor como se describe a continuación:

1. Preparar una solución de NaOH al 10% con 100 g de NaOH y 1000 mL de agua destilada, para cada recipiente del sistema de columna de desplazamiento líquido y purificación de biogás.
2. Colocar la solución preparada en cada sistema y sellar herméticamente.
3. Colocar un Beaker de 250 mL para recolectar el líquido desplazado armando el sistema que se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Sistema de medición de biogás producido por desplazamiento líquido.



Adición del sustrato. Realizar la adición del sustrato como se describe a continuación:

1. Después de las 3 semanas de adaptación, empezar a añadir sustrato en cada relación inóculo-sustrato seleccionadas según la teoría (50:50, 50:25 y 50:75 m/v, las cuales son las más empleadas en sistemas de digestión anaeróbica), de la siguiente manera: 50 ml de vinaza concentrada en los reactores 1-4, 25 ml de vinaza concentrada en los reactores 5-8 y 75 ml de vinaza concentrada en los reactores 9-12.
2. Sellar herméticamente y llevar a cabo la digestión anaeróbica.

Digestión anaeróbica. Llevar a cabo a digestión anaeróbica como se describe a continuación:

1. Observar la producción de biogás durante 45 días (10 días de adaptación y 35 días de tiempo de retención hidráulica, determinados para estiércol vacuno como inóculo).
2. Medir la cantidad de líquido desplazado del sistema que se muestra en la Figura 9. Realizar la corrección de presión y temperatura para determinar la cantidad de biogás producido, empleando la siguiente ecuación:

$$Volumen_{biogás} = \frac{P_{estándar} * V_{desplazado} * T_{ambiente}}{T_{estándar} * P_{ambiente}}$$

Donde:

$P_{estándar}$ = Presión estándar (1 atm).

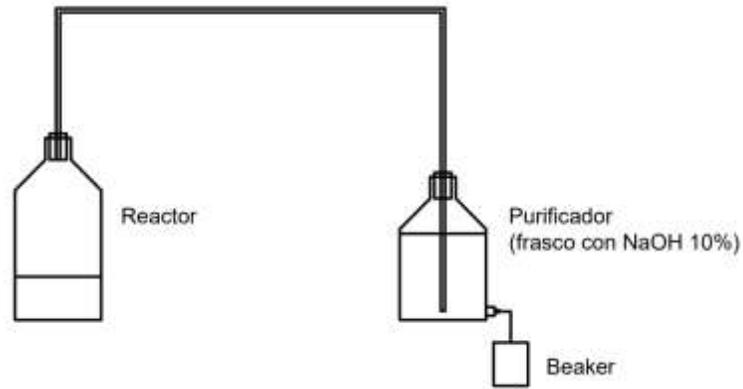
$P_{ambiente}$ = Presión a la que se realizó el experimento.

$V_{desplazado}$ = Volumen desplazado por el sistema de purificación.

$T_{estándar}$ = Temperatura estándar (25°C).

$P_{ambiente}$ = Temperatura a la que se realizó el experimento.

Figura 9. Sistema de producción, recolección y purificación de biogás.



4. ANÁLISIS DE PRODUCTOS

Análisis de sobrenadante. Realizar la prueba de sólidos totales y volátiles para el sobrenadante muestreando 15 mL de sobrenadante en cada reactor. Seguir el procedimiento descrito en la sección de Método - Caracterización de vinaza (Helrich, 1990).

Análisis de composición de biogás (según manual Dräger X-am 8000). Realizar el análisis de composición de biogás como se describe a continuación:

1. Recolectar el biogás de cada reactor en una bolsa de almacenamiento de gas insertando la boquilla de la bolsa en el punto de muestreo del purificador.
2. Al llenar la bolsa, asegurarse de que se encuentre completamente sellada.
3. Realizar el análisis de composición empleando el equipo Dräger X-am 8000 colocando un pre-tubo correspondiente para la detección de cada gas: CH_4 , H_2S , CO , SO_2 , O_2 , N_2 , CO_2
4. Anotar los porcentajes de composición del biogás y repetir el procedimiento para cada muestra de biogás.

(Dräger, s.f.)

5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS TÉCNICO/ECONÓMICO

Cálculos. Calcular la cantidad teórica de biogás producido y comparar con la cantidad experimental. Determinar la cantidad de sólidos volátiles totales del sobrenadante para obtener el porcentaje de error y la eficiencia de producción de biogás a partir de estiércol vacuno y vinaza. Además, realizar el balance de masa promedio del sistema.

Análisis técnico y económico. Realizar un análisis técnico y económico de costo-beneficio para comparar la factibilidad de la producción de biogás empleando vinaza como sustrato, evaluando la eficiencia de la digestión y capacidad del sistema.

VII. RESULTADOS

Cuadro 7. Resultados de caracterización de vinaza concentrada.

Parámetro	Resultado promedio
Temperatura (°C)	19.7 ± 0.50
pH	4.01 ± 0.00020
Densidad (g/mL)	1.19 ± 0.022
Humedad (%)	61.9 ± 0.0020
Sólidos totales (ppm)	0.461 ± 0.031
Sólidos volátiles (ppm)	0.322 ± 0.022
Sólidos fijos (ppm)	0.139 ± 0.010

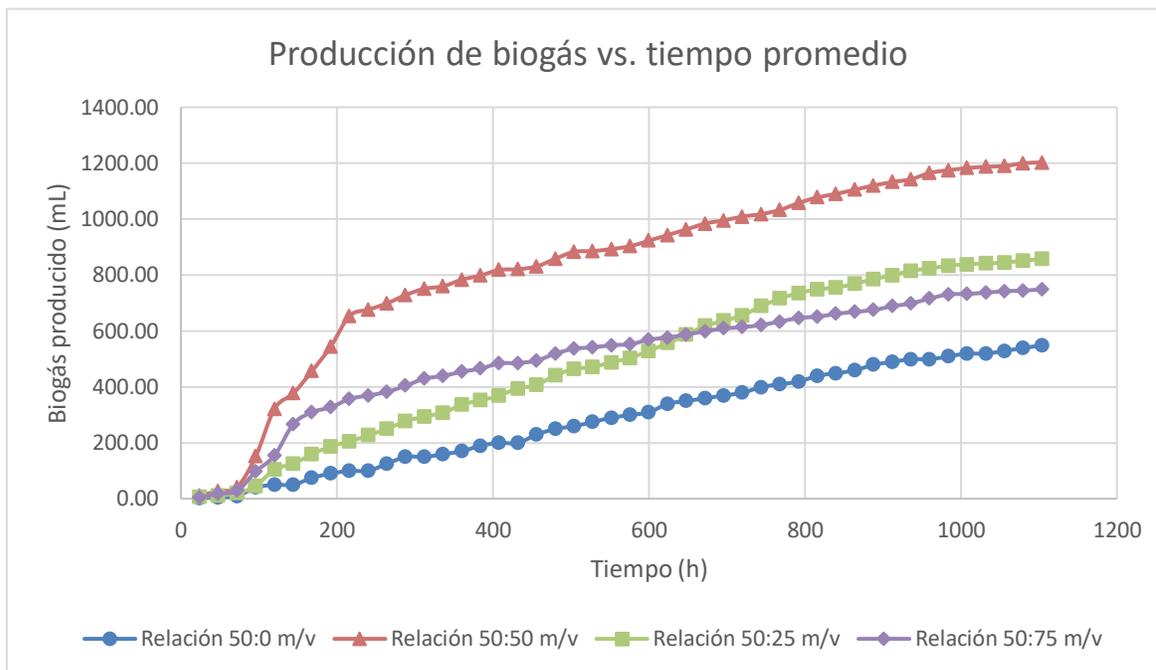
Descripción: Estos datos fueron medidos en cuadruplicado y se reporta el resultado promedio para la caracterización de la materia prima empleada.

Cuadro 8. Producción total promedio de biogás en cada relación.

Relación inóculo/sustrato (m/v)	Tiempo de digestión (h)	Biogás promedio producido por la adición de vinaza (mL)	Biogás promedio producido por vinaza y estiércol (mL)
50:50	1104	653.55 ± 11.2	1202.34 ± 10
50:25	1104	308.07 ± 11.2	856.85 ± 10
50:75	1104	199.56 ± 11.2	748.34 ± 10

Descripción: Se midió la producción en cuadruplicado y se obtuvo el promedio. Se reporta el biogás promedio por la adición de vinaza y por la mezcla vinaza y estiércol, para visualizar el efecto que la vinaza concentrada tiene en la maximización de producción de biogás. Estos datos se obtuvieron a temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm.

Figura 10. Producción promedio de biogás en cada relación y el blanco.



Descripción: Se puede observar que la relación inóculo/sustrato de 50:50 m/v es la que mostró una mayor producción de biogás. Las curvas muestran una tendencia similar. La curva del blanco (relación 50:0 m/v) muestra el aporte del estiércol en la producción de biogás total por relación. Estos datos se obtuvieron a temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm.

Cuadro 9. Eficiencia de la producción de biogás de cada relación.

Relación inóculo/sustrato (m/v)	Eficiencia media de reactor (%)	Varianza (%)
50:50	91.1	0.0699
50:25	97.2	0.0002
50:75	94.4	0.0001

Descripción: Se puede observar las eficiencias promedio de los reactores en cada relación en cuanto a la reducción de materia orgánica en la vinaza.

Cuadro 10. Calidad de biogás obtenido por cada relación inóculo-sustrato.

Relación inóculo/sustrato (m/v)	Calidad de biogás (%)							Energía generada para cada relación (W)
	CH_4	H_2S	CO	SO_2	O_2	N_2	CO_2	
50:50	70	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	25	$6.9 * 10^{-3}$
50:25	55	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	40	$4.9 * 10^{-3}$
50:75	60	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	35	$4.3 * 10^{-3}$

Descripción: Se puede observar la calidad del biogás para determinar la factibilidad técnica del sistema empleado, para la obtención de biogás de alta calidad. A su vez, se muestra la energía generada por el biogás producido, empleando un poder calorífico teórico de biogás de 23 MJ/m^3 .

Cuadro 11. Análisis económico de la producción de biogás de cada relación.

Relación inóculo/sustrato (m/v)	50:50	50:25	50:75
Inversión por reactor	Q154.87	Q154.87	Q154.87
Relación costo-beneficio	0.25	0.18	0.16

Descripción: Se puede observar la inversión por reactor y la relación costo-beneficio calculada para cada relación inóculo/sustrato.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de estiércol vacuno como inóculo y vinaza como sustrato, se construyó 13 reactores a escala laboratorio (ver Figura 20), 4 para evaluar la relación inóculo/sustrato 50:50 m/v, 4 para la relación 50:25 m/v, 4 para la relación 50:75 m/v y 1 con inóculo como blanco (relación inóculo/sustrato de 50:0 m/v). Se realizó la adaptación del inóculo colocando los reactores a temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm, por 3 semanas (ver Figura 16). Durante la adaptación, se inició la caracterización de la vinaza concentrada proveniente del Ingenio Pantaleón. Para esto, se midió el pH y temperatura (ver Cuadro 13). Se esperaba un pH de 4.0-5.0 para vinazas obtenidas de melaza de caña y de 3.7-4.6 para vinazas obtenidas de jugo de caña, como se muestra en el Cuadro 2, por lo que el pH de la vinaza de 4.01 ± 0.00020 se encuentra dentro del rango esperado (Guevara, 1999).

Además, se midió la humedad de la vinaza concentrada (ver Cuadro 14), para lo cual se obtuvo un porcentaje de humedad promedio de $61.9\% \pm 0.0020$. Se esperaba que la humedad fuera entre 60-95% debido a que la vinaza tiene un alto contenido de agua (ver Cuadro 2), por lo tanto, la humedad determinada se encuentra dentro del rango esperado. Por otro lado, se calculó la densidad de la vinaza (ver Cuadro 25). Se esperaba una densidad de 1.15-1.25 g/mL (ver Cuadro 2), por lo que la densidad promedio de 1.19 ± 0.022 g/mL se encuentra dentro de lo esperado. Para la determinación de la eficiencia de producción de biogás, se midió la cantidad de sólidos volátiles (SV), fijos (SF) y totales (ST) del sustrato de 0.322 ± 0.02 ppm, 0.139 ± 0.01 ppm y 0.461 ± 0.03 ppm, respectivamente. Se esperaba que el valor de sólidos volátiles se encontrara por debajo de 500 ppm (ver Cuadro 2), indicando el contenido de material orgánico disponible para la digestión anaeróbica (Guevara, 1999).

Al finalizar la caracterización del sustrato y adaptación del inóculo, se ajustó el pH de la vinaza a 7.1 ± 0.005 con Hidróxido de sodio al 10%, debido a que los reactores deben mantener un pH entre 7.0-7.5 para propiciar la producción de biogás. Se midió la cantidad de hidróxido de sodio desplazado cada 24 horas, hasta observar la disminución de producción de biogás. Después de 6 semanas de digestión, se obtuvo una producción promedio de 1202.34 ± 10 mL de biogás en la relación 50:50 m/v, 856.85 ± 10 mL en la relación 50:25 m/v y 748.34 ± 10 mL en la relación 50:75 m/v (ver Cuadro 8).

Luego, se determinó la producción de biogás generada por la adición de vinaza al sistema, restando la cantidad de biogás producida por el blanco (reactor 0) de 550 ± 5 mL, como se observa en el Cuadro 29. En la relación 50:50 m/v se obtuvo una producción por vinaza de 653.55 ± 11.2 mL, en la relación 50:25 m/v de 308.07 ± 11.2 mL y en la relación 50:75 m/v de 199.56 ± 11.2 mL (ver Cuadro

7). En todos los casos, se observó una producción acelerada con una tendencia creciente, que se volvió constante en las últimas semanas de digestión (ver Figura 10). Además, se comprobó que la adición de vinaza puede aumentar la producción de biogás un 30% en la relación 50:75 m/v, 40% en la relación 50:25 m/v y 55% en la relación 50:50 m/v; por lo tanto, todas las relaciones son recomendables para maximizar la producción de biogás en ingenios azucareros.

Según los valores teóricos esperados de producción de biogás (ver Cuadro 28), la producción de biogás aumenta de manera proporcional con la cantidad de sustrato añadido al medio. Sin embargo, experimentalmente se observó una tendencia diferente, dando como resultado porcentajes de error de la predicción mayores al 25% (ver Cuadro 40). Esto se debe a que los cálculos teóricos estaban limitados a la cantidad de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en el medio; sin embargo, la vinaza es un sustrato con alto contenido orgánico, incluyendo otros componentes que no fueron tomados en cuenta en el cálculo.

Como se observa en la Figura 10, a pesar de que los reactores presentaron una tendencia similar, la relación inóculo/sustrato con mayor producción es la de 50:50 m/v. Esto se debe a que la digestión se dio en condiciones favorables, al tener suficiente sustrato para la metanogénesis de las bacterias. Al emplear una relación de 50:75 m/v se observó una producción limitada, debido a que, el exceso de sustrato en el medio provocó una inhibición por sustrato durante la DA. Por otro lado, la relación 50:25 m/v mostró una producción mayor; sin embargo, en la gráfica se observa que la generación de biogás fue retardada debido a la escasez de sustrato en el medio.

Para modelar el comportamiento de la digestión anaeróbica dentro del reactor, se realizó el ajuste de los datos experimentales empleando el modelo de Roediger, en el software Berkeley Madonna. En la sección de “Modelo cinético del reactor” de “Anexos”, se detallan los datos y gráficos obtenidos para la obtención del modelo. Finalmente, se obtuvo los 3 modelos que se muestran en el Cuadro 47. Como se puede observar, el modelo para cada relación se ajusta a los datos en el rango de tiempo de 6 días de digestión; el alto porcentaje de error durante los primeros días se debe a que el modelo no toma en cuenta el período de latencia, de forma que no pudo representar adecuadamente el comportamiento al inicio de la reacción. Sin embargo, el porcentaje de error reduce considerablemente con el paso del tiempo, de forma que el modelo puede ser utilizado para este tipo de reactores durante la digestión anaeróbica de estiércol vacuno empleando vinaza como sustrato. Se recomienda emplear otro modelo que considere el consumo de sustrato con el tiempo, para que se pueda predecir en el periodo de latencia.

La producción de biogás promedio por cada relación medida en cuadruplicado, fue sometida a un análisis ANOVA de un factor. La hipótesis nula indica que no hay diferencia significativa entre la producción de biogás promedio para cada relación de inóculo/sustrato; la hipótesis alternativa indica que sí existe una diferencia significativa entre la producción de biogás promedio para cada relación de inóculo/sustrato. Como se observa en Cuadro 35, la razón F de 1.977 es menor al valor crítico para F de 4.26 y la probabilidad de 0.194 es mayor al grado de significancia de 0.05, por lo tanto, no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, al tener un valor F levemente mayor a 1, se comprueba que la diferencia entre medias es mínima. Por lo tanto, la relación de inóculo/sustrato empleada, no tiene un efecto estadístico significativo sobre la producción de biogás promedio durante 6 semanas de digestión.

El resultado del análisis estadístico resulta importante para implementar la digestión en ingenios azucareros, debido a que pueden emplear la relación inóculo/sustrato de 50:75 m/v para maximizar el uso de las vinazas y reducir el uso de estiércol vacuno. En Guatemala, se cuenta con un promedio de 3.6 millones de cabezas bovinas, lo cual representa una cantidad aproximada de 72 billones de kilogramos de estiércol generado anualmente (MAGA, 2018). A pesar de que tiene un rendimiento elevado, la cantidad de estiércol vacuno en Guatemala es limitada y representaría costos adicionales de compra y transporte hacia los ingenios azucareros; con este análisis se comprueba que la relación inóculo sustrato de 50:75 m/v brinda resultados favorables en el aumento de biogás generado y podría ser una opción viable para la reducción de costos de operación.

Para el análisis técnico, se determinó la eficiencia de reducción de material orgánico de la vinaza en los reactores (ver Cuadro 9) y la calidad del biogás obtenido después de la remoción de dióxido de carbono (ver Cuadro 10). La relación con mayor rendimiento promedio es la de 50:25 m/v, esto se debe a la cantidad limitada de sustrato en el medio, es decir, al tener una mayor relación de inóculo (bacterias metanogénicas) y una menor cantidad de vinaza, las bacterias agotan el sustrato disminuyendo así la cantidad de material orgánico en el medio. A pesar de que esta relación presentó un mejor rendimiento en la remoción de sólidos volátiles, todos los reactores presentaron rendimientos mayores al 90%, por lo que el diseño de reactor empleado es adecuado para la digestión anaeróbica de estiércol vacuno y vinaza.

La eficiencia de digestión promedio por cada relación, fue sometida a un análisis ANOVA de un factor. La hipótesis nula indica que no hay diferencia significativa entre la eficiencia de digestión promedio para cada relación de inóculo/sustrato; la hipótesis alternativa indica que sí existe una diferencia significativa entre la eficiencia de digestión promedio para cada relación de inóculo/sustrato. Como se observa en Cuadro 37, la razón F de 15.9 es mayor al valor crítico para F de 4.26 y la probabilidad de 0.001 es menor al grado de significancia de 0.05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis

nula a favor de la hipótesis alternativa, indicando que la relación de inóculo/sustrato empleada si tiene un efecto significativo en las eficiencias de digestión promedio.

Después de realizar el análisis de calidad del biogás, se obtuvo los porcentajes mostrados en el Cuadro 10. Como se puede observar, al emplear la relación de 50:50 m/v, se obtiene una mejor calidad de biogás, esto se debe a que la relación entre nutrientes y microorganismos es óptima para la producción de biogás rico en metano. Por lo tanto, respecto al análisis técnico, se determinó que la relación favorable para maximizar la producción de biogás es 50:50 m/v, empleando el sistema de purificación de biogás debido a que la cantidad de dióxido de carbono remanente es mínima, evidenciando la calidad del biogás generado.

Además, considerando que la diferencia entre la producción de biogás promedio en cada relación no es significativa, se evaluó el comportamiento gráfico de generación de biogás. Como se observa en la Figura 10, la relación 50:50 m/v es la que muestra una producción más acelerada debido a que la adaptación del inóculo con el sustrato se llevó a cabo en menor tiempo al mantener una relación de inóculo-sustrato favorable para el crecimiento microbiano y producción de biogás. Sin embargo, se determinó que la relación 50:75 m/v puede brindar resultados favorables porque tiene una eficiencia de remoción de material orgánico del 94.4%, la cual es mayor que para la relación 50:50.

Analizando económicamente, se determinó que para la producción de biogás con el sistema propuesto (ver Figura 9), se requiere una inversión de Q154.87 por reactor. Los costos de operación para ingenios y destilerías incluyen la compra de estiércol de vaca, con un precio promedio de Q0.39 por gramo, e hidróxido de sodio, con un precio de Q30.69 por kilogramo; de forma que los costos de operación son de Q317.95 cada 6 semanas, operando los reactores por lotes. Estos reactores se instalaron a temperatura ambiente para la reducción de costos y para simular las condiciones en las que se operan los biodigestores en los ingenios azucareros.

Utilizando el precio promedio del biogás en el mercado es de 1000 euros por tonelada, se obtuvo que la relación costo-beneficio (C/B) de los reactores empleados es de 0.25 para la relación 50:50 m/v, 0.18 para la relación 50:25 m/v y 0.16 para la relación 50:75 m/v. Al ser una relación menor a 1, se determinó que el índice de rendimiento por unidad invertida es bajo. Sin embargo, se deben evaluar otros beneficios ambientales como la reducción de DQO y DBO en el residuo de destilería, el aprovechamiento energético del material y la reducción de costos por el tratamiento químico de vinazas. Se recomienda realizar la prueba con otros tipos de inóculos para determinar un método que brinde una producción de biogás sostenible económicamente.

A pesar de que la relación C/B es menor a 1, se considera que el beneficio a largo plazo puede ser mayor al aprovechar los desechos orgánicos de destilación de alcohol para la producción de energía eléctrica, como alternativa del uso de bunker o carbón que, debido a las situaciones mundiales, ha representado un aumento considerable en los costos de producción dentro de los ingenios. Además, en este análisis no se consideró el beneficio económico y legal por el tratamiento químico de las vinazas que, actualmente, tiene un costo de operación anual de Q99,839,520.00 (Carhuas & Velazquez, 2018).

Por lo tanto, evaluando económica y técnicamente la producción de biogás empleando estiércol de vaca como inóculo y vinaza concentrada como sustrato a escala laboratorio, se concluye que la mejor relación inóculo/sustrato es la de 50:75 m/v, si se desea minimizar los costos de operación y maximizar la eficiencia de remoción de material orgánico. Esta relación presentó un aumento del 30% en la producción de biogás, maximiza el uso de vinazas y reduce el uso de estiércol, el cual es la materia prima limitada en el país, y cuenta con una eficiencia de remoción de material orgánico cercana al 95%. Por otro lado, si se desea aumentar la producción de biogás de mayor calidad, se recomienda emplear la relación 50:50 m/v, considerando que, estadísticamente, la producción promedio no se ve significativamente afectada por la relación inóculo/sustrato empleado.

Se recomienda evaluar esta relación en reactores continuos para determinar el beneficio de esta en el aumento de generación de biogás y emplear otras relaciones de inóculos para compensar la cantidad limitada de estiércol vacuno. Para implementar digestores, se recomienda realizar pruebas a nivel planta piloto y caracterizar el estiércol empleado porque varía según el tipo de ganado y la alimentación de este.

IX. CONCLUSIONES

- La vinaza concentrada empleada para la producción de biogás tiene un pH de 4.01, una densidad de 1.19 ± 0.022 g/mL, una humedad de $61.9 \pm 0.0020\%$, una cantidad de sólidos volátiles (SV), fijos (SF) y totales (ST) del sustrato de 0.322 ± 0.02 ppm, 0.139 ± 0.01 ppm y 0.461 ± 0.03 ppm, respectivamente, a una temperatura de 19.7°C .
- Empleando 3 relaciones de inóculo/sustrato diferentes, se obtuvo una producción de biogás promedio de 1202.34 ± 10 mL en la relación 50:50 m/v, 856.85 ± 10 mL en la relación 50:25 m/v y 748.34 ± 10 mL en la relación 50:75 m/v. Según el análisis estadístico de ANOVA de un factor, la producción de biogás no se ve significativamente afectada por la relación inóculo/sustrato utilizada. Sin embargo, con un factor F mayor a 1, se comprueba que sí existe una diferencia mínima entre las medias.
- El análisis técnico evidenció que la relación inóculo/sustrato 50:50 m/v es la más recomendable si se desea maximizar la producción de biogás de mayor calidad; sin embargo, se demostró que el reactor que presenta un mejor rendimiento en cuanto a reducción de materia orgánica disuelta es empleando la relación 50:25. Según el análisis estadístico de ANOVA de un factor, la eficiencia de digestión se ve significativamente afectada por la relación inóculo/sustrato utilizada. Por lo tanto, si se desea aumentar la eficiencia de remoción de materia orgánica y reducir los costos de operación, se recomienda emplear la relación 50:75 m/v.
- Mediante el análisis económico, se determinó que el índice de rendimiento por unidad invertida es bajo al tener relaciones costo-beneficio menores a 1, de forma que se deben tomar en cuenta los beneficios ambientales, aprovechamiento energético de las vinazas dentro de ingenios, reducción de costos por tratamiento químico de vinazas y los beneficios legales.

X. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las pruebas fisicoquímicas de caracterización de la vinaza de manera continua para evitar desviaciones por las condiciones ambientales.
- Se recomienda realizar la digestión anaeróbica de vinaza empleando otros inóculos o relaciones de inóculos, como estiércol de gallina y cerdo, o residuos alimenticios, para determinar el material que brinda mejor rendimiento y tener mayor disponibilidad de inóculo.
- Se recomienda obtener la cinética de la producción de biogás para un reactor por lotes, considerando no solo la producción de biogás sino también el consumo de sustrato, para generar un modelo que prediga el comportamiento de la digestión con el tiempo para todas las fases de crecimiento, incluyendo la fase de latencia.
- Se recomienda evaluar más relaciones de inóculo-sustrato para determinar las condiciones que favorecen la producción de biogás.
- Se recomienda evaluar la operación del reactor de manera continua, regulando el pH de la vinaza entrante con el efluente del reactor para reducir costos por Hidróxido de Sodio.
- Si se desea escalar el proceso, se recomienda tomar en cuenta los costos de transporte del estiércol y los beneficios económicos por el tratamiento anaeróbico de las vinazas.
- Se recomienda obtener el poder calorífico experimental del biogás para determinar la cantidad de electricidad real que se puede generar en cada relación.
- Se recomienda realizar la caracterización del estiércol vacuno para observar la composición de este y así, comprobar si se mantiene dentro del rango esperado según la teoría.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, P.; García, L.; Borray, E.; Constanza, L. & Consuelo, L. (2008) *Aislamiento e identificación de microorganismos del género Methanococcus y Methanobacterium de cuatro fuentes de Bogotá D.C.* Recuperado de: <https://revistas.unicolmayor.edu.co/index.php/nova/article/download/116/231?inline=1>
- Arroyo, G. (1988) *Biotecnología: ¿una salida para la crisis agroalimentaria?* México: Ed. Plaza y Valdés, pp. 319.
- ASTM D4052-22 (2022) *Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter.* ASTM International.
- Carhuas, W. & Velazquez, D. (2018) *Determinación de las condiciones de operación y diseño del proceso coagulación floculación para el tratamiento de vinazas de Catarvío Rum Company.* Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de: https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/10524/CarhuasPerez_W%20-%20VelasquezGutierrez_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carneiro, T.F. (2005) *Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor.* Universidad de Cádiz.
- Cengicaña (2019) *Recopilación de la información del proceso de generación de energía presentada en los simposios de análisis de las zafras de 1997 al 2019.* Boletín estadístico. Cengicaña.
- Córdova, V. (2016) *Estudio de la cinética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y agroindustriales.* Buenos Aires, Argentina: UNCPBA.
- Dräger (s.f.) *Dräger X-am 8000: Equipos de detección multigas.* Recuperado de: <https://www.draeger.com/Products/Content/x-am-8000-pi-9104665-es-es.pdf>
- Food & Agriculture Org. (2019) *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa.* Buenos Aires: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, pp. 104.

- Gerardi, M.H. (2003) *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Guatibonza, A. & Leguizamón, L. (2016) *PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN TÉCNICA EN LA ETAPA DE FORMULACIÓN DE UN PROYECTO*. Universidad de San Buenaventura. Recuperado de: http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/3717/1/Procedimiento_realizar_evaluacion_tecnica_guatibonza_2016.pdf
- Guevara, L. (1999) *CARACTERIZACIÓN Y DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE VINAZAS DESTILADAS DEL ECUADOR*. Riobamba, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4082/1/20T00019.pdf>
- Gómez, A. (s.f.) *Evaluación económica. Facultad de economía UNAM*. Recuperado de: <http://www.economia.unam.mx/secss/docs/tesisfe/GomezAM/cap4.pdf>
- Helrich, K. (1990) *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Virginia, USA: AOAC.
- Juárez, M.; Castellanos, E. & Fuentes, G. (2019) *Emisiones históricas de gases de efecto invernadero y sus tendencias*. Editorial Universitaria UVG. Recuperado de: <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2019/07/1RepCCGuaCap11.pdf>
- Khanal, S.K. (2008) *Anaerobic biotechnology for bioenergy production principles and applications*. John Wiley & Sons, Iowa, USA.
- Lopez, M. (s.f.) *Producción de biogás a partir de la biodegradación anaeróbica de la “vinaza” generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas para bajar los gases invernadero*. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11153/1/Produccion%20de%20biogas%20a%20partir%20de%20la%20biodegradacion%20anaerobica%20de%20la%20vinaza%20generada%20por%20las%20destilerias%20de%20alcohol%20y%20su%20aprovechamiento%20energetico%20como%20combustible%20de%20calderas%20bajar%20los%20gases%20invernadero.pdf>

MAGA (2018) *Estrategia nacional de ganadería bovina sostenible con bajas emisiones*. MAGA, Gobierno de la República de Guatemala. Recuperado de: <https://www.maga.gob.gt/download/estrategiaganado.pdf>

Martínez, C.; Francesena, Y.; García, Y. & Martínez, N. (2017) *Impacto ambiental provocado por efluentes de instalaciones de biogás de pequeña y mediana escala*. Scielo, 26(4). Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000400009

Mejía, G. (1996) *Digestión Anaerobia*. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

MEM (2020) *Reporte final de resultados proyecto piloto movilidad verde 2020*. Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/01/BID-Informe_final_Etanol_REDD_Enero2020.pdf

METHOD 9040C (2004) *pH ELECTROMETRIC MEASUREMENT*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9040c.pdf>

Microlab Industrial (s.f.) *Análisis de sólidos totales volátiles*. Microlab Industrial. Recuperado el 22 de julio 2022, de: <https://www.microlabindustrial.com/parametros/propiedades-agregadas/579/solidos-totales-volaticos#:~:text=Los%20s%C3%B3lidos%20totales%20vol%C3%A1tiles%20son,medirse%20principalmente%20en%20muestras%20s%C3%B3lidas>

Monnet, F. (2003) *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes*.

Muñoz, M. (2014) *POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA VINAZA PARA SU UTILIZACIÓN COMO BIOCOMBUSTIBLE*. Cengicaña. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Mario-Munoz-Solares/publication/301358757_POTENTIAL_ENERGY_VINAZA_FOR_USE_AS_FUEL/links/57155a3f08ae8ab56695ac2a/POTENTIAL-ENERGY-VINAZA-FOR-USE-AS-FUEL.pdf

Ohaus (s.f.) *Instruction Manual MB120 Moisture Analyzer*. Ohaus.

- Parra, B.; Torres, P.; Marmolejo, L.; Cárdenas, L.; Vásquez, C.; Torres, W. & Ordoñez, J. (2014) *Efecto de la relación inóculo-sustrato sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal*, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(4). Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v16n4/v16n4a4.pdf>
- Parsaei, M.; Kiani, M. & Karimi, K. (2019) *A review of biogas production from sugarcane vinasse*. *Biomass and Bioenergy*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>
- Pinos, J., García, J.; Peña, L.; Rendón, J.; González, C. & Tristán, F. (2012) *Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América*, *SciELO*, 46(4). Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004
- Piñeros-Castro, Y. (2014) *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. Colombia: UTadeo, pp. 328.
- Quezada, J. (2016) *ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS*. Universidad San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5829/1/Josu%C3%A9%20Eduardo%20Quezada%20Palacios.pdf>
- Santiago, D. (2016) *EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE VINAZA Y CACHAZA SOBRE INDICADORES BIOLÓGICOS DE CALIDAD DEL SUELO EN LOTES DE PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum spp.), BAJO DOS SISTEMAS DE COSECHA*. INGENIO PANTALEÓN, S.A., SIQUINALÁ, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A. Universidad San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5980/1/TESIS.pdf>
- Subirós, F. (2000) *Cultivo de la Caña de Azúcar*. Costa Rica: Ed. Universidad, pp. 362.
- Superintendencia de Bancos de Guatemala. (2011) *SECTOR AZUCARERO. Análisis de Sectores Económicos. Departamento de Análisis Económico y Estándares de Supervisión. Área de Análisis Económico y Financiero*, Guatemala.
- Varnero, M. (2011) *Manual de Biogás*. MINERGÍA. Chile. Recuperado de: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Villatoro, B. (2015) *Sostenibilidad en la aplicación de vinaza como fertirriego en la producción de caña de azúcar*. Quetzaltenango: URL, 59 págs.

Yoandy, 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*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, 43(1). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120681002.pdf>

XII. ANEXO

A. BALANCES DE MASA

Figura 11. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador del blanco.

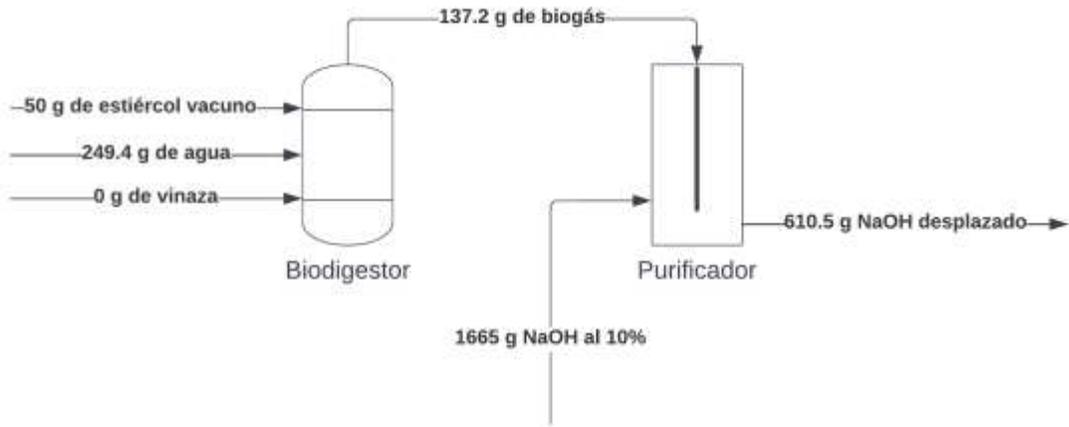


Figura 12. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:50.

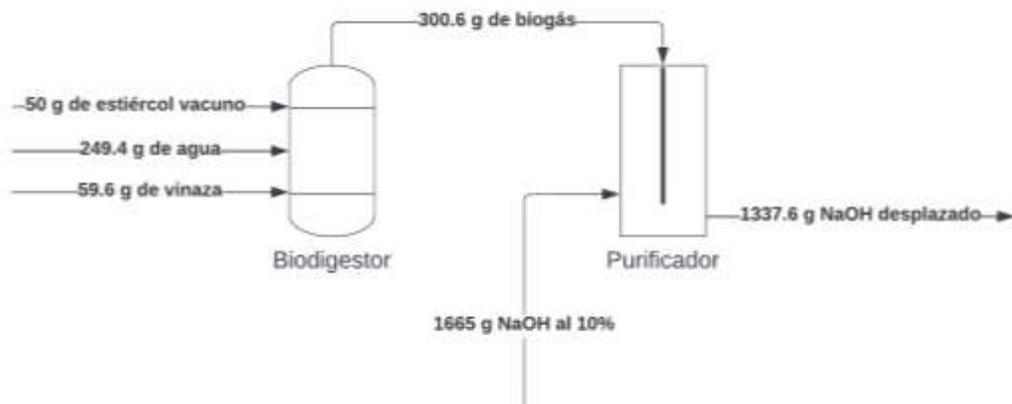


Figura 13. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:25.

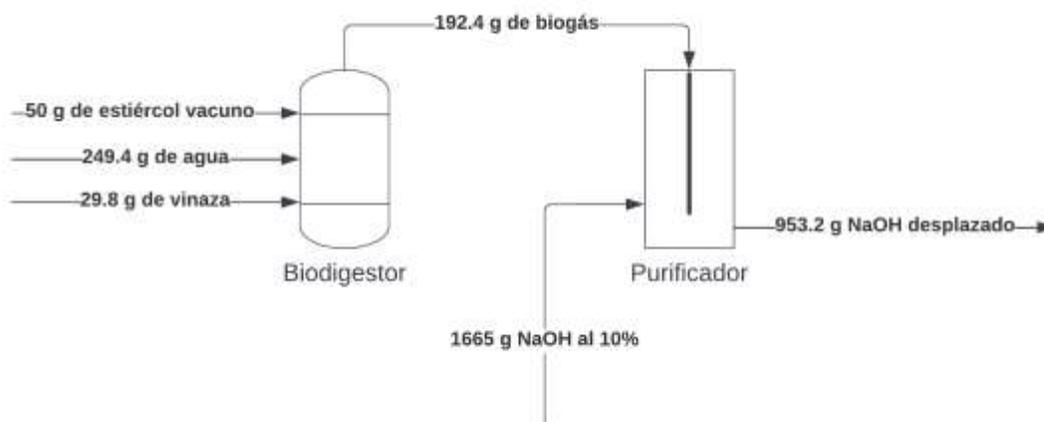
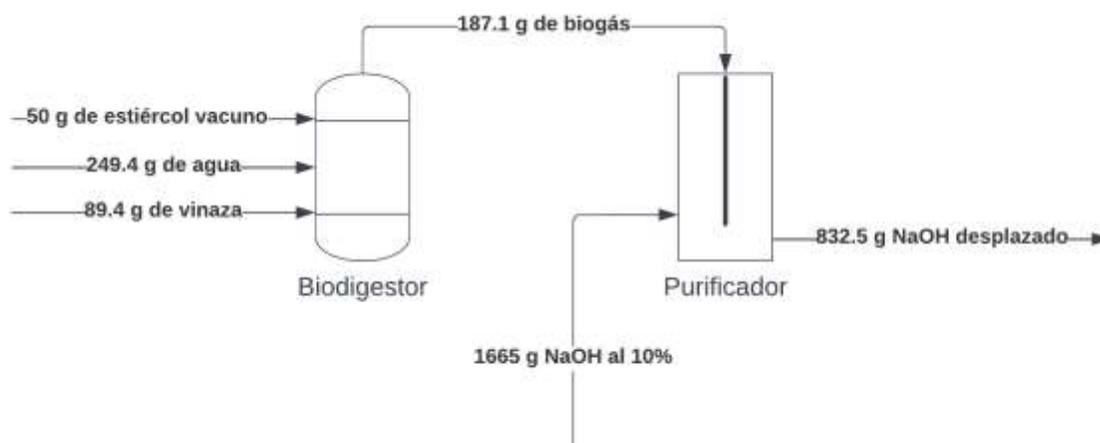


Figura 14. Diagrama de flujo de sistema reactor-purificador de relación inóculo/sustrato 50:75.



Cuadro 12. Balance de masa promedio de cada relación.

Relación inóculo/sustrato	ENTRADAS				SALIDAS			
	REACTOR			PURIFICADOR	REACTOR		PURIFICADOR	
	V (g)	A (g)	E (g)	NaOH entrada (g)	Ac 1 (g)	B1 (g)	NaOH salida (g)	Ac 2 (g)
Blanco	0	249.4	50	1665	162.2	137.2	610.5	1054.5
50:50	59.6	249.4	50.0	1665	58.4	300.6	1337.6	327.5
50:25	29.8	249.4	50.0	1665	136.8	192.4	953.2	711.8
50:75	89.4	249.4	50.0	1665	201.7	187.1	832.5	832.5

Descripción: Se describen las corrientes másicas del sistema reactor-purificador. Donde V es la cantidad de vinaza añadida, A es la cantidad de agua, E es la cantidad de estiércol, NaOH entrada es la cantidad de hidróxido de sodio al 10% añadido al purificador, Ac 1 es la acumulación de materia en el reactor, B1 es la cantidad de biogás generada, NaOH salida es la cantidad de hidróxido de sodio desplazado del purificador y Ac 2 es la cantidad de hidróxido de sodio acumulado en el purificador.

B. DATOS ORIGINALES DEL EXPERIMENTO

Cuadro 13. Registro de pH de vinaza concentrada.

No. De Corrida	pH vinaza concentrada
1	4.01±0.005
2	4.01±0.005
3	4.02±0.005
4	4.01±0.005

Descripción: Estos valores corresponden al pH inicial de la vinaza concentrada. Se realizó la medición con un phmetro en cuadruplicado. Temperatura del laboratorio de 24.1 ±0.05 °C.

Cuadro 14. Registro de corridas de humedad de vinaza concentrada.

No. De corrida	Muestra	Volumen (mL)	Masa (g)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Humedad de Muestra (%)
1	Vinaza concentrada	10±0.5	10.291±0.0005	23.4±0.05	120±0.05	44.31	65.44±0.005
2	Vinaza concentrada	10±0.5	11.688±0.0005	24.1±0.05	120±0.05	228.30	61.63±0.005
3	Vinaza concentrada	10±0.5	11.321±0.0005	25.1±0.05	120±0.05	52.21	59.38±0.005
4	Vinaza concentrada	10±0.5	11.352±0.0005	25.3±0.05	120±0.05	197.25	61.18±0.005

Descripción: Estos valores corresponden a la humedad inicial de la vinaza concentrada. Se realizó la medición con una balanza de humedad en cuadruplicado a 120±0.05 °C.

Cuadro 15. Registro de pesos y volumen de probeta, para la densidad de vinaza concentrada.

No. De corrida	Peso probeta (g)	Peso probeta con muestra (g)	Volumen de muestra (mL)
1	37.0475	96.7633	50
2	37.1745	96.6618	50
3	37.1357	96.4608	50
4	37.1170	96.8775	50

Descripción: Estos datos fueron tomados en cuadruplicado para calcular la densidad de la vinaza concentrada. Temperatura del laboratorio de 24.1 ±0.05 °C.

Cuadro 16. Ajuste de pH inicial de vinaza concentrada con hidróxido de sodio.

pH de vinaza concentrada	Volumen de NaOH añadido (mL)	Volumen de NaOH total (mL)	Temperatura de medición (°C)
4.02±0.005	0±0.5	0±0.5	22.0±0.05
5.18±0.005	10±0.5	10±0.5	22.2±0.05
5.35±0.005	20±0.5	30±0.5	22.8±0.05
5.71±0.005	30±0.5	60±0.5	24.0±0.05
6.33±0.005	30±0.5	90±0.5	24.2±0.05
7.1±0.005	20±0.5	110±0.5	24.0±0.05

Descripción: El pH de la vinaza añadida a los reactores fue ajustado hasta 7.0 – 7.5, para favorecer la producción de biogás. El ajuste fue realizado con una solución de Hidróxido de sodio al 10% y se llegó a un pH de 7.1.

Cuadro 17. Datos medidos para la obtención de ST y SV de vinaza por el método gravimétrico.

No.	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	Volumen (ml)
1	40.26±0.0005	47.10±0.0005	42.96±0.0005	15.00±0.5
2	40.55±0.0005	47.55±0.0005	43.33±0.0005	15.00±0.5
3	38.47±0.0005	45.12±0.0005	41.10±0.0005	15.00±0.5
4	41.36±0.0005	48.53±0.0005	41.60±0.0005	15.00±0.5

Descripción: Estos datos corresponden a los pesos y volumen medido para la prueba gravimétrica de ST y SV. Donde W1 es el peso del crisol con tapadera vacío, W2 es el peso del crisol con tapadera y la muestra seca y W3 es el peso del crisol con tapadera y la muestra después de calcinación en mufla. La muestra evaluada fue la vinaza concentrada alimentada al sistema.

Cuadro 18. Datos medidos para la obtención de ST y SV de sobrenadante por el método gravimétrico.

No. Reactor	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	Volumen (ml)
1	29.70±0.0005	30.40±0.0005	30.10±0.0005	15.00±0.5
2	29.69±0.0005	30.44±0.0005	30.04±0.0005	15.00±0.5
3	29.82±0.0005	30.79±0.0005	30.18±0.0005	15.00±0.5
4	29.75±0.0005	30.53±0.0005	30.13±0.0005	15.00±0.5
5	32.151±0.0005	32.52±0.0005	32.384±0.0005	15.00±0.5
6	32.06±0.0005	32.39±0.0005	32.26±0.0005	15.00±0.5
7	33.16±0.0005	33.55±0.0005	33.404±0.0005	15.00±0.5
8	32.15±0.0005	32.457±0.0005	32.331±0.0005	15.00±0.5
9	53.53±0.0005	54.25±0.0005	53.98±0.0005	15.00±0.5
10	53.8±0.0005	54.52±0.0005	54.24±0.0005	15.00±0.5
11	55.4±0.0005	56.156±0.0005	55.887±0.0005	15.00±0.5
12	53.70±0.0005	54.399±0.0005	54.133±0.0005	15.00±0.5

Descripción: Estos datos corresponden a los pesos y volumen medido para la prueba gravimétrica de ST y SV. Donde W1 es el peso del crisol con tapadera vacío, W2 es el peso del crisol con tapadera y la muestra seca y W3 es el peso del crisol con tapadera y la muestra después de calcinación en mufla. La muestra evaluada fueron los sobrenadantes de los 12 reactores.

Cuadro 19. Solución de Hidróxido de Sodio al 10% desplazada en sistema reactor-purificador del blanco.

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)
24	2±5
48	5±5
72	10±5
96	40±5
120	50±5
144	50±5
168	75±5
192	90±5
216	100±5
240	100±5
264	125±5
288	150±5
312	150±5
336	160±5
360	170±5
384	190±5
408	200±5
432	200±5
456	230±5
480	250±5
504	260±5
528	275±5
552	290±5
576	300±5
600	310±5
624	340±5
648	350±5
672	360±5
696	370±5
720	380±5
744	400±5
768	410±5
792	420±5
816	440±5
840	450±5

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)
864	460±5
888	480±5
912	490±5
936	500±5
960	500±5
984	510±5
1008	520±5
1032	520±5
1056	530±5
1080	540±5
1104	550±5

Descripción: Estos datos fueron medidos a una temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm. La cantidad de líquido desplazado (hidróxido de sodio con dióxido de carbono disuelto) registrada en este cuadro muestra la producción del blanco (reactor 0).

Cuadro 20. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:50.

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
24	10±5	10±5	15±5	10±5
48	20±5	25±5	50±5	15±5
72	25±5	30±5	90±5	20±5
96	100±5	160±5	200±5	150±5
120	300±5	350±5	290±5	350±5
144	360±5	410±5	330±5	410±5
168	440±5	490±5	430±5	470±5
192	540±5	580±5	500±5	560±5
216	660±5	700±5	620±5	640±5
240	680±5	720±5	650±5	660±5
264	710±5	760±5	670±5	660±5
288	740±5	810±5	700±5	670±5
312	760±5	840±5	720±5	690±5
336	770±5	850±5	725±5	700±5
360	800±5	880±5	740±5	720±5
384	810±5	900±5	750±5	740±5
408	830±5	920±5	770±5	760±5
432	840±5	920±5	770±5	760±5
456	850±5	930±5	780±5	770±5

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
480	880±5	960±5	800±5	800±5
504	900±5	990±5	830±5	820±5
528	910±5	990±5	830±5	820±5
552	910±5	1010±5	830±5	830±5
576	920±5	1020±5	840±5	840±5
600	950±5	1040±5	850±5	860±5
624	980±5	1065±5	860±5	875±5
648	1000±5	1090±5	880±5	890±5
672	1020±5	1100±5	905±5	920±5
696	1030±5	1115±5	910±5	935±5
720	1040±5	1140±5	925±5	940±5
744	1050±5	1160±5	930±5	940±5
768	1070±5	1170±5	950±5	950±5
792	1090±5	1210±5	980±5	960±5
816	1110±5	1230±5	1000±5	980±5
840	1120±5	1250±5	1010±5	990±5
864	1130±5	1270±5	1020±5	1010±5
888	1150±5	1270±5	1050±5	1020±5
912	1160±5	1280±5	1070±5	1030±5
936	1180±5	1290±5	1080±5	1030±5
960	1200±5	1300±5	1120±5	1050±5
984	1210±5	1310±5	1130±5	1060±5
1008	1220±5	1320±5	1135±5	1065±5
1032	1220±5	1330±5	1140±5	1070±5
1056	1230±5	1330±5	1140±5	1070±5
1080	1240±5	1340±5	1150±5	1080±5
1104	1240±5	1340±5	1150±5	1090±5

Descripción: Estos datos fueron medidos a una temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm. La cantidad de líquido desplazado (hidróxido de sodio con dióxido de carbono disuelto) registrada en este cuadro muestra la producción de la relación inóculo/sustrato 50:50 m/v (reactor 1, 2, 3 y 4).

Cuadro 21. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:25.

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 5	Reactor 6	Reactor 7	Reactor 8
24±5	5±5	10±5	5±5	10±5
48±5	10±5	10±5	10±5	15±5
72±5	20±5	20±5	20±5	20±5
96±5	30±5	70±5	25±5	60±5
120±5	40±5	160±5	40±5	180±5
144±5	40±5	200±5	50±5	210±5
168±5	50±5	250±5	70±5	270±5
192±5	60±5	290±5	90±5	310±5
216±5	70±5	310±5	100±5	340±5
240±5	80±5	340±5	120±5	370±5
264±5	90±5	370±5	140±5	400±5
288±5	100±5	410±5	160±5	440±5
312±5	110±5	430±5	180±5	460±5
336±5	120±5	450±5	190±5	470±5
360±5	130±5	490±5	220±5	510±5
384±5	150±5	490±5	250±5	520±5
408±5	160±5	500±5	260±5	560±5
432±5	160±5	550±5	300	570
456±5	160±5	570±5	320±5	580±5
480±5	180±5	600±5	350±5	640±5
504±5	200±5	610±5	370±5	680±5
528±5	200±5	620±5	380±5	690±5
552±5	205±5	640±5	390±5	720±5
576±5	210±5	650±5	410±5	750±5
600±5	230±5	670±5	430±5	790±5
624±5	240±5	720±5	450±5	820±5
648±5	250±5	740±5	480±5	880±5
672±5	270±5	780±5	490±5	940±5
696±5	280±5	790±5	500±5	980±5
720±5	290±5	820±5	510±5	1010±5
744±5	300±5	850±5	520±5	1090±5
768±5	310±5	880±5	540±5	1140±5
792±5	330±5	890±5	560±5	1170±5
816±5	340±5	900±5	570±5	1190±5

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 5	Reactor 6	Reactor 7	Reactor 8
840±5	350±5	900±5	580±5	1200±5
864±5	360±5	920±5	590±5	1210±5
888±5	380±5	920±5	610±5	1240±5
912±5	390±5	930±5	620±5	1260±5
936±5	410±5	940±5	630±5	1290±5
960±5	430±5	940±5	630±5	1300±5
984±5	440±5	950±5	640±5	1310±5
1008±5	445±5	955±5	645±5	1315±5
1032±5	450±5	960±5	645±5	1320±5
1056±5	455±5	960±5	650±5	1320±5
1080±5	455±5	970±5	660±5	1330±5
1104±5	465±5	980±5	660±5	1330±5

Descripción: Estos datos fueron medidos a una temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm. La cantidad de líquido desplazado (hidróxido de sodio con dióxido de carbono disuelto) registrada en este cuadro muestra la producción de la relación inóculo/sustrato 50:25 m/v (reactor 5, 6, 7 y 8).

Cuadro 22. Solución de NaOH al 10% desplazada en sistema reactor-purificador relación 50:75.

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 9	Reactor 10	Reactor 11	Reactor 12
24	5±5	5±5	5±5	5±5
48	10±5	15±5	20±5	25±5
72	25±5	20±5	30±5	40±5
96	30±5	35±5	155±5	170±5
120	40±5	40±5	300±5	240±5
144	40±5	40±5	500±5	490±5
168	60±5	60±5	570±5	550±5
192	60±5	100±5	580±5	570±5
216	70±5	130±5	610±5	620±5
240	80±5	140±5	630±5	630±5
264	90±5	160±5	650±5	630±5
288	100±5	170±5	710±5	640±5
312	120±5	190±5	740±5	670±5
336	120±5	200±5	750±5	690±5
360	130±5	210±5	760±5	720±5
384	140±5	215±5	770±5	740±5
408	150±5	220±5	800±5	770±5

Tiempo (h)	Líquido desplazado acumulado (mL)			
	Reactor 9	Reactor 9	Reactor 9	Reactor 9
432	150±5	220±5	800±5	775±5
456	150±5	230±5	810±5	790±5
480	180±5	250±5	830±5	820±5
504	190±5	270±5	850±5	840±5
528	190±5	270±5	860±5	850±5
552	190±5	280±5	870±5	860±5
576	190±5	280±5	870±5	875±5
600	200±5	290±5	890±5	900±5
624	210±5	295±5	900±5	905±5
648	220±5	300±5	930±5	905±5
672	220±5	320±5	950±5	910±5
696	230±5	330±5	960±5	920±5
720	230±5	340±5	970±5	920±5
744	230±5	350±5	980±5	930±5
768	240±5	360±5	1000±5	940±5
792	240±5	370±5	1020±5	960±5
816	240±5	370±5	1030±5	970±5
840	250±5	380±5	1040±5	980±5
864	250±5	390±5	1050±5	990±5
888	255±5	390±5	1060±5	1000±5
912	260±5	410±5	1080±5	1010±5
936	260±5	420±5	1090±5	1030±5
960	270±5	440±5	1110±5	1050±5
984	280±5	450±5	1120±5	1080±5
1008	280±5	450±5	1125±5	1080±5
1032	290±5	455±5	1130±5	1080±5
1056	295±5	460±5	1130±5	1090±5
1080	300±5	460±5	1135±5	1090±5
1104	300±5	460±5	1140±5	1100±5

Descripción: Estos datos fueron medidos a una temperatura ambiente promedio de 21°C y presión atmosférica promedio de 0.838 atm. La cantidad de líquido desplazado (hidróxido de sodio con dióxido de carbono disuelto) registrada en este cuadro muestra la producción de la relación inóculo/sustrato 50:75 m/v (reactor 9, 10, 11 y 12).

Cuadro 23. Costos y cantidad de materia prima para operación.

Cantidad	Unidad	Material	Costo individual (Q)	Costo total (Q)	Costo total por reactor (Q)
450	ml	Vinaza	Q -	Q -	Q -
650	g	Estiércol vacuno	Q 0.39	Q 253.50	Q 19.50
2.1	kg	NaOH	Q 30.69	Q 64.45	Q 4.96
TOTAL				Q 317.95	Q 24.46

Descripción: Estos datos corresponden a los costos de materia prima para la operación de los reactores cada 6 semanas, operando tipo batch. La vinaza no representa ningún costo adicional debido a que este análisis está dirigido a la implementación de biodigestores en ingenios y destilerías de bioetanol en donde la vinaza es un residuo.

Cuadro 24. Entradas y salidas de sistemas reactor-purificador.

Reactor	ENTRADAS			SALIDAS		
	REACTOR		PURIFICADOR	PURIFICADOR		
	V (mL)	E (g)	A (mL)	NaOH entrada (mL)	NaOH salida (mL)	B1 (mL)
0	0.0	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	550.0±5	548.8±5
1	50.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1240.0±5	1237.3±5
2	50.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1340.0±5	1337.0±5
3	50.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1150.0±5	1147.5±5
4	50.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1090.0±5	1087.6±5
5	25.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	465.0±5	464.0±5
6	25.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	980.0±5	977.8±5
7	25.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	660.0±5	658.5±5
8	25.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1330.0±5	1327.1±5
9	75.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	300.0±5	299.3±5
10	75.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	460.0±5	459.0±5
11	75.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1140.0±5	1137.5±5
12	75.0±0.5	50±0.05	250.0±0.5	1500.0±5	1100.0±5	1097.6±5

Descripción: Se describen las corrientes volumétricas del sistema reactor-purificador. Donde V es la cantidad de vinaza añadida, A es la cantidad de agua, E es la cantidad de estiercol, NaOH entrada es la cantidad de hidróxido de sodio al 10% añadido al purificador, B1 es la cantidad de biogás generada y NaOH salida es la cantidad de hidróxido de sodio desplazado del purificador.

C. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1. Determinación del tamaño de muestra experimental.

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2} = \frac{(2.58)^2(0.95)(0.05)}{(0.3)^2} = 3.5 \approx 4.0$$

Descripción: Este tamaño de muestra se empleó para la caracterización de la vinaza y para cada relación de inóculo/sustrato analizada.

Cálculo 2. Determinación de humedad promedio.

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{65.44\% + 61.63\% + 59.38\% + 61.18\%}{4} = 61.9075\%$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todas las mediciones y datos obtenidos en cuadruplicado.

Cálculo 3. Determinación de incertidumbre de humedad promedio con incertidumbre de sumas.

$$e_{n+1} = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2} = \sqrt{(0.001)^2 + (0.001)^2 + (0.001)^2 + (0.001)^2} = 0.002$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todas las incertidumbres de sumas.

Cálculo 4. Determinación de densidad de vinaza cruda.

$$\rho = \frac{\text{peso}_{\text{probeta+muestra}}(g) + \text{peso}_{\text{probeta}}(g)}{\text{volumen probeta (mL)}} = \frac{96.7633 \text{ g} - 37.0475 \text{ g}}{50 \text{ mL}} = 1.1943 \text{ g/mL}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para calcular la densidad de la vinaza en cuadruplicado. Posteriormente, se determinó la densidad promedio.

Cálculo 5. Determinación de incertidumbre de densidad promedio.

$$R = \frac{X * Y}{Z}$$
$$\delta R = |R| * \sqrt{\left(\frac{\delta X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{Z}\right)^2}$$
$$\delta R = 1.1943 \frac{\text{g}}{\text{mL}} * \sqrt{\left(\frac{0.0001414 \text{ g}}{96.7633 - 37.0475 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.5 \text{ mL}}{50 \text{ mL}}\right)^2} = 0.0119 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para determinar la incertidumbre de multiplicación y división de los datos obtenidos en cuadruplicado.

Cálculo 6. Determinación de sólidos totales de muestra de vinaza.

$$ST = \frac{W_2 - W_1 (mg)}{vol (L)} = \frac{47.10 - 40.26 g}{15 mL} * \frac{1000 mg}{1 g} * \frac{1000 mL}{1L} = 455640.0 ppm$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para determinar los sólidos totales en la vinaza cruda y en el sobrenadante en cuadruplicado, para determinar los sólidos totales en la muestra de vinaza.

Cálculo 7. Determinación de sólidos volátiles de muestra de vinaza.

$$SV = \frac{W_2 - W_3}{vol}$$
$$SV = \frac{W_2 - W_3 (mg)}{vol (L)} = \frac{47.10 - 42.96 g}{15 mL} * \frac{1000 mg}{1 g} * \frac{1000 mL}{1L} = 275846.7 ppm$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para determinar los sólidos volátiles en la vinaza cruda y en el sobrenadante en cuadruplicado, para determinar los sólidos volátiles en la muestra de vinaza.

Cálculo 8. Determinación de sólidos fijos promedio de muestra de vinaza.

$$SV = \frac{W_2 - W_3}{vol}$$
$$SV = \frac{W_3 - W_1 (mg)}{vol (L)} = \frac{42.96 - 40.26 g}{15 mL} * \frac{1000 mg}{1 g} * \frac{1000 mL}{1L} = 179793.3 ppm$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para determinar los sólidos fijos en la vinaza cruda y en el sobrenadante en cuadruplicado, para determinar los sólidos fijos en la muestra de vinaza.

Cálculo 9. Determinación de eficiencia de biodigestión.

$$Eficiencia (\%) = \frac{SV_{entrada} - SV_{salida}}{SV_{entrada}} \times 100 = \frac{321608.3 ppm - 20213.3 ppm}{321608.3 ppm} \times 100$$
$$= 93.71\%$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para todos los reactores y se calculó el promedio en cada relación.

Cálculo 10. Determinación de biogás producido a partir del líquido desplazado.

$$V_2 = \frac{P_1 * V_1 * T_2}{T_1 * P_2} = \frac{(1 \text{ atm})(2 \text{ mL líquido desplazado})(21 \text{ °C})}{(25 \text{ °C})(0.838 \text{ atm})} = 2.0 \text{ mL biogás}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para calcular el volumen de biogás producido en relación con la cantidad de líquido desplazado. Para esto, se utilizó la relación de gases ideales y las condiciones ambientales en las que se realizó el experimento (21 °C y 0.838 atm). El procedimiento se repitió para todos los reactores.

Cálculo 11. Determinación de biogás producido por la adición de vinaza.

$$Biogás_{vinaza} = Biogás_{vinaza+estiércol} - Biogás_{estiércol} = 1202.34 \text{ mL} - 548.78 \text{ mL} = 653.55 \text{ mL}$$

Descripción: El biogás producido por el estiércol se obtuvo instalando un reactor blanco (sin sustrato). La producción final de este se restó a la producción de biogás promedio de cada relación para obtener la cantidad de biogás producido por la adición de vinaza.

Cálculo 12. Determinación de la producción teórica de biogás.

Suponiendo que los $SV = f(C, H, O, N)$ y la fórmula química es $C_c H_h O_o N_n$, se determinó la cantidad de átomos de Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno, asumiendo una base de 1 átomo de carbono:

$$c = 1$$

$$h = \frac{308 * DQO + 704 * N_{org}}{49 * DQO - 64 * N_{org} + 112 * SV}$$

$$= \frac{308(44.39 \text{ g } O_2/kg) + 704(7.3 \text{ g } N_{org}/kg)}{49(44.39 \text{ g } O_2/kg) - 64(7.3 \text{ g } N_{org}/kg) + 112(38.7 \text{ g } ODM/kg)} = 3.11$$

$$o = \frac{224 * SV - 56 * DQO - 304 * N_{org}}{49 * DQO - 64 * N_{org} + 112 * SV}$$

$$= \frac{224(38.7 \text{ g } ODM/kg) - 56(44.39 \text{ g } O_2/kg) - 304(7.3 \text{ g } N_{org}/kg)}{49(44.39 \text{ g } O_2/kg) - 64(7.3 \text{ g } N_{org}/kg) + 112(38.7 \text{ g } ODM/kg)} = 0.657$$

$$n = \frac{352 * N_{org}}{49 * DQO - 64 * N_{org} + 112 * SV}$$

$$= \frac{352(7.3 \text{ g } N_{org}/kg)}{49(44.39 \text{ g } O_2/kg) - 64(7.3 \text{ g } N_{org}/kg) + 112(38.7 \text{ g } ODM/kg)} = 0.425$$

Con el volumen normal de 1 mol de gas (NVMG), se obtiene:

$$\text{Biogas} \left(\frac{L}{kg} \right) = \frac{ODM}{12 + h + 16 * o + 14 * n} * (1 - n) * NVMG$$

$$\text{Biogas} \left(\frac{L}{kg} \right) = \frac{38.7 \text{ g ODM/kg}}{12 + 3.11 + 16 * 0.657 + 14 * 0.425} * (1 - 0.425) \left(22.41 \frac{L}{mol} \right) = 15.81$$

Para cada relación de vinaza, se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Biogás (mL)} = 15.81 \frac{L}{kg} * 50 \text{ mL} * 1.19 \frac{kg}{L} = 942.31 \text{ mL biogás}$$

Este cálculo se repitió para el resto de las relaciones de vinaza: 50 mL, 25 mL y 75 mL.

Cálculo 13. Determinación de entrada másica de vinaza.

$$V (g) = V(mL) * \rho_{vinaza}$$

$$V (g) = 50 \text{ mL} * 1.19 \frac{g}{mL} = 59.6 \text{ g de vinaza}$$

Descripción: Este cálculo se repitió para determinar las masas de entrada de vinaza en cada reactor.

Cálculo 14. Determinación de entrada másica de agua.

$$A (g) = A(mL) * \rho_{agua}$$

$$A (g) = 250 \text{ mL} * 0.9976 \frac{g}{mL} = 249.4 \text{ g de vinaza}$$

Descripción: Este cálculo se repitió para determinar las masas de entrada de agua en cada reactor.

Cálculo 15. Determinación de entrada másica de hidróxido de sodio al 10%.

$$NaOH_{entrada} (g) = NaOH_{entrada} (mL) * \rho_{NaOH 10\%}$$

$$NaOH_{entrada} (g) = 1500 \text{ mL} * 1.11 \frac{g}{mL} = 1665 \text{ g de NaOH}$$

Descripción: Este cálculo se repitió para determinar las masas de entrada de hidróxido en cada purificador. La densidad es teórica a 21°C.

Cálculo 16. Determinación de densidad de biogás.

$$\begin{aligned}\rho_{biogás} &= x_{CH_4}\rho_{CH_4} + x_{H_2S}\rho_{H_2S} + x_{H_2}\rho_{H_2} + x_{O_2}\rho_{O_2} + x_{N_2}\rho_{N_2} + x_{CO}\rho_{CO} \\ \rho_{biogás} &= (0.55)\left(0.66\frac{g}{mL}\right) + (0.03)\left(0.00119\frac{g}{mL}\right) + (0.01)\left(0.0899\frac{g}{mL}\right) \\ &\quad + (0.02)\left(0.00071\frac{g}{mL}\right) + (0.02)\left(0.0017\frac{g}{mL}\right) + (0.005)\left(0.00114\frac{g}{mL}\right) \\ &= 0.383\frac{g}{mL}\end{aligned}$$

Descripción: Las relaciones corresponden a la calidad del biogás y las densidades son teóricas. Este cálculo se realizó para determinar la cantidad másica de biogás producida.

Cálculo 17. Determinación de salida másica de biogás.

$$\begin{aligned}B(g) &= B(mL) * \rho_{biogás} \\ B(g) &= 548.8 mL * 0.383\frac{g}{mL} = 210.4 g \text{ de biogás}\end{aligned}$$

Descripción: Este cálculo se repitió para determinar las masas de salida de biogás para cada reactor.

Cálculo 18. Balance de materia de los sistemas reactor-purificador.

Los balances son:

$$\begin{aligned}\text{Balance reactor: } &V + E + A \rightarrow B_1 + Ac_1 \\ \text{Balance purificador: } &B_1 + NaOH_{entrada} \rightarrow B_2 + NaOH_{salida} + Ac_2\end{aligned}$$

Considerando que:

$$Ac_2 = NaOH_{entrada} - NaOH_{salida}$$

Se obtiene que:

$$B_1 = B_2$$

De forma que:

$$\begin{aligned}Ac_1 &= V + E + A - B_2 \\ Ac_1 &= 59.6 g + 50 g + 249.4 g - 309.3 g = 49.7 g\end{aligned}$$

Descripción: Este cálculo se utilizó para determinar el balance de masa de todo el proceso para cada reactor.

Cálculo 19. Obtención de producción acumulada de biogás experimental en relación con los sólidos volátiles del sustrato.

$$B(t)_{experimental} = \frac{11.23 \text{ mL biogás}_{estiércol+vinaza}}{4824.1 \text{ mg SV}_{vinaza}} = 0.00230 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para cada tiempo de medición experimental de biogás en cada una de las relaciones empleadas.

Cálculo 20. Obtención de producción potencial de metano por el sustrato para cada relación.

$$B_{o,proporción\ 50:50} = \frac{1202.34 \text{ mL biogás} - 548.78 \text{ mL biogás}}{4824.1 \text{ mg SV}_{vinaza}} = 0.135 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}$$

$$B_{o,proporción\ 50:25} = \frac{856.85 \text{ mL biogás} - 548.78 \text{ mL biogás}}{4824.1 \text{ mg SV}_{vinaza}} = 0.0638 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}$$

$$B_{o,proporción\ 50:75} = \frac{748.34 \text{ mL biogás} - 548.78 \text{ mL biogás}}{4824.1 \text{ mg SV}_{vinaza}} = 0.0414 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para dar un valor de referencia al ajustar los datos experimentales en Berkeley Madonna para la obtención del modelo cinético.

Cálculo 21. Obtención de producción acumulada de biogás en relación con los sólidos volátiles del sustrato empleando el modelo cinético de cada relación y porcentaje de error.

$$B(t) = 0.257 (1 - e^{-0.00259(24 \text{ h})}) = 0.0155 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}$$

$$\text{Porcentaje de error (\%)} = \frac{\left| 0.00230 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}} - 0.0155 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}} \right|}{0.00230 \frac{\text{mL}}{\text{mg SV}}} = 566\%$$

Descripción: Este cálculo se aplicó para cada modelo empleando los datos cinéticos dados por el software Berkeley Madonna. De la misma manera, el cálculo se aplicó para cada relación y se obtuvo el porcentaje de error promedio.

D. DATOS CALCULADOS DEL EXPERIMENTO

Cuadro 25. Densidad por corrida de vinaza concentrada.

No. De corrida	Densidad (g/mL)
1	1.194±0.000141
2	1.190±0.000141
3	1.186±0.000141
4	1.195±0.000141

Cuadro 26. Sólidos totales, fijos y volátiles en muestra de vinaza cruda.

No. Corrida	Sólidos totales fijos (ppm)	Sólidos totales volátiles (ppm)	Sólidos totales (ppm)
1	179793.3±5993.1	275846.7±9194.9	455640.0±15188.0
2	185713.3±6190.4	280946.7±9364.9	466660.0±15555.3
3	175533.3±5851.1	267953.3±8931.8	443486.7±14782.9
4	16420.0±547.4	461686.7±15389.6	478106.7±15936.9
PROMEDIO	139365.0±10429.5	321608.3±22110.2	460973.3±30743.5

Descripción: Estos datos fueron calculados como se muestra en el Cálculo 6, 7 y 8. Se obtuvo el promedio de las pruebas realizadas en cuadruplicado.

Cuadro 27. Sólidos totales, fijos y volátiles en muestra de vinaza cruda.

No. Corrida	Sólidos totales fijos (ppm)	Sólidos totales volátiles (ppm)	Sólidos totales (ppm)
1	26433.3±881.2	20213.3±673.8	46646.7±1554.9
2	23333.3±777.8	26666.7±888.9	50000.0±1666.7
3	24493.3±816.5	40393.3±1346.5	64886.7±2162.9
4	25333.3±844.5	26666.7±888.9	52000.0±1733.3
5	15533.3±517.2	9000.0±300.1	24533.3±817.8
6	13140.0±438.1	8660.0±288.8	21800.0±726.7
7	16533.3±551.2	9400.0±313.5	25933.3±864.5
8	12400.0±413.4	8400.0±280.2	20800.0±693.4
9	30333.3±1011.2	17686.7±589.6	48020.0±1600.7
10	29533.3±984.5	18466.7±615.6	48000.0±1600.0
11	32466.7±1082.3	17933.3±597.9	50400.0±1680.0
12	29000.0±966.7	17733.3±591.2	46733.3±1557.8
PROMEDIO	22918.2±1630.2	18273.3±1642.6	41191.5±3191.6

Descripción: Estos datos fueron calculados como se muestra en el Cálculo 6, 7 y 8. Se obtuvo el promedio de las pruebas realizadas en cuadruplicado para cada reactor.

Cuadro 28. Biogás producido teórico para cada relación de inóculo/sustrato.

Relación inóculo/sustrato	Biogás por reactor (mL)
50:50	942.31
50:25	471.15
50:75	1413.5

Descripción: Estos valores fueron determinados de manera teórica, asumiendo que la cantidad de sólidos volátiles es una función de la cantidad de moles de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en el medio (ver Cálculo 12).

Cuadro 29. Biogás producido en el tiempo de digestión del blanco (relación 50:0 m/v).

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)
24	2.00±5
48	4.99±5
72	9.98±5
96	39.91±5
120	49.89±5
144	49.89±5
168	74.83±5
192	89.80±5
216	99.78±5
240	99.78±5
264	124.72±5
288	149.67±5
312	149.67±5
336	159.65±5
360	169.62±5
384	189.58±5
408	199.56±5
432	199.56±5
456	229.49±5
480	249.45±5
504	259.43±5
528	274.39±5
552	289.36±5
576	299.34±5
600	309.32±5
624	339.25±5
648	349.23±5

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)
672	359.20±5
696	369.18±5
720	379.16±5
744	399.12±5
768	409.09±5
792	419.07±5
816	439.03±5
840	449.01±5
864	458.98±5
888	478.94±5
912	488.92±5
936	498.90±5
960	498.90±5
984	508.87±5
1008	518.85±5
1032	518.85±5
1056	528.83±5
1080	538.81±5
1104	548.78±5

Descripción: Estos datos fueron calculados mediante un ajuste de presión y temperatura entre las condiciones estándares y las condiciones reales de experimentación, empleando la ley de gases ideales (ver Cálculo 10). La cantidad de biogás registrada en este cuadro muestra la producción del blanco (reactor 0).

Cuadro 30. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:50 m/v.

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
24	9.98±5	9.98±5	14.97±5	9.98±5
48	19.96±5	24.94±5	49.89±5	14.97±5
72	24.94±5	29.93±5	89.80±5	19.96±5
96	99.78±5	159.65±5	199.56±5	149.67±5
120	299.34±5	349.23±5	289.36±5	349.23±5
144	359.20±5	409.09±5	329.27±5	409.09±5
168	439.03±5	488.92±5	429.05±5	468.96±5
192	538.81±5	578.72±5	498.90±5	558.76±5
216	658.54±5	698.45±5	618.63±5	638.59±5
240	678.50±5	718.41±5	648.56±5	658.54±5
264	708.43±5	758.32±5	668.52±5	658.54±5

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
288	738.37±5	808.21±5	698.45±5	668.52±5
312	758.32±5	838.14±5	718.41±5	688.48±5
336	768.30±5	848.12±5	723.40±5	698.45±5
360	798.23±5	878.06±5	738.37±5	718.41±5
384	808.21±5	898.01±5	748.34±5	738.37±5
408	828.17±5	917.97±5	768.30±5	758.32±5
432	838.14±5	917.97±5	768.30±5	758.32±5
456	848.12±5	927.95±5	778.28±5	768.30±5
480	878.06±5	957.88±5	798.23±5	798.23±5
504	898.01±5	987.81±5	828.17±5	818.19±5
528	907.99±5	987.81±5	828.17±5	818.19±5
552	907.99±5	1007.77±5	828.17±5	828.17±5
576	917.97±5	1017.75±5	838.14±5	838.14±5
600	947.90±5	1037.70±5	848.12±5	858.10±5
624	977.84±5	1062.65±5	858.10±5	873.07±5
648	997.79±5	1087.59±5	878.06±5	888.03±5
672	1017.75±5	1097.57±5	903.00±5	917.97±5
696	1027.72±5	1112.54±5	907.99±5	932.93±5
720	1037.70±5	1137.48±5	922.96±5	937.92±5
744	1047.68±5	1157.44±5	927.95±5	937.92±5
768	1067.64±5	1167.42±5	947.90±5	947.90±5
792	1087.59±5	1207.33±5	977.84±5	957.88±5
816	1107.55±5	1227.28±5	997.79±5	977.84±5
840	1117.53±5	1247.24±5	1007.77±5	987.81±5
864	1127.50±5	1267.19±5	1017.75±5	1007.77±5
888	1147.46±5	1267.19±5	1047.68±5	1017.75±5
912	1157.44±5	1277.17±5	1067.64±5	1027.72±5
936	1177.39±5	1287.15±5	1077.61±5	1027.72±5
960	1197.35±5	1297.13±5	1117.53±5	1047.68±5
984	1207.33±5	1307.11±5	1127.50±5	1057.66±5
1008	1217.30±5	1317.08±5	1132.49±5	1062.65±5
1032	1217.30±5	1327.06±5	1137.48±5	1067.64±5
1056	1227.28±5	1327.06±5	1137.48±5	1067.64±5
1080	1237.26±5	1337.04±5	1147.46±5	1077.61±5
1104	1237.26±5	1337.04±5	1147.46±5	1087.59±5

Descripción: Estos datos fueron calculados mediante un ajuste de presión y temperatura entre las condiciones estándares y las condiciones reales de experimentación, empleando la ley de gases ideales (ver Cálculo 10).

Cuadro 31. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:25 m/v.

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 5	Reactor 6	Reactor 7	Reactor 8
24	4.99±5	9.98±5	4.99±5	9.98±5
48	9.98±5	9.98±5	9.98±5	14.97±5
72	19.96±5	19.96±5	19.96±5	19.96±5
96	29.93±5	69.85±5	24.94±5	59.87±5
120	39.91±5	159.65±5	39.91±5	179.60±5
144	39.91±5	199.56±5	49.89±5	209.54±5
168	49.89±5	249.45±5	69.85±5	269.40±5
192	59.87±5	289.36±5	89.80±5	309.32±5
216	69.85±5	309.32±5	99.78±5	339.25±5
240	79.82±5	339.25±5	119.73±5	369.18±5
264	89.80±5	369.18±5	139.69±5	399.12±5
288	99.78±5	409.09±5	159.65±5	439.03±5
312	109.76±5	429.05±5	179.60±5	458.98±5
336	119.73±5	449.01±5	189.58±5	468.96±5
360	129.71±5	488.92±5	219.51±5	508.87±5
384	149.67±5	488.92±5	249.45±5	518.85±5
408	159.65±5	498.90±5	259.43±5	558.76±5
432	159.65±5	548.78±5	299.34±5	568.74±5
456	159.65±5	568.74±5	319.29±5	578.72±5
480	179.60±5	598.67±5	349.23±5	638.59±5
504	199.56±5	608.65±5	369.18±5	678.50±5
528	199.56±5	618.63±5	379.16±5	688.48±5
552	204.55±5	638.59±5	389.14±5	718.41±5
576	209.54±5	648.56±5	409.09±5	748.34±5
600	229.49±5	668.52±5	429.05±5	788.25±5
624	239.47±5	718.41±5	449.01±5	818.19±5
648	249.45±5	738.37±5	478.94±5	878.06±5
672	269.40±5	778.28±5	488.92±5	937.92±5
696	279.38±5	788.25±5	498.90±5	977.84±5
720	289.36±5	818.19±5	508.87±5	1007.77±5
744	299.34±5	848.12±5	518.85±5	1087.59±5
768	309.32±5	878.06±5	538.81±5	1137.48±5
792	329.27±5	888.03±5	558.76±5	1167.42±5
816	339.25±5	898.01±5	568.74±5	1187.37±5

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 5	Reactor 6	Reactor 7	Reactor 8
840	349.23±5	898.01±5	578.72±5	1197.35±5
864	359.20±5	917.97±5	588.70±5	1207.33±5
888	379.16±5	917.97±5	608.65±5	1237.26±5
912	389.14±5	927.95±5	618.63±5	1257.22±5
936	409.09±5	937.92±5	628.61±5	1287.15±5
960	429.05±5	937.92±5	628.61±5	1297.13±5
984	439.03±5	947.90±5	638.59±5	1307.11
1008	444.02±5	952.89±5	643.58±5	1312.10
1032	449.01±5	957.88±5	643.58±5	1317.08
1056	453.99±5	957.88±5	648.56±5	1317.08
1080	453.99±5	967.86±5	658.54±5	1327.06
1104	463.97±5	977.84±5	658.54±5	1327.06

Descripción: Estos datos fueron calculados mediante un ajuste de presión y temperatura entre las condiciones estándares y las condiciones reales de experimentación, empleando la ley de gases ideales (ver Cálculo 10). La cantidad de biogás registrada en este cuadro muestra la producción de la relación inóculo/sustrato 50:25 m/v (reactor 5, 6, 7 y 8).

Cuadro 32. Biogás producido en el tiempo de digestión en la relación 50:75 m/v.

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 9	Reactor 10	Reactor 11	Reactor 12
24	4.99±5	4.99	4.99	4.99
48	9.98±5	14.97±5	19.96±5	24.94±5
72	24.94±5	19.96±5	29.93±5	39.91±5
96	29.93±5	34.92±5	154.66±5	169.62±5
120	39.91±5	39.91±5	299.34±5	239.47±5
144	39.91±5	39.91±5	498.90±5	488.92±5
168	59.87±5	59.87±5	568.74±5	548.78±5
192	59.87±5	99.78±5	578.72±5	568.74±5
216	69.85±5	129.71±5	608.65±5	618.63±5
240	79.82±5	139.69±5	628.61±5	628.61±5
264	89.80±5	159.65±5	648.56±5	628.61±5
288	99.78±5	169.62±5	708.43±5	638.59±5
312	119.73±5	189.58±5	738.37±5	668.52±5
336	119.73±5	199.56±5	748.34±5	688.48±5
360	129.71±5	209.54±5	758.32±5	718.41±5
384	139.69±5	214.53±5	768.30±5	738.37±5
408	149.67±5	219.51±5	798.23±5	768.30±5

Tiempo (h)	Biogás producido (mL)			
	Reactor 9	Reactor 10	Reactor 11	Reactor 12
432	149.67±5	219.51±5	798.23±5	773.29±5
456	149.67±5	229.49±5	808.21±5	788.25±5
480	179.60±5	249.45±5	828.17±5	818.19±5
504	189.58±5	269.40±5	848.12±5	838.14±5
528	189.58±5	269.40±5	858.10±5	848.12±5
552	189.58±5	279.38±5	868.08±5	858.10±5
576	189.58±5	279.38±5	868.08±5	873.07±5
600	199.56±5	289.36±5	888.03±5	898.01±5
624	209.54±5	294.35±5	898.01±5	903.00±5
648	219.51±5	299.34±5	927.95±5	903.00±5
672	219.51±5	319.29±5	947.90±5	907.99±5
696	229.49±5	329.27±5	957.88±5	917.97±5
720	229.49±5	339.25±5	967.86±5	917.97±5
744	229.49±5	349.23±5	977.84±5	927.95±5
768	239.47±5	359.20±5	997.79±5	937.92±5
792	239.47±5	369.18±5	1017.75±5	957.88±5
816	239.47±5	369.18±5	1027.72±5	967.86±5
840	249.45±5	379.16±5	1037.70±5	977.84±5
864	249.45±5	389.14±5	1047.68±5	987.81±5
888	254.44±5	389.14±5	1057.66±5	997.79±5
912	259.43±5	409.09±5	1077.61±5	1007.77±5
936	259.43±5	419.07±5	1087.59±5	1027.72±5
960	269.40±5	439.03±5	1107.55±5	1047.68±5
984	279.38±5	449.01±5	1117.53±5	1077.61±5
1008	279.38±5	449.01±5	1122.51±5	1077.61±5
1032	289.36±5	453.99±5	1127.50±5	1077.61±5
1056	294.35±5	458.98±5	1127.50±5	1087.59±5
1080	299.34±5	458.98±5	1132.49±5	1087.59±5
1104	299.34±5	458.98±5	1137.48±5	1097.57±5

Descripción: Estos datos fueron calculados mediante un ajuste de presión y temperatura entre las condiciones estándares y las condiciones reales de experimentación, empleando la ley de gases ideales (ver Cálculo 10). La cantidad de biogás registrada en este cuadro muestra la producción de la relación inóculo/sustrato 50:75 m/v (reactor 9, 10, 11 y 12).

Cuadro 33. Biogás producido promedio de la digestión en cada una de las relaciones.

Tiempo (h)	Biogás producido promedio (mL)		
	Relación 50:50 m/v	Relación 50:25 m/v	Relación 50:75 m/v
24	11.23±10	7.48±10	4.99±10
48	27.44±10	11.23±10	17.46±10
72	41.16±10	19.96±10	28.69±10
96	152.16±10	46.15±10	97.28±10
120	321.79±10	104.77±10	154.66±10
144	376.67±10	124.72±10	266.91±10
168	456.49±10	159.65±10	309.32±10
192	543.80±10	187.09±10	326.78±10
216	653.55±10	204.55±10	356.71±10
240	676.00±10	227.00±10	369.18±10
264	698.45±10	249.45±10	381.66±10
288	728.39±10	276.89±10	404.11±10
312	750.84±10	294.35±10	429.05±10
336	759.57±10	306.82±10	439.03±10
360	783.27±10	336.75±10	453.99±10
384	798.23±10	351.72±10	465.22±10
408	818.19±10	369.18±10	483.93±10
432	820.68±10	394.13±10	485.18±10
456	830.66±10	406.60±10	493.91±10
480	858.10±10	441.52±10	518.85±10
504	883.04±10	463.97±10	536.31±10
528	885.54±10	471.46±10	541.30±10
552	893.02±10	487.67±10	548.78±10
576	903.00±10	503.88±10	552.53±10
600	922.96±10	528.83±10	568.74±10
624	942.91±10	556.27±10	576.22±10
648	962.87±10	586.20±10	587.45±10
672	984.07±10	618.63±10	598.67±10
696	995.30±10	636.09±10	608.65±10
720	1009.02±10	656.05±10	613.64±10
744	1017.75±10	688.48±10	621.12±10
768	1032.71±10	715.91±10	633.60±10
792	1057.66±10	735.87±10	646.07±10
816	1077.61±10	748.34±10	651.06±10

Tiempo (h)	Biogás producido promedio (mL)		
	Relación 50:50 m/v	Relación 50:25 m/v	Relación 50:75 m/v
840	1090.09±10	755.83±10	661.04±10
864	1105.05±10	768.30±10	668.52±10
888	1120.02±10	785.76±10	674.76±10
912	1132.49±10	798.23±10	688.48±10
936	1142.47±10	815.69±10	698.45±10
960	1164.92±10	823.18±10	715.91±10
984	1174.90±10	833.16±10	730.88±10
1008	1182.38±10	838.14±10	732.13±10
1032	1187.37±10	841.89±10	737.12±10
1056	1189.87±10	844.38±10	742.11±10
1080	1199.84±10	851.86±10	744.60±10
1104	1202.34±10	856.85±10	748.34±10

Descripción: Estos datos fueron obtenidos calculando el promedio de la producción de biogás por cada reactor correspondiente a cada relación de inóculo/sustrato empleada.

Cuadro 34. Eficiencias de biodigestores en relación con el contenido de SV.

No. Reactor	Relación (m/v)	Sólidos volátiles entrada (ppm)	Sólidos volátiles sobrenadante (ppm)	Eficiencia (%)
1	50:50	321608.3	20213.3	93.71%
2	50:50	321608.3	26666.7	91.71%
3	50:50	321608.3	40393.3	87.44%
4	50:50	321608.3	26666.7	91.71%
5	50:25	321608.3	9000.0	97.20%
6	50:25	321608.3	8660.0	97.31%
7	50:25	321608.3	9400.0	97.08%
8	50:25	321608.3	8400.0	97.39%
9	50:75	321608.3	17686.7	94.50%
10	50:75	321608.3	18466.7	94.26%
11	50:75	321608.3	17933.3	94.42%
12	50:75	321608.3	17733.3	94.49%
13	75:54	321608.3	18273.3	94.32%

Descripción: Los valores de eficiencia de digestión fueron obtenidos como se muestra en el cálculo 8. Estos corresponden únicamente a la eficiencia de la biodigestión en cuanto a reducción de materia orgánica dentro del reactor.

Cuadro 35. Entradas y salidas de sistemas reactor-purificador.

Reactor	ENTRADAS				SALIDAS			
	REACTOR			PURIFICADOR	REACTOR		PURIFICADOR	
	V (g)	A (g)	E (g)	NaOH entrada (g)	Ac 1 (g)	B1 (g)	NaOH salida (mL)	Ac 2 (g)
0	0.0	249.4	50.0	1665.0	162.2	137.2	550.0	1054.5
1	59.6	249.4	50.0	1665.0	49.7	309.3	1240.0	288.6
2	59.6	249.4	50.0	1665.0	24.7	334.3	1340.0	177.6
3	59.6	249.4	50.0	1665.0	72.1	286.9	1150.0	388.5
4	59.6	249.4	50.0	1665.0	87.1	271.9	1090.0	455.1
5	29.8	249.4	50.0	1665.0	213.2	116.0	465.0	1148.9
6	29.8	249.4	50.0	1665.0	84.7	244.5	980.0	577.2
7	29.8	249.4	50.0	1665.0	164.6	164.6	660.0	932.4
8	29.8	249.4	50.0	1665.0	84.7	244.5	1330.0	188.7
9	89.4	249.4	50.0	1665.0	313.9	74.8	300.0	1332.0
10	89.4	249.4	50.0	1665.0	274.0	114.7	460.0	1154.4
11	89.4	249.4	50.0	1665.0	104.4	284.4	1140.0	399.6
12	89.4	249.4	50.0	1665.0	114.4	274.4	1100.0	444.0

Descripción: Se describen las corrientes másicas de los sistemas reactor-purificador. Donde V es la cantidad de vinaza añadida, A es la cantidad de agua, E es la cantidad de estiércol, NaOH entrada es la cantidad de hidróxido de sodio al 10% añadido al purificador, Ac 1 es la acumulación de materia en el reactor 1, B1 es la cantidad de biogás generada, NaOH salida es la cantidad de hidróxido de sodio desplazado del purificador y Ac 2 es la cantidad de hidróxido de sodio acumulado en el purificador.

Cuadro 36. Resumen estadístico de producción de biogás en cada relación.

Grupos	Cuenta	Suma (mL)	Promedio (mL)	Varianza (mL)
Relación 50:50 m/v	4	4809.3	1202.3	11847.5
Relación 50:25 m/v	4	3427.41	856.8	143138.4
Relación 50:75 m/v	4	2993.4	748.3	186241.1

Descripción: Se determinó la producción de biogás promedio para cada relación de inóculo/sustrato empleada. De esta forma, se realizó el análisis estadístico que se muestra a continuación.

Cuadro 37. Análisis ANOVA de un factor para la producción de biogás.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	449660.9	2	224830.4	1.977	0.1942	4.2564
Dentro de los grupos	1023680.9	9	113742.3			
Total	1473341.8	11				

Descripción: El análisis ANOVA de un factor fue realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis; 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre la producción promedio de biogás en cada relación y 2) Hipótesis alternativa que indica que la producción promedio de biogás en cada relación es diferente. Este análisis fue realizado con un significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 38. Resumen estadístico de la eficiencia de digestión en cada relación.

Grupos	Cuenta	Suma (mL)	Promedio (mL)	Varianza (mL)
Relación 50:50 m/v	4	3.646	91.1430%	0.0699%
Relación 50:25 m/v	4	3.890	97.2435%	0.0002%
Relación 50:75 m/v	4	3.777	94.4171%	0.0001%

Descripción: Se determinó la producción de biogás promedio para cada relación de inóculo/sustrato empleada. De esta forma, se realizó el análisis estadístico que se muestra a continuación.

Cuadro 39. Análisis ANOVA de un factor para la eficiencia de digestión en cada relación.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.00746	2	0.00373	15.93626	0.00110	4.25649
Dentro de los grupos	0.00211	9	0.00023			
Total	0.00956	11				

Descripción: El análisis ANOVA de un factor fue realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis; 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre la eficiencia de digestión en cada relación y 2) Hipótesis alternativa que indica que la eficiencia de digestión en cada relación es diferente. Este análisis fue realizado con un significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 40. Producción de biogás teórica para cada relación inóculo/sustrato y porcentaje de error.

Relación inóculo/sustrato (m/v)	Producción de biogás teórica (mL)	Porcentaje de error (%)
50:50	942.31	27.60
50:25	471.15	81.86
50:75	1413.5	47.06

Cuadro 41. Costo de inversión por reactor y sistema de purificación de biogás.

Cantidad	Unidad	Material	Costo individual (Q)		Costo total (Q)	
13	unidades	Recipientes PET (reactores)	Q	14.00	Q	182.00
4.5	metros	Manguera	Q	5.00	Q	22.50
39	unidades	Corchos	Q	1.00	Q	39.00
13	unidades	Pajillas	Q	0.25	Q	3.25
3	unidades	Sellador	Q	65.50	Q	196.50
3	metros	Tubos PVC	Q	77.00	Q	231.00
26	unidades	Topes PVC	Q	34.00	Q	884.00
13	unidades	Beaker	Q	35.00	Q	455.00
TOTAL					Q	2,013.25
TOTAL, POR REACTOR					Q	154.87

Descripción: En el cuadro se enlistan los materiales empleados para la construcción del sistema reactor-purificador de biogás. Se observa el total por 13 reactores y la inversión por reactor en Quetzales.

Cuadro 42. Costos y cantidad de materia prima totales por reactor para operación.

Cantidad	Unidad	Material	Costo individual (Q)		Costo total (Q)		Costo total por reactor (Q)	
450	ml	Vinaza	Q	-	Q	-	Q	-
650	g	Estiércol vacuno	Q	0.39	Q	253.50	Q	19.50
2.1	kg	NaOH	Q	30.69	Q	64.45	Q	4.96
TOTAL					Q	317.95	Q	24.46

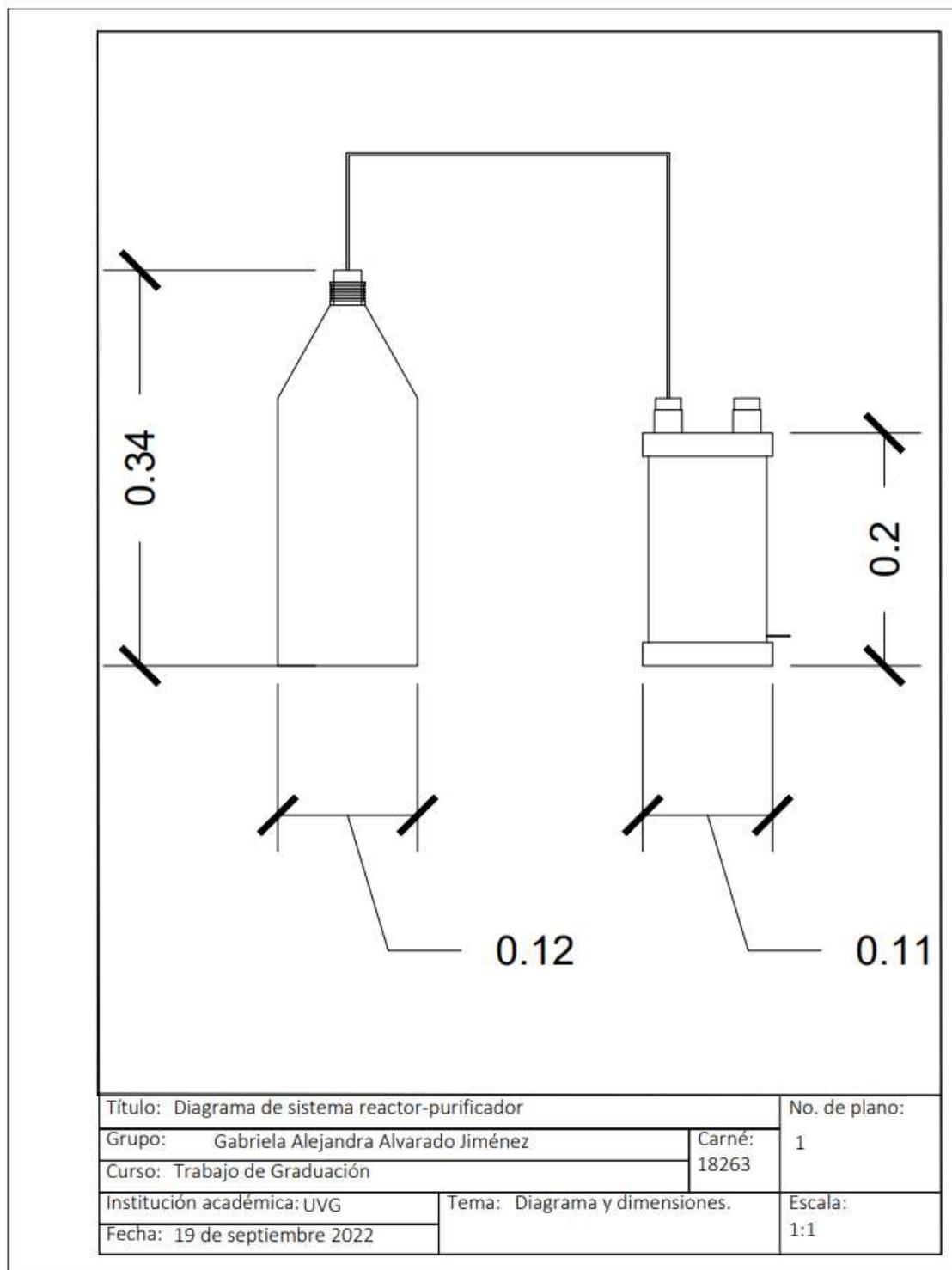
Descripción: Estos datos corresponden a los costos de materia prima para la operación de los reactores cada 6 semanas, operando tipo batch. La vinaza no representa ningún costo adicional debido a que este análisis está dirigido a la implementación de biodigestores en ingenios y destilerías de bioetanol en donde la vinaza es un residuo.

Cuadro 43. Ventas, costo y relación costo-beneficio para cada relación.

Relación inóculo/sustrato	Biogás generado (mL)	Ventas de biogás (Q)	Costo por reactor (Q)		Relación C/B
50:50	1202.34	6.131254852	Q	24.46	0.25
50:25	856.85	4.369473115	Q	24.46	0.18
50:75	748.34	3.816133725	Q	24.46	0.16

E. PLANOS DEL EQUIPO

Figura 15. Diagrama y dimensiones del sistema reactor-purificador.



F. GRÁFICOS E IMÁGENES DEL PROCESO

Figura 16. Sistema reactores para adaptación de inóculo en condiciones ambientales.



Figura 17. Determinación de sólidos volátiles para cálculo de eficiencia.



Figura 18. Determinación de humedad de vinaza.



Figura 19. Adición de sustrato en los reactores.



Figura 20. Sistemas de reactor-purificador para producción de biogás.



Figura 21. Producción acumulada de biogás del blanco (relación inóculo/sustrato 50:0 m/v).

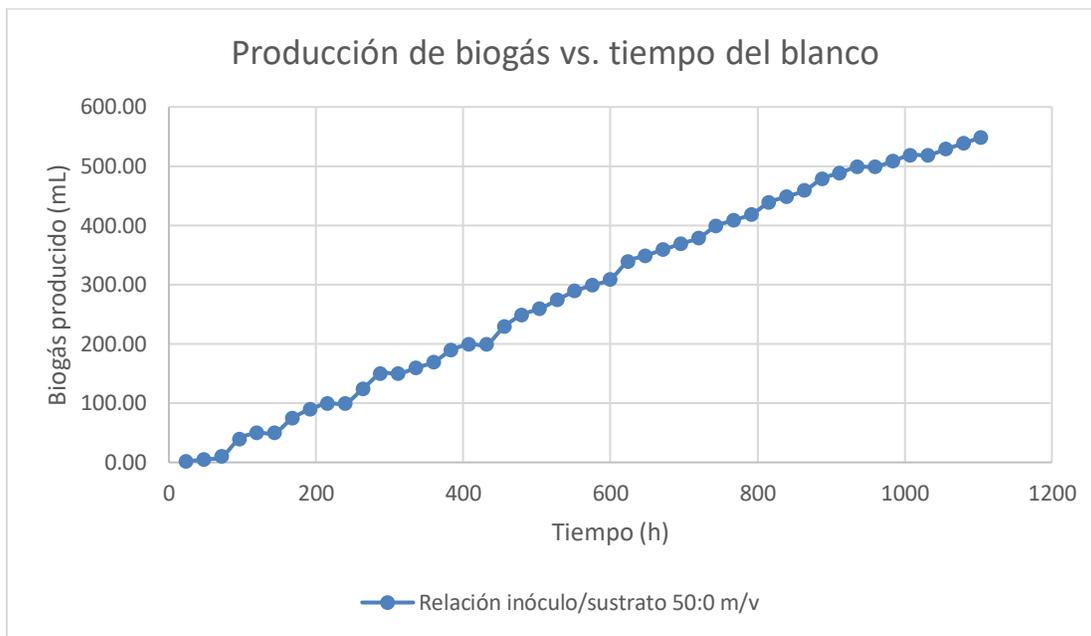


Figura 22. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:50 m/v.

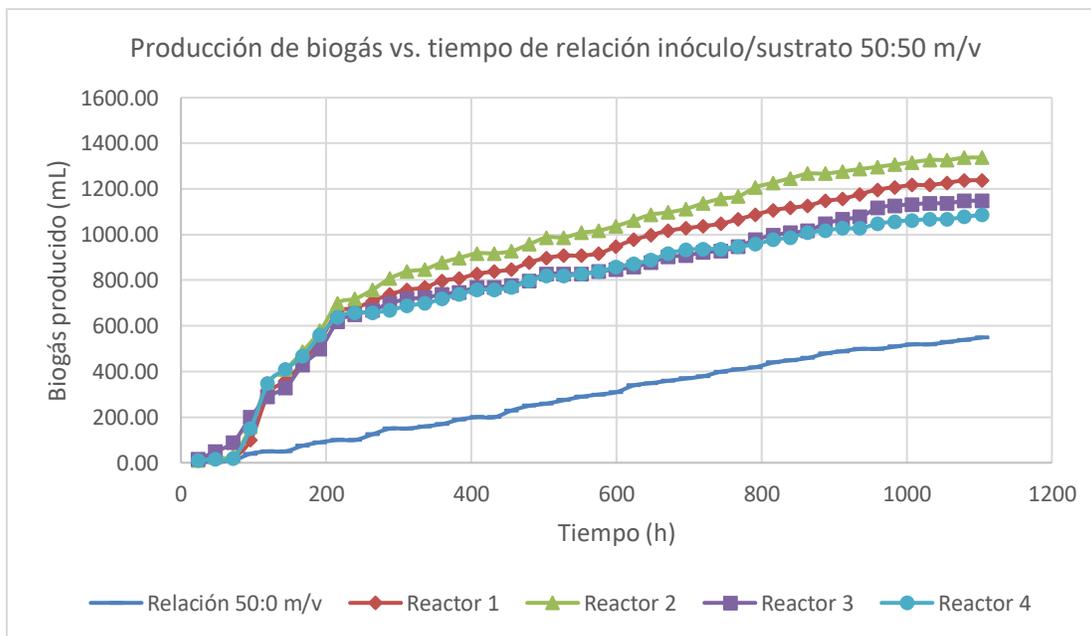


Figura 23. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:25 m/v.

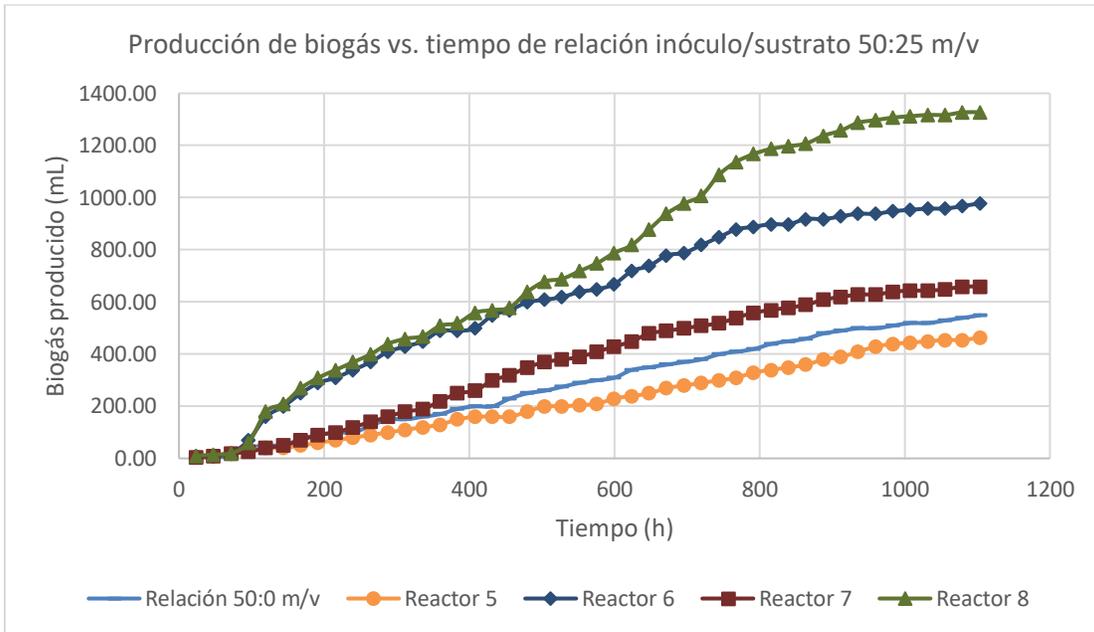
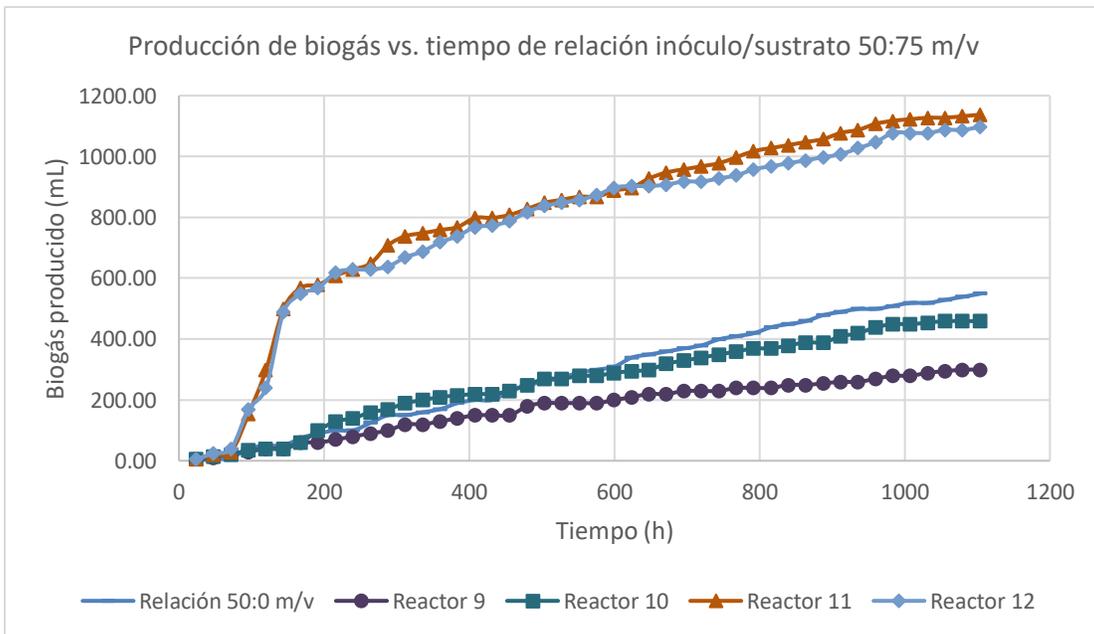
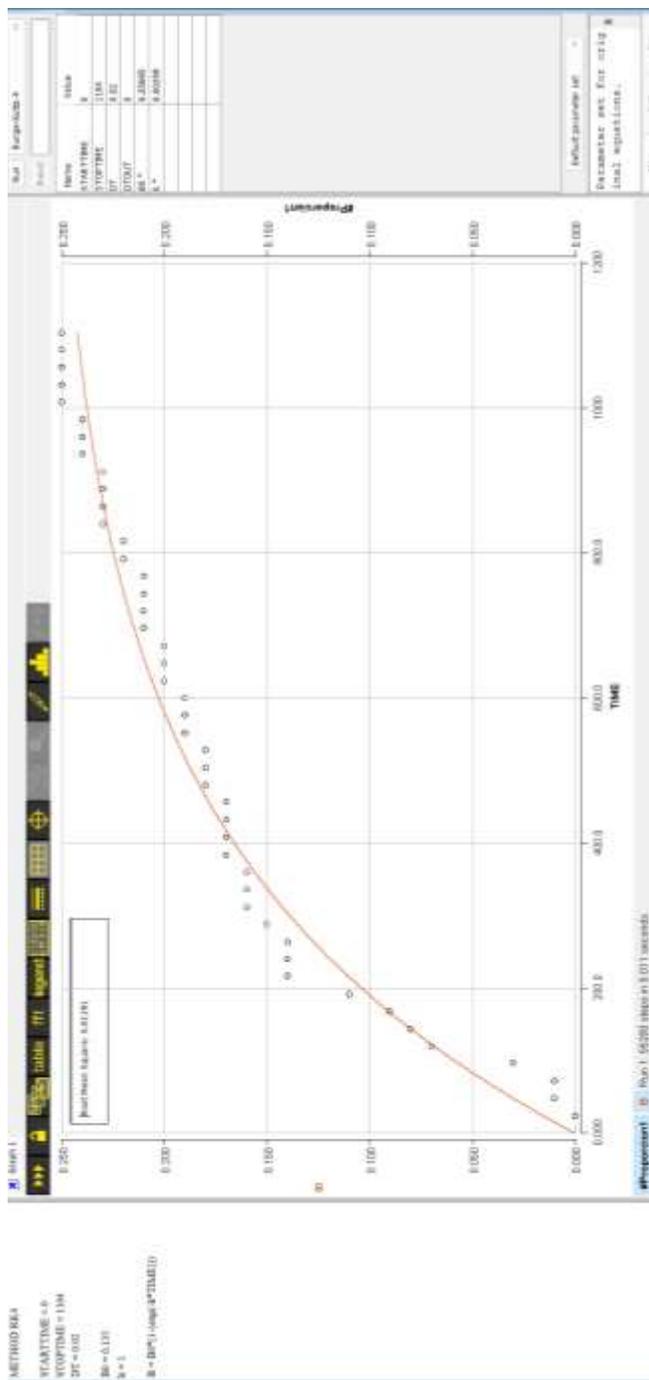


Figura 24. Producción acumulada de biogás de 4 corridas de relación inóculo/sustrato 50:75 m/v.



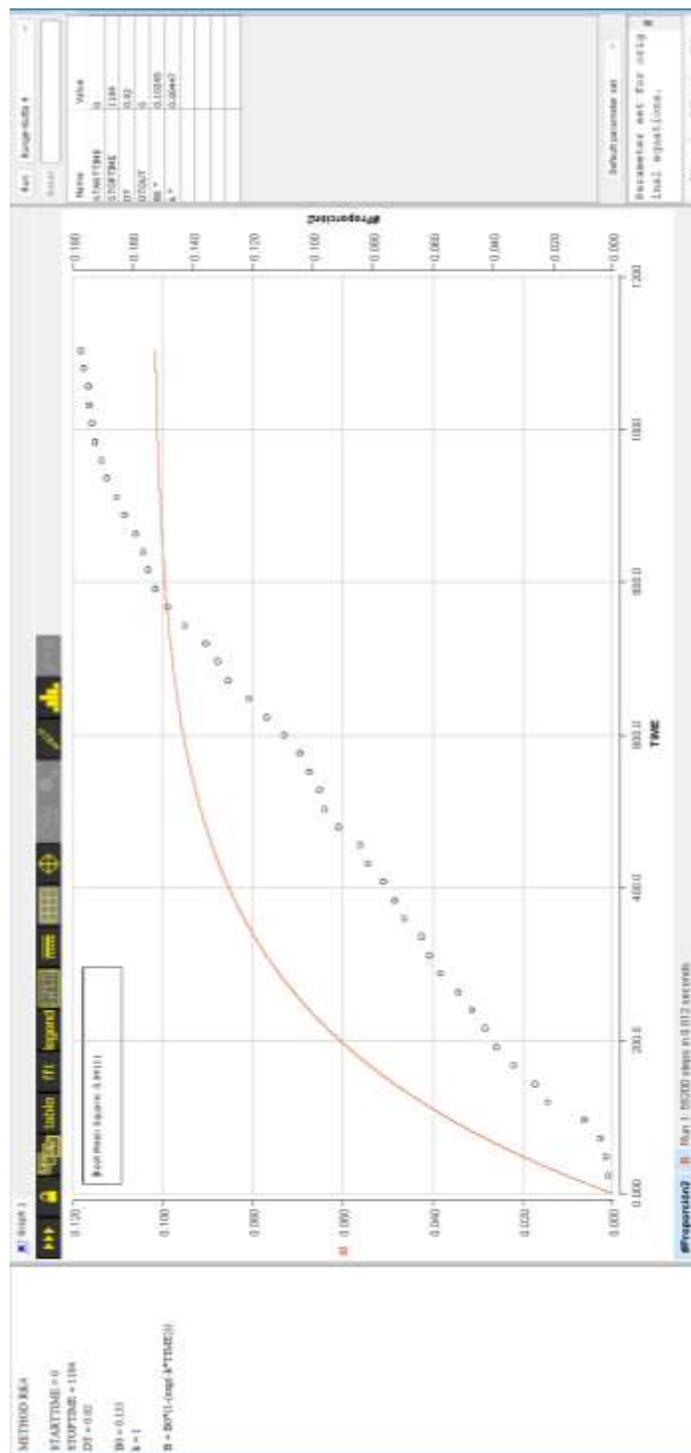
XIII. MODELO CINÉTICO DEL REACTOR

Figura 25. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:50 m/v al modelo cinético.



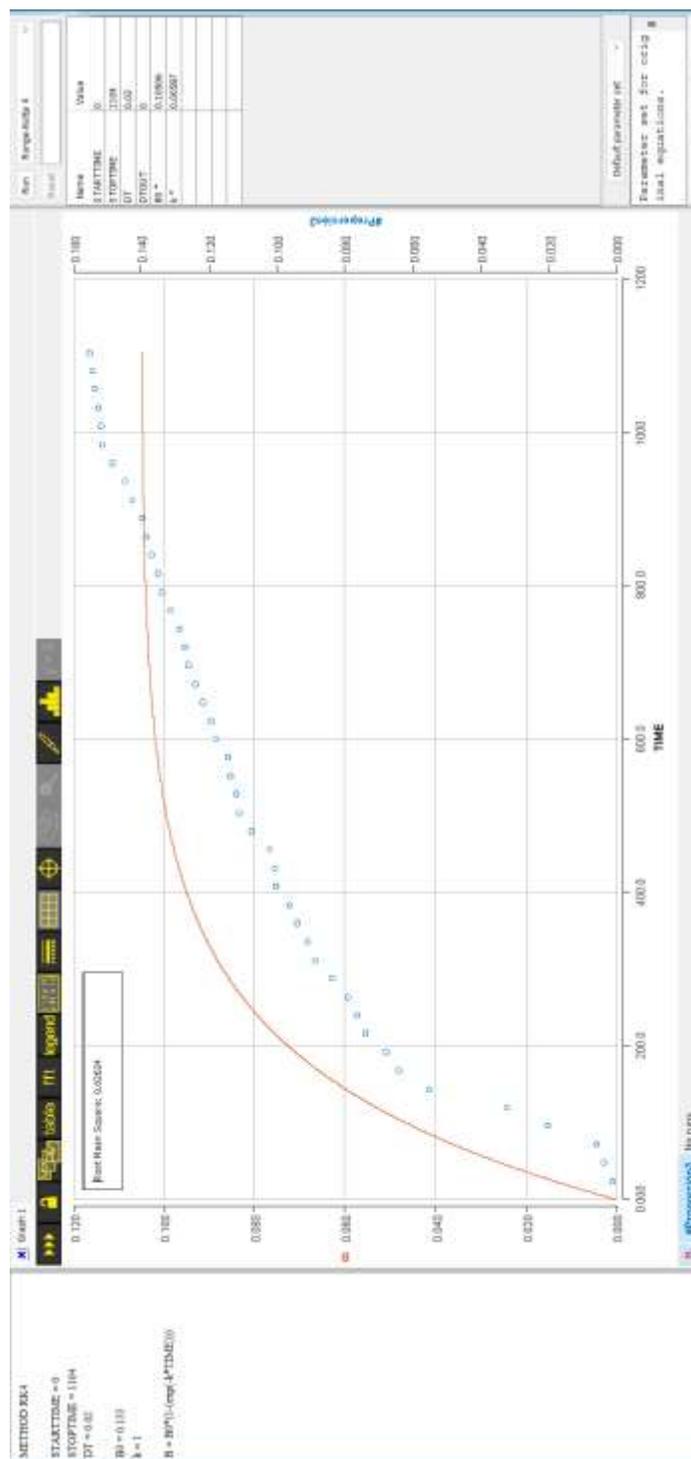
Descripción: Se realizó el ajuste de datos empleando el programa Berkeley Madonna y la ecuación del modelo de Roediger para cinética de primer orden para la hidrólisis de la materia particulada. Los parámetros son: B(t) es la producción de metano acumulada por tiempo (mL/mg SV), B0 es la producción potencial de metano del sustrato (mL/mg SV), k es la constante de desintegración de primer orden (1/día) y t es el tiempo (días).

Figura 26. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:25 m/v al modelo cinético.



Descripción: Se realizó el ajuste de datos empleando el programa Berkeley Madonna y la ecuación del modelo de Roediger para cinética de primer orden para la hidrólisis de la materia particulada. Los parámetros son: B(t) es la producción de metano acumulada por tiempo (mL/mg SV), B0 es la producción potencial de metano del sustrato (mL/mg SV), k es la constante de desintegración de primer orden (1/día) y t es el tiempo (días).

Figura 27. Ajuste de datos experimentales de la relación 50:25 m/v al modelo cinético.



Descripción: Se realizó el ajuste de datos empleando el programa Berkeley Madonna y la ecuación del modelo de Roediger para cinética de primer orden para la hidrólisis de la materia particulada. Los parámetros son: B(t) es la producción de metano acumulada por tiempo (mL/mg SV), B0 es la producción potencial de metano del sustrato (mL/mg SV), k es la constante de desintegración de primer orden (1/día) y t es el tiempo (días).

Cuadro 44. Producción experimental de biogás en relación con los sólidos volátiles del sustrato.

Tiempo (h)	Producción de biogás (mL/ mg SV)		
	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75
24	0.0023	0.0016	0.0010
48	0.0057	0.0023	0.0036
72	0.0085	0.0041	0.0059
96	0.0315	0.0096	0.0202
120	0.0667	0.0217	0.0321
144	0.0781	0.0259	0.0553
168	0.0946	0.0331	0.0641
192	0.1127	0.0388	0.0677
216	0.1355	0.0424	0.0739
240	0.1401	0.0471	0.0765
264	0.1448	0.0517	0.0791
288	0.1510	0.0574	0.0838
312	0.1556	0.0610	0.0889
336	0.1575	0.0636	0.0910
360	0.1624	0.0698	0.0941
384	0.1655	0.0729	0.0964
408	0.1696	0.0765	0.1003
432	0.1701	0.0817	0.1006
456	0.1722	0.0843	0.1024
480	0.1779	0.0915	0.1076
504	0.1830	0.0962	0.1112
528	0.1836	0.0977	0.1122
552	0.1851	0.1011	0.1138
576	0.1872	0.1045	0.1145
600	0.1913	0.1096	0.1179
624	0.1955	0.1153	0.1194
648	0.1996	0.1215	0.1218
672	0.2040	0.1282	0.1241
696	0.2063	0.1319	0.1262
720	0.2092	0.1360	0.1272
744	0.2110	0.1427	0.1288
768	0.2141	0.1484	0.1313
792	0.2192	0.1525	0.1339
816	0.2234	0.1551	0.1350
840	0.2260	0.1567	0.1370
864	0.2291	0.1593	0.1386
888	0.2322	0.1629	0.1399
912	0.2348	0.1655	0.1427
936	0.2368	0.1691	0.1448
960	0.2415	0.1706	0.1484
984	0.2435	0.1727	0.1515

Tiempo (h)	Producción de biogás (mL/ mg SV)		
	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75
1008	0.2451	0.1737	0.1518
1032	0.2461	0.1745	0.1528
1056	0.2467	0.1750	0.1538
1080	0.2487	0.1766	0.1544
1104	0.2492	0.1776	0.1551

Descripción: Estos datos fueron calculados (ver Cálculo 18) para realizar el ajuste de los datos experimentales con el modelo cinético propuesto para cada relación inóculo/sustrato.

Cuadro 45. Parámetros cinéticos del modelo de producción de metano en cada relación.

Parámetro cinético	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75
B0 (mL/mg)	0.25695	0.10245	0.10506
k (h-1)	0.00259	0.0047	0.00587

Descripción: Estos datos fueron obtenidos mediante el ajuste de los datos experimentales con el modelo cinético propuesto para cada relación inóculo/sustrato, empleando el software Berkeley Madonna (ver Figuras 25-27).

Cuadro 46. Predicción de producción de biogás con el modelo cinético en cada relación y porcentaje de error.

Tiempo (h)	Predicción de producción de biogás (mL/ mg SV)			Porcentaje de error de predicción		
	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75
24	0.0155	0.0109	0.0138	566%	604%	1235%
48	0.0300	0.0207	0.0258	428%	789%	613%
72	0.0437	0.0294	0.0362	412%	611%	509%
96	0.0566	0.0372	0.0453	79%	289%	124%
120	0.0686	0.0442	0.0531	2.9%	103%	66%
144	0.0800	0.0504	0.0599	2.4%	95%	8.3%
168	0.0907	0.0559	0.0659	4.2%	69%	2.7%
192	0.1007	0.0609	0.0710	11%	57%	4.8%
216	0.1101	0.0653	0.0755	19%	54%	2.1%
240	0.1189	0.0693	0.0794	15%	47%	3.7%
264	0.1273	0.0728	0.0828	12%	41%	4.6%
288	0.1351	0.0760	0.0857	11%	32%	2.3%
312	0.1424	0.0788	0.0882	8.5%	29%	0.8%
336	0.1493	0.0813	0.0904	5.2%	28%	0.6%
360	0.1558	0.0836	0.0924	4.0%	20%	1.9%
384	0.1619	0.0856	0.0940	2.2%	17%	2.5%
408	0.1676	0.0874	0.0955	1.2%	14%	4.8%
432	0.1730	0.0890	0.0967	1.7%	9%	3.8%
456	0.1781	0.0904	0.0978	3.4%	7%	4.4%

Tiempo (h)	Predicción de producción de biogás (mL/ mg SV)			Porcentaje de error de predicción		
	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75	Relación 50:50	Relación 50:25	Relación 50:75
480	0.1828	0.0917	0.0988	2.8%	0%	8.2%
504	0.1873	0.0929	0.0996	2.3%	3%	10%
528	0.1915	0.0939	0.1003	4.3%	4%	11%
552	0.1954	0.0948	0.1009	5.6%	6%	11%
576	0.1991	0.0956	0.1015	6.4%	8%	11%
600	0.2026	0.0963	0.1020	5.9%	12%	14%
624	0.2059	0.0970	0.1024	5.3%	16%	14%
648	0.2090	0.0976	0.1027	4.7%	20%	16%
672	0.2119	0.0981	0.1030	3.9%	24%	17%
696	0.2146	0.0986	0.1033	4.0%	25%	18%
720	0.2171	0.0990	0.1035	3.8%	27%	19%
744	0.2195	0.0993	0.1037	4.1%	30%	19%
768	0.2218	0.0997	0.1039	3.6%	33%	21%
792	0.2239	0.1000	0.1041	2.1%	34%	22%
816	0.2259	0.1002	0.1042	1.1%	35%	23%
840	0.2278	0.1005	0.1043	0.8%	36%	24%
864	0.2295	0.1007	0.1044	0.2%	37%	25%
888	0.2312	0.1009	0.1045	0.4%	38%	25%
912	0.2327	0.1010	0.1046	0.9%	39%	27%
936	0.2342	0.1012	0.1046	1.1%	40%	28%
960	0.2356	0.1013	0.1047	2.4%	41%	29%
984	0.2369	0.1014	0.1047	2.7%	41%	31%
1008	0.2381	0.1016	0.1048	2.9%	42%	31%
1032	0.2392	0.1016	0.1048	2.8%	42%	31%
1056	0.2403	0.1017	0.1048	2.6%	42%	32%
1080	0.2413	0.1018	0.1049	3.0%	42%	32%
1104	0.2422	0.1019	0.1049	2.8%	43%	32%
PORCENTAJE DE ERROR PROMEDIO				36%	80%	69%

Descripción: Las predicciones representan la cantidad de biogás acumulada respecto al tiempo en (mL/mg SV). Los porcentajes de error promedio se describen al final de la tabla (ver Cálculo 20).

Cuadro 47. Modelo cinético para cada relación de inóculo/sustrato.

Relación inóculo/sustrato	Modelo cinético
50:50	$B(t) = 0.257 (1 - e^{-0.00259t})$
50:25	$B(t) = 0.102 (1 - e^{-0.0047t})$
50:75	$B(t) = 0.105 (1 - e^{-0.00587t})$

Descripción: Los modelos fueron obtenidos por el programa Berkeley Madonna, ajustando los datos experimentales al modelo propuesto por Roediger para la producción acumulada de biogás en reactores tipo batch.

XIV. GLOSARIO

- Ácidos de cadena corta (ACC): Los ácidos de cadena corta son ácidos grasos con 2 a 6 átomos de carbono en su estructura.
- Ácidos de cadena larga (ACL): Los ácidos de cadena larga son ácidos grasos con 12 a 24 átomos de carbono en su estructura.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Demanda bioquímica de oxígeno que tiene una muestra, es la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de sustancias orgánicas contenidas en la muestra.
- Demanda química de oxígeno (DQO): Demanda química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos para convertirla en dióxido de carbono y agua. Un alto valor de DQO representa un mayor peligro de contaminación de la muestra.
- Digestión anaeróbica (DA): La digestión anaeróbica es el proceso en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en compuestos más simples, en ausencia de oxígeno. A partir de la DA, se obtiene dióxido de carbono y metano.
- Hidróxido de sodio (NaOH): El hidróxido de sodio es un hidróxido cáustico formado por cationes de sodio Na^+ y aniones de hidróxido OH^- .
- pH: Medición de acidez o alcalinidad de una solución o muestra.
- Sólidos totales (ST): Los sólidos totales son la cantidad de sólidos disueltos en una sustancia, representando los compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en la muestra.
- Sólidos volátiles (SV): Los sólidos volátiles son la cantidad de sólidos que quedan tras secar la muestra y están relacionados con la materia orgánica contenida en la misma.
- Vinaza: Residuo de la destilación de bioetanol a partir de melaza de caña de azúcar, con alto contenido de carga orgánica que puede ser empleado como fertilizante o sustrato en la digestión anaeróbica para obtención de biogás.