

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA QUÍMICA



Evaluación técnica en la generación de biogás en biodigestores de gallinaza y residuos de comida rápida de un restaurante de pollo frito.

Trabajo de graduación presentado por Leonel Alejandro Joachin Padilla para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA QUÍMICA



Evaluación técnica en la generación de biogás en biodigestores de gallinaza y residuos de comida rápida de un restaurante de pollo frito.

Trabajo de graduación presentado por Leonel Alejandro Joachin Padilla para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

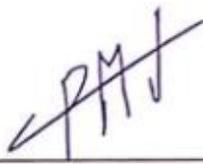
2023

Vo. Bo.

(f) 

Lic. Carlo Martinez Joachin

Tema examinadora:

(f) 

Lic. Carlo Martinez Joachin

(f) 

Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 

Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de Aprobación: Guatemala, 5 de mayo de 2023

Prefacio

Este trabajo de graduación es el resultado de mucho esfuerzo y dedicación a lo largo de estos 5 años en la carrera de Ingeniería Química. En donde a lo largo de la carrera he sabido sobre llevar la carga emocional como de trabajo, este trabajo que a continuación leerán nació gracias a la necesidad de personas que en ciertas partes del país no tiene acceso a artículos de primera necesidad como es el gas. El siguiente trabajo no solo nació por el hambre de querer cubrir una necesidad sino también de darle un significado especial a lo que he aprendido a lo largo de los 5 años de carrera, de manera que más que un estudio o trabajo de graduación, es un reto personal el poder superar este reto como lo es la Ingeniería Química. Este trabajo, es la culminación de todos los sacrificios y retos que se tuvo a lo largo de la carrera. Además, este trabajo también es una muestra de compromiso como estudiante, ingeniero y principalmente como persona hacia la sociedad y mi objetivo es que este trabajo haga que se beneficien personas que los necesiten.

El trabajo que se presenta no se hubiera logrado sin la ayuda de muchas personas que con mucho cariño me regalaron su tiempo. Pero, principalmente este trabajo es dedicado a Dios, que sin él todo esto no sería posible y que hace que día a día siga luchando por mis objetivos vida. También con especial agradecimiento al Licenciado Carlo Martínez, el cual gracias a su asesoría y su guía se logró concretar el trabajo de graduación, a la ingeniera Carmen Ortiz por su asesoría para poder iniciar con el trabajo y la ingeniera Ana Luisa Mendizábal Sole por todo el apoyo que me dio y la accesibilidad a equipo necesario para la realización de este proyecto, todo lo que me apoyaron y proporcionaron tiene un valor único y especial para que esta trabajo de graduación se lograra llevar a cabo.

Índice

Prefacio	v
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	xi
Resumen	xv
I. Introducción	1
II. Justificación	2
III. Objetivos	3
A. General	3
B. Específicos	3
IV. Marco teórico	4
A. Gallinaza	4
1. Definición.....	4
2. Composición de la gallinaza.....	4
3. Manejo de la gallinaza.....	4
B. Biogás	5
1. Definición.....	5
2. Características generales del biogás.....	5
C. Digestión anaeróbica	6
1. Productos de la digestión.....	7
2. Factores que considerar.....	7
D. Biodigestor	7
1. ¿Qué son?.....	7
2. Características.....	8
3. Componentes de un biodigestor.....	8
4. Tipos de biodigestores.....	8
E. Fundamentos de la fermentación metanogénica	9
1. Etapas de la fermentación metanogénica.....	9
2. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica.....	11
F. Factores determinantes en el proceso metanogénico	12
1. Relación C/N de las materias primas.....	12
2. Temperaturas.....	14

3.	Tiempo de retención hidráulico	14
4.	Rango de pH y alcalinidad.....	15
G.	Usos del biogás.....	16
1.	Aplicaciones del biogás.	16
H.	Contaminación por gallinaza y desecho alimenticios.....	17
I.	Balance de masa	18
J.	Diagrama de flujo.....	19
V.	Antecedentes	20
A.	Situación nacional de la bioenergía y los desechos.....	20
B.	Proyectos relacionados con el biogás.....	21
C.	Proyectos internacionales relacionados con el biogás.....	21
VI.	Metodología.....	23
A.	Diseño del experimento.....	23
1.	Elección de las proporciones	23
2.	Caracterización de los sustratos	24
3.	Obtención del volumen y la calidad del gas	24
4.	Construcción de lo biodigestores	25
5.	Caracterización del gas	25
B.	Caracterización de los sustratos.....	25
1.	Medición de humedad.	25
2.	Determinación de pH.....	26
3.	Determinación de la relación C/N.....	27
C.	Operación y construcción de biodigestores	30
1.	Construcción de biodigestor.....	30
2.	Procedimiento para cargar los biodigestores.	32
3.	Procedimiento del manejo de bioabono.....	33
D.	Almacenamiento de biogás	34
1.	Almacenamiento del gas.....	34
2.	Obtención de %LEL para la calidad del gas	35
E.	Procedimiento del FID	36
VII.	Resultados	37
A.	Caracterización del sustrato	37
B.	Comparativo de volumen	37

C.	Cromatogramas de la caracterización del biogás	38
D.	Calidad del gas.	41
E.	Gráficas de la producción de volumen.	44
VIII.	Discusión de resultados	46
A.	Módulo A. Caracterización del sustrato	46
B.	Módulo B. Comparación del volumen de biogás	50
C.	Módulo C. Caracterización del biogás	53
D.	Módulo D. Calidad del biogás.....	54
IX.	Conclusiones	58
X.	Recomendaciones	59
XI.	Bibliografía	60
XII.	Anexos	62
A.	Referencias.....	62
B.	Balance de masa real	64
C.	Incertidumbre	67
D.	Cálculo de muestra.....	69
1.	Módulo A. Cálculos para la caracterización de los sustratos.....	69
2.	Módulo B. Cálculos para la obtención del volumen.	72
3.	Módulo C. Calidad del gas.	74
E.	Datos originales.....	74
1.	Módulo A. Caracterización del sustrato.....	74
2.	Módulo B. Volumen de biogás.	75
3.	Módulo C. Caracterización del biogás.....	93
4.	Módulo D. Calidad del gas.	96
XIII.	Glosario	100

Lista de tablas

Tabla 1. Características de la gallinaza	4
Tabla 2. Propiedades del biogás generado por la fermentación anaerobia.....	6
Tabla 3. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero.	12
Tabla 4. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	14
Tabla 5 Costo de los estudios para la caracterización de los sustratos.....	24
Tabla 6. Resultados de la caracterización de los sustratos que se van a utilizar para la producción del biogás	37
Tabla 7. Volumen total de biogás generado en la fermentación de gallinaza y residuos alimenticios.....	37
Tabla 8. Características generales del biogás	62
Tabla 9. Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal. .	62
Tabla 10. Producción de biogás por tipo de sustrato.....	62
Tabla 11. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.	62
Tabla 12. Análisis químicos entre el compost y el bioabono generado	63
Tabla 13. Propiedades de los residuos alimenticios a utilizar en los biodigestores para la producción de biogás	74
Tabla 14. Propiedades de la gallinaza a utilizar en los biodigestores para la producción de biogás.....	74
Tabla 15. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 1:3	75
Tabla 16. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 1:3.....	76
Tabla 17. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 2:3.	78
Tabla 18. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 2:3.....	79
Tabla 19. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 3:3.	81
Tabla 20. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 3:3.....	82
Tabla 21. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 1:3.....	84

Tabla 22. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 1:3.	85
Tabla 23. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 2:3.	87
Tabla 24. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 2:3.	88
Tabla 25. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 3:3.	90
Tabla 26. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 3:3.	91
Tabla 27. Datos de %LEL de ambos sustratos recabados a lo largo de la fermentación, para conocer la explosividad.	96
Tabla 28. Datos de placa del sensor de metano.	96

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama ilustrativo de la digestión anaeróbica.....	6
Figura 2. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica.....	10
Figura 3. Valores promedios de la relación C/N de algunos residuos disponibles.	13
Figura 4. Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones.....	15
Figura 5. Dependencia del pH de la actividad metanogénica.....	15
Figura 6. Balance de masa general del proceso.....	18
Figura 7. Diagrama de flujo general del proceso de un biodigestor.....	19
Figura 8. Diagrama de la introducción de la tapa en la caneca.	30
Figura 9. Diagrama de válvula de gas con los adaptadores.....	31
Figura 10. Diagrama del biodigestor con la adaptación colocada.....	31
Figura 11. Diagrama de las medidas del tubo de 90°C en el biodigestor.....	31
Figura 12. Diagrama final del prototipo de biodigestor a utilizar.	32
Figura 13. Marca máxima hasta donde se cargó los biodigestores.	32
Figura 14. Recepción de bioabono de los biodigestores	33
Figura 15. Utilización del bioabono en suelos.	33
Figura 16. Adaptador colocado en el biodigestor.....	34
Figura 17. Almacenamiento de biogás generado.....	34
Figura 18. Almacenamiento de muestras de biogás.	35
Figura 19. Extracción de biogás.	35
Figura 20. Detección de %LEL en el biogás	36
Figura 21. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 1:3 de gallinaza	38
Figura 22. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 2:3 de gallinaza	38
Figura 23. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 3:3 de gallinaza.....	39
Figura 24. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.....	39
Figura 25. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.....	40

Figura 26. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.....	40
Figura 27. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 1:3 de ambos sustratos.	41
Figura 28. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 2:3 de ambos sustratos.	42
Figura 29. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 3:3 de ambos sustratos.	43
Figura 30. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 1:3.....	44
Figura 31. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 2:3.....	44
Figura 32. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 3:3.....	45
Figura 33. Referencia del FID para la detección del biogás.....	63
Figura 34. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 1:3.....	64
Figura 35. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 2:3.....	64
Figura 36. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 3:3.....	65
Figura 37. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 1:3. ...	65
Figura 38. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 2:3. ...	66
Figura 39. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 3:3. ...	66
Figura 40 Tabla de distribución normal para hallar el valor de Z.....	69
Figura 41. Marca máxima del biodigestor hasta donde se llenó.	73
Figura 42. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 1:3.....	76
Figura 43. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 1:3.	77
Figura 44. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 2:3.....	79
Figura 45. Gráfica de la producción de biogas a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 2:3.	80

Figura 46. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 3:3.....	82
Figura 47. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 3:3.....	83
Figura 48. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 1:3.....	85
Figura 49. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 1:3.	86
Figura 50. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 2:3.....	88
Figura 51. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 2:3.	89
Figura 52. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 3:3.....	91
Figura 53. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 3:3.	92
Figura 54. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 1:3 de gallinaza.....	93
Figura 55. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 2:3 de gallinaza.....	93
Figura 56. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 3:3 de gallinaza.....	94
Figura 57. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.	94
Figura 58. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.	95
Figura 59. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.	95
Figura 60. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 1:3 de gallinaza.	97
Figura 61. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 2:3 de gallinaza.	97
Figura 62. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 3:3 de gallinaza.	98

Figura 63. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.....	98
Figura 64. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.....	99
Figura 65. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.....	99

Resumen

Si bien hoy en el territorio nacional muchas personas no tienen acceso a energía, actualmente el 8.04% de la población no tienen acceso a energía ya sea eléctrica o de gas, claramente hay un problema de escasez y de mala repartición de recursos, con lo cual la vía de utilizar energías renovables o de desechos tiene claramente una gran relevancia hoy en día. Con lo cual, se realizó una evaluación técnica de biogás en biodigestores anaerobios utilizando gallinaza y residuos de comida rápida de un restaurante de comida rápida, de manera que lo que se quería lograr era la producción de metano dentro de los biodigestores para poder comparar el volumen de biogás obtenido y encontrar la calidad del gas para generar la mayor cantidad de metano. Para poder cumplir con los objetivos planteados, se construyó un total de 6 biodigestores 3 para gallinaza y 3 para los residuos alimenticios, la cantidad se da ya que se tenía cierta cantidad limitada de la materia prima que se iba a utilizar dentro de los biodigestores. Previo al ingreso del material biológico a los biodigestores, este se tuvo que caracterizar para tener un mejor control del sustrato a lo largo de la fermentación y saber la calidad del producto que se estaba utilizando.

Se encontró que ambos sustratos son aptos para la fermentación anaerobia esto quiere decir que pueden producir biogás ya que obtuvieron valores de pH, materia orgánica y relación C/N favorables para que se genere biogás. Por lo cual, se encontró que en los 3 biodigestores de gallinaza se obtuvo un total de 0.084 m^3 de biogás mientras que en los 3 biodigestores de comida podrida se obtuvo un volumen de biogás de 0.055 m^3 , presentando así que la gallinaza presenta una mayor producción de gas. El biogás obtenido en los fermentadores anaerobios presentó un buen porcentaje de %LEL con esto se garantiza que se puedan utilizar para la generación de energía en forma de calor, lo que hace que se una buena opción viable para el uso de energías renovables. El objetivo principal de este trabajo es dar un uso a material biológico que actualmente en muchos lugares se desecha y contamina, principalmente en granjas donde se genera bastante desecho biológico y en restaurante donde se produce bastante residuos que luego son desechados provocando más contaminación.

I. Introducción

El presente trabajo tiene como propósito realizar un estudio para la producción y evaluación técnica de biogás mediante biodigestores anaeróbicos utilizando gallinaza y residuos alimenticios de un restaurante de comida rápida con el objetivo de realizar un análisis técnico de biogás luego del período de fermentación. Para evaluar las propiedades de cada materia prima, se realizaron 3 biodigestores para cada sustrato, con el objetivo de utilizar toda la materia prima disponible. Se tiene como objetivo encontrar el volumen de biogás obtenido de los diferentes materiales teniendo en cuenta que tienen el mismo tiempo de fermentación, esto se refleja en el volumen extraído de biogás el cual se analizó mediante un registro y control de volumen y densidad del bioabono a lo largo de la fermentación. Se utilizó un sensor portátil de metano para encontrar el porcentaje de metano obtenido en la gallinaza y en los residuos alimenticios, por medio de una pesa y del concepto de densidad es posible hallar el volumen de biogás generado.

Esta necesidad de utilizar la gallinaza y residuos alimenticios es por el desaprovechamiento y la alta contaminación que estos generan, estos sustratos en la actualidad generan una gran contaminación en los lugares de donde se obtiene, por lo cual en ocasiones se opta por desecharlos o no darle un uso correcto. Otra razón por la cual se optó por la utilización de esta materia prima es para darle un uso energético ya que la baja accesibilidad en ciertas regiones del país a la energía eléctrica y de gas hace que se vuelva una necesidad prioritaria, la utilización de este biogás también implica una opción barata y viable, lo que hace que en cierta medida la economía de algunas familias guatemaltecas sea vea favorecida.

II. Justificación

Hoy en día el acceso a la energía se ha convertido en un privilegio para sectores marginados en el país, esto se debe principalmente al bajo desarrollo humano y tecnológico en estas pequeñas regiones también a la poca accesibilidad a la energía eléctrica. El último dato registrado por parte del ministerio de energías y minas es que el 91.96% de las personas en el interior del país tienen acceso a energía eléctrica. Mientras que el 8.04% de la población no tienen acceso, y de ese porcentaje cada departamento tiene más del 10% de su población que no pueden acceder a la red eléctrica guatemalteca claramente hay un problema de escasez y baja accesibilidad de energía a nivel nacional.

Se puede pensar en el uso de energía renovables, pero a esto hay que agregarle que el costo de implementación y de mantenimiento son altos. Una solución viable es la de utilización de biodigestores que en comparación de los paneles solares son una opción económicamente más viable. Además, estos sistemas permiten producir biogás naturalmente, con un elevado poder calorífico, para ser utilizado como combustible, evitando así la extracción de combustibles no renovables, los cuales hacen que se tenga un ambiente más dañino, el uso de biodigestores hace que se mejore las condiciones sanitarias, al evitar malos olores, insectos y controlar las pequeñas bacterias las cuales son capaces de generar enfermedades. En este caso de estudio los materiales a utilizar son la gallinaza y desperdicios alimenticios, el realizar un biodigestor ayudaría a la reducción de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros compuestos orgánicos, que causan un daño a quienes habitan cerca de las granjas avícolas. Y también ayudaría a reducir el desperdicio de alimentos los cuales genera aproximadamente el 8% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. Aparte de poder llevar energía eléctrica a las personas que no tienen acceso también ayudaría a la reducción de contaminación.

III. Objetivos

A. General

Evaluación técnica de la producción de biogás entre gallinaza y residuos de comida rápida de un restaurante de comida rápida para comparar el rendimiento de metano.

B. Específicos

- Caracterizar la comida rápida del restaurante de pollo frito y la gallinaza mediante análisis fisicoquímicos para observar las propiedades del sustrato durante la fermentación.
- Producir biogás mediante dos sustratos, gallinaza y residuos alimenticios de comida rápida; para comparar el rendimiento de producción de volumen entre ambos.
- Caracterizar el biogás obtenido en la fermentación, por medio de un análisis FID para determinar la composición y el volumen que este genera.
- Encontrar las fracciones de metano en el biogás durante el tiempo de fermentación mediante un detector de gases para hallar la calidad del gas obtenido a lo largo de un mes.

IV. Marco teórico

A. Gallinaza

1. Definición

2. Composición de la gallinaza

Es un material con buen aporte de nitrógeno, además de fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y algunos micronutrientes. Su aplicación al suelo también aumenta la materia orgánica, fertilidad y calidad del suelo, la calidad de la gallinaza depende de varios factores, los cuales se reflejan a continuación.

Tabla 1. Características de la gallinaza

Nutrientes	Gallinaza (kg/ton)
Nitrógeno	34.7
Fósforo (P)	30.8
Potasio (K)	20.9
Calcio	61.2
Magnesio	8.3
Sodio	5.6
Sales solubles	56
Materia orgánica	700

Cabe destacar que la gallinaza es también uno de los abonos orgánicos con mayor tasa de mineralización. Esto la hace una excelente fuente para el aporte de nitrógeno a los cultivos, pues tan solo en tres semanas el nitrógeno orgánico de la gallinaza se mineraliza en un 75 % (Intagri, 2015).

3. Manejo de la gallinaza

Se deben tener ciertas condiciones donde para que se pueda producir gallinaza de alta calidad algunas maneras de poder manejar la gallinaza son por las siguientes:

- Evitar que se presenten altas humedades dentro del galpón, puesto que es el causante de la producción de las altas concentraciones de gases y pérdida de elementos como el nitrógeno.

- Una vez recolectada la gallinaza del galpón, debe tener un lugar para su disposición (secaderos) que sea cubierto para evitar el contacto con el agua lluvia y almacenarla en forma de pirámide, con el fin de lograr un escurrido de la humedad.
- Se puede emplear instrumentos y métodos para que se reduzcan la generación de humedad y gases (Estrada, 2005).

B. Biogás

1. Definición

Esta energía renovable procede de la transformación de residuos orgánicos en energía en forma de gas. Es un gas renovable que este compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono que se da por la degradación anaeróbica. Es un gas que puede ser aprovechado para generar energía eléctrica en casas, que es donde se aplicaría más este método. Se da también por medio de la oxidación biológica de la materia orgánica por la acción de microorganismos específicos que puede aprovechar energéticamente (Romero, 2022).

2. Características generales del biogás

Las características del biogás dependen del material digerido y del funcionamiento del proceso, tiene propiedades específicas. Algunas propiedades del biogás se dan en el siguiente cuadro, estos parámetros se dan con base en lo que genera el biogás en general:

Tabla 2. Propiedades del biogás generado por la fermentación anaerobia

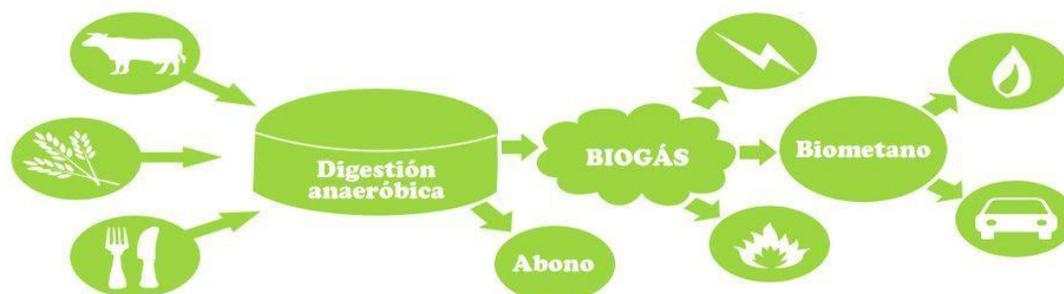
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
• Metano (CH ₄)	55 - 70%
• Dióxido de Carbono CO ₂	35 - 40%
• Hidrógeno H ₂	1 - 3 %
• Nitrógeno N ₂	0.5 - 3 %
• Sulfuro de hidrógeno	0.1 %
• Vapor de agua	Trazas
Contenido energético	6.0 - 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 - 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

(Gonzales, 2015)

C. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en donde hay ausencia de oxígeno en donde la materia orgánica se transforman por la acción de microorganismos en una mezcla de gases que está constituido principalmente por metano y dióxido de carbono. Es un proceso en donde interviene diferentes grupos de microorganismos, la materia se descompone en compuestos más sencillos los cuales son transformados en ácidos grasos volátiles, estos ácidos se consumen por parte de los microorganismos metano génicos que producen metano y CO₂ (Huertas, 2015).

Figura 1. Diagrama ilustrativo de la digestión anaeróbica



1. Productos de la digestión.

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia que se pueden presentar a la hora de realizar el proceso de digestión anaeróbica:

- a. **Biogás:** Es una mezcla gaseosa la cual está formada principalmente por metano y dióxido y en pequeñas concentraciones. Todo esto depende del material que se va a digerir y del funcionamiento del equipo.
- b. **Efluente:** El efluente es otro producto resultante de la degradación anaeróbica y se puede asumir que es la mezcla de este efluente está constituido principalmente de biomasa producida e influente estabilizado

2. Factores que considerar

Algunos factores que puede afectar a la digestión anaerobia son los siguientes:

- a. **Material de carga:** En el proceso de fermentación los microorganismos metanogénicos necesitan nutrientes para producir biogás, por ello es necesario contar con suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa. La materia orgánica que se utiliza como material de carga (residuos de los cultivos, excretas de humanos y de animales) puede dividirse en dos grupos, las materias primas ricas en nitrógeno y 43 las materias primas ricas en carbono (Huertas, 2015).
- b. **Temperatura y tiempo de retención:** La temperatura determina el tiempo de retención para la digestión y degradación de la materia orgánica dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de biogás. Puesto que la digestión es un proceso tan lento, con frecuencia es necesario aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas (Estrada, 2005).

D. Biodigestor

1. ¿Qué son?

Un biodigestor es un contenedor cerrado de forma hermética el cual contiene residuos orgánicos que son de origen vegetal o animal. El grupo de microorganismos presentes en los desechos orgánicos producen una reacción conocida como fermentación anaeróbica, de la que se puede obtener compuestos que pueden producir energía. Los biodigestores son una alternativa limpia, efectiva y económica para comunidades rurales de todo el mundo, estas

permiten satisfacer la demanda energética de las poblaciones y proporciona un medio efectivo para poder manejar residuos humanos y animales. Es una alternativa eficaz para hacer frente contra el calentamiento global (Aquae, 2021).

2. Características

Las características que debe tener un biodigestor van a ir dependiendo de la carga que se quiere tener. Pero las características generales son las siguientes:

- a. Ser totalmente hermético con el fin de evitar la entrada de aire el cual interfiere con la digestión anaeróbica y a la vez que impida la fuga de gas.
- b. Evitar que este térmicamente aislado para evitar cambios de temperatura.
- c. Válvula de seguridad.
- d. Medio para poder efectuar la carga y descarga del sistema.
- e. Acceso para el mantenimiento (Borja, 2017).

3. Componentes de un biodigestor

El sistema consta principalmente de 5 partes:

- a. Cámara de carga: Es un pequeño depósito donde se coloca la materia orgánica el cual alimenta al reactor.
- b. Reactor: Es el digestor es un tanque alargado que se sitúa bajo de tierra en algunos diseños. En este lugar es donde se descomponen los desechos, está conectado a las cámaras de carga y se descarga en 2 extremos diferentes.
- c. Cámara de descarga: Esta recibe los residuos provenientes del reactor, los cuales pueden utilizarse como abono y acondicionador del suelo.
- d. Cubierta de plástico: Esta encima del reactor y lo que básicamente hace es impedir la entrada de aire y evitar la fuga de gas producido.
- e. Tubería: Esta conduce el gas al almacenador de gas. Cuenta con una válvula de seguridad la cual impide que se escape el gas.
- f. Llave de paso: Regula el flujo de biogás producido (Aquae, 2021).

4. Tipos de biodigestores

Existen diferentes tipos de biodigestores: de flujo discontinuo, semicontinuo y continuo. Todo va a depender de lo que se requiera para el proceso. Normalmente el más utilizado en la industria es el continuo o semicontinuo ya que estos proveen la facilidad de tener tiempos de retención bajos y se maneja más por volumen. En cambio, los discontinuos

o tipo batch, tienen tiempos de retención más altos esto se debe a que el proceso de la generación de gas es más tardado para aprovechar todos los microorganismos presentes. El tiempo requerido para que las bacterias digieran la materia orgánica está directamente relacionado con la temperatura. En ambientes que promedian 30 °C, se necesitan 10 días; 5 días a 20 °C y 55 días a 10 °C (Aqua, 2021).

E. Fundamentos de la fermentación metanogénica

1. Etapas de la fermentación metanogénica.

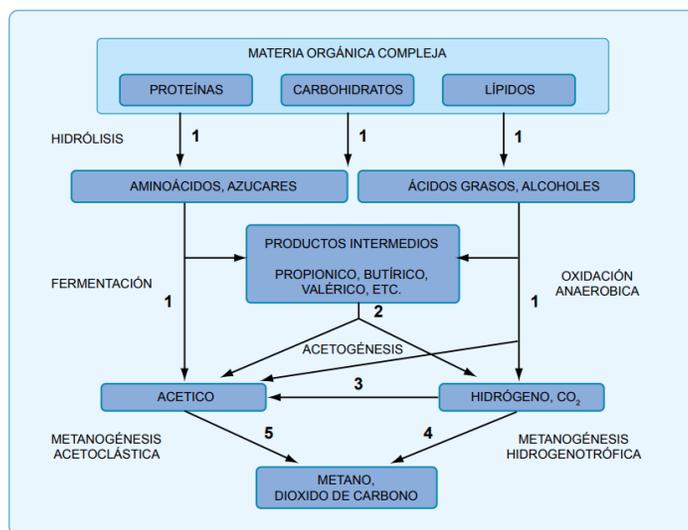
La descomposición anaeróbica es un procedimiento altamente complicado debido al gran número de reacciones bioquímicas que se llevan a cabo y a la cantidad de microorganismos que participan en ellas. De hecho, varias de estas reacciones se desarrollan al mismo tiempo (Brock, 1994).

La materia orgánica se divide en 4 fases o etapas:

- a. Hidrólisis.
- b. Etapa fermentativa o acidogénica
- c. Etapa acetogénica
- d. Etapa metanogénica

La etapa inicial implica la hidrólisis de compuestos complejos, como proteínas, carbohidratos y lípidos, en partículas más sencillas mediante el uso de enzimas extracelulares producidas por microorganismos acidogénicos o fermentativos. Este proceso produce compuestos solubles más simples, como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga, que son luego metabolizados por las bacterias acidogénicas. El resultado principal de esta etapa es la producción de ácidos grasos de cadena corta (Brock, 1994).

Figura 2. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica



a. Hidrólisis

La descomposición anaeróbica de sustratos orgánicos complejos requiere la hidrólisis como primer paso esencial. Es mediante este proceso que se proporcionan los sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. Los microorganismos hidrolíticos producen enzimas extracelulares que llevan a cabo la hidrólisis de estas moléculas complejas. Sin embargo, la etapa hidrolítica puede limitar la velocidad global del proceso, especialmente cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis está influenciada por varios factores, como la temperatura del proceso, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), el tamaño de partículas, el pH, la concentración de NH_4^+ y la concentración de los productos de la hidrólisis (Deublein, 2008).

b. Etapa fermentativa o acidogénica

En esta etapa, ocurre la fermentación de moléculas orgánicas solubles para convertirlas en compuestos que las bacterias metanogénicas puedan utilizar directamente, como ácido acético, ácido fórmico e hidrógeno. También se producen compuestos orgánicos más reducidos, como ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico, ácido láctico y etanol, los cuales deben ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La presencia de este grupo de bacterias es importante, no solo porque producen alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino también porque eliminan cualquier rastro de oxígeno disuelto en el sistema (Deublein, 2008).

c. Etapa acetogénica

En esta fase del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han consumido todo el alimento disponible en la biomasa y, como resultado de su metabolismo, excretan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, conocidos como ácidos volátiles simples, se utilizarán como sustrato en la siguiente etapa por las bacterias metanogénicas (Deublein, 2008).

d. Etapa metanogénica

En esta etapa, un conjunto diverso de bacterias anaerobias estrictas trabaja en los productos resultantes de las etapas previas. Los microorganismos metanogénicos son especialmente importantes en el consorcio de microorganismos anaerobios ya que son los encargados de producir metano y eliminar los subproductos de las etapas anteriores, además de dar nombre al proceso de biometanización en general. Los microorganismos metanogénicos llevan a cabo la digestión anaerobia al convertir sustratos que contienen uno o dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente, como acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas, en metano (Deublein, 2008).

2. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica.

El aumento de la presión económica en los productos agrícolas convencionales ha llevado a muchos agricultores a abandonar la producción debido a rendimientos insuficientes. Sin embargo, en algunos países, la producción de biogás se encuentra subvencionada o cuenta con incentivos económicos, lo que brinda a los agricultores una fuente adicional de ingresos. La implementación de tecnologías de digestión anaeróbica en el sector agrícola puede ofrecer beneficios ambientales, económicos y energéticos significativos, además de mejorar la gestión de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y capturar y utilizar el biogás generado. La degradación aeróbica de residuos orgánicos genera compuestos de bajo poder energético como CO_2 y H_2O , con una pérdida de energía estimada en aproximadamente veinte veces más alta que en la degradación anaeróbica. En cambio, la degradación anaeróbica produce productos metabólicos de alto poder energético, como alcoholes, ácidos orgánicos y metano, que pueden ser utilizados por otros organismos como nutrientes o por la sociedad con fines energéticos, como el biogás (CNE, 2016).

Para poder comparar el efecto de diferentes gases de efecto invernadero, se utiliza un factor de potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) para cada uno de ellos en relación con el CO₂, que se considera como el "gas de referencia". El GWP indica la medida del efecto invernadero de un gas en comparación con el CO₂ y se puede calcular multiplicando el potencial de efecto invernadero en relación con la masa del gas correspondiente. Se expresa en términos de la cantidad de CO₂ que produciría el mismo efecto invernadero en un período de 100 años. Por ejemplo, el metano (CH₄) es un gas de efecto invernadero más potente que el CO₂ en un factor de 21.

Tabla 3. Potencial de calentamiento de los gases de efecto invernadero.

Gas	Potencial de calentamiento
<i>CO₂</i>	1
<i>CH₄</i>	21
<i>N₂O</i>	310
<i>SF₄</i>	23900
PFC	9200
HFC	11700

(CNEE, 2006)

F. Factores determinantes en el proceso metanogénico

Es esencial analizar los factores que influyen en el proceso metanogénico, ya que los microorganismos involucrados son altamente sensibles a las condiciones ambientales. La tasa de producción de metano es un factor crucial en la evaluación del rendimiento de un sistema anaeróbico, ya que la metanogénesis se considera una etapa limitante del proceso. Varios factores ambientales pueden afectar el desempeño del sistema, como la temperatura, el pH, la concentración de sustrato, la carga orgánica, la presencia de inhibidores y la disponibilidad de nutrientes. Es importante controlar los factores para optimizar el rendimiento del proceso metanogénico y su estabilidad a largo plazo (Brock, 1994).

1. Relación C/N de las materias primas

Casi toda la materia orgánica puede generar biogás mediante el proceso de fermentación anaeróbica. La cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la naturaleza y composición del residuo utilizado. Es importante asegurarse de que los niveles

de nutrientes estén por encima del nivel óptimo de bacterias, ya que una falta de nutrientes las puede inhibir severamente.

Las bacterias metanogénicas se alimentan principalmente de carbono y nitrógeno, siendo el carbono la fuente de energía y el nitrógeno utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que se considera que una relación óptima de carbono a nitrógeno en la materia prima esté en el rango de 30:1 a 20:1.

La descomposición de materiales con un alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente ya que la multiplicación y desarrollo de las bacterias es baja debido a la falta de nitrógeno, aunque el período de producción de biogás es más prolongado. Sin embargo, una relación C/N menor a 8:1 puede inhibir la actividad bacteriana debido a la formación de un exceso de amonio, lo cual en grandes cantidades puede ser tóxico e inhibir el proceso (Varnero, 1991).

Figura 3. Valores promedios de la relación C/N de algunos residuos disponibles.

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos vegetales			
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	0.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

(Varnero, 1991)

2. Temperaturas

La temperatura es un factor crucial en los procesos anaeróbicos, así como en otros sistemas biológicos. La velocidad de los procesos biológicos está estrechamente relacionada con la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, la cual depende de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la velocidad de crecimiento de los microorganismos se acelera y, por lo tanto, se incrementa la producción de biogás.

La temperatura del digestor es considerada como uno de los parámetros fundamentales de diseño, debido a su gran influencia en la velocidad de la digestión anaeróbica. Variaciones repentinas en la temperatura del digestor pueden ocasionar la desestabilización del proceso. Por lo tanto, es esencial contar con un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura para asegurar una temperatura uniforme en el digestor.

Tabla 4. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psychrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 Días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30 - 60 Días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10 – 15 Días

3. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención y la velocidad de carga orgánica son dos factores clave en el diseño de sistemas anaeróbicos, ya que determinan el volumen del digestor necesario. La materia orgánica o sólidos volátiles (SV) es la porción de la materia seca que se volatiliza a altas temperaturas. En el caso de los residuos animales, su contenido de materia seca puede ser superior al 10% de la mezcla agua-estiércol, lo que puede ser problemático para la operación del reactor anaeróbico. Por lo tanto, los residuos de las granjas deben diluirse antes de someterlos al proceso de tratamiento.

La eficiencia de producción de biogás se expresa generalmente como el volumen de biogás producido por unidad de peso de materia seca o sólidos volátiles. La fermentación de biogás requiere una concentración adecuada de materia seca, que puede variar desde 1% hasta 30%, dependiendo de la temperatura (Vernero, 1991).

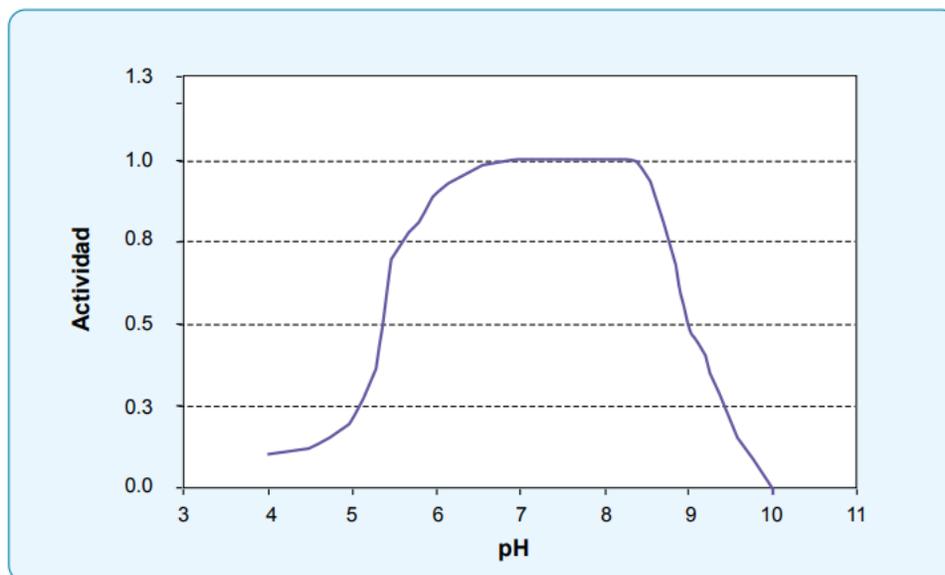
Figura 4. Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones

Tiempo de retención hidráulico	Características
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía.
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

4. Rango de pH y alcalinidad

Pequeñas variaciones en los niveles de pH pueden afectar negativamente el proceso anaeróbico. Los microorganismos metanogénicos son especialmente sensibles a las fluctuaciones del pH en comparación con otros microorganismos presentes en la comunidad microbiana anaeróbica. Cada grupo de bacterias presenta niveles óptimos de actividad en un rango de pH específico. Los acidogénicos tienen un pH óptimo entre 5.5 y 6.5, mientras que los metanogénicos prefieren un pH entre 7.8 y 8.2. Para los cultivos mixtos, el pH óptimo está en el rango de 6.8 a 7.4, siendo el pH neutro el más adecuado. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0 (Speece, 1996).

Figura 5. Dependencia del pH de la actividad metanogénica



G. Usos del biogás

1. Aplicaciones del biogás.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos.

- *Producción de calor o vapor:* El biogás se utiliza principalmente para obtener energía térmica, es decir, calor. En zonas donde los combustibles son limitados, los sistemas de biogás de pequeña escala pueden proporcionar calor para cocinar y calentar agua. Además, estos sistemas también se pueden utilizar para iluminación.
- *Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad:* Los sistemas combinados de calor y electricidad aprovechan tanto la electricidad generada por el combustible como el calor residual que se produce. En algunos casos, estos sistemas producen principalmente calor, y la electricidad es secundaria, mientras que, en otros sistemas, se produce principalmente electricidad, y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se mejora la eficiencia del proceso en comparación con el uso separado del biogás para generar electricidad o calor. Las turbinas de gas, tanto las microturbinas (de 25 a 100 kW) como las turbinas grandes (>100 kW), se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones, se utilizan motores de combustión interna. Para usar biogás en estos sistemas, se requiere la eliminación del H₂S (por debajo de 100 ppm) y del vapor de agua.
- *Combustible para vehículos:* Además, el biogás utilizado en vehículos debe cumplir con ciertas especificaciones en cuanto a su composición y pureza, tales como bajos niveles de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y de agua, así como un alto contenido de metano. Los sistemas de purificación y enriquecimiento de biogás pueden ser necesarios para lograr esta calidad. El uso de biogás como combustible vehicular puede ser una opción más sostenible y menos contaminante que los combustibles fósiles convencionales (Mandujano, 1981).

H. Contaminación por gallinaza y desecho alimenticios

En el caso de la gallinaza, cuando se obtiene fresca contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros compuestos orgánicos, que causan perjuicio a quienes habitan cerca de las granjas avícolas. Algunas consecuencias del mal manejo de la gallinaza son los siguientes:

- **Atmósfera:** Produce malos olores debido al contenido de nitrógeno, gases asfixiantes por el sulfuro que este produce, gases irritantes, desnitrificación y aerosoles. Que a largo plazo son contraproducentes para las personas que pudieran estar viviendo en esas zonas.
- **Suelo:** En los suelos, a parte que puede ser un buen fertilizante también puede tener variaciones de pH, salinidad alta con el mal manejo que esta pueda tener, al no tener una buena separación también puede contener metales pesados los cuales pueden afectar a las plantaciones o hasta a los mismos animales. Exceso de NO_2 y NO_3 que es un subproducto producido en los suelos, y retención de agua lo que puede causar que haya una mala alimentación para las plantas.
- **Agua:** Producción de lixiviados los cuales pueden ser altamente contaminantes al ambiente al tirarlos a ríos o al desagüe. Eutrofización que al igual que los lixiviados pueden dañar el ecosistema de ríos o lagos. Patógenos fecales los que pueden generar enfermedades a las personas o hasta los mismos animales (Rodríguez, 2020).

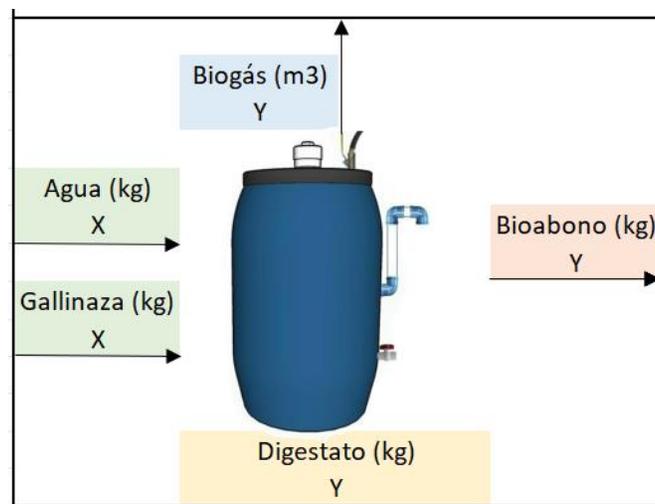
En el caso de la contaminación cuando desperdiciamos alimentos, también desperdiciamos toda la energía y el agua que se requieren para cultivarlos, cosecharlos y transportarlos. Los alimentos llegan a parar en un vertedero donde se pudren, luego producen metano, que es un gas de efecto invernadero aún más perjudicial que el dióxido de carbono. El desperdicio de alimentos genera aproximadamente el 8% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan. Solo en Estados Unidos, la producción de alimentos perdidos o desperdiciados genera el equivalente en emisiones de gases de efecto invernadero a 43 millones de automóviles. Actualmente es una fuente de contaminación que está empezando a tener una gran participación en la contribución de gases de efecto invernadero al ambiente. El desperdicio de recursos utilizados en la producción como tierra, agua, energía e insumos, por lo que producir comida que no va

a consumirse supone emisiones innecesarias de CO2 que contribuyen al calentamiento global y cambio climático. (WWF, s.f).

I. Balance de masa

El balance de masa es un factor y una herramienta muy importante para entender y optimizar el proceso de biodigestión de la gallinaza y de los residuos alimenticios. Básicamente el balance de masa se representa de la siguiente manera:

Figura 6. Balance de masa general del proceso



Entrada de materia orgánica (MO) + Entrada de agua = Salida de biogás + Salida de efluente + Digestato.

La materia orgánica y el agua son los principales componentes del biodigestor, mientras que el biogás y el bioabono/efluente son los productos principales que se obtienen durante la fermentación. El biogás es una mezcla de metano con dióxido de carbono, mientras que el bioabono es un líquido que es rico en nutrientes y materia orgánica. La mezcla de la materia orgánica se escoge dependiendo de la edad de las aves, su alimentación y las prácticas de manejo de la granja de donde se obtiene la materia orgánica.

El biogás se obtiene dependiendo del tipo de sustrato y se tiene que llevar un registro a lo largo de la fermentación. Normalmente se registra en términos de volumen. Y puede

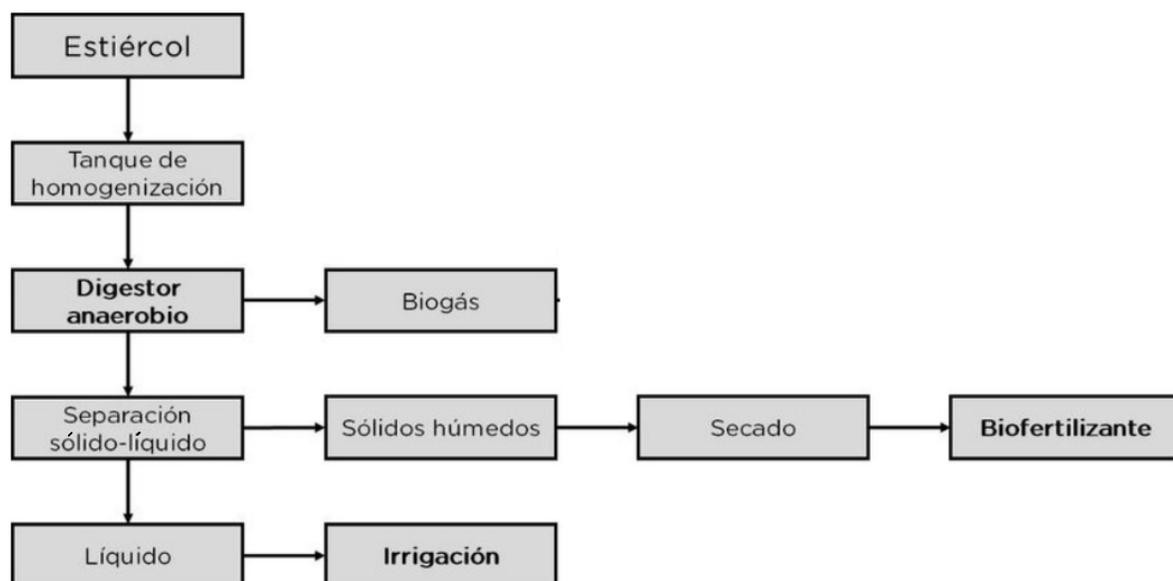
utilizarse como fuente de energía para el uso doméstico. Es importante el balance de masa para mantener optimas las condiciones para los microorganismos (Kumar, 2008).

J. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo describe todo el procedimiento que se lleva a cabo a lo largo del proceso. El diagrama de flujo teórico de un biodigestor es el siguiente:

1. Recepción y almacenamiento de los sustratos frescos en un tanque o fosa.
2. Pretratamiento: Se realiza la separación de los sólidos gruesos y se mezcla con agua para formar una suspensión homogénea.
3. Alimentación del biodigestor con la mezcla de sustrato y agua.
4. Fermentación anaerobia: la mezcla de sustrato y agua se somete a la acción de las bacterias anaerobias que producen biogás.
5. Separación del biogás: el biogás producido en el biodigestor se recolecta y se separa del digestato.
6. Eliminación del digestato: El digestato posteriormente se utiliza como un fertilizante (Varnero, 1991).

Figura 7. Diagrama de flujo general del proceso de un biodigestor



V. Antecedentes

A. Situación nacional de la bioenergía y los desechos

La situación nacional de los desechos sólidos ha ido cambiando al largo de los años. Ya que el consumo de comida ha ido creciendo. Según el Banco Mundial, cada persona en Guatemala produce en promedio 0.47 kg de desechos sólidos al día. Dado que hay alrededor de 17 millones de habitantes en el país, esto quiere decir que se generan cerca de 7990 toneladas de desechos sólidos al día. Estas cifras son del último perfil ambiental del país, que es del 2021. En general, al año se generan 2,916,350 toneladas de basura, la cual se acumula en vertederos municipales, basureros clandestinos y cuerpos de agua. Se espera que estos desechos crezcan cerca de un 70% para el año 2050. Todos estos desechos constituyen principalmente residuos de comida, plásticos y en menor proporción desechos orgánicos. A más detalle, el tipo de desecho que más se produce es el agrícola y el domiciliario.

Debido a la mala gestión de los desechos orgánicos que se generan, en algunas casas y granjas se optó por darle un uso a estos desechos. Guatemala, en los últimos años, ha invertido en las energías renovables para no depender de las energías convencionales es por eso que se calcula que para 2050, el país estaría contratando cerca de 2000 MW, en las que se encuentran energías provenientes de residuos alimenticios. Actualmente, se utilizan pequeñas plantas pilotos en granjas y en casas que consisten en biodigestores que generan biogás, como dato actual, en Guatemala hay 4 mil MW establecidos, de los cuales 7 MW provienen del biogás en total aporta un 0.025% de la energía total.

En la actualidad, hay bastantes proyectos sobre la generación de biogás el último proyecto importante fue el de una inversión de 35 millones. El proyecto consistió en la implementación de una planta que tiene la capacidad para generar 1 MW, el proyecto llevó alrededor de 3 años de investigación y dos años de construcción para que operara. En 2020 operaba entre 500 a 600 kilovatios por ahora. El 10% de volumen generado es para el autoconsumo de la planta, el resto se inyecta a la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. La planta cuenta con 2 biodigestores anaeróbicos que cuenta con un desulfurador. El resultado

es que el 10% de la materia prima se transforma en gas, que se usa para generar la energía renovable.

B. Proyectos relacionados con el biogás.

Se presentó un trabajo que constaba de el “*Diseño de un sistema integrado generador de energía que incluye la producción de biogás, electricidad y compost, utilizando residuos orgánicos de origen animal en la finca Rama Blanca de Sipacate, Escuintla*” el objetivo del trabajo consistía en el desarrollo de una propuesta técnica y económicamente viable de generación de energía a partir de desechos orgánicos como lo son excremento de búfalo y suero. Se utilizó dos biodigestores a nivel laboratorio para la generación del biogás, donde se trató el biogás obtenido por medio de un desulfurado para purificarlo. En términos económicos el proyecto es rentable obteniendo una TIR de 67.8%. El estudio concluyó en que el que produce más metano durante la fermentación fue el suero de leche. Para seguir el estudio del tema se recomendó analizar la alimentación de los animales para tener una mejor perspectiva del sustrato.

Castillo, M y Galdámez, R que realizaron el trabajo titulado “*Aprovechamiento de Desechos Orgánicos Seleccionados del Zoológico “La Aurora”*”, el cual consistía en la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia a partir de desechos orgánicos para su próxima implementación, además de encontrar la mezcla adecuada para la mayor cantidad de metano producido. Para la continuación del proyecto se recomendó utilizar otro tipo de sustratos de otros animales para analizar la producción de metano y revisar si se puede realizar nuevas mezclas a partir de estos nuevos sustratos.

C. Proyectos internacionales relacionados con el biogás.

A nivel internacional, la utilización del biogás ha ido incrementado a lo largo de los años para la reducción del uso de energías convencionales. En Alemania se encuentra la planta de biogás más grande del mundo, la cual cuenta con una potencia 55 MW puede cubrir las necesidades de un pueblo de 50,000 habitantes. La planta contaba con veinte biodigestores, en los cuales se recibía los desechos orgánicos de las granjas aledañas a la planta, con el objetivo de reducir la contaminación y el mal uso de los desechos de animales

como de los humanos. De hecho, este tipo de modelos de plantas es un buen sustituto del gas natural, el cual es una materia prima e importante para población de Europa.

Otro proyecto de gran impacto a nivel mundial es que se está desarrollando en Polonia llamado Polaniec, este proyecto de biogás consiste en una planta de biomasa que tiene una potencia instalada de 205 MW. Es la cuarta más grande del mundo, principalmente utiliza subproductos agrícolas y residuos de madera para su funcionamiento. La planta genera electricidad para abastecer alrededor de 600,000 hogares, reduciendo alrededor de 1.2 millones de toneladas de emisiones CO_2 .

VI. Metodología

A. Diseño del experimento.

1. Elección de las proporciones: Las proporciones propuestas para llevar a cabo la producción de biogás fueron las siguientes: 1:3, 2:3 y 3:3 (kg de gallinaza: kg de agua). Estas proporciones se escogieron por razones económicas y ambientales, actualmente de donde se obtiene los residuos orgánicos no se desecha de una manera adecuada lo cual genera una contaminación alta y eso tiene incidencia directa en costos como multas, remuneración por daños a las personas que viven cerca. Además, cabe resaltar que los residuos en varios casos son una materia prima clave para la elaboración de abono orgánico, lo cual implica que el descartar los residuos se pierde una posible fuente de ingresos. Por lo cual las proporciones fueron enfocadas en factores externos como por ejemplo el lugar donde se vaya a implementar el proyecto. Que dependerá de la cantidad de materia orgánica y agua que se tenga disponible, los factores son los siguientes:
 - a. *Rapidez de descomposición*: Para obtener biogás de una manera rápida para su consumo al instante es necesario que las proporciones sean equivalentes ya que promueve una actividad microbiana alta por esta razón la mezcla 3:3 es la mejor opción.
 - b. *Manejo del contenido de sólidos*: Las diferentes proporciones afectan el contenido de sólidos en la mezcla. Una alta cantidad de materia orgánica aumenta la concentración de sólidos. Mientras que de agua los diluye, la producción de biogás va a depender del diseño del biodigestor en este caso. Por esta razón es que a partir de un mismo diseño de biodigestor se busca con las diferentes proporciones, cual es la óptima para la producción de biogás.
 - c. *Disponibilidad de recursos*: La disponibilidad de materia orgánica en la región donde se implemente el sistema de biodigestores es un factor clave. Si hay escasez de materia orgánica, podrías haber optado por una proporción más baja (1:3) para conservar este recurso. Mientras que si se quiere mantener un equilibrio entre la disponibilidad de nutrientes y la cantidad de agua, es una buena opción optar por la mezcla 2:3

2. Caracterización de los sustratos: El tamaño de la muestra para la caracterización de las muestras se vio influenciada por varios factores. Las muestras se realizaron en el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas, esto debido a que la Universidad no contaba con el equipo necesario para realizar los respectivos estudios. Como se muestra a continuación los estudios tenían un costo muy elevado.

Tabla 5 Costo de los estudios para la caracterización de los sustratos

Código	Descripción	Precio (Q)	Precio (\$)
AO-1	Abonos orgánicos sólidos: pH, N, Ca, K, Mg, P, Fe, Cu, Mn y Zn, % de MO y relación C/N	225.00	28.73

Al ser dos sustratos el costo se elevaba mucho. También se tiene que tomar en cuenta que ambos sustratos salieron de un mismo lote obtenido por lo cual no hubo variación.

Aunque si no existiera el inconveniente del costo de los estudios se calculó el tamaño de muestra para los tres biodigestores, como se muestra en el cálculo No 1 en la sección de cálculos, se encontró cuantas muestras realmente se tienen que realizar para tener un nivel de confianza de 95%. El 95% es debido a que es un rango óptimo para este tipo de experimentos y además proporciona un equilibrio entre la confianza de los resultados y la precisión del intervalo de confianza.

Proporción (kg gallinaza: kg agua)	Tamaño de muestra
1:3	13
2:3	20
3:3	24

3. Obtención del volumen y la calidad del gas: A lo largo del tiempo de fermentación en los 6 biodigestores se fue liberando gas y al mismo tiempo se fue capturando. Para el número de muestras no se estableció una cantidad fija, esto debido a que el volumen

se iba registrando por día lo que se quería evaluar era la cantidad de gas que se podía producir en un día ya que el uso del gas en la actualidad para este modelo de estudio es por día. Al igual que con el volumen se realizó el mismo procedimiento con la calidad ya que se analizó y observó en que día de la fermentación se obtenía la mayor calidad del gas.

4. Construcción de los biodigestores: Para la construcción de los biodigestores se escogió un total de seis biodigestores, tres para cada sustrato. No hay un fundamento estadístico que dictamine el porqué de esta cantidad. Pero se escogió esta cantidad ya que los biodigestores en su mayoría están contruidos a partir de materiales reciclables por lo cual la cantidad de material era limitada y a eso agregar que, según el manual del biogás, un estudio representativo para la producción de biogás, el número óptimo es de 3 biodigestores. Con las mezclas que se utilizó ya que según el *Manual del biogás* estas 3 mezclas son las óptimas para producir biogás para estos 2 tipos de sustratos.
5. Caracterización del gas: Aquí se escogió un número limitado de muestras ya que los análisis se tenían que realizar el mismo día que se extraía el gas por lo cual había ocasiones donde no salía una cantidad significativa de gas. Por lo cual se optó por tener un número limitado de muestras para no tener una variabilidad alta.

B. Caracterización de los sustratos.

1. Medición de humedad.

Cabe resaltar, que se siguió la normativa NTE INEN 265. Se realizó el mismo procedimiento para ambos sustratos (gallinaza y residuos alimenticios) cabe resaltar que se realizaron los análisis en Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas, el procedimiento fue el siguiente:

- a. Se precalentó la estufa a 105°C.
- b. Pesar los crisoles previamente.
- c. Colocar los crisoles vacíos en el horno alrededor de 30 minutos.
- d. Con guantes térmicos, retirar los crisoles del horno.
- e. Colocar los crisoles en el deshumidificador. Colocar el termómetro de contacto encima de las cápsulas.

- f. Cuando la temperatura de las cápsulas haya bajado hasta temperatura ambiente $\pm 2^{\circ}\text{C}$, pesar los crisoles.
- g. Colocar entre 20 a 30 gramos del sustrato dentro del crisol, cerrar con la tapa y pesar la cápsula en la balanza analítica.
- h. Volver a colocar las cápsulas con la tapa entreabierta.
- i. Secar la muestra alrededor de 3 horas. Asegurándose que no se abra la puerta de la estufa.
- j. Transcurrido las 3 horas. Cerrar las cápsulas con las tapas, retirar las cápsulas de la estufa y colocarlas en el deshumidificador con el termómetro de contacto.
- k. Enfriar las cápsulas hasta que el termómetro indique la temperatura ambiente $\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- l. Pesar las cápsulas en la balanza analítica.
- m. Se realizan los respectivos cálculos. Se expresa la pérdida de masa en forma de % de la masa original, mediante el siguiente cálculo:

1. *Pérdida durante el secado, %* = $\frac{m_2 - m_3}{m_1 - m_2} * 100\%$

- a. Donde:

- m1: Masa de la cápsula (g).
- m2: Masa de la cápsula + sustrato antes del secado (g)
- m3: Masa de la cápsula + sustrato después del secado (g)

2. Determinación de pH.

Según el *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos*, la determinación del pH se realizó en ambos sustratos, cabe resaltar que se realizaron los análisis en Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. El procedimiento es el siguiente:

- a. Se calibra el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras (solución básica y solución ácida).
- b. A continuación, se pesaron 10 g de muestra/sustrato los cuales fueron puestos en un Beaker.
- c. Se adicionaron 90 mL de agua destilada.
- d. Se colocó un agitador magnético dentro del Beaker y se puso a agitar durante 10 minutos.
- e. Se dejó reposar la solución durante 1 hora.

f. Luego con el potenciómetro, medir el pH.

3. Determinación de la relación C/N.

La determinación de la relación Carbono – Nitrógeno, se realiza por medio de dos análisis previos, los cuales son la determinación de carbono y de nitrógeno, cabe resaltar que estos análisis se realizaron en el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. El primer análisis es la determinación de Carbono en los sustratos, el procedimiento a utilizar es el método Walkley-Black, el procedimiento es el siguiente:

- a) Pesar 1 gramo del sustrato en un Erlenmeyer de 500 mL.
- b) Adicionar 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ 0.167 M, agitar suavemente el Erlenmeyer.
- c) Luego adicionar con cuidado 20 mL de H_2SO_4 concentrado.
- d) A continuación, mover el Erlenmeyer suavemente hasta mezclar todos los reactivos, durante 1 minuto.
- e) Este procedimiento se realizó en una campana de extracción. Dejar reposar por 30 minutos.
- f) Luego, adicionar 200 mL de agua al Erlenmeyer.
- g) A continuación, adicionar 10 mL H_3PO_4 AL 85%,
- h) Colocar 3 a 4 gotas de indicador difenilamina sulfonato de bario y titular la solución con la solución de $FeSO_4$ a 0.5 M.
 1. En la titulación el punto final cambia a azul violáceo oscuro.
 2. Agregar lentamente gota a gota la solución de sulfato ferroso.
 3. En el punto final el color cambia bruscamente a verde brillante.
- i) Calcular el % CO. Se calcula mediante la siguiente manera.
 1. A partir de la ecuación:
 - a. $2Cr_2O_7^{2-} + 3C^0 + 16H^+ \leftrightarrow 4Cr^{3+} + 3CO_2 + 8H_2O$
 - b. 1 mL de solución de dicromato 1 N es equivalente a 3 mg de carbono.
 - c. Después de la reacción, el exceso de Cr_2O_7 es titulado con $FeSO_4$ 0.5 M.
 - d. $6Fe^{2+} + Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ \leftrightarrow 2Cr^{3+} + 6Fe^{3+} + 7H_2O$
 - e. $C_{orgánico}, \% = \frac{(V_{blanco} - V_{muestra}) * M_{Fe^{2+}} * 0.003 * 100 * f * mcf}{W}$
 1. Donde:

- V_{blanco} : Volumen de titulante utilizado en el blanco, mL.
- $V_{muestra}$: Volumen de titulante utilizado de muestra, mL.
- $M_{Fe^{2+}}$: Concentración de la solución estandarizada de $FeSO_4$.
- f : Factor de corrección, 1.3
- W: Peso del sustrato, g
- mcf: factor de corrección por humedad

A continuación, y siguiendo con la metodología se encontró el porcentaje de nitrógeno dentro de los sustratos. Siguiendo con el método de Kjeldahl, el cual se realizó en el Laboratorio del Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas. El procedimiento es el siguiente:

- Obtener una muestra representativa (10 gramos – 20 gramos) y diluirla en agua.
- Preparar la mezcla catalizadora con 10.4 gramos de sulfato de potasio, 0.3 gramos de sulfato de cobre pentahidratado y 0.3 gramos de óxido de titanio.
- Pesar 0.7 o 2.2 gramos y transferirlos al matraz Kjeldahl.
- Agregar 40 mL de ácido sulfúrico que contengan 2 mL de ácido salicílico.
- Mezclar y dejar reposar 30 minutos, agitando cada 5 minutos.
- Agregar 5 gramos de tiosulfato de sodio a continuación agitar y dejar reposar 5 minutos.
- Calentar suavemente hasta que desaparezca la espuma que se genera.
- Agregar al balón de Kjeldahl 2 gramos de mezcla catalizadora.
- Hervir hasta que la solución se clarifique durante 30 minutos a 2 horas a 80 °C.
- A continuación, se empieza con la destilación.
- Enfriar a temperatura ambiente y agregar 200 mL de agua.
- Añadir granallas de zinc para regular la ebullición.
- Inclinar el balón y colocar 60 mL de solución de hidróxido de sodio al 45%.
- Conectar el balón al refrigerante a la trampa de vapor, dejando el extremo del refrigerante sumergido en una cantidad conocida en solución de ácido sulfúrico.

- o. Calentar hasta destilar todo el amoníaco. Mínimo 150 ml de destilado.
- p. Retirar el tubo de salida del destilado, enjuagando el exterior del tubo en el destilado para evitar el arrastre de vapor.
- q. A continuación, se valorará el exceso de ácido.
- r. Titular con 2 gotas de indicador rojo de metilo.
- s. Se titula el exceso de la solución el exceso de la solución de ácido con la solución alcalina valorada con hidróxido de sodio.
- t. Se realizan los cálculos:

1. El contenido de nitrógeno en los sustratos se da por la siguiente ecuación:

$$a. N = \frac{1.4*(V1*N1-V2*N2)-(V3*N1-V4*N2)}{m}$$

b. Donde:

- N: Contenido de nitrógeno total.
- V1: Volumen de la solución de ácido sulfúrico usado para recoger el destilado de la muestra, en mL.
- N1: Normalidad de la solución de ácido sulfúrico.
- V2: Volumen de la solución de hidróxido de sodio usado en la titulación, mL.
- N2: Normalidad de la solución de hidróxido de sodio.
- V3: Volumen de la solución de ácido sulfúrico usado para recoger el destilado del blanco, mL.
- V4: Volumen de la solución de hidróxido de sodio empleado en la titulación del ensayo de blanco, en mL.
- m: Masa de la muestra del sustrato, en gramos.

C. Operación y construcción de biodigestores

1. Construcción de biodigestor.

La construcción del biodigestor se realizó partiendo de un modelo estándar, a continuación, se detallarán los materiales y el procedimiento en cómo se construyó los biodigestores.

Materiales:

- a. Caneca plástica de 55 galones con tu tapa.
- b. Cincho metálico.
- c. Válvula con tapa.
- d. Válvula de paso.
- e. Válvula de media pulgada de gas.
- f. 3 codos de 90°C PVC.
- g. 1 tubo PVC de 2 pulgadas.
- h. 1 metro de tubo PVC de media pulgada.

Construcción del biodigestor:

- a. En la tapa de la caneca realizar un orificio de 2 pulgadas con una broca.
- b. Unir la válvula con el tubo PVC por medio de un adaptador hembra – macho.
- c. Introducir la unión en la tapa de caneca.

Figura 8. Diagrama de la introducción de la tapa en la caneca.



- d. A continuación, en la misma tapadera colocar un orificio de media pulgada, la cual se realiza con una broca de media pulgada.
- e. Y se introduce la válvula de gas, esto se une con el mismo adaptador hembra – macho.

Figura 9. Diagrama de válvula de gas con los adaptadores



- f. Posteriormente se coloca un orificio en la parte inferior de la caneca, de media pulgada.
- g. Se unen nuevamente con la adaptación hembra – macho.

Figura 10. Diagrama del biodigestor con la adaptación colocada.



- h. Con los 3 tubos de 90°C se construye un tubo y se coloca en la mitad de la caneca.
- i. Con 20 centímetros de altura y 4 centímetros ancho.

Figura 11. Diagrama de las medidas del tubo de 90°C en el biodigestor.



- j. De manera que quede de la siguiente manera.

Figura 12. Diagrama final del prototipo de biodigestor a utilizar.



2. Procedimiento para cargar los biodigestores.

El procedimiento para cargar los biodigestores se realizó de la misma manera para los dos tipos de sustrato (gallinaza, residuos alimenticios). En ambos sustratos se utilizó las mismas mezclas (1:3, 2:3, 3:3). El procedimiento fue el siguiente:

- Los sustratos se obtuvieron de una granja de pollos y de un restaurante de comida rápida. Se juntó alrededor de 160 kilogramos, de cada sustrato.
- Dependiendo la mezcla que se iba a utilizar, se utilizó una pala para cargar los biodigestores.
- La carga se realizó hasta la altura de la tubería de 90°, tal como se ve en la imagen.

Figura 13. Marca máxima hasta donde se cargó los biodigestores.



- Primero se ingresó el sustrato para posteriormente ingresar la porción de agua correspondiente. Se hizo reposar por 1 minuto.
- Luego se colocó la tapa con la válvula de gas y se selló.

3. Procedimiento del manejo de bioabono.

En la producción de biogás, se generó un líquido oscuro llamado bioabono. Este residuo generado es utilizado como una especie de fertilizante las plantas o suelos.

- a. Al cabo de unos días, en la tubería de 90° fue saliendo el bioabono.
- b. El bioabono fue almacenado en pequeños recipientes.

Figura 14. Recepción de bioabono de los biodigestores



- c. El recipiente se tiene que cambiar cada día para llevar un registro de la generación de bioabono.
- d. El bioabono en el recipiente se pesa.
- e. Se mide la densidad del bioabono para llevar un registro.
- f. A continuación, el bioabono se coloca en suelos para utilizarlo como fertilizante.

Figura 15. Uso del bioabono en suelos.



- g. En el caso del bioabono utilizado en los residuos alimenticios, este fue enviado a un criadero de cerdos donde lo utilizan como alimento.

D. Almacenamiento de biogás

1. Almacenamiento del gas.

Al cabo aproximadamente de 2 días de iniciada la fermentación, empezó a generar biogás dentro de los biodigestores. El gas se tuvo que almacenar para luego caracterizarlo.

- En la válvula de salida de gas, se coloca un adaptador para luego colocar una manguera de extracción.

Figura 16. Adaptador colocado en el biodigestor.



2. A continuación, se coloca un globo de aluminio en la manguera de extracción.

Figura 17. Almacenamiento de biogás generado.



3. Se abre la válvula, y por diferencias de presión. El gas sale y el globo se llena de biogás.
4. El globo se cambia cada día para llevar el registro del volumen generado de biogás.
5. A lo largo de la fermentación se almacenaron las muestras de gas.

Figura 18. Almacenamiento de muestras de biogás.



6. Cada muestra se identificó con el número de muestra, y de que biodigestor era.

2. Obtención de %LEL para la calidad del gas

Se utilizó un sensor de metano para la cuantificación de %LEL y así saber la calidad del gas que se obtiene en la fermentación. El sensor solo es especializado para la detección de metano.

- Con una jeringa extraer una muestra de biogás de 5 ml.

Figura 19. Extracción de biogás.



- A continuación, colocar la jeringa en el sensor y tomar la muestra.

Figura 20. Detección de %LEL en el biogás



- Tomar la muestra hasta que se estabilice el sensor y registrar la medida.

E. Procedimiento del FID

Para caracterizar el gas y saber que compuestos contiene, se realizó un análisis en la Universidad del Valle de Guatemala, por medio de FID. Este equipo analiza la composición del gas, dando los resultados como espectros. Por medio de un estándar se analiza los picos. El procedimiento es el siguiente:

- a. La muestra se recolecta en globos de aluminio, como previamente fue descrito.
- b. Se debe retirar cualquier tipo de humedad o partículas sólidas.
- c. La muestra debe tener al menos 500 μm . Ya que es lo que el equipo necesita para realizar el análisis.
- d. El FID se tiene que calibrar previamente utilizando un gas de referencia, en este caso es nitrógeno.
- e. Por medio de una jeringa se captura una muestra de 500 μm , y se inyecta en el equipo.
- f. Transcurridos alrededor de 2 minutos, el espectrómetro comienza a reflejar los primeros picos.
- g. Se identifican los picos por medio del manual del equipo.

VII. Resultados

A. Caracterización del sustrato

Tabla 6. Resultados de la caracterización de los sustratos que se van a utilizar para la producción del biogás

Tipo de sustrato	Parámetro	Valor promedio
Residuos alimenticios	pH	9.83
	% Materia orgánica	51.40
	Relación C/N	21.45
	Humedad (%)	62
Gallinaza	pH	10.69
	% Materia orgánica	47.00
	Relación C/N	13.91
	Humedad (%)	78

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

B. Comparativo de volumen

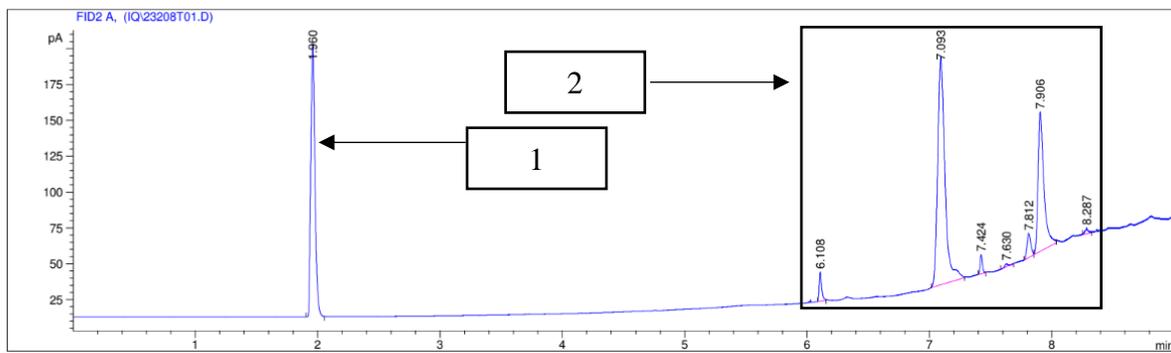
Tabla 7. Volumen total de biogás generado en la fermentación de gallinaza y residuos alimenticios.

No	Sustrato	Mezcla	Volumen total (m³)
1	Gallinaza	1: 3	0.032
2	Gallinaza	2: 3	0.029
3	Gallinaza	3: 3	0.023
4	Residuos alimenticios	1: 3	0.021
5	Residuos alimenticios	2: 3	0.017
6	Residuos alimenticios	3: 3	0.017

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

C. Cromatogramas de la caracterización del biogás

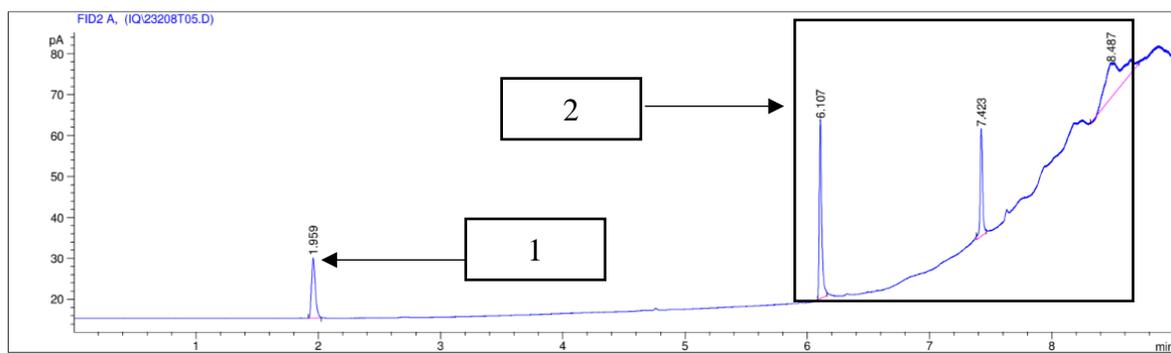
Figura 21. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 1:3 de gallinaza



Número	Nombre del compuesto	Tiempo (min)
1	Metano	1.96
2	Ruido	6.11 – 8.29

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

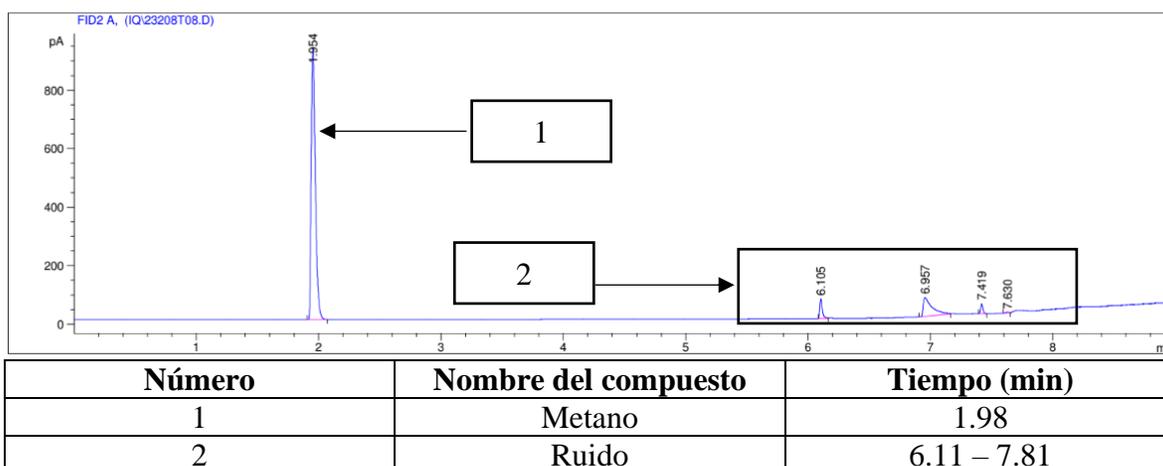
Figura 22. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 2:3 de gallinaza



Número	Nombre del compuesto	Tiempo (min)
1	Metano	1.96
2	Ruido	6.11 – 8.49

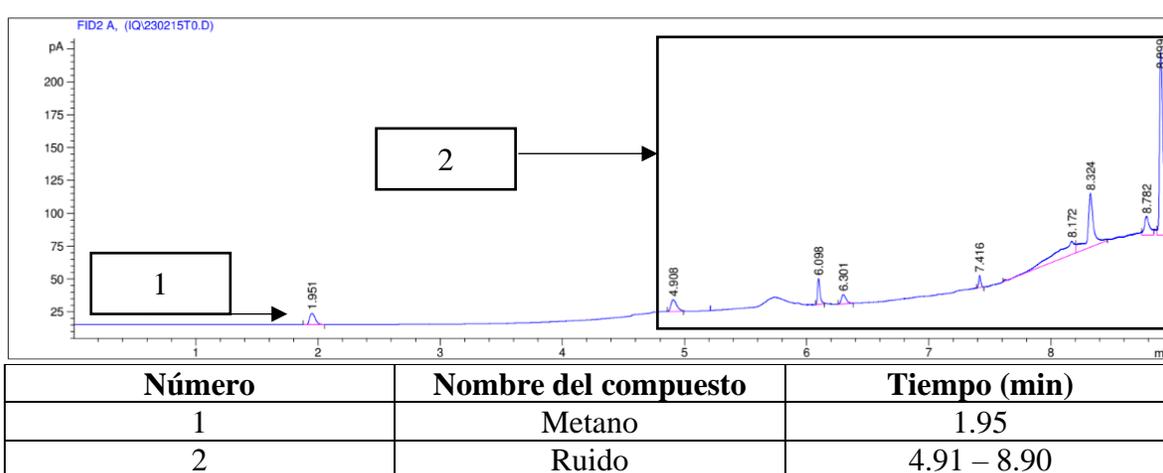
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 23. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 3:3 de gallinaza.



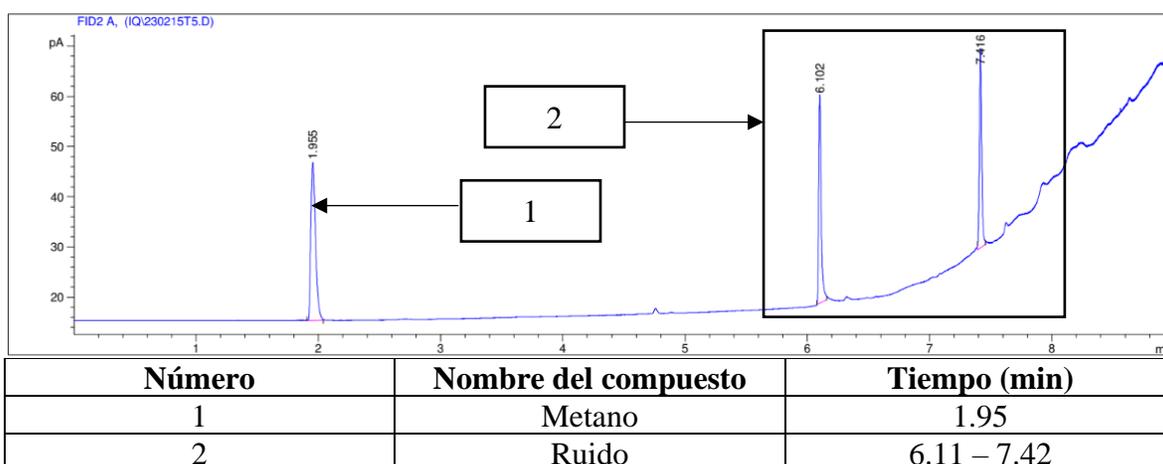
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 24. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.



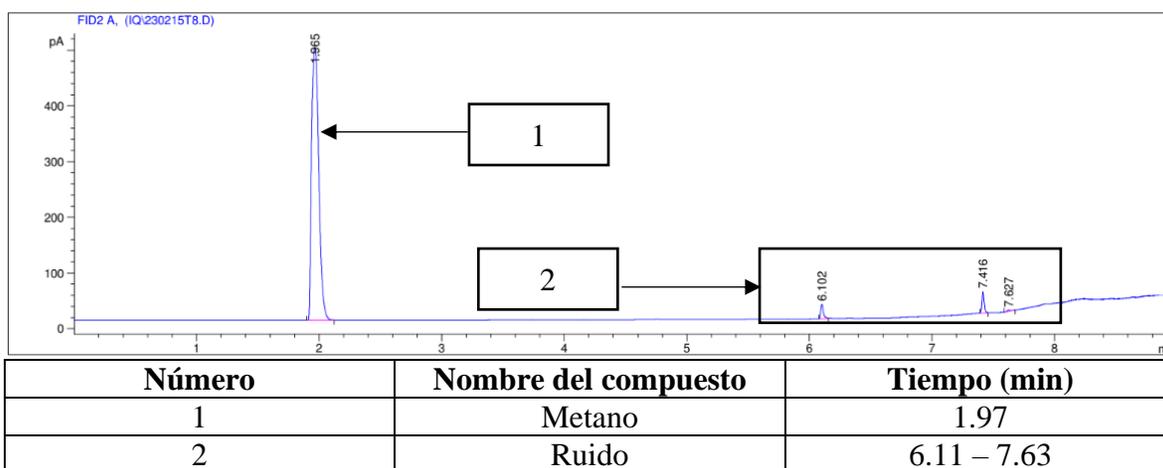
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 25. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

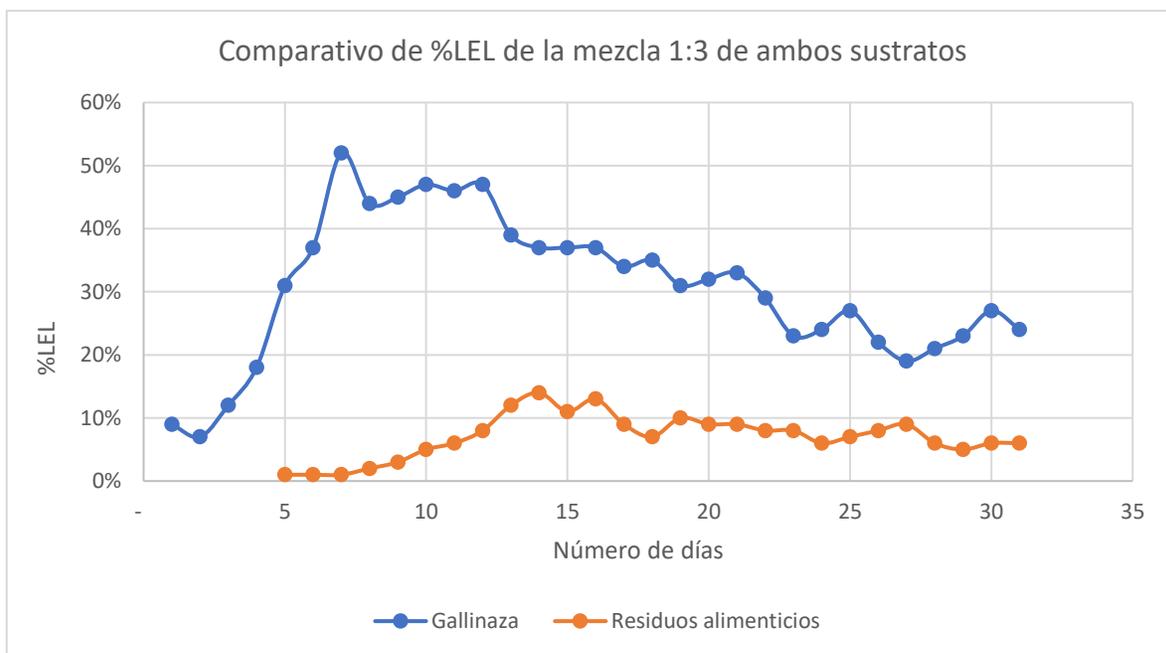
Figura 26. Gráfico del detector de ionización de llama (FID) para la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

D. Calidad del gas.

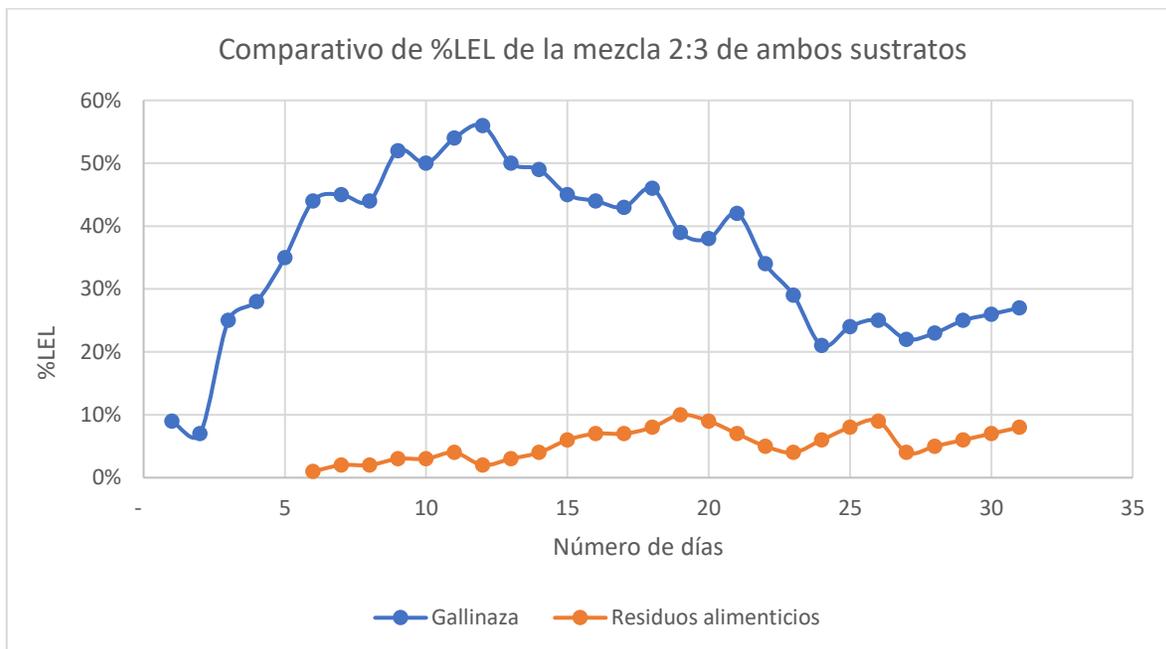
Figura 27. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 1:3 de ambos sustratos.



Tipo de sustrato	%LEL máximo	%LEL mínimo
Gallinaza	52	7
Residuos alimenticios	14	1

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

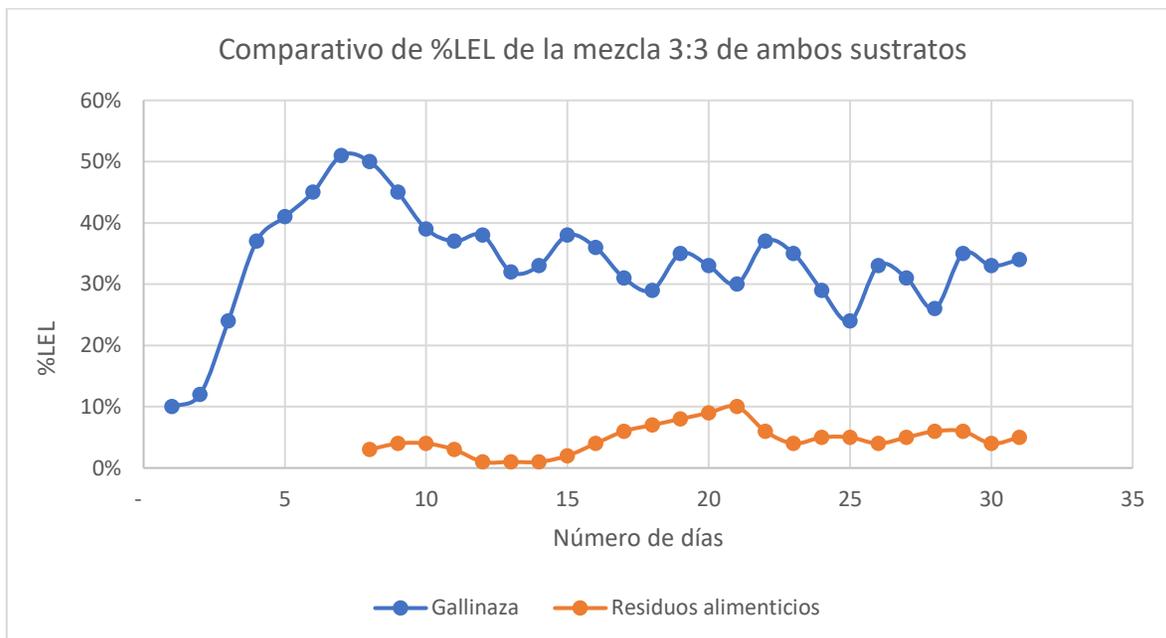
Figura 28. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 2:3 de ambos sustratos.



Tipo de sustrato	%LEL máximo	%LEL mínimo
Gallinaza	56	7
Residuos alimenticios	10	1

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 29. Comparativo del límite inferiores de explosividad de la mezcla 3:3 de ambos sustratos.

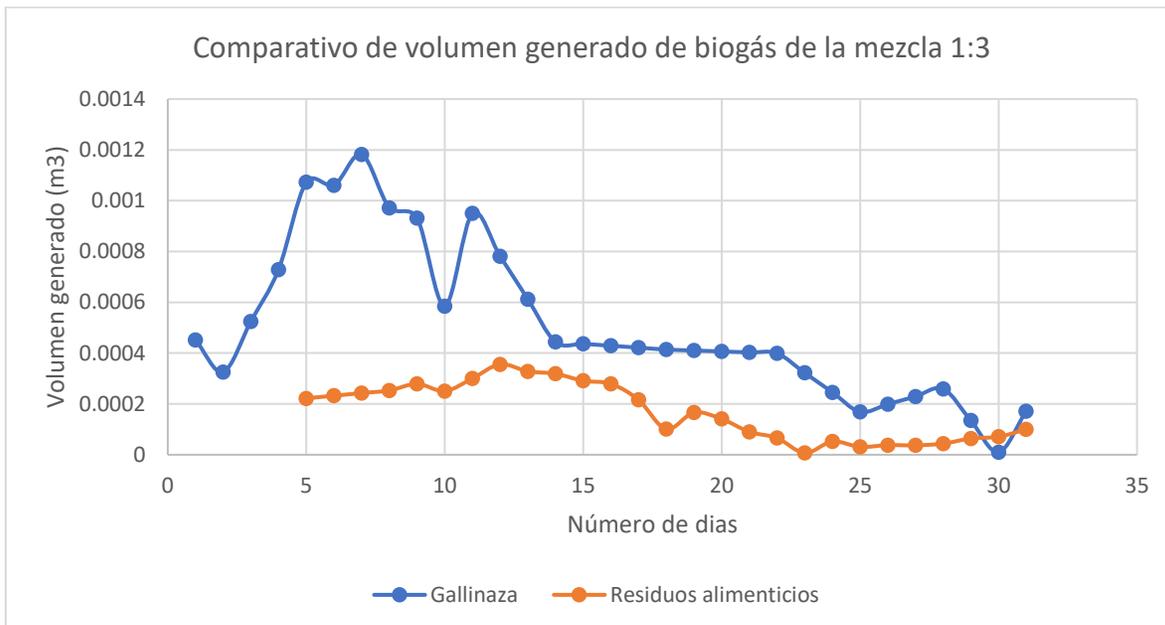


Tipo de sustrato	%LEL máximo	%LEL mínimo
Gallinaza	51	10
Residuos alimenticios	10	1

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

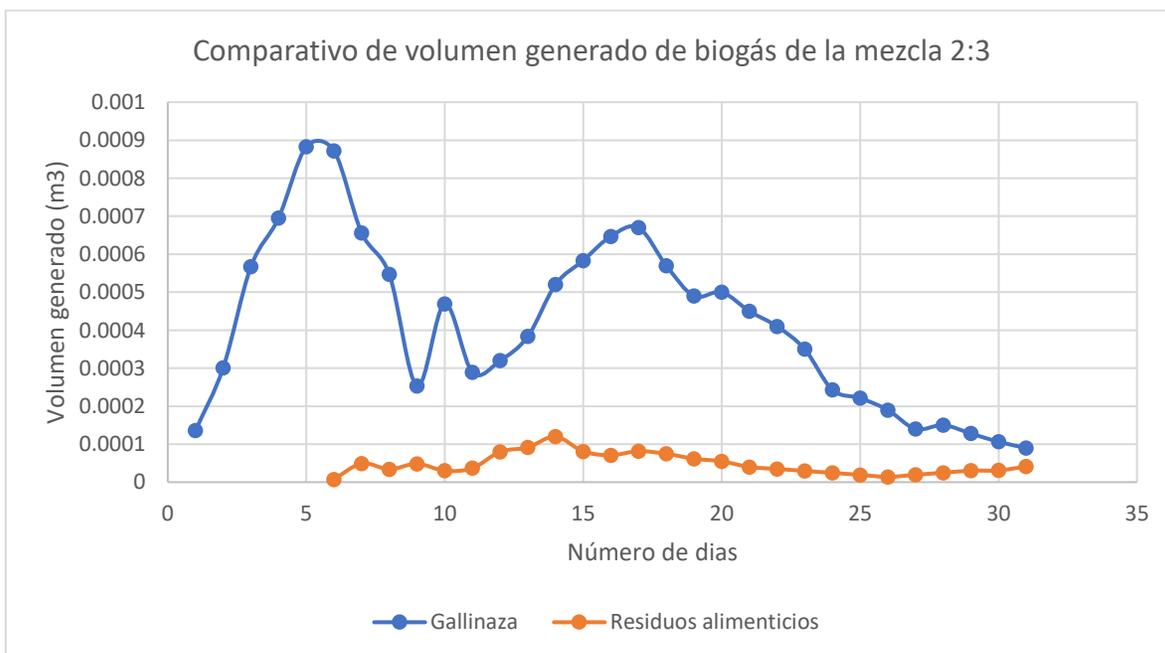
E. Gráficas de la producción de volumen.

Figura 30. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 1:3



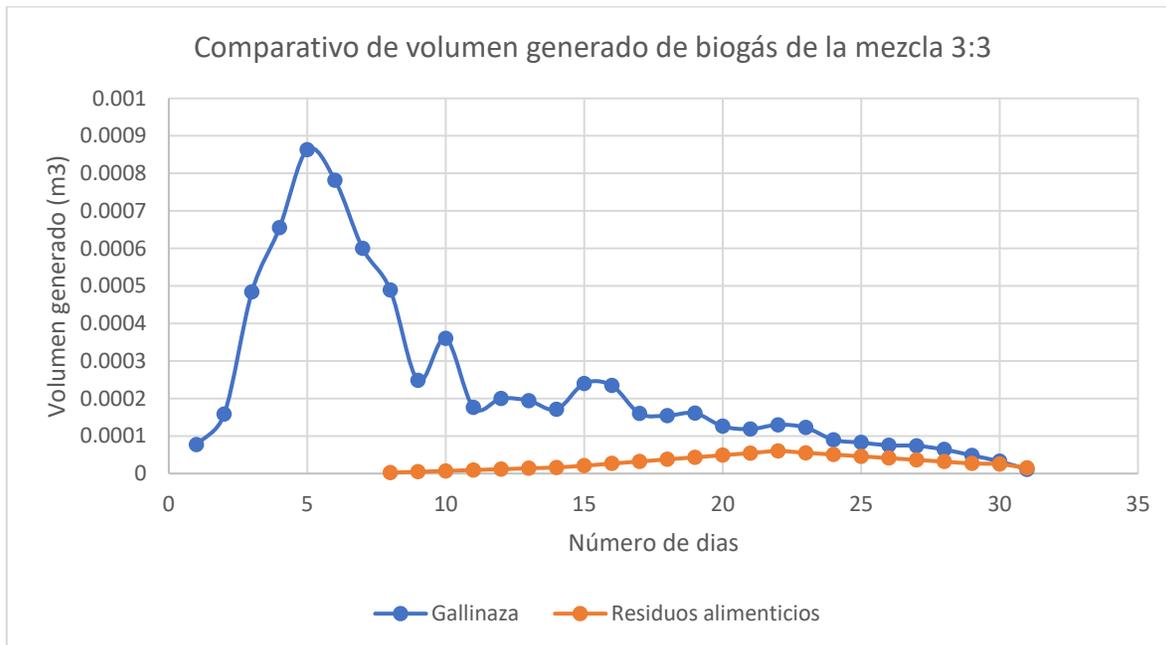
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 31. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 2:3



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 32. Comparativo del volumen producido de biogás entre la gallinaza y los residuos alimenticios a lo largo de la fermentación con la mezcla 3:3



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

VIII. Discusión de resultados

A. Módulo A. Caracterización del sustrato

La caracterización de la materia prima para biodigestores es una parte fundamental para que la generación de biogás se pueda llevar a cabo de la manera más efectiva. Primero se parte de que no todo producto de origen animal u origen vegetal es ideal para utilizarlos como una fuente de generación de energía. En este caso se utilizó dos fuentes para la generación de biogás, el animal que en este caso fue la gallinaza y la segunda de origen vegetal que en este caso es de residuos de comida. Se escogieron estos dos tipos de sustratos debido a diferentes motivos. Se escogió la gallinaza debido a que en ciertas granjas no se tiene un manejo correcto de residuos orgánicos. Además, la teoría dice que la gallinaza es un buen sustrato para fermentar y generar biogás. Ahora con respecto a los residuos alimenticios, partió la idea de darle un uso a estos desechos que se generaban en un restaurante de comida de rápida ubicado en San Marcos. En principio estos desechos son tirados a la basura, generando más contaminación por lo cual se optó por darle un uso energético.

La caracterización de sustratos es muy importante para los biodigestores, ya que es esencial para determinar la calidad y la cantidad de los materiales orgánicos que se van a procesar. La calidad del sustrato influye directamente en la producción de biogás, ya que una mayor cantidad y variedad de materiales orgánicos pueden producir una mayor cantidad de biogás. La caracterización de sustratos para los biodigestores implica la medición de parámetros como la concentración la densidad, el contenido de humedad, la relación carbono/nitrógeno, la acidez y la alcalinidad. Estos parámetros son importantes para determinar la cantidad y calidad de la materia orgánica que se puede procesar en un biodigestor, así como para ajustar las condiciones de operación del proceso. Además, la caracterización de sustratos también es importante para garantizar la estabilidad del proceso y prevenir problemas como la acidificación o la inhibición del proceso de digestión anaerobia. Conocer la composición química del sustrato permite optimizar la operación de la producción de biogás.

El análisis de la materia prima a utilizar en los biodigestores se basó en encontrar el pH, %Nitrógeno, % Fósforo, % Potasio, % Magnesio, % Calcio, % Hierro, ppm de Cobre, ppm de Manganeso, ppm de Zinc, % MO y la relación C/N. Cabe resaltar, que estos análisis se realizaron en el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), se realizaron en este lugar debido a que en la Universidad no cuenta con todos los equipos necesarios para llevar a cabo una correcta caracterización de la materia prima. Los análisis se realizaron solo una vez, esto debió a que el costo de las pruebas era alto, agregar que la de gallinaza y los residuos alimenticios provino del mismo lote de producción por lo cual también fue otra razón por la que se optó realizarlo una única vez.

Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 6 en la sección de resultados. Como se observa, se reportaron todos los resultados importantes. Como primer parámetro fue el pH, la gallinaza obtuvo un pH de 10.69 mientras que los residuos alimenticios 9.83. La gallinaza presentó un mayor pH en comparación de los residuos alimenticios. Para los residuos alimenticios, el rango de pH antes de ingresar al biodigestor es de 4 – 8, por lo cual se obtuvo un pH muy elevado esto indica que es un sustrato bastante alcalino e indica la presencia de algún compuesto alcalino dentro de los residuos, la manera en que puede afectar tener un pH elevado para los residuos es que puede inhibir la actividad de microorganismos y disminuir la producción de biogás. Además, el alto nivel de alcalinidad puede favorecer el crecimiento de microorganismos no deseados como algunas bacterias de putrefacción que puedan competir con los microorganismos que producen biogás. Por otro lado, el rango de pH para la gallinaza se encuentra muy parecido al de los residuos alimenticios, este se encuentra entre 6 – 7. Con la gallinaza se encontró un pH alto en comparación al rango establecido. Una razón por la que el pH salió alto es debido al tiempo de almacenamiento de la gallinaza, otro factor que influyó fue la alimentación de las aves ya que no se tiene un alimento regulado. Además, agregar que la gallinaza se obtuvo de un lugar alto (2,390 m sobre el nivel del mar).

Otro factor que se evaluó fue el %MO (Porcentaje de Materia Orgánica) obteniendo para los residuos alimenticios 51.4 % y para la gallinaza un 47.00%. La materia orgánica es básicamente una medida de los componentes orgánicos de un material. Para los residuos alimenticios el rango de % MO que se espera es de alrededor de 40% - 90%, tal y como se

refleja la medida obtenida entra dentro del rango esperado, esto es debido por lo que contienen los residuos que en este caso son residuos de algunas frutas, verduras y materia orgánica de pollo. Por otro lado, para la gallinaza el rango de materia orgánica esta entre 40% – 80%, como se observa el resultado obtenido está dentro del rango teórico. Como se mencionó anteriormente, la materia orgánica también depende de la alimentación de las aves y del almacenamiento de la gallinaza, esto hace que los niveles de materia orgánica sean altos o sea bajos. Los niveles de materia orgánica se espera que sean altas debido a que la mayor parte de la gallinaza está compuesta por excremento y algunos residuos orgánicos. Es importante tener en cuenta el contenido de materia orgánica porque es el principal componente que se degrada en el proceso de biodigestión para producir biogás. Cuanto mayor sea el contenido de materia orgánica, mayor será la producción de biogás en el biodigestor.

Otro factor que es muy importante a tomar en cuenta es la relación C/N, ya que es un parámetro que permite evaluar la calidad de los materiales orgánicos en la digestión anaerobia. Para la gallinaza, el rango esperado para la relación C/N es de alrededor de 10 – 15, en las pruebas que se realizaron se obtuvo una relación C/N de 13.91, el valor está dentro del rango esperado. Aunque la gallinaza tiene una relación C/N baja en comparación de otros sustratos, todavía puede ser una excelente materia prima para la biodigestión anaerobia debido a su alto contenido de materia orgánica, el bajo valor de la relación C/N se debe también a que la gallinaza tiene un alto contenido de nitrógeno. Por otro lado, el rango de la relación C/N en los residuos alimenticios esta entre 20 – 40. El valor obtenido fue de 21.45 el cual entra dentro del rango esperado. En general, los residuos alimenticios tienen una relación C/N más alta que la gallinaza debido a su mayor contenido de carbono y menor contenido de nitrógeno. El tener una relación C/N alta puede resultar en una digestión incompleta de la materia orgánica y una disminución en la producción de biogás.

Luego se evaluó la humedad en ambos sustratos con el propósito de tener un mejor control de operación en la producción de biogás. La gallinaza obtuvo una humedad de 78%, el rango de humedad de la gallinaza esta entre 50% - 80%. En general, se espera que la gallinaza presente mayor contenido de humedad ya que está compuesta principalmente por

excremento de aves, además es importante que la gallinaza tenga un alto contenido de humedad antes de ingresar al biodigestor, ya que una humedad demasiado baja puede dificultar la fermentación y la producción de biogás, mientras que una humedad demasiado alta puede dificultar la circulación del sustrato y aumentar el riesgo de obstrucciones y problemas de operación. Mantener la humedad alta dentro de estos rangos hace que la gallinaza se aproveche de mejor forma y se produzca una mayor cantidad de biogás.

También se evaluaron otros compuestos importantes como el porcentaje de calcio y de potasio, estos se encuentran en la Tabla 20 en la sección de datos originales. Los datos más relevantes y que impactan también de alguna forma en la fermentación son el calcio y el potasio. El calcio en la gallinaza varía entre 2% - 4%, se obtuvo un 14%. Un contenido de calcio del 14% en la gallinaza es relativamente alto y puede indicar que las aves que produjeron la gallinaza recibieron una dieta rica en calcio o que la gallinaza contiene una cantidad significativa de cáscaras de huevo o huesos. En términos de la producción de biogás en el biodigestor, un alto contenido de calcio en la gallinaza puede ser beneficioso en cierta medida, ya que el calcio es un nutriente importante para las bacterias que descomponen la materia orgánica y producen biogás. Sin embargo, un contenido de calcio excesivamente alto también puede causar problemas en el biodigestor, como obstrucciones y dificultades en la operación. Al igual que con los residuos alimenticios los rangos esperados son relativamente chiquitos entre 1% - 5%, se encontró un 10% esto debido al alto contenido de calcio que se almacena en los residuos alimenticios, al igual que con la gallinaza en ocasiones puede ser beneficioso para el biodigestor. Por otro lado, el potasio es otro componente importante ya que el contenido de potasio en la gallinaza puede ser beneficioso porque el potasio es un nutriente importante para las bacterias que descomponen la materia orgánica, el rango esperado está entre 1% - 3% como se aprecia se obtuvo un valor alto esto es porque la alimentación de las aves tenía un alto contenido de potasio, en cambio los residuos alimenticios tienen un contenido de potasio entre 0.1% - 1.5%, al igual que con el potasio se obtuvo un valor alto esto significa que los residuos alimenticios podrían ser una fuente potencialmente valiosa de potasio para la producción de biogás y como fertilizante orgánico. El tener un alto contenido de potasio puede afectar directamente al fertilizante obtenido de la

fermentación ya que un exceso de potasio puede causar problemas de salinidad en el suelo y afectar la absorción de otros nutrientes por las plantas.

B. Módulo B. Comparación del volumen de biogás

El principal producto de un biodigestor es el biogás, dependiendo del biodigestor que se utiliza así va a ser el volumen de biogás que se obtiene. En este caso se utilizaron biodigestores que se realizaron con canecas de 55 galones por lo cual se esperaba un volumen significativo de biogás. Cabe resaltar que los biodigestores se realizaron de forma casera, no se utilizó ningún tipo de sistema de agitación, esto se debe a que principalmente solo se quería generar biogás a partir de la fermentación natural de los sustratos. En total se realizaron un total de 6 biodigestores, 3 para gallinaza y 3 para residuos alimenticios. El principal motivo por el cual se realizó esta cantidad de biodigestores es porque la cantidad de materia disponible y por los recursos disponibles. Todo el material obtenido en principio iba a ser desechado por lo cual el material estuvo limitado. Para los biodigestores se utilizaron diferentes proporciones. Se utilizó las siguientes proporciones (kg de gallinaza/kg de agua) 1:3, 2:3 y 3:3, estas proporciones se utilizaron en ambos sustratos.

La razón por la cual se escogió estas proporciones fue porque en la literatura y en otros trabajos las utilizaron ya que es donde se produce la mayor cantidad de biogás. La mezcla 1:3 se escogió debido a que una proporción baja de sustrato puede limitar la producción de biogás debido a la baja concentración de materia orgánica entonces el agregar más agua podría mejorar la producción de biogás. La mezcla 2:3 es una proporción intermedia de gallinaza podría ser suficiente para obtener una buena producción de biogás con lo cual puede ser que sea la proporción óptima para la producción de biogás. Mientras que la mezcla 3:3 es una proporción alta de sustrato podría resultar en una alta concentración de materia orgánica y nutrientes, lo que podría mejorar la producción de biogás. Sin embargo, una proporción demasiado alta podría ser difícil de manejar debido a la alta viscosidad del sustrato. Este tipo de factores se analizaron entre la gallinaza y los residuos alimenticios.

El tiempo de fermentación para los 6 biodigestores fue de 31 días esto debido a que se buscaba una fermentación mesofílica, ya que este tipo de fermentación son parecidas a las

condiciones del reactor. Y el tiempo de retención hidráulico (TRH) es de 31 días. Para la mezcla 1:3 se encuentran los resultados en la tabla número 6 de ambos sustratos, obteniendo que para la gallinaza se generó un volumen de biogás de 0.032 m^3 mientras que para los residuos alimenticios 0.021 m^3 . Para este tipo de biodigestores no hay un rango teórico ya que la producción de biogás depende del tipo de reactor y las condiciones de operación, por lo cual la gallinaza produjo una mayor cantidad de biogás. A lo largo de la fermentación, se fue produciendo biogás y por lo cual se fue expandiendo el gas dentro del biodigestor y por consecuencia se fue expulsando un líquido oscuro en el caso de la gallinaza y un líquido incoloro en el caso de los residuos, este líquido es bioabono. Este líquido lo expulsaban los biodigestores a diario en la mayoría de los casos, a partir de la medición de estos líquidos se sabía cuánto se expandía el gas y por consecuencia cuanto biogás se generaba. En la Figura 21 muestra la producción de biogás a lo largo del tiempo de fermentación de la gallinaza y de los residuos alimenticios, y aparece un comparativo entre los dos sustratos, tal y como se muestra en la gráfica, a lo largo de la fermentación se observa que la gallinaza en términos de volumen produjo más que los residuos alimenticios esto se debe principalmente a que la gallinaza al tener un alto contenido de potasio y calcio hace que se produzca más biogás. Aunque cabe resaltar que en el día 30 los residuos tomaron una tendencia ascendente en la generación de biogás.

Cabe destacar que se comenzaron a tomar muestras a partir del día donde comenzó a expulsar bioabono. Pasaron aproximadamente 2 días después de haber cargado los biodigestores. En la mezcla 2:3 se hizo del mismo modo que con la mezcla 1:3, obteniendo que para la gallinaza se obtuvo 0.029 m^3 mientras que para los residuos alimenticios se obtuvo 0.017 m^3 . Siguiendo la misma tendencia de la mezcla 1:3, donde se obtuvo mayor volumen en la gallinaza que en los residuos alimenticios. Cabe señalar, que en este caso los residuos alimenticios comenzaron a expulsar bioabono hasta el día 5 de fermentación, esto se debe principalmente a que los biodigestores de residuos alimenticios tardan más en generar biogás. A lo largo de la generación de biogás, los residuos alimenticios tuvieron un comportamiento en ocasiones lineal, al final de la fermentación se observa que el volumen de biogás a partir de residuos alimenticios tiende a producir la misma cantidad de biogás que la gallinaza y que este va descendiendo. En todas las mezclas se fue registrando la variación

de densidad ya que a partir de este dato se podría calcular el volumen de biogás que se producía. El registro de la densidad de las mezclas se encuentra en la sección de datos originales, tal y como se muestra en la figura número 41 donde aparece el cambio de la densidad a lo largo de la fermentación. En general, la densidad del bioabono disminuye a medida que avanza la fermentación debido a la liberación de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) producidos por la actividad microbiana en el biodigestor. Esto puede hacer que el bioabono sea menos denso que la mezcla inicial de gallinaza y agua.

En la mezcla 3:3 fue donde se obtuvo menos volumen en ambos sustratos en comparación con las otras proporciones. Tal y como se observa en la tabla número 6 con la mezcla 3:3 la gallinaza obtuvo $0.023 m^3$ mientras que para los residuos alimenticio se obtuvo $0.017 m^3$, a pesar de que la mezcla 3:3 de los residuos alimenticios produjo igual cantidad de biogás que la mezcla 2:3, este generó menos volumen, lo que hizo que tuviera el mismo volumen fue todo el gas acumulado dentro del biodigestor. Ahora bien, el biodigestor de residuos alimenticios fue el que tardó más en expulsar bioabono de todos los biodigestores, como se observa en la figura 23, el biogás se comenzó a expandirse en el día 8. Esto se debe a que la proporción hace que los microorganismos tarde más en generar biogás, y sea más retardado la fermentación. A pesar de que al principio la mezcla 3:3 de gallinaza tiene un comportamiento exponencial luego cae abruptamente, debido a que el potencial de los microorganismos se disminuye porque la proporción los afecta. Y esta mezcla sigue la misma tendencia de las otras mezclas que al llegar casi al final de la fermentación producen el mismo volumen, donde se observa que la gallinaza tiene una pequeña tendencia a subir. Todo el bioabono obtenido durante la fermentación fue almacenado para luego utilizarlo en suelos ya que este líquido es un buen fertilizante para suelos y plantas. Durante el proceso de biodigestión, los microorganismos descomponen la materia orgánica en nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes están presentes en el bioabono en formas solubles y disponibles para las plantas, lo que permite que se absorban de manera más eficiente. Además, ayudan a la actividad biológica de los suelos haciendo que la estructura de los suelos sea más compacta y mejor condicionada, haciendo que la fertilidad de los suelos se vea favorecida. El desechar el bioabono a desagües

o a la basura solo ocasionaría más contaminación ya que el mal manejo de este líquido puede producir daños al ambiente.

C. Módulo C. Caracterización del biogás

La caracterización del biogás es importante ya que va ligado a la calidad del gas y además es importante saber de qué está compuesto el gas que se está obtenido en la fermentación. La caracterización del biogás puede ayudar a evaluar la eficiencia del proceso de biodigestión. Si la composición del biogás cambia con el tiempo, puede indicar problemas en el proceso de biodigestión que deben abordarse para mejorar la eficiencia. También es clave caracterizar el biogás debido a que el biogás puede tener diferentes aplicaciones, como combustible para vehículos, generación de electricidad, calefacción, entre otros. La caracterización del biogás puede ayudar a determinar la mejor forma de utilizar el biogás producido en el biodigestor.

Los análisis se realizaron en la Universidad del Valle de Guatemala con ayuda del departamento de Química. Para la caracterización normalmente se utiliza la cromatografía de gases, pero en este caso se utilizó el detector de ionización de llama (FID) y el detector de conductividad térmica (TCD). Estos dos detectores únicamente hallaron los compuestos que se encontraban en el biogás mas no cuantificaron ya que no se tenía el lector de Fourier para poder realizar la cuantificación. Como se refleja en el inciso 3 en la sección de resultados aparecen todos los cromatogramas de las muestras de las distintas mezclas de ambos sustratos. Tal y como se observa en todos los cromatogramas el primer pico se encuentra en los primeros 2 minutos, este compuesto es el metano que se encuentra en el biogás, esto se sabe ya que se usó como referencia la figura número 33 de la sección de referencias. Donde se observa que en los primeros minutos se encuentra un pico el cual es metano. En todos los cromatogramas a partir del minuto 4 empieza una lectura un tanto distorsionada con varios picos. Estos representan ruido ya que no se tiene certeza que tipo de compuestos son ya que el cromatograma de referencia no indica el tipo de compuesto del que se trata, por lo cual el procedimiento dicta que estos picos son una especie de ruido que no afecta a la detección de la composición del biogás.

Durante los análisis se utilizaron dos detectores tal como se mencionó anteriormente, el FID fue únicamente utilizado para la detección del metano en el biogás mientras que el TCD detectaba los otros compuestos dentro de gas como el CO_2 y los sulfuros. Se optó por realizar únicamente los análisis con el FID ya que el compuesto de interés dentro del biogás era el metano y al no cuantificar era más viable optar por realizar únicamente los análisis del FID. Se escogió una muestra representativa de biogás, se obtuvieron muestras de biogás del día 10 de fermentación de todos los biodigestores. Se escogió este día ya que según la literatura es el día donde se produce la mayor cantidad de biogás. Al no cuantificar se escogió una única muestra por cada biodigestor.

Cada cromatograma tiene diferente forma, pero la mayoría tiene la misma tendencia donde aparece el pico en los primeros minutos. Lo que cambia entre los cromatogramas es el tamaño del pico que se va registrando. Tal como muestra la Figura 24 de la mezcla 1:3 de gallinaza obtuvo un pico grande en comparación de la Figura 27 de la mezcla 1:3 de residuos alimenticios que se obtuvo un pico pequeño. A pesar de la diferencia de áreas y de tamaño esto no indica la cantidad de metano contenido dentro del biogás, por lo cual no es una medida fiable para saber la calidad del biogás. Esto se debe a que el área en que registra estos picos se mide en $pA*s$ la cual es una medida de carga total, que se utiliza para cuantificar la cantidad de analito presente en una muestra, mas no un porcentaje del contenido del analito en la muestra.

Esa tendencia también se vio reflejada en las mezclas 2:3 y 3:3. En el caso de la mezcla 2:3 de gallinaza y residuos alimenticios se obtuvieron picos casi del mismo tamaño, por otro lado, en los biodigestores con la mezcla 3:3, el que presento un mayor tamaño de pico fue los residuos alimenticios en comparación de la gallinaza. Las áreas de los picos con su cromatograma se encuentran en los datos originales en el módulo C donde se puede analizar a profundidad las áreas obtenidas de los picos en todas las muestras de biogás.

D. Módulo D. Calidad del biogás

Con la calidad del gas, en este trabajo se refiere a lo que el biogás puede generar en forma de energía, también quiere decir cómo es su composición y propiedades físicas y

químicas, que pueden afectar su eficiencia energética, impacto ambiental, rentabilidad y seguridad. La calidad del gas también puede indicar en qué momento se puede volver a cargar los biodigestores para generar más biogás o en dado caso más metano. Durante la fermentación de la gallinaza no se alimentó con más sustrato o agua esto con el objetivo de que la fermentación se realizara de forma libre y natural. Y así analizar que sustrato es mejor, todo esto bajo la limitación de la materia prima. La calidad de gas en este caso se refiere a la capacidad que tiene para generar una energía en forma de calor, para esto se midió el %LEL (porcentaje de límite inferior de inflamabilidad) la cual es una medida importante ya que indica el nivel de concentración de gases inflamables en una mezcla de gases. Se midió este porcentaje porque el objetivo es saber la calidad del biogás con base en la capacidad de inflamabilidad que tiene. Se sabe que cuanto mayor sea el %LEL mayor contenido de partículas de metano se encuentran en el biogás. En ocasiones la producción del volumen de biogás no está directamente relacionado con el %LEL ya que se puede obtener un volumen grande biogás, pero este no puede tener muchas fracciones de metano. Lo que hace que sea un gas de baja calidad al no tener la capacidad de tener un %LEL alto.

El monitoreo de %LEL se realizó a lo largo de los 31 días de fermentación para evaluar en qué punto es donde se encuentra la mayor concentración de metano. Comenzando con la mezcla 1:3 de ambos sustratos se observa que la mayor %LEL tuvo un valor de 51% y se obtuvo en el día 7 de fermentación, cabe resaltar que el rango de %LEL para la gallinaza esta entre 25% - 45%. Mientras que para los residuos alimenticios el mayor %LEL fue de 13% y se obtuvo en el día 14 de fermentación, tal y como se muestra en la figura número 30, cabe resaltar que el rango de %LEL para residuos alimenticios es entre 5% - 50%. En este caso la cantidad de volumen obtenida está relacionada con el %LEL ya que la mayor cantidad de volumen se obtuvo al mismo tiempo de cuando se obtuvo el mayor porcentaje de %LEL. En la gráfica se observa que el que obtuvo mayor cantidad de fracciones de metano fue la gallinaza esto debido a que la materia orgánica hizo que se generaran más partículas de metano.

Para la mezcla 2:3 de gallinaza y residuos alimenticios se obtuvieron un máximo de %LEL de 57% y 10% respectivamente, este comportamiento se refleja en la figura número

31. Al igual que con la mezcla 1:3, la gallinaza obtuvo mayor porcentaje de inflamabilidad. En comparación con la producción de volumen si hay un pequeño desfase con los residuos alimenticios ya que el día que se produjo la mayor cantidad de biogás no está cerca del día que se produjo más %LEL esto puede ser por el tipo de sustrato que se utilizó y a la descomposición que este tiene. Por otro lado, el biogás si presento una tendencia a producir la mayor cantidad de %LEL al mismo tiempo que se produjo la mayor cantidad de volumen de biogás ya que en ambos casos son cercanos a los 7 días.

En la mezcla 3:3 de gallinaza se obtuvo un %LEL máximo de 51% en el día 7 al igual que las otras mezclas de gallinaza. En cambio, los residuos alimenticios obtuvieron un %LEL máximo de 10% que fue en el día 21 de la fermentación. En este caso la mayor producción de volumen de biogás en la gallinaza fue en el día 5 mientras que en los residuos alimenticios fue en el día 21. En este caso el volumen generado de biogás tiene una correlación con el %LEL en los residuos alimenticios. Al igual que en las otras mezclas se obtuvo un mayor %LEL. Lo que hace que el biogás de la gallinaza sea más inflamable y que tenga un mejor uso. Ya que el cromatógrafo no podía cuantificar las partículas de metano. Se optó que las partículas de %LEL se midieron por medio de un detector portable de gas especializado en metano.

También se calculó la producción de biogás por kilogramo de sustrato, esto quiere decir cuanto sustrato se utilizó para producir un metro cubico de biogás. Se realizó la gráfica para todos los biodigestores, estas gráficas se reflejan en la sección de datos originales en el módulo D. Tal como se observa no se tiene una tendencia clara del comportamiento del sustrato y del biogás a lo largo de la fermentación. Estas gráficas se realizaron para tener un mejor control del balance de masa. Los balances de masa están reflejados en la sección de anexos, como se observa muestra las entradas y salidas de materia orgánica y del biogás generado. En los 31 días de fermentación dentro de los biodigestores quedó materia orgánica. Esta materia es llamada digestato, el cual es utilizado posteriormente para realizar un compost para suelo y utilizarse como abono natural con esto se ayuda a no desaprovechar esta materia prima al mismo tiempo tampoco se genera contaminación y le da alimento fresco al suelo. El digestato generado por ambos sustratos se utilizó como compost en los suelos.

Cabe resaltar que a la hora de abrirse los biodigestores los que tenían la mezcla 2:3 y con la mezcla 3:3 todavía tenían un olor a huevo podrido y a orina esto se debe principalmente a él sulfuro de hidrogeno y el amoniaco los cuales se caracterizan por tener olores inodoros. En ocasiones el mal olor puede ser un indicador que todavía tiene potencial para generar más biogás y más metano. Pero normalmente no es necesariamente una señal de que todavía hay biogás en el sistema. El biogás es producido continuamente en el biodigestor mientras los microorganismos están descomponiendo la materia orgánica. Por lo tanto, incluso si el biogás ha sido liberado y ha salido del sistema, aún puede haber biogás en producción. El olor desagradable del biogás puede ser una señal de la presencia de impurezas en el gas, lo que indica una mala calidad del biogás. Además, un olor fuerte y desagradable también puede ser un indicador de problemas en el proceso de digestión anaerobia, como una sobrecarga del sistema, baja eficiencia de los microorganismos o acumulación de materiales tóxicos.

IX. Conclusiones

- Se determinó que el pH para los residuos alimenticios fue de 9.83 mientras que para la gallinaza se obtuvo un pH de 10.69. Se encontró que el porcentaje de materia orgánica para la gallinaza fue de 47%, en cambio para los residuos alimenticios fue de 51.40. Se obtuvo que la relación C/N para la gallinaza fue de 13.91 mientras que para los residuos alimenticios fue de 21.45. Se determinó que el mejor sustrato para la fermentación anaerobia es la gallinaza esto debido a su alto contenido calcio y potasio.
- Se encontró que en la mezcla 1:3 de gallinaza se obtuvo un volumen total de biogás de 0.032 m^3 , en cambio para la mezcla 1:3 de residuos alimenticios se obtuvo un volumen total de 0.021 m^3 . Se determinó que en la mezcla 2:3 de residuos alimenticios se obtuvo un volumen total de 0.017 m^3 mientras que para la mezcla 2:3 de gallinaza fue de 0.029 m^3 . Se encontró que para la mezcla 3:3 de gallinaza se obtuvo un volumen total de 0.023 m^3 , por otro lado, para los residuos alimenticios se encontró un volumen total de 0.017 m^3 . Se demostró que la gallinaza produce un mayor volumen de biogás en comparación con los residuos alimenticios. Esto se atribuye principalmente a mayor cantidad de nitrógeno y otros nutrientes presentes en la gallinaza.
- Se determinó por medio del detector de ionización de llama la presencia de metano en el biogás obtenido a partir de la fermentación anaerobia de gallinaza y de residuos alimenticios.
- Los resultados del experimento muestran que los niveles de %LEL son significativamente diferentes entre los biodigestores de gallinaza y los de residuos alimenticios. Los biodigestores de gallinaza presentaron niveles más altos de %LEL en comparación con los de residuos alimenticios. Esto podría deberse a las diferencias en la composición química y la producción de gases entre los dos tipos de sustratos. La mayor cantidad de metano obtenido con gallinaza fue en la mezcla 1:3 mientras que en la mezcla 3:3 fue la que genero menos contenido de metano. Los residuos alimenticios siguieron la misma tendencia de la gallinaza.

X. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar otros tipos de sustrato para hacer una comparación más amplia y encontrar el mejor sustrato para la producción de biogás.
- Se recomienda probar diferentes mezclas para la gallinaza y los residuos alimenticios para evaluar su generación de biogás.
- Para el pH de los residuos alimenticios se recomienda ajustarlo con soluciones ácidas para que tenga un mejor control de las condiciones. Para regular el pH de la gallinaza se recomienda mezclarlo con paja con el objetivo de elevar la relación C/N.
- Se recomienda realizar otro tipo de fermentaciones, con esto se refiere a dejar más tiempo para observar si se produce más biogás y como afecta a la calidad de este.
- Se recomienda probar otro tipo de biodigestores para observar el comportamiento de los sustratos dentro de estas nuevas condiciones.
- Se recomienda realizarle estudios al bioabono obtenido durante la fermentación con el objetivo de tener una mejor perspectiva de la actividad microbológica.
- Realizar mezclas entre sustratos también se recomienda para encontrar las mejores mezclas donde se generen más biogás.
- Se recomienda regular la alimentación de las aves para que la caracterización de la materia prima sea de manera más concisa.
- Se recomienda probar la construcción de biodigestores a partir de otro tipo de materiales para ver si hay algún cambio significativo.
- El realizar la fermentación en otro tipo de climas es recomendable para evaluar si es viables colocar biodigestores en cualquier parte del país.
- Se recomienda que cada cierto tiempo se alimente ya sea con agua o con sustrato para observar el comportamiento del biodigestor en la generación de biogás.
- Se recomienda que para dar un mejor fundamento en la producción de biogás se caracterice la microbiota de los biodigestores y tener un panorama más amplio de la actividad microbiana durante la fermentación.

XI. Bibliografía



- AEFA. (s. f.). *Gallinaza – AEFA – Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes*. <https://aeфа-agronutrientes.org>. <https://aeфа-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/gallinaza>
- Borja, R., & Rincón, B. (2017). Biogas Production ☆. *Reference Module in Life Sciences*, 785–798. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.09105-6>
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J. 1994. *Biology of Microorganisms*. Prentice-Hall, New York, USA
- CNE, Comisión Nacional de Energía. 2006. *Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile*. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Cooperación Intergubernamental Chile-Alemania (Eds). 69 p, Santiago.
- Deublein D., Steinhauser A. 2008. *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 443 p.
- ESTRADA, Mónica. *Manejo y Procesamiento de la Gallinaza* [en línea]. Corporación Universitaria Lasallista. Colombia: Revista Lasallista de Investigación, 2005. 48 p. [Consulta 7 de junio del 2014]. ISSN: 1794-4449. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/695/69520108.pdf>
- Fundación Aquae. (2021, 11 marzo). *Qué es un biodigestor y cómo funciona el biogás - Fundación Aquae*. Fundación Aquae. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/>
- Gonzales, A. (2015, 10 agosto). *Características y usos del Biogas*. ENERGYMET. <https://www.energymet.com.mx/caracteristicas-y-usos-del-biogas/>
- Intagri. (2015, 14 abril). *La Gallinaza Como Fertilizante | Intagri S.C.* <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/gallinaza-como-fertilizante#:~:text=La%20gallinaza%20es%20un%20excelente,fertilidad%20y%20calidad%20del%20suelo>.
- Kamran, M. (2021). Bioenergy. *Renewable Energy Conversion Systems*, 243–264. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823538-6.00002-6>
- Kumar S. 2008 Anaerobic reactor configurations for bioenergy production. En: *Anaerobic biotechnology for bioenergy production. Principles and Applications*. Kumar S. (Ed.). Pp 93-114. Blackwell Publishing. Hawaii.

- Mandujano, M. I.; Félix, A. y Martínez, A.M. 1981. *Biogas, Energía y Fertilizante a partir de desechos orgánicos*. OLADE, Serie de publicaciones especiales N 6, México. 41pp.
- Redalyc, R. (2016). Redalyc: *La digestión Anaeróbica*. *Archivos de Medicina (Manizales)*, 16(1), 35–48. <https://doi.org/10.30554/archmed.16.1.1731.2016>
- Rodríguez, C. S. (2020, 12 septiembre). *La gallinaza, efecto en el medio ambiente y posibilidades de reutilización*. Scielo. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202020000300087
- Romero, S. (2022, 4 enero). *¿Qué es el biogás, cómo se obtiene y para qué se utiliza?* BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-biogas-como-se-obtiene-y-para-que-se-utiliza/>
- Speece, R. E. 1996. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments*. Archae Press, Nashville, TN, USA.
- Varnero, M.T. 1991. *Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás*. Ministerio de Agricultura (FIA) – Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile, 48p.
- WWF. (s. f.). *Evita el desperdicio. Luchemos contra el cambio climático*. World Wildlife Fund. <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/lucha-contra-el-cambio-climatico-evitando-el-desperdicio-de-alimentos#:~:text=E1%20desperdicio%20de%20alimentos%20genera,a%2043%20millones%20de%20autom%C3%B3viles>.

XII. Anexos

A. Referencias

Tabla 8. Características generales del biogás

Composición	55 – 70% metano (CH_4) 30 – 45% dióxido de carbono (CO_2) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 $kWh\ m^{-3}$
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/ m^3 biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg/m^3
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 $kg/kmol$

(Deublein y Steinhauser, 2008)

Tabla 9. Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de origen animal y vegetal.

Origen	C (%)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Aves	28 - 35	1.4 – 2.0	2.0 – 2.8	1.4	0.8	0.48
Alimentos	27 - 30	0.34	0.16	0.58	0.64	-

(Varnero y Arellano, 1991)

Tabla 10. Producción de biogás por tipo de sustrato.

Tipo de sustrato	Disponibilidad (kg/día)	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m^3/kg húmedo	$m^3/día/año$
Aves	0.18	19:1	0.08	0.014
Alimentos	5.5	12:1	0.006	0.003

(Varnero y Arellano, 1991)

Tabla 11. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

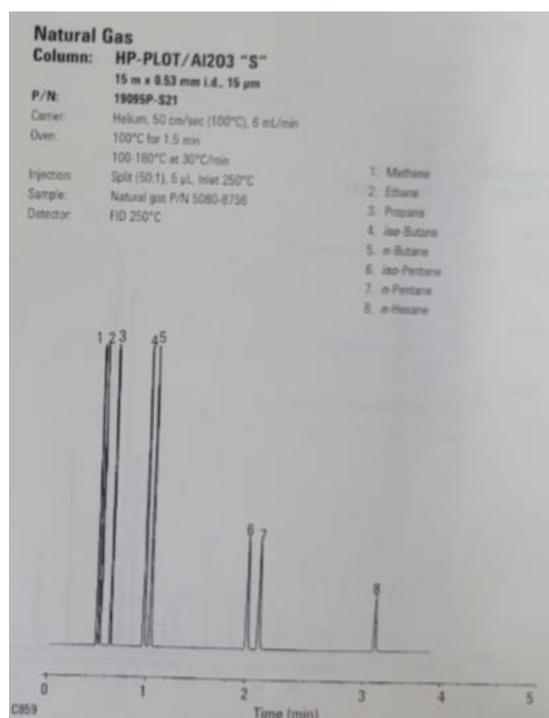
(Lagrange, 1979)

Tabla 12. Análisis químicos entre el compost y el bioabono generado

Parámetros	Compost	Bioabono
pH	7.2	7.9
MO	20.0	45.0
MO (Calcio)	39.0	58.0
N Total (%)	1.0	1.8
P Total (%)	4.1	8.4
K Total (%)	0.4	0.7
Relación C/N	19.0	25.0
N mineral (mg/kg)	550.0	30.0

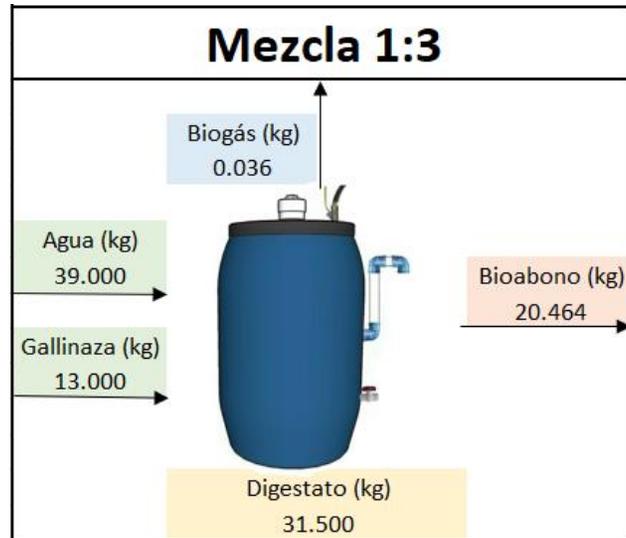
(Deublein y Steinhauser, 2008)

Figura 33. Referencia del FID para la detección del biogás.



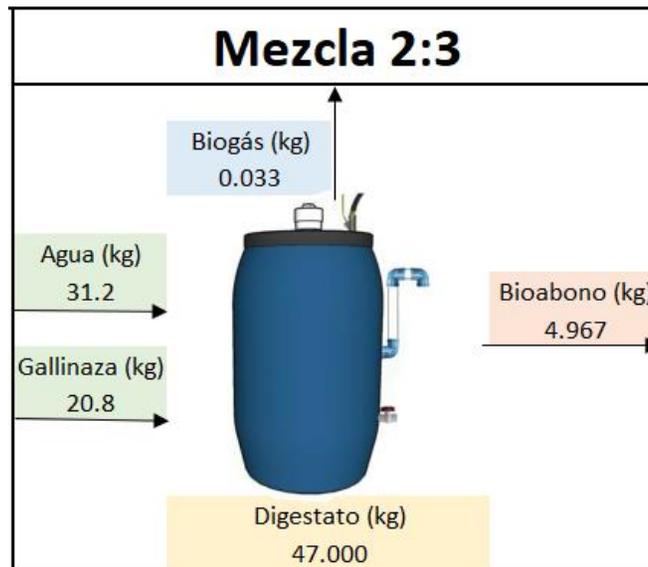
B. Balance de masa real

Figura 34. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 1:3.



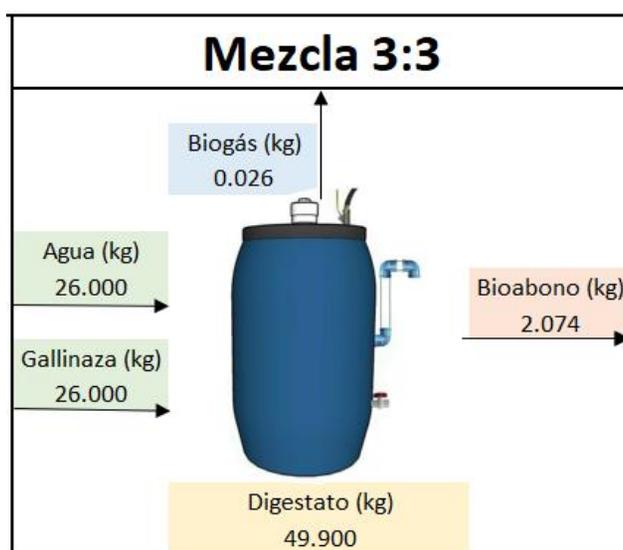
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 35. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 2:3.



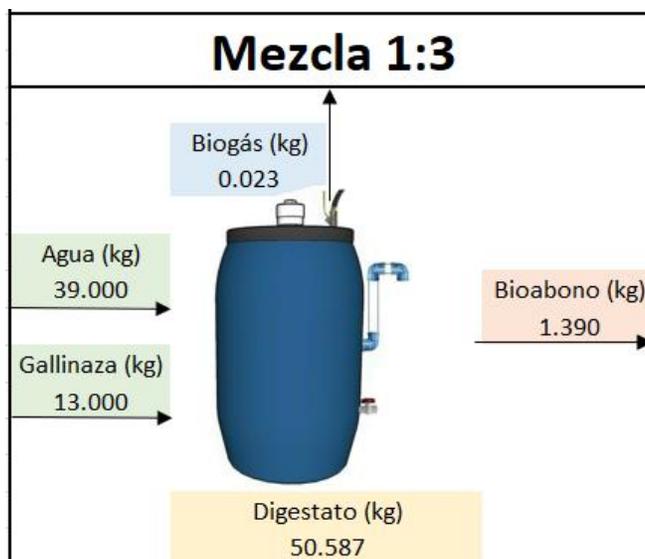
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 36. Balance de masa del biodigestor de gallinaza con la mezcla 3:3.



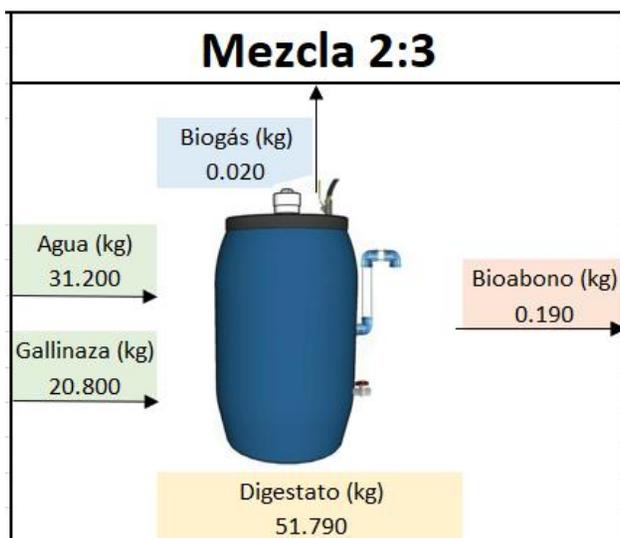
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 37. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 1:3.



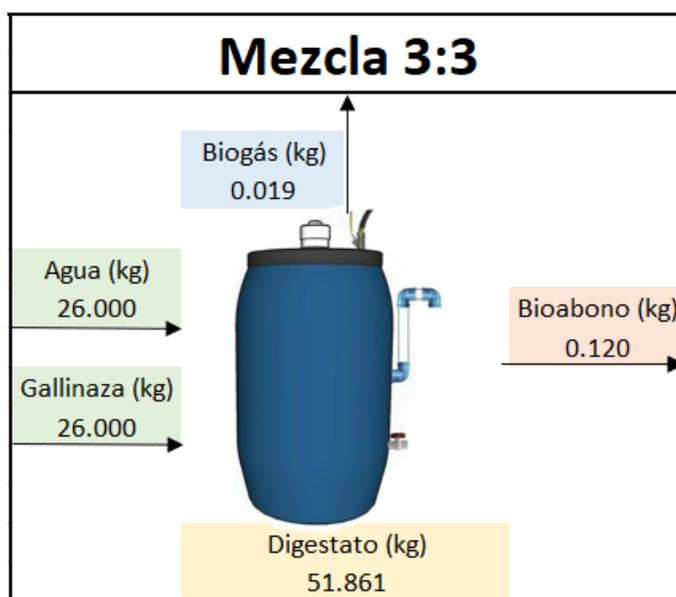
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 38. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 2:3.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 39. Balance de masa del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 3:3.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

C. Incertidumbre

Cálculo No. 1. Incertidumbre de una suma. Dato para el cálculo de la humedad de las muestras.

$$S_y = \pm \sqrt{S_a^2 + S_a^2 + S_c^2}$$

$$S_y = \pm \sqrt{0.01^2 + 0.01^2} = \pm 0.014$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

**Cabe resaltar que este cálculo se realizó para todas las operaciones con sumas y restas.

Cálculo No. 2. Incertidumbre de una multiplicación y división. Dato para el cálculo del porcentaje de nitrógeno.

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2 + \left(\frac{c}{C}\right)^2}$$

$$S_y = 0.1457 \text{ g} * \sqrt{\left(\frac{0.014}{0.35}\right)^2 + \left(\frac{0.014}{25}\right)^2} = \pm 0.0058$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

**Cabe resaltar que este cálculo se realizó para todas las operaciones con multiplicación y división.

Cálculo No. 3. Media de datos. Dato para sacar el promedio de densidades de bioabono.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{(0.85 + 0.92 + 1.06 + 0.99 + 0.95 + 0.93 + \dots) \text{ g/ml}}{31} = 0.94 \text{ g/ml}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

**Cabe resaltar que este cálculo se realizó para todos los datos para encontrar el promedio.

Cálculo No. 4. Desviación estándar de una media. Dato utilizando para las densidades de bioabono.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}}{N - 1}}$$

$$= \sqrt{\frac{(0.85^2 + 0.92^2 + 1.06^2 + 0.99^2 + 0.95^2 + 0.93^2) - \frac{(0.85^2 + 0.92^2 + 1.06^2 + 0.99^2 + 0.95^2 + 0.93^2)}{31}}{31 - 1}}$$

$$= \pm 0.010$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

**Cabe resaltar que este cálculo se realizó para todas las medias.

D. Cálculo de muestra

1. Módulo A. Cálculos para la caracterización de los sustratos.

Cálculo No. 1 Cálculo de la cantidad de muestras que se tendrían que realizar para la caracterización de los sustratos.

$$n = \frac{N * p * (1 - p)}{(N - 1) * \left(\frac{d}{Z}\right)^2 + p * (1 - p)}$$

Donde:

n: Tamaño de muestra.

N: Tamaño total de la población.

p: Proporción estimada del biodigestor.

d: Margen de error permitido.

Z: Valor critico de la distribución normal estándar.

$$n = \frac{13 \text{ kg} * 0.33 * (1 - 0.33)}{(13 - 1) * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + 0.33 * (1 - 0.33)} = 12.55 \approx 13$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Figura 40 Tabla de distribución normal para hallar el valor de Z

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952

Cálculo No. 2. Cálculo de la humedad en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios realizados en el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola.

$$\text{Humedad} = (\text{masa cristol} + \text{masa sustrato}) - (\text{masa crisol} + \text{masa sustrato luego del horno})$$

$$\text{Humedad} = 133.45 \text{ g} - 113.95 \text{ g} = 19.5 \text{ g}$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{19.5 \text{ g de humedad}}{25 \text{ g muestra}} * 100\% = 78\%$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 3. Cálculo para encontrar el porcentaje de carbono en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios.

$$\% \text{Nitrógeno} = \frac{\text{Cantidad de carbono, g}}{\text{Peso de muestra, g}} * 100\%$$

$$\% N = \frac{3.64 \text{ g}}{25 \text{ g}} * 100\% = 14.57\%$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 4. Cálculo para encontrar el porcentaje de nitrógeno en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios.

$$\% \text{Nitrógeno} = \frac{\text{Cantidad de nitrógeno, g}}{\text{Peso de muestra, g}} * 100\%$$

$$\% N = \frac{0.35 \text{ g}}{25 \text{ g}} * 100\% = 1.39\%$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 5. Cálculo para encontrar el porcentaje de fósforo en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios.

$$\% \text{ Fósforo} = \frac{\text{Cantidad de fósforo, g}}{\text{Peso de muestra, g}} * 100\%$$

$$\% N = \frac{0.17 \text{ g}}{25 \text{ g}} * 100\% = 0.68 \%$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 6. Cálculo para encontrar el porcentaje de calcio en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios.

$$\% \text{ Calcio} = \frac{\text{Cantidad de calcio, g}}{\text{Peso de muestra, g}} * 100\%$$

$$\% Ca = \frac{2.65 \text{ g}}{25 \text{ g}} * 100\% = 10.58 \%$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 7. Cálculo para encontrar la relación C/N en las muestras de gallinaza y residuos alimenticios.

$$\text{Relación C/N} = \frac{\% \text{ de Carbono}}{\% \text{ de Nitrógeno}}$$

$$\text{Relación C/N} = \frac{14.57 \%}{0.68 \%} = 21.45$$

* Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

2. Módulo B. Cálculos para la obtención del volumen.

Cálculo No. 8. Cálculo para hallar el peso de bioabono que salía de los biodigestores,

$$\begin{aligned} \text{Peso vaso} + \text{bioabono (g)} - \text{Peso vaso (g)} &= \text{Peso bioabono (g)} \\ 427 \text{ g} - 43 \text{ g} &= 384 \text{ g} \end{aligned}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 9. Cálculo para encontrar el peso de agua que se desplazó del biodigestor.

$$\begin{aligned} \text{Peso de H}_2\text{O} + \text{vaso} - \text{Peso vaso} &= \text{Peso H}_2\text{O} \\ 495 \text{ g} - 43 \text{ g} &= 452 \text{ g} \end{aligned}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 10. Cálculo del volumen de bioabono que se desplazó del biodigestor.

$$\begin{aligned} \frac{\text{Peso H}_2\text{O, g}}{\text{Densidad H}_2\text{O, g/ml}} &= \text{Volumen de bioabono desplazado, ml} \\ \frac{452 \text{ g}}{1 \text{ g/ml}} &= 452 \text{ ml} \end{aligned}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 11. Cálculo para encontrar el volumen total del biodigestor.

Peso del Biodigestor con Agua al máximo, kg

$$\begin{aligned} - \text{Peso del Biodigestor sin agua, kg} &= \text{Peso de Agua al máximo, kg} \\ 65 \text{ kg} - 3 \text{ kg} &= 62 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{Peso de Agua al máximo kg}}{\text{Densidad del Agua kg/m}^3} &= \text{Volumen máximo del biodigestor, m}^3 \\ \frac{62 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} &= 0.062 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 12. Cálculo para hallar el volumen de llenado hasta la marca máxima de llenado.

$$\begin{aligned} & \text{Peso de agua hasta marca máxima, kg} - \text{Peso del biodigestor vacío, kg} \\ & = \text{Peso del agua de la marca máxima kg} \end{aligned}$$

$$49 \text{ kg} - 3 \text{ kg} = 46 \text{ kg}$$

$$\frac{\text{Peso de agua al máximo kg}}{\text{Densidad del agua kg/m}^3} = \text{Volumen máximo del biodigestor, m}^3$$

$$\frac{46 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.046 \text{ m}^3$$

Figura 41. Marca máxima del biodigestor hasta donde se llenó.



*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 13. Cálculo de volumen de biogás generado antes de que se desplace bioabono.

$$\begin{aligned} & \text{Volumen máximo del biodigestor, m}^3 - \text{Volumen en la marca máxima, m}^3 \\ & = \text{Volumen biogas, m}^3 \end{aligned}$$

$$0.062 \text{ m}^3 - 0.046 \text{ m}^3 = 0.016 \text{ m}^3$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

Cálculo No. 14. Cálculo del volumen desplazado de bioabono.

$$\text{Peso de agua de la marca máxima, kg}$$

$$- \text{Peso del agua de la marca hasta donde llego, kg}$$

$$= \text{Peso de agua desplazada, kg}$$

$$46 \text{ kg} - 30 \text{ kg} = 16 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen desplazado, m}^3 = \frac{16 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.016 \text{ m}^3$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

3. Módulo C. Calidad del gas.

Cálculo No. 15. Cálculo de la cantidad de biogás producido por unidad de masa utilizado.

$$\text{Cantidad de biogas} \frac{m^3}{kg} = \frac{m^3 \text{ de biogas generado.}}{kg \text{ de sustrato utilizado para la generación de biogás}}$$

$$\frac{0.000316 m^3}{0.063 kg} = 0.002 \frac{m^3}{kg}$$

*Se realizó el mismo cálculo para todas las mezclas y para ambos sustratos.

E. Datos originales

1. Módulo A. Caracterización del sustrato.

Tabla 13. Propiedades de los residuos alimenticios a utilizar en los biodigestores para la producción de biogás

Parámetro	Valor	Unidad
Nitrógeno	1.39	%
Fosforo (P)	0.68	%
Potasio (K)	4.20	%
Magnesio (Mg)	1.00	%
Calcio (Ca)	10.58	%
Hierro (Fe)	2.60	%
Cobre (Cu)	109.00	ppm
Manganeso (Mn)	770.00	ppm
Zinc (Zn)	617.00	ppm

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 14. Propiedades de la gallinaza a utilizar en los biodigestores para la producción de biogás.

Parámetro	Valor	Unidad
Nitrógeno	1.96	%
Fosforo (P)	0.64	%
Potasio (K)	5.10	%
Magnesio (Mg)	1.11	%
Calcio (Ca)	14.75	%
Hierro (Fe)	0.40	%
Cobre (Cu)	84.00	ppm
Manganeso (Mn)	730.00	ppm
Zinc (Zn)	624.00	ppm

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

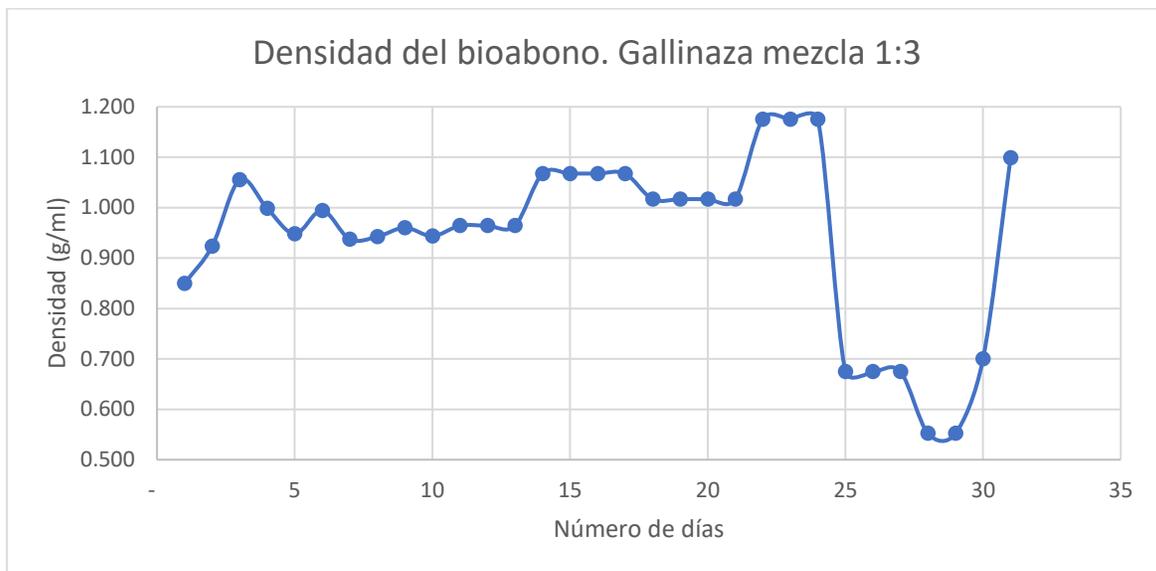
2. Módulo B. Volumen de biogás.

Tabla 15. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 1:3

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	427	43	384	0.850
20/01/2023	2	326	25	301	0.923
21/01/2023	3	590	36	554	1.055
22/01/2023	4	765	37	728	0.999
23/01/2023	5	1056	39	1017	0.948
24/01/2023	6	1093	39	1054	0.994
25/01/2023	7	1145	37	1108	0.937
26/01/2023	8	947	31	916	0.942
27/01/2023	9	927	32	895	0.960
28/01/2023	10	576	24	552	0.944
29/01/2023	11	935	19	916	0.964
30/01/2023	12	935	19	916	0.964
31/01/2023	13	935	19	916	0.964
1/02/2023	14	525	51	474	1.068
2/02/2023	15	525	51	474	1.068
3/02/2023	16	525	51	474	1.068
4/02/2023	17	525	51	474	1.068
5/02/2023	18	459	38	421	1.017
6/02/2023	19	459	38	421	1.017
7/02/2023	20	459	38	421	1.017
8/02/2023	21	459	38	421	1.017
9/02/2023	22	521	52	469	1.175
10/02/2023	23	521	52	469	1.175
11/02/2023	24	521	52	469	1.175
12/02/2023	25	146	32	114	0.675
13/02/2023	26	146	32	114	0.675
14/02/2023	27	146	32	114	0.675
15/02/2023	28	182	39	143	0.552
16/02/2023	29	182	39	143	0.552
17/02/2023	30	37	30	7	0.700
18/02/2023	31	232	43	189	1.099

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 42. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 1:3.



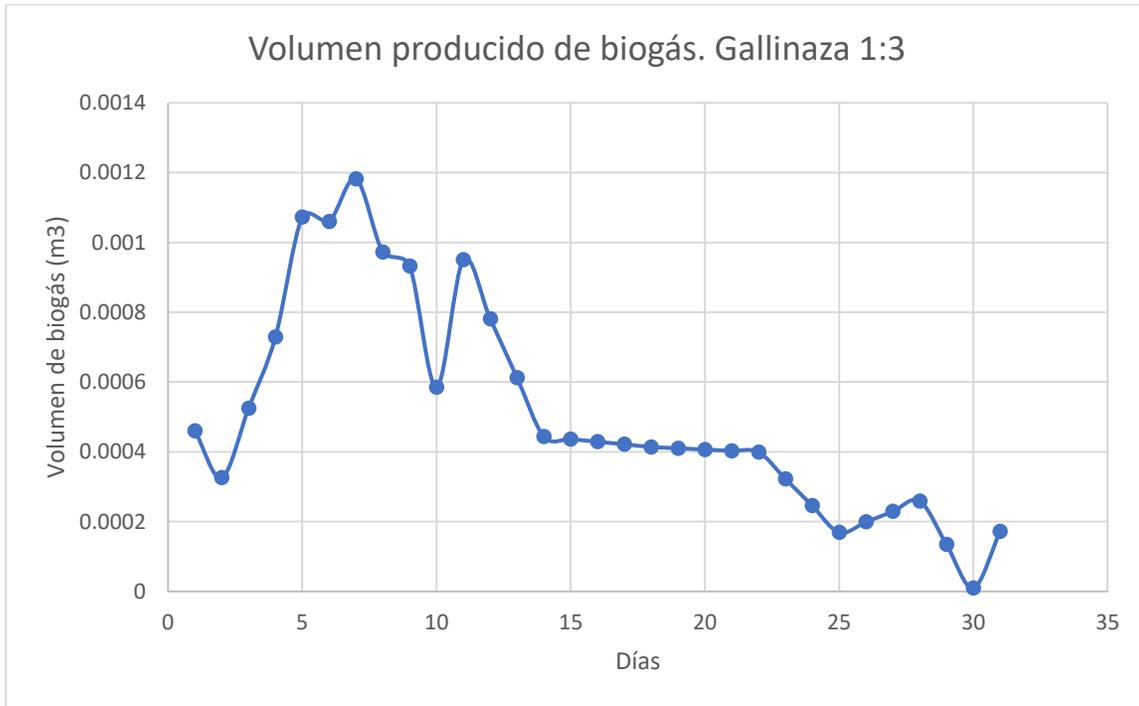
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 16. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 1:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	495	43	452	452	0.000452
20/01/2023	2	345	19	326	326	0.000326
21/01/2023	3	555	30	525	525	0.000525
22/01/2023	4	761	32	729	729	0.000729
23/01/2023	5	1106	33	1073	1073	0.001073
24/01/2023	6	1093	33	1060	1060	0.00106
25/01/2023	7	1204	22	1182	1182	0.001182
26/01/2023	8	1000	28	972	972	0.000972
27/01/2023	9	963	31	932	932	0.000932
28/01/2023	10	613	28	585	585	0.000585
29/01/2023	11	967	17	950	950	0.00095
30/01/2023	12	967	17	950	950	0.00095
31/01/2023	13	967	17	950	950	0.00095
1/02/2023	14	495	51	444	444	0.000444
2/02/2023	15	495	51	444	444	0.000444
3/02/2023	16	495	51	444	444	0.000444
4/02/2023	17	495	51	444	444	0.000444
5/02/2023	18	452	38	414	414	0.000414
6/02/2023	19	452	38	414	414	0.000414
7/02/2023	20	452	38	414	414	0.000414
8/02/2023	21	452	38	414	414	0.000414
9/02/2023	22	451	52	399	399	0.000399
10/02/2023	23	451	52	399	399	0.000399
11/02/2023	24	451	52	399	399	0.000399
12/02/2023	25	201	32	169	169	0.000169
13/02/2023	26	201	32	169	169	0.000169
14/02/2023	27	201	32	169	169	0.000169
15/02/2023	28	298	39	259	259	0.000259
16/02/2023	29	298	39	259	259	0.000259
17/02/2023	30	40	30	10	10	0.00001
18/02/2023	31	215	43	172	172	0.000172

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 43. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 1:3.



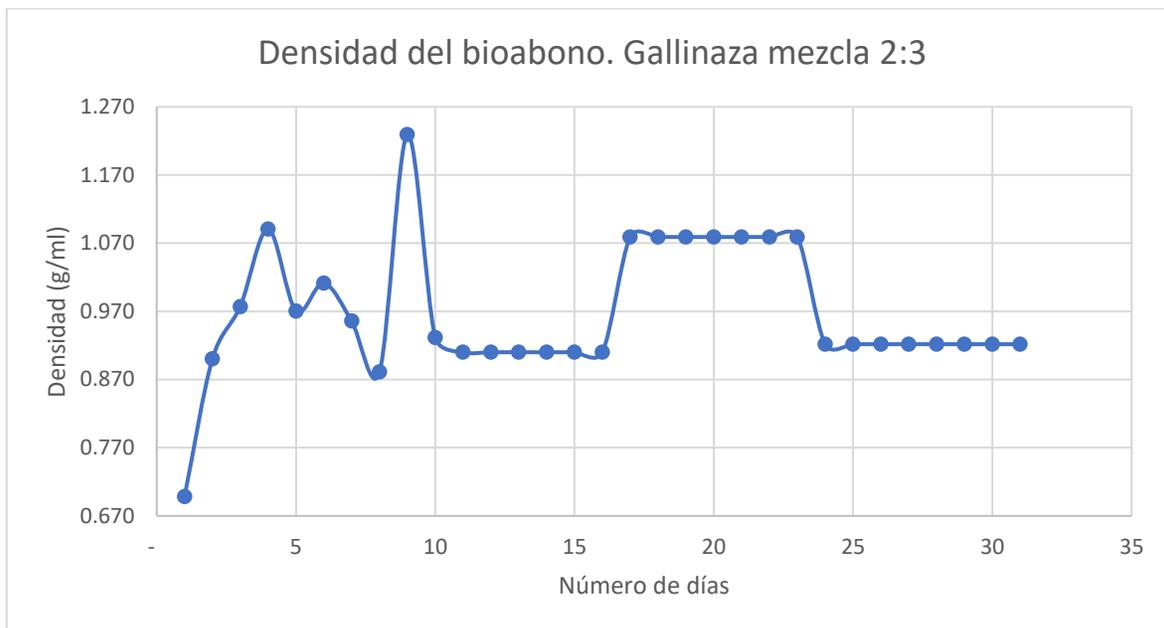
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 17. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 2:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	119	24	95	0.699
20/01/2023	2	295	24	271	0.900
21/01/2023	3	582	28	554	0.977
22/01/2023	4	794	36	758	1.091
23/01/2023	5	882	25	857	0.971
24/01/2023	6	910	28	882	1.011
25/01/2023	7	652	25	627	0.956
26/01/2023	8	520	38	482	0.881
27/01/2023	9	348	37	311	1.229
28/01/2023	10	462	25	437	0.932
29/01/2023	11	289	26	263	0.910
30/01/2023	12	289	26	263	0.910
31/01/2023	13	289	26	263	0.910
1/02/2023	14	289	26	263	0.910
2/02/2023	15	289	26	263	0.910
3/02/2023	16	289	26	263	0.910
4/02/2023	17	766	43	723	1.079
5/02/2023	18	766	43	723	1.079
6/02/2023	19	766	43	723	1.079
7/02/2023	20	766	43	723	1.079
8/02/2023	21	766	43	723	1.079
9/02/2023	22	766	43	723	1.079
10/02/2023	23	766	43	723	1.079
11/02/2023	24	251	27	224	0.922
12/02/2023	25	251	27	224	0.922
13/02/2023	26	251	27	224	0.922
14/02/2023	27	251	27	224	0.922
15/02/2023	28	251	27	224	0.922
16/02/2023	29	251	27	224	0.922
17/02/2023	30	251	27	224	0.922
18/02/2023	31	251	27	224	0.922

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 44. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 2:3.



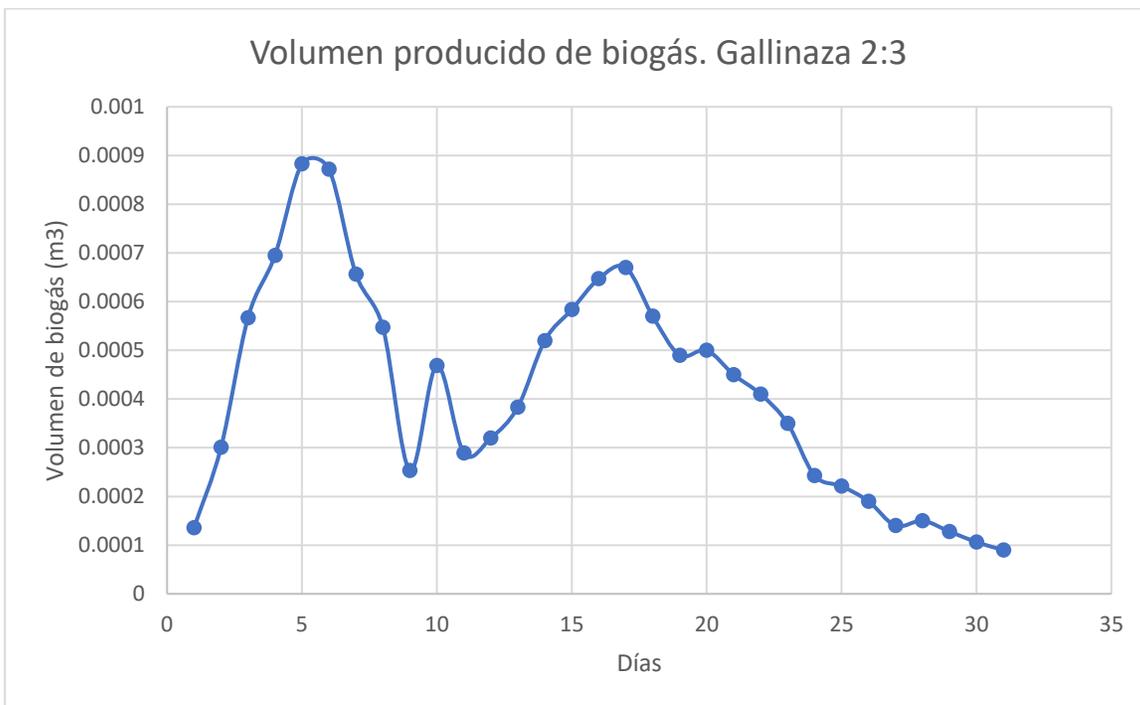
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 18. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 2:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	156	20	136	136	0.000136
20/01/2023	2	321	20	301	301	0.000301
21/01/2023	3	591	24	567	567	0.000567
22/01/2023	4	725	30	695	695	0.000695
23/01/2023	5	903	20	883	883	0.000883
24/01/2023	6	894	22	872	872	0.000872
25/01/2023	7	691	35	656	656	0.000656
26/01/2023	8	580	33	547	547	0.000547
27/01/2023	9	287	34	253	253	0.000253
28/01/2023	10	491	22	469	469	0.000469
29/01/2023	11	312	23	289	289	0.000289
30/01/2023	12	312	23	289	289	0.000289
31/01/2023	13	312	23	289	289	0.000289
1/02/2023	14	312	23	289	289	0.000289
2/02/2023	15	312	23	289	289	0.000289
3/02/2023	16	312	23	289	289	0.000289
4/02/2023	17	713	43	670	670	0.00067
5/02/2023	18	713	43	670	670	0.00067
6/02/2023	19	713	43	670	670	0.00067
7/02/2023	20	713	43	670	670	0.00067
8/02/2023	21	713	43	670	670	0.00067
9/02/2023	22	713	43	670	670	0.00067
10/02/2023	23	713	43	670	670	0.00067
11/02/2023	24	270	27	243	243	0.000243
12/02/2023	25	270	27	243	243	0.000243
13/02/2023	26	270	27	243	243	0.000243
14/02/2023	27	270	27	243	243	0.000243
15/02/2023	28	270	27	243	243	0.000243
16/02/2023	29	270	27	243	243	0.000243
17/02/2023	30	270	27	243	243	0.000243
18/02/2023	31	270	27	243	243	0.000243

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 45. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 2:3.



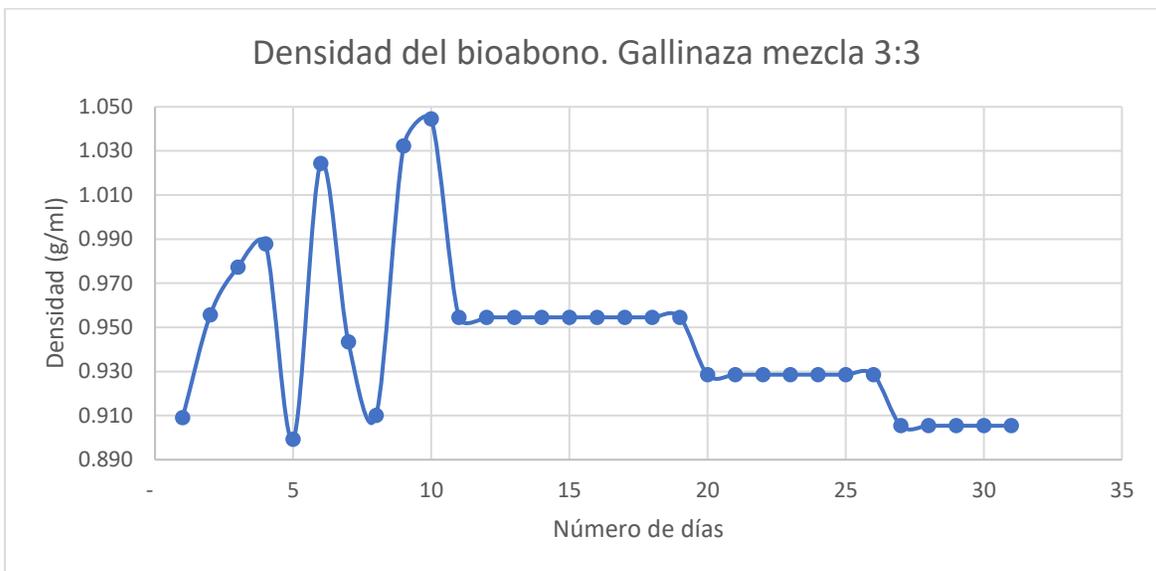
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 19. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de gallinaza con la mezcla 3:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	94	24	70	0.909
20/01/2023	2	175	24	151	0.956
21/01/2023	3	501	28	473	0.977
22/01/2023	4	683	36	647	0.988
23/01/2023	5	801	25	776	0.899
24/01/2023	6	829	28	801	1.024
25/01/2023	7	591	25	566	0.943
26/01/2023	8	483	38	445	0.910
27/01/2023	9	293	37	256	1.032
28/01/2023	10	401	25	376	1.044
29/01/2023	11	194	26	168	0.955
30/01/2023	12	194	26	168	0.955
31/01/2023	13	194	26	168	0.955
1/02/2023	14	194	26	168	0.955
2/02/2023	15	194	26	168	0.955
3/02/2023	16	194	26	168	0.955
4/02/2023	17	194	26	168	0.955
5/02/2023	18	194	26	168	0.955
6/02/2023	19	194	26	168	0.955
7/02/2023	20	138	21	117	0.929
8/02/2023	21	138	21	117	0.929
9/02/2023	22	138	21	117	0.929
10/02/2023	23	138	21	117	0.929
11/02/2023	24	138	21	117	0.929
12/02/2023	25	138	21	117	0.929
13/02/2023	26	138	21	117	0.929
14/02/2023	27	88	21	67	0.905
15/02/2023	28	88	21	67	0.905
16/02/2023	29	88	21	67	0.905
17/02/2023	30	88	21	67	0.905
18/02/2023	31	88	21	67	0.905

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 46. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de la gallinaza con la mezcla 3:3.



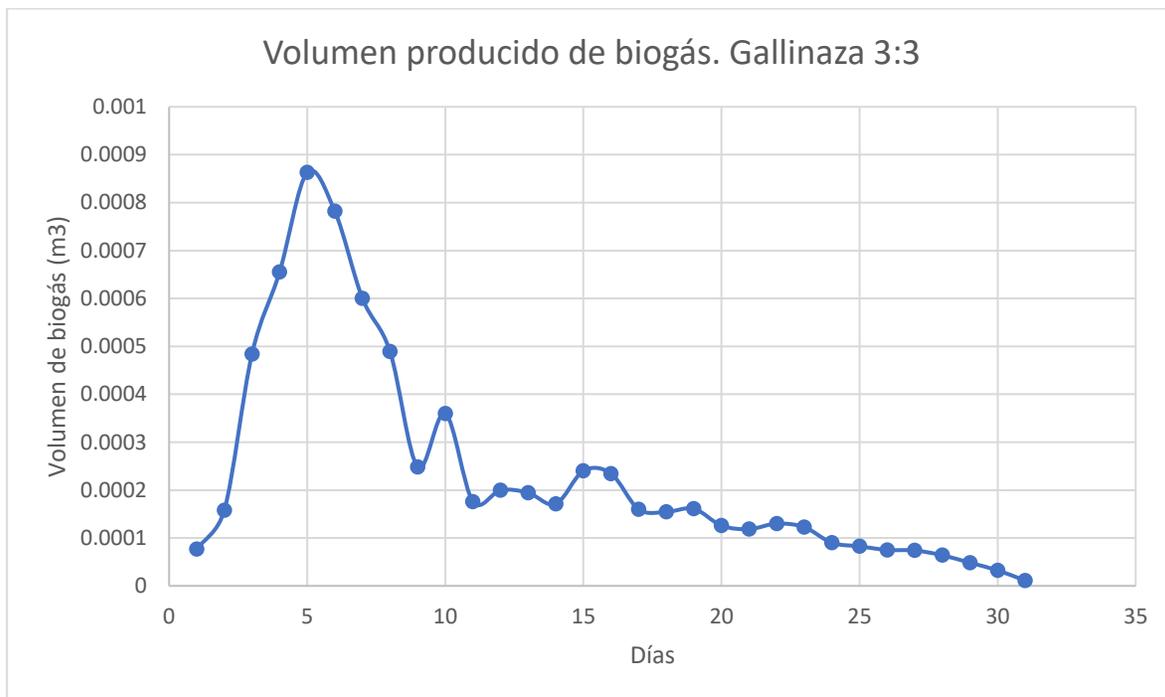
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 20. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 3:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	101	24	77	77	0.000077
20/01/2023	2	182	24	158	158	0.000158
21/01/2023	3	512	28	484	484	0.000484
22/01/2023	4	691	36	655	655	0.000655
23/01/2023	5	888	25	863	863	0.000863
24/01/2023	6	810	28	782	782	0.000782
25/01/2023	7	625	25	600	600	0.0006
26/01/2023	8	527	38	489	489	0.000489
27/01/2023	9	285	37	248	248	0.000248
28/01/2023	10	385	25	360	360	0.00036
29/01/2023	11	202	26	176	176	0.000176
30/01/2023	12	202	26	176	176	0.000176
31/01/2023	13	202	26	176	176	0.000176
1/02/2023	14	202	26	176	176	0.000176
2/02/2023	15	202	26	176	176	0.000176
3/02/2023	16	202	26	176	176	0.000176
4/02/2023	17	202	26	176	176	0.000176
5/02/2023	18	202	26	176	176	0.000176
6/02/2023	19	202	26	176	176	0.000176
7/02/2023	20	147	21	126	126	0.000126
8/02/2023	21	147	21	126	126	0.000126
9/02/2023	22	147	21	126	126	0.000126
10/02/2023	23	147	21	126	126	0.000126
11/02/2023	24	147	21	126	126	0.000126
12/02/2023	25	147	21	126	126	0.000126
13/02/2023	26	147	21	126	126	0.000126
14/02/2023	27	95	21	74	74	0.000074
15/02/2023	28	95	21	74	74	0.000074
16/02/2023	29	95	21	74	74	0.000074
17/02/2023	30	95	21	74	74	0.000074
18/02/2023	31	95	21	74	74	0.000074

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 47. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de la gallinaza en la mezcla 3:3.



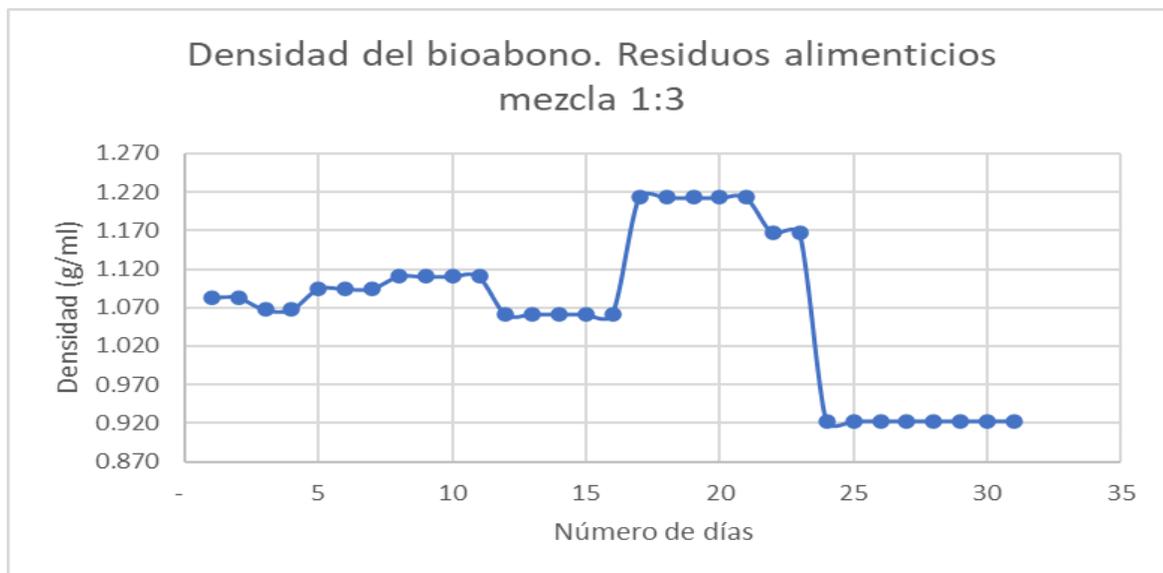
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 21. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 1:3

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	50	24	26	1.083
20/01/2023	2	50	24	26	1.083
21/01/2023	3	103	24	79	1.068
22/01/2023	4	103	24	79	1.068
23/01/2023	5	271	28	243	1.095
24/01/2023	6	271	28	243	1.095
25/01/2023	7	271	28	243	1.095
26/01/2023	8	317	36	281	1.111
27/01/2023	9	317	36	281	1.111
28/01/2023	10	317	36	281	1.111
29/01/2023	11	317	36	281	1.111
30/01/2023	12	403	25	378	1.062
31/01/2023	13	403	25	378	1.062
1/02/2023	14	403	25	378	1.062
2/02/2023	15	403	25	378	1.062
3/02/2023	16	403	25	378	1.062
4/02/2023	17	287	25	262	1.213
5/02/2023	18	287	25	262	1.213
6/02/2023	19	287	25	262	1.213
7/02/2023	20	287	25	262	1.213
8/02/2023	21	287	25	262	1.213
9/02/2023	22	114	37	77	1.167
10/02/2023	23	114	37	77	1.167
11/02/2023	24	74	26	48	0.923
12/02/2023	25	74	26	48	0.923
13/02/2023	26	74	26	48	0.923
14/02/2023	27	74	26	48	0.923
15/02/2023	28	74	26	48	0.923
16/02/2023	29	74	26	48	0.923
17/02/2023	30	74	26	48	0.923
18/02/2023	31	74	26	48	0.923

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 48. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 1:3.



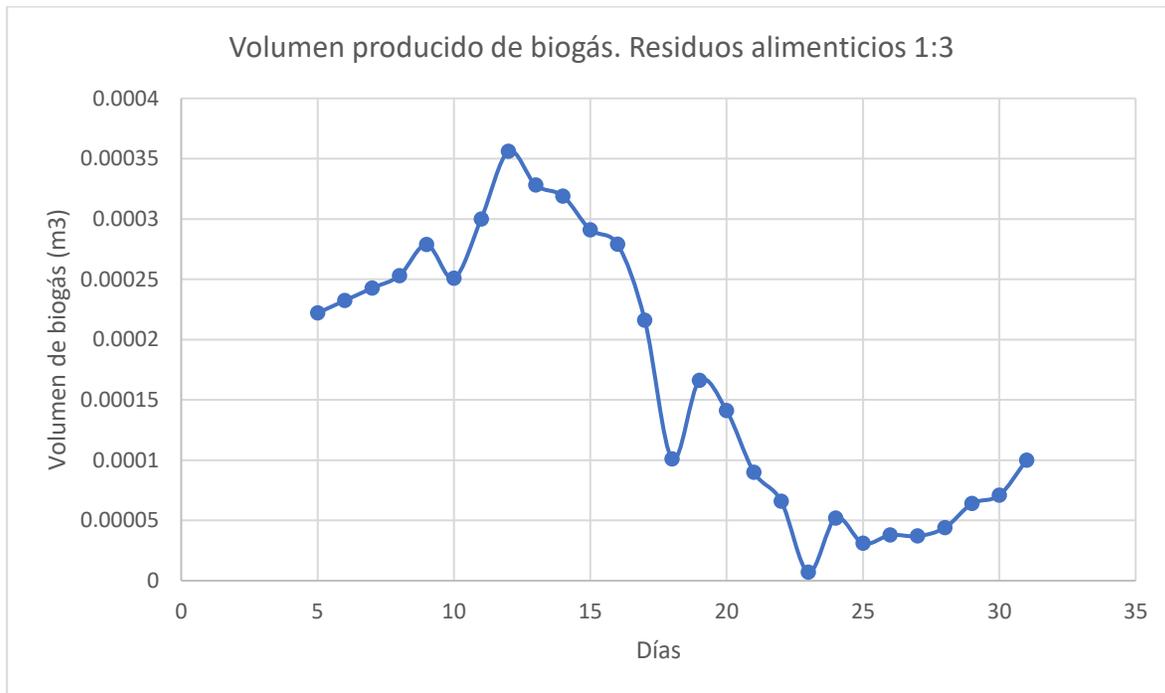
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 22. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 1:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	48	24	24	24	0.000024
20/01/2023	2	48	24	24	24	0.000024
21/01/2023	3	98	24	74	74	0.000074
22/01/2023	4	98	24	74	74	0.000074
23/01/2023	5	250	28	222	222	0.000222
24/01/2023	6	250	28	222	222	0.000222
25/01/2023	7	250	28	222	222	0.000222
26/01/2023	8	289	36	253	253	0.000253
27/01/2023	9	289	36	253	253	0.000253
28/01/2023	10	289	36	253	253	0.000253
29/01/2023	11	289	36	253	253	0.000253
30/01/2023	12	381	25	356	356	0.000356
31/01/2023	13	381	25	356	356	0.000356
1/02/2023	14	381	25	356	356	0.000356
2/02/2023	15	381	25	356	356	0.000356
3/02/2023	16	381	25	356	356	0.000356
4/02/2023	17	241	25	216	216	0.000216
5/02/2023	18	241	25	216	216	0.000216
6/02/2023	19	241	25	216	216	0.000216
7/02/2023	20	241	25	216	216	0.000216
8/02/2023	21	241	25	216	216	0.000216
9/02/2023	22	103	37	66	66	0.000066
10/02/2023	23	103	37	66	66	0.000066
11/02/2023	24	78	26	52	52	0.000052
12/02/2023	25	78	26	52	52	0.000052
13/02/2023	26	78	26	52	52	0.000052
14/02/2023	27	78	26	52	52	0.000052
15/02/2023	28	78	26	52	52	0.000052
16/02/2023	29	78	26	52	52	0.000052
17/02/2023	30	78	26	52	52	0.000052
18/02/2023	31	78	26	52	52	0.000052

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 49. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 1:3.



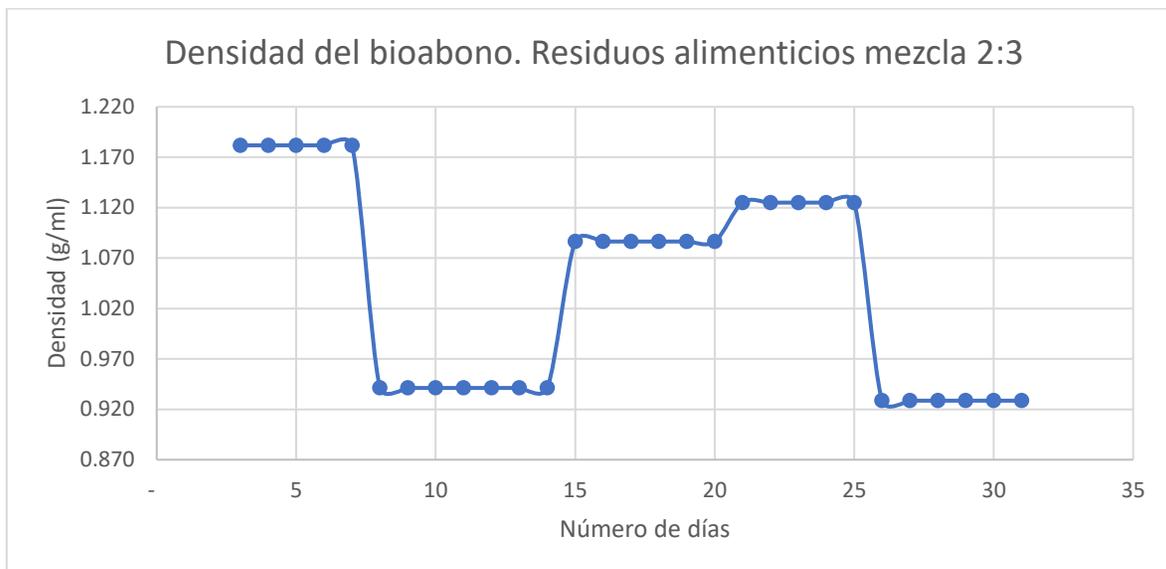
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 23. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 2:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	0	0	0	0.000
20/01/2023	2	0	0	0	0.000
21/01/2023	3	32	19	13	1.182
22/01/2023	4	32	19	13	1.182
23/01/2023	5	32	19	13	1.182
24/01/2023	6	32	19	13	1.182
25/01/2023	7	32	19	13	1.182
26/01/2023	8	53	21	32	0.941
27/01/2023	9	53	21	32	0.941
28/01/2023	10	53	21	32	0.941
29/01/2023	11	53	21	32	0.941
30/01/2023	12	53	21	32	0.941
31/01/2023	13	53	21	32	0.941
1/02/2023	14	53	21	32	0.941
2/02/2023	15	111	23	88	1.086
3/02/2023	16	111	23	88	1.086
4/02/2023	17	111	23	88	1.086
5/02/2023	18	111	23	88	1.086
6/02/2023	19	111	23	88	1.086
7/02/2023	20	111	23	88	1.086
8/02/2023	21	64	19	45	1.125
9/02/2023	22	64	19	45	1.125
10/02/2023	23	64	19	45	1.125
11/02/2023	24	64	19	45	1.125
12/02/2023	25	64	19	45	1.125
13/02/2023	26	34	21	13	0.929
14/02/2023	27	34	21	13	0.929
15/02/2023	28	34	21	13	0.929
16/02/2023	29	34	21	13	0.929
17/02/2023	30	34	21	13	0.929
18/02/2023	31	34	21	13	0.929

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 50. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 2:3.



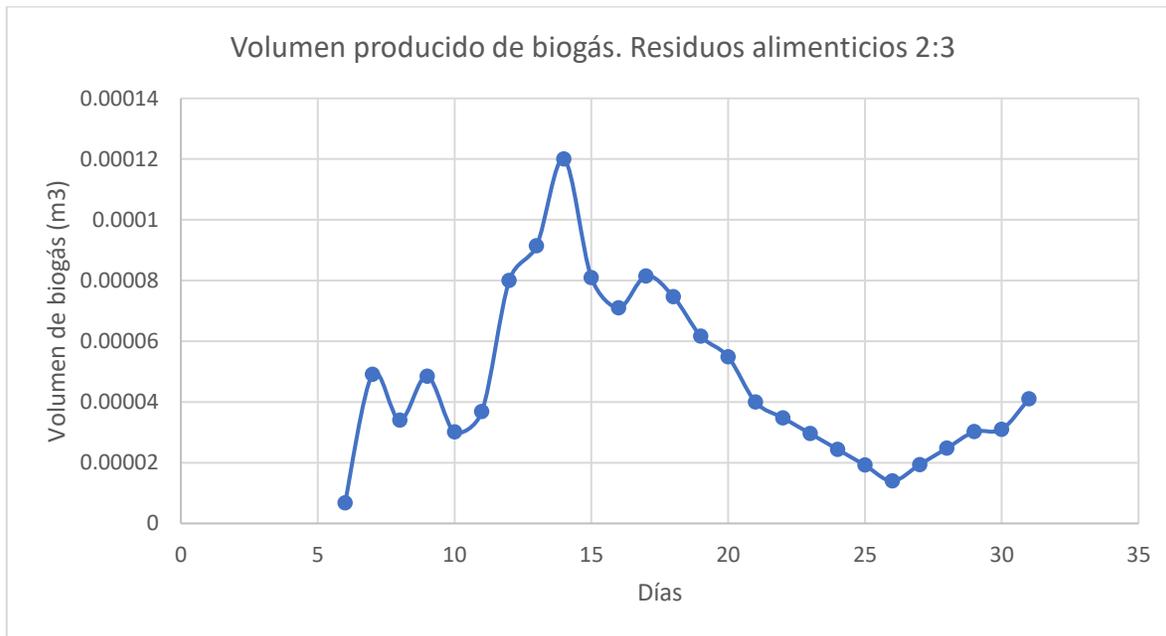
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 24. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 2:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	0	0	0	0	0
20/01/2023	2	0	0	0	0	0
21/01/2023	3	30	19	11	11	0.000011
22/01/2023	4	30	19	11	11	0.000011
23/01/2023	5	30	19	11	11	0.000011
24/01/2023	6	30	19	11	11	0.000011
25/01/2023	7	30	19	11	11	0.000011
26/01/2023	8	55	21	34	34	0.000034
27/01/2023	9	55	21	34	34	0.000034
28/01/2023	10	55	21	34	34	0.000034
29/01/2023	11	55	21	34	34	0.000034
30/01/2023	12	55	21	34	34	0.000034
31/01/2023	13	55	21	34	34	0.000034
1/02/2023	14	55	21	34	34	0.000034
2/02/2023	15	104	23	81	81	0.000081
3/02/2023	16	104	23	81	81	0.000081
4/02/2023	17	104	23	81	81	0.000081
5/02/2023	18	104	23	81	81	0.000081
6/02/2023	19	104	23	81	81	0.000081
7/02/2023	20	104	23	81	81	0.000081
8/02/2023	21	59	19	40	40	0.00004
9/02/2023	22	59	19	40	40	0.00004
10/02/2023	23	59	19	40	40	0.00004
11/02/2023	24	59	19	40	40	0.00004
12/02/2023	25	59	19	40	40	0.00004
13/02/2023	26	35	21	14	14	0.000014
14/02/2023	27	35	21	14	14	0.000014
15/02/2023	28	35	21	14	14	0.000014
16/02/2023	29	35	21	14	14	0.000014
17/02/2023	30	35	21	14	14	0.000014
18/02/2023	31	35	21	14	14	0.000014

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 51. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 2:3.



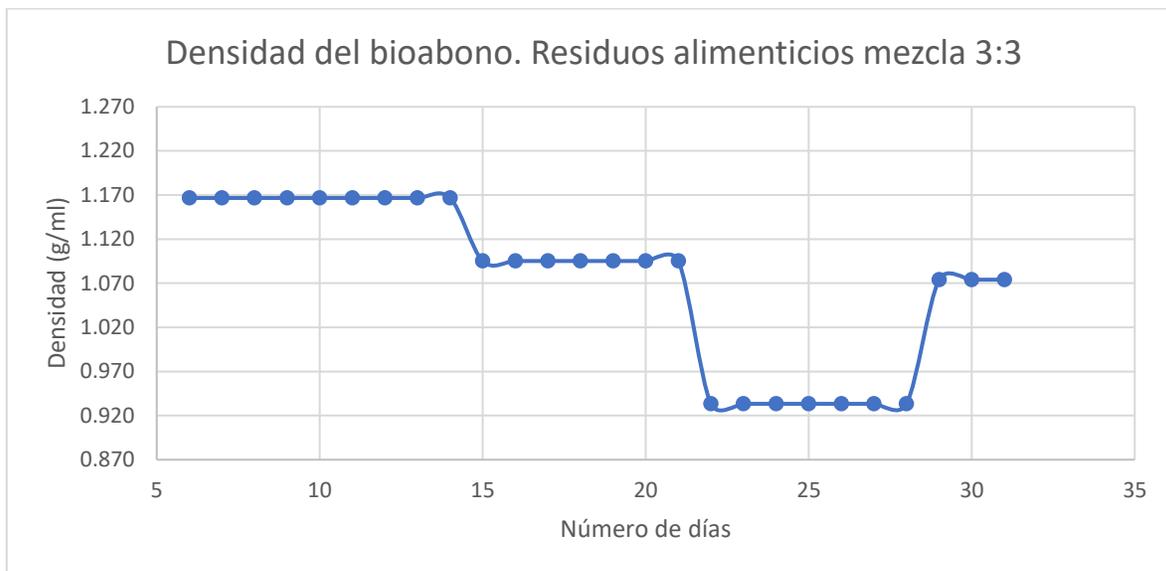
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 25. Densidad del bioabono obtenido del biodigestor de residuos alimenticios con la mezcla 3:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Biol (g)	Peso del vaso (g)	Peso biol (g)	Densidad del biol (g/ml)
19/01/2023	1	0		0	0.000
20/01/2023	2	0	0	0	0.000
21/01/2023	3	0	0	0	0.000
22/01/2023	4	0	0	0	0.000
23/01/2023	5	0	0	0	0.000
24/01/2023	6	29	15	14	1.167
25/01/2023	7	29	15	14	1.167
26/01/2023	8	29	15	14	1.167
27/01/2023	9	29	15	14	1.167
28/01/2023	10	29	15	14	1.167
29/01/2023	11	29	15	14	1.167
30/01/2023	12	29	15	14	1.167
31/01/2023	13	29	15	14	1.167
1/02/2023	14	29	15	14	1.167
2/02/2023	15	43	20	23	1.095
3/02/2023	16	43	20	23	1.095
4/02/2023	17	43	20	23	1.095
5/02/2023	18	43	20	23	1.095
6/02/2023	19	43	20	23	1.095
7/02/2023	20	43	20	23	1.095
8/02/2023	21	43	20	23	1.095
9/02/2023	22	76	20	56	0.933
10/02/2023	23	76	20	56	0.933
11/02/2023	24	76	20	56	0.933
12/02/2023	25	76	20	56	0.933
13/02/2023	26	76	20	56	0.933
14/02/2023	27	76	20	56	0.933
15/02/2023	28	76	20	56	0.933
16/02/2023	29	52	23	29	1.074
17/02/2023	30	52	23	29	1.074
18/02/2023	31	52	23	29	1.074

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 52. Gráfica del comportamiento de la densidad del bioabono a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios con la mezcla 3:3.



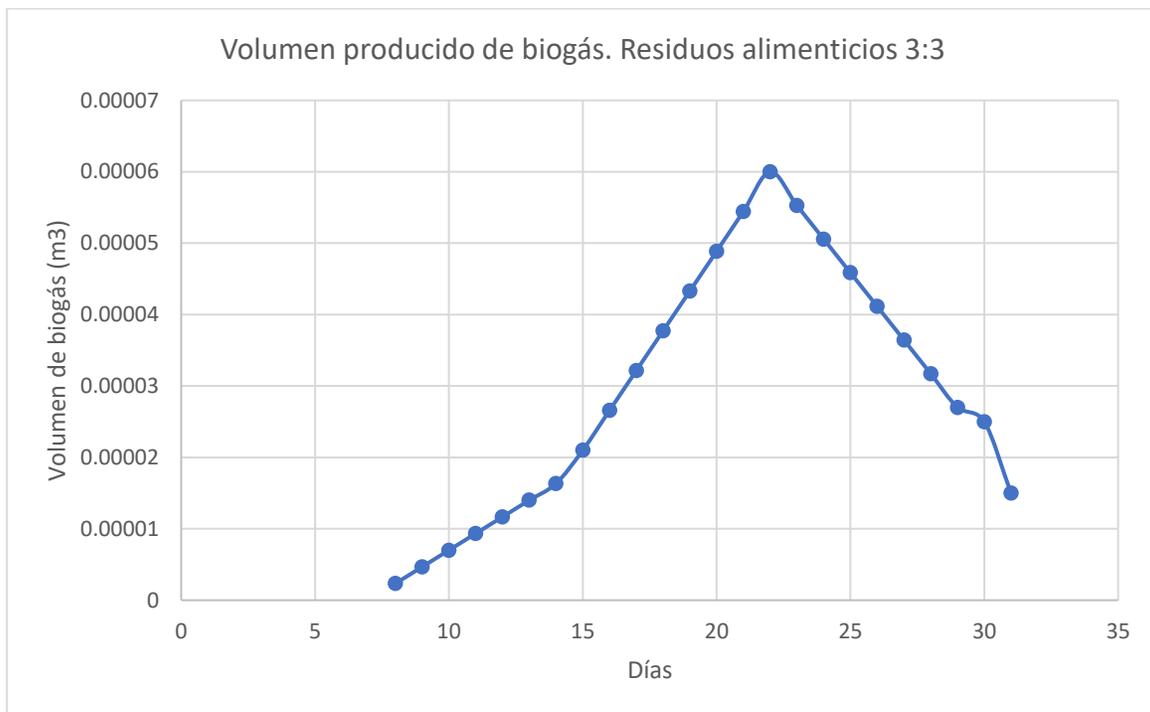
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 26. Volumen de biogás producido a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 3:3.

Fecha	Número de días	Peso vaso + Agua (g)	Peso del vaso (g)	Peso agua (g)	Volumen de agua, biol y biogás producido (ml)	Volumen de agua, biol y biogás producido (m3)
19/01/2023	1	0	15	-15	-15	0
20/01/2023	2	0	15	-15	-15	0
21/01/2023	3	0	15	-15	-15	0
22/01/2023	4	0	15	-15	-15	0
23/01/2023	5	0	15	-15	-15	0
24/01/2023	6	27	15	12	12	0.000012
25/01/2023	7	27	15	12	12	0.000012
26/01/2023	8	27	15	12	12	0.000012
27/01/2023	9	27	15	12	12	0.000012
28/01/2023	10	27	15	12	12	0.000012
29/01/2023	11	27	15	12	12	0.000012
30/01/2023	12	27	15	12	12	0.000012
31/01/2023	13	27	15	12	12	0.000012
1/02/2023	14	27	15	12	12	0.000012
2/02/2023	15	41	20	21	21	0.000021
3/02/2023	16	41	20	21	21	0.000021
4/02/2023	17	41	20	21	21	0.000021
5/02/2023	18	41	20	21	21	0.000021
6/02/2023	19	41	20	21	21	0.000021
7/02/2023	20	41	20	21	21	0.000021
8/02/2023	21	41	20	21	21	0.000021
9/02/2023	22	80	20	60	60	0.00006
10/02/2023	23	80	20	60	60	0.00006
11/02/2023	24	80	20	60	60	0.00006
12/02/2023	25	80	20	60	60	0.00006
13/02/2023	26	80	20	60	60	0.00006
14/02/2023	27	80	20	60	60	0.00006
15/02/2023	28	80	20	60	60	0.00006
16/02/2023	29	50	23	27	27	0.000027
17/02/2023	30	50	23	27	27	0.000027
18/02/2023	31	50	23	27	27	0.000027

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

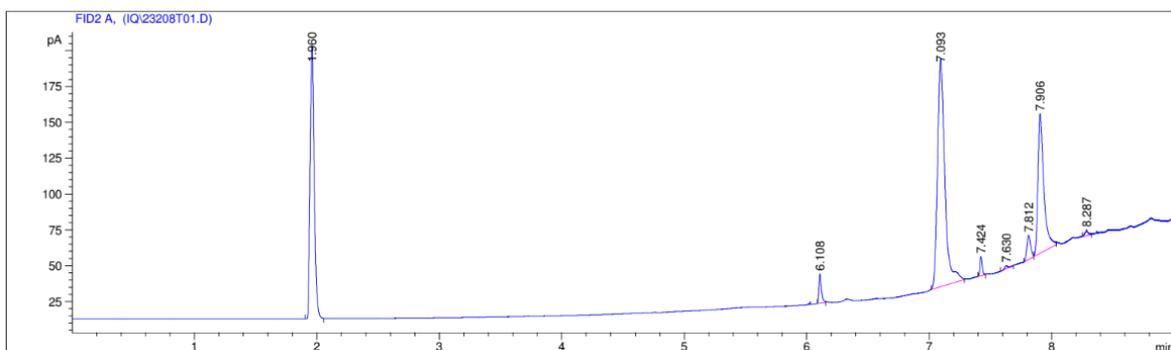
Figura 53. Gráfica de la producción de biogás a lo largo de la fermentación de los residuos alimenticios en la mezcla 3:3.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

3. Módulo C. Caracterización del biogás.

Figura 54. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 1:3 de gallinaza.



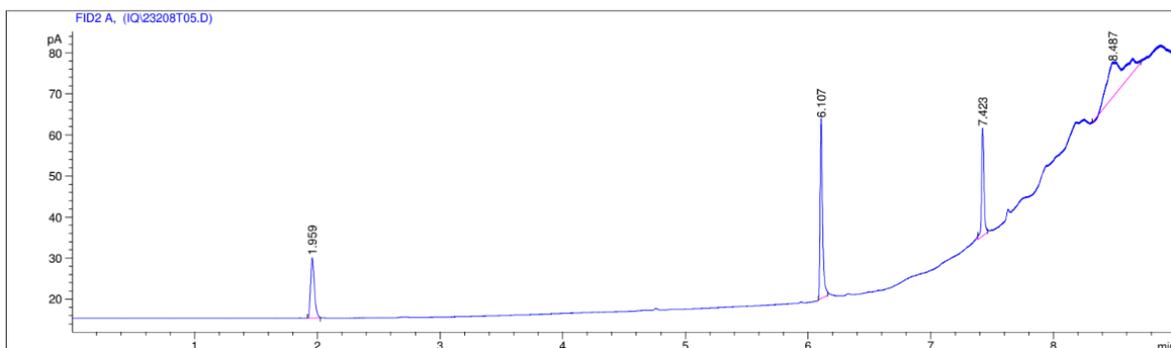
Signal 1: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	1.960	PB	0.0376	448.25446	189.62212	29.50122
2	6.108	PB	0.0215	28.91442	20.38978	1.90296
3	7.093	PB	0.0614	656.99823	158.21454	43.23939
4	7.424	BB	0.0204	17.27723	13.11125	1.13708
5	7.630	PB	0.0256	3.51720	2.09192	0.23148
6	7.812	PV	0.0328	35.80770	16.83002	2.35663
7	7.906	VB	0.0487	321.56287	97.00216	21.16320
8	8.287	BB	0.0250	7.11155	3.77403	0.46804

Totals : 1519.44365 501.03581

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 55. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 2:3 de gallinaza.



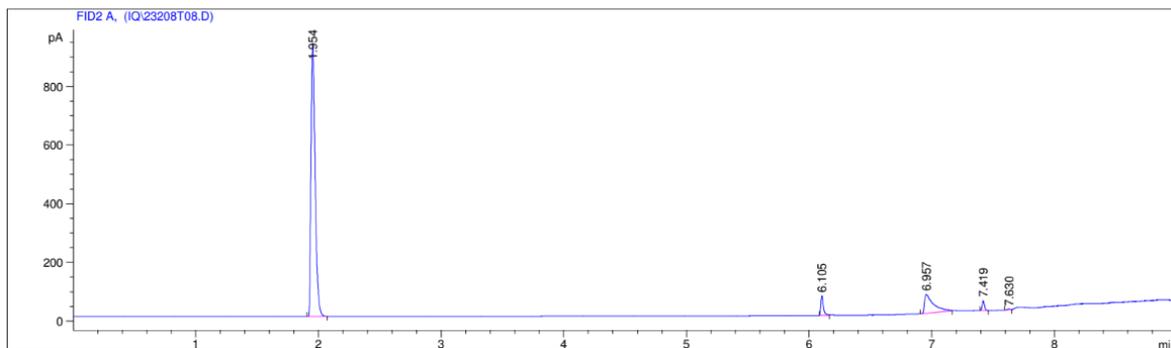
Signal 1: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	1.959	PB	0.0329	31.04703	14.56961	14.68617
2	6.107	PB	0.0214	60.56920	43.11075	28.65104
3	7.423	BB	0.0209	35.40641	25.91005	16.74829
4	8.487	PB	0.1311	84.38050	8.33343	39.91450

Totals : 211.40314 91.92384

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 56. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 3:3 de gallinaza.



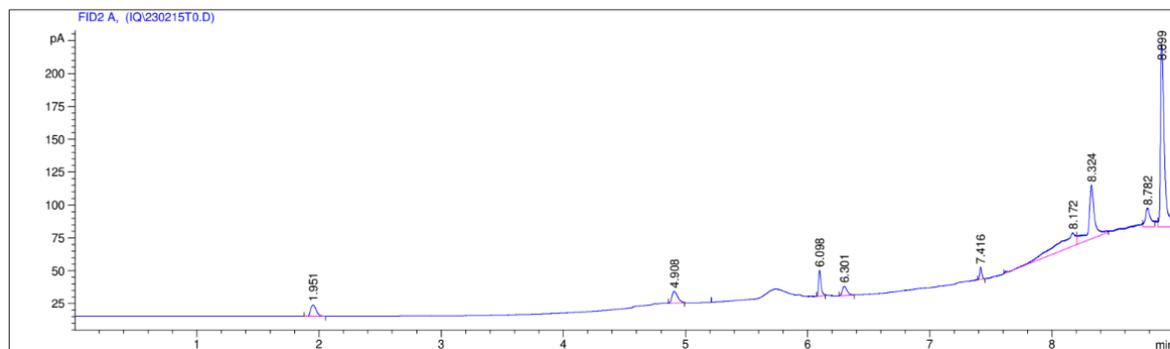
Signal 1: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	1.954	PB	0.0364	2178.71313	927.89081	82.30722
2	6.105	PB	0.0217	94.84877	66.41483	3.58319
3	6.957	PB	0.0704	326.19504	64.04804	12.32297
4	7.419	BB	0.0202	44.11360	33.96661	1.66652
5	7.630	PV	0.0220	3.17920	2.18304	0.12010

Totals : 2647.04974 1094.50333

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 57. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.



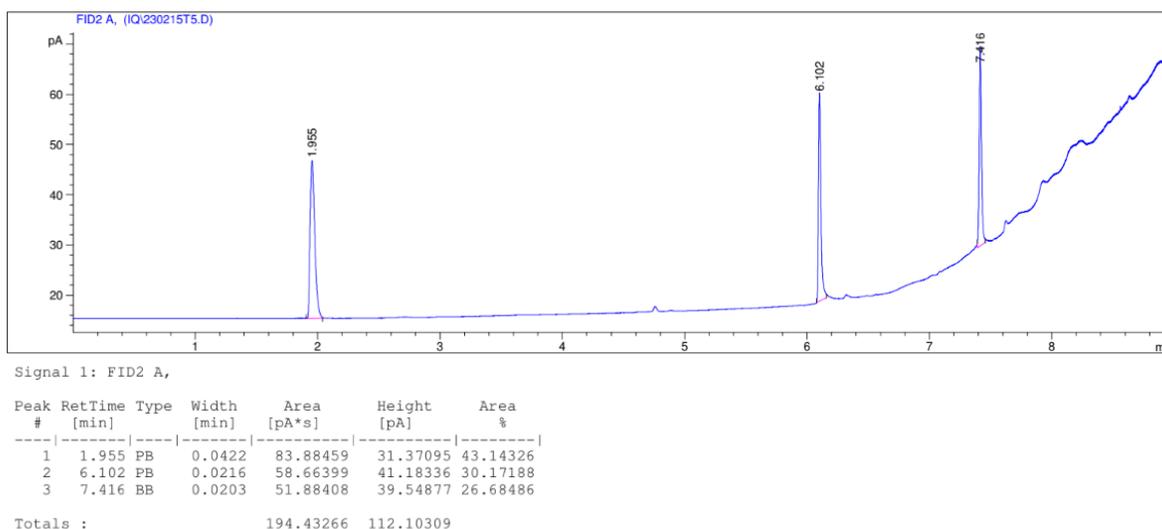
Signal 1: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	1.951	BB	0.0521	27.23928	8.56952	3.78217
2	4.908	BB	0.0504	29.64242	9.00485	4.11584
3	6.098	PB	0.0216	27.64796	19.44616	3.83891
4	6.301	PB	0.0415	18.68509	6.92847	2.59442
5	7.416	PB	0.0193	11.36276	9.24165	1.57772
6	8.172	PV	0.1477	121.33856	9.98988	16.84783
7	8.324	VB	0.0483	139.46754	40.40538	19.36504
8	8.782	BB	0.0437	42.87179	14.01019	5.95274
9	8.899	BBA	0.0324	301.94748	138.78714	41.92534

Totals : 720.20289 256.38324

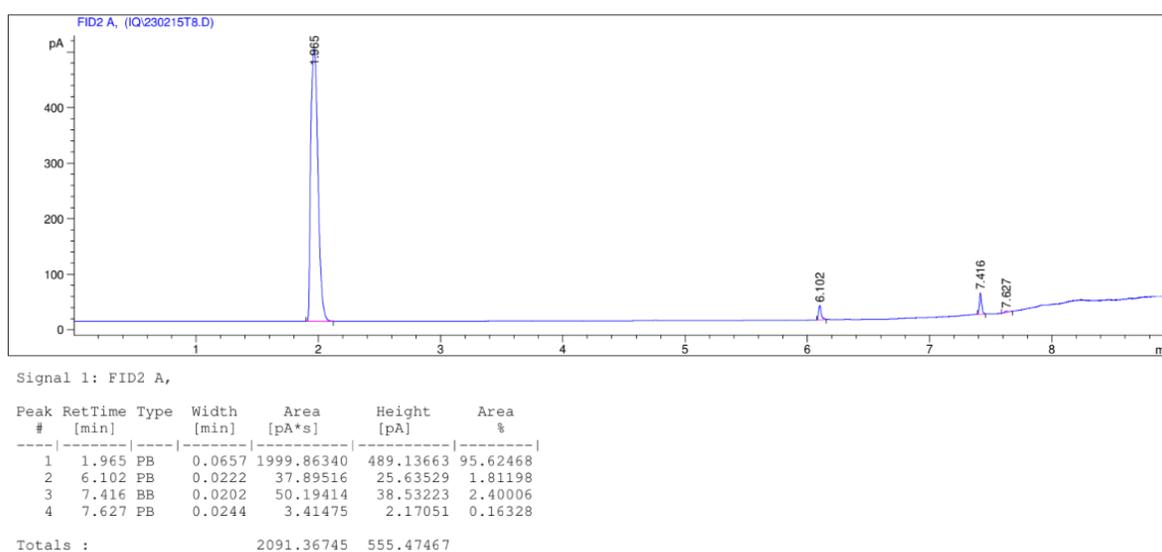
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 58. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 59. Áreas de los compuestos en el FID para la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

4. Módulo D. Calidad del gas.

Tabla 27. Datos de %LEL de ambos sustratos recabados a lo largo de la fermentación, para conocer la explosividad.

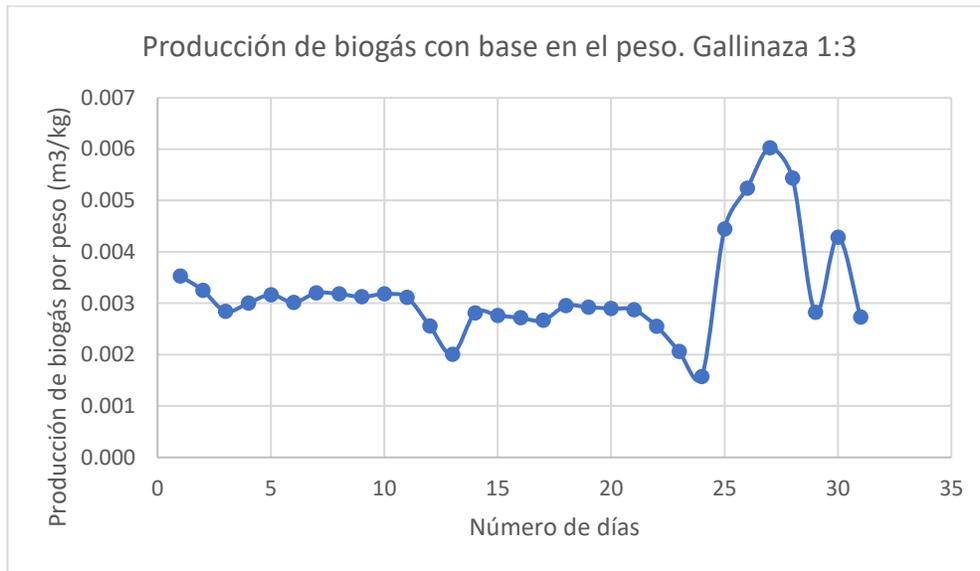
Lower Explo Limit	5%	%LEL					
Fecha de muestra	Número de días	Mezcla 13 G	Mezcla 23 G	Mezcla 33 G	Mezcla 13 R	Mezcla 23 R	Mezcla 33 R
19/01/2023	1	9%	9%	10%			
20/01/2023	2	7%	7%	12%			
21/01/2023	3	12%	25%	24%			
22/01/2023	4	18%	28%	37%			
23/01/2023	5	31%	35%	41%	1%		
24/01/2023	6	37%	44%	45%	1%	1%	
25/01/2023	7	52%	45%	51%	1%	2%	
26/01/2023	8	44%	44%	50%	2%	2%	3%
27/01/2023	9	45%	52%	45%	3%	3%	4%
28/01/2023	10	47%	50%	39%	5%	3%	4%
29/01/2023	11	46%	54%	37%	6%	4%	3%
30/01/2023	12	47%	56%	38%	8%	2%	1%
31/01/2023	13	39%	50%	32%	12%	3%	1%
1/02/2023	14	37%	49%	33%	14%	4%	1%
2/02/2023	15	37%	45%	38%	11%	6%	2%
3/02/2023	16	37%	44%	36%	13%	7%	4%
4/02/2023	17	34%	43%	31%	9%	7%	6%
5/02/2023	18	35%	46%	29%	7%	8%	7%
6/02/2023	19	31%	39%	35%	10%	10%	8%
7/02/2023	20	32%	38%	33%	9%	9%	9%
8/02/2023	21	33%	42%	30%	9%	7%	10%
9/02/2023	22	29%	34%	37%	8%	5%	6%
10/02/2023	23	23%	29%	35%	8%	4%	4%
11/02/2023	24	24%	21%	29%	6%	6%	5%
12/02/2023	25	27%	24%	24%	7%	8%	5%
13/02/2023	26	22%	25%	33%	8%	9%	4%
14/02/2023	27	19%	22%	31%	9%	4%	5%
15/02/2023	28	21%	23%	26%	6%	5%	6%
16/02/2023	29	23%	25%	35%	5%	6%	6%
17/02/2023	30	27%	26%	33%	6%	7%	4%
18/02/2023	31	24%	27%	34%	6%	8%	5%

Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Tabla 28. Datos de placa del sensor de metano.

Parámetro	Dato
Modelo	Portable gas Detector KP810
Rango (%LEL)	0 – 100
Condiciones de operación (°C)	20 – 50
Power (V)	3.7

Figura 60. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 1:3 de gallinaza.



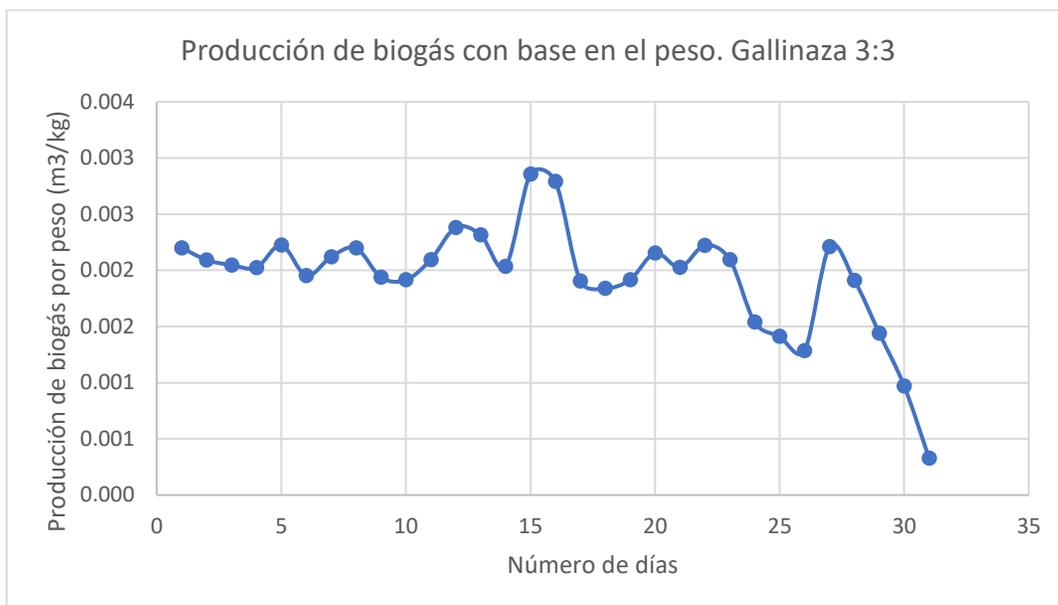
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 61. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 2:3 de gallinaza.



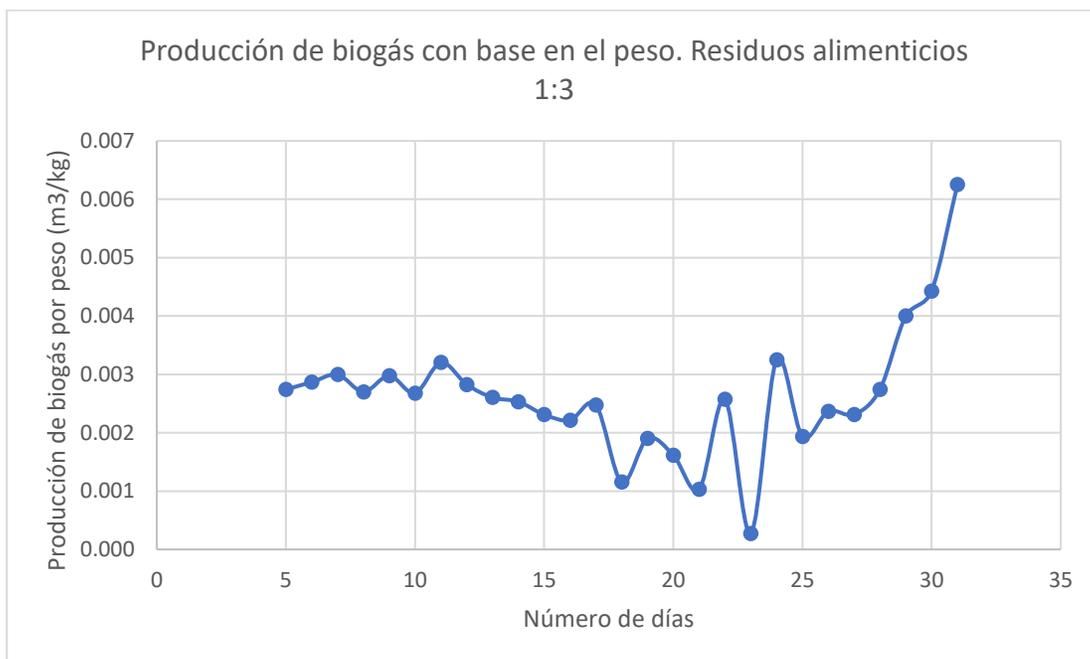
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 62. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 3:3 de gallinaza.



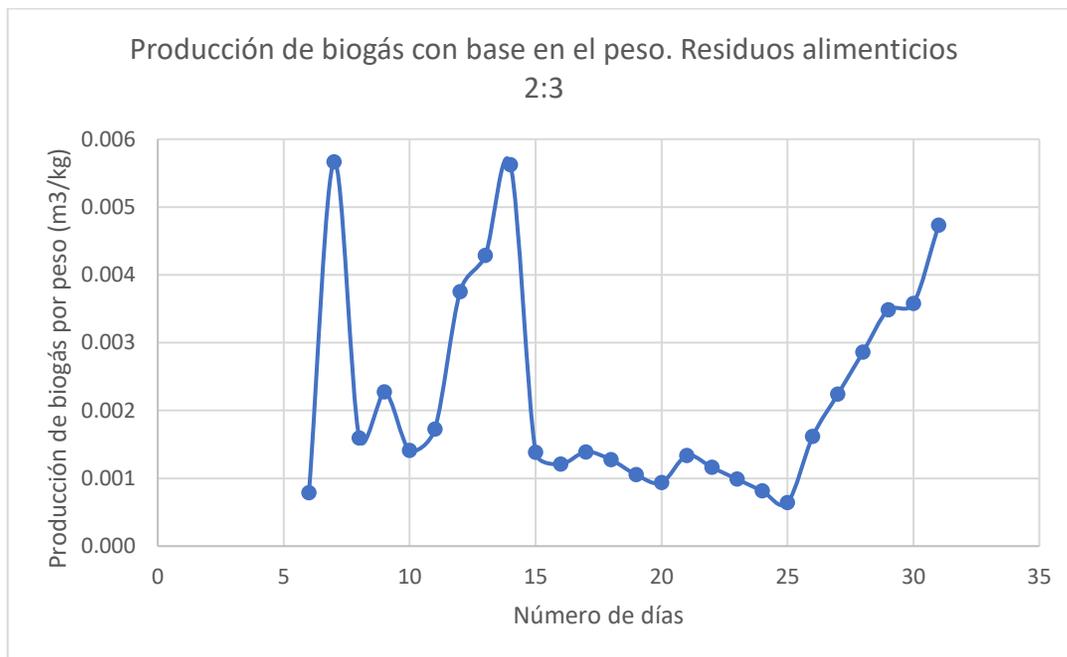
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 63. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 1:3 de residuos alimenticios.



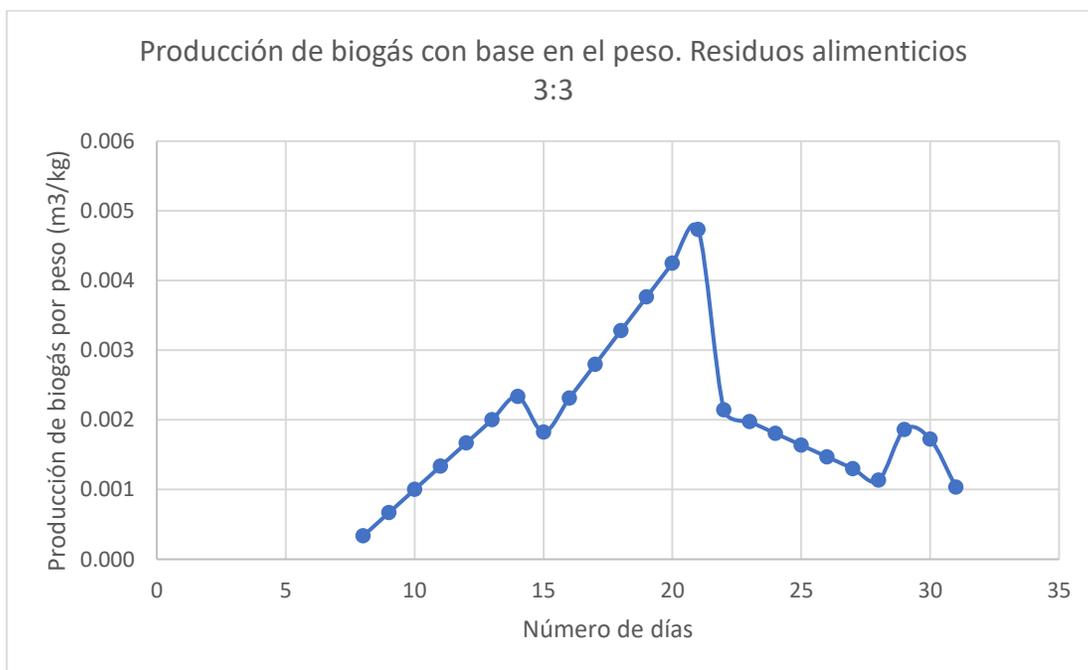
Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 64. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 2:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

Figura 65. Producción de biogás por kg de sustrato utilizado en la mezcla 3:3 de residuos alimenticios.



Condiciones de operación: Presión: 0.996 atm. Temperatura: 27°C

XIII. Glosario

1. **Biodigestor:** Sistema anaeróbico que utiliza microorganismos para descomponer materia orgánica y producir biogás.
2. **Biogás:** Mezcla de gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono.
3. **Gallinaza:** Excrementos de gallina y otros residuos orgánicos producidos en la industria avícola, utilizados como materia prima para biodigestores.
4. **Residuos alimenticios:** Restos de comida y otros desechos orgánicos generados en establecimientos como restaurantes, hoteles, comedores y hogares, que se pueden utilizar como materia prima para biodigestores.
5. **Digestión anaerobia:** Proceso biológico en el que el microorganismo descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir biogás.
6. **Metano:** Gas inodoro e inflamable que se produce en la digestión anaerobia y es un componente principal del biogás.
7. **Dióxido de carbono:** Gas incoloro e inodoro que se produce en la digestión anaerobia y es un componente principal del biogás.
8. **Relación C/N:** Proporción entre la cantidad de carbono y nitrógeno en los residuos alimenticios y otros sustratos utilizados en biodigestores, que afecta la eficiencia de la digestión anaerobia.
9. **pH:** Medida de acidez o alcalinidad de una solución, que influye en la actividad de los microorganismos y la producción de biogás en biodigestores.

10. **Fermentación:** Proceso biológico en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno para producir ácidos orgánicos y otros productos intermedios utilizados en la digestión anaerobia.
11. **Acetogénesis:** Etapa de la digestión anaerobia en la que bacterias anaerobias transforman ácidos orgánicos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.
12. **Metanogénesis:** Etapa en la digestión anaerobia en la que bacterias metanogénicas utilizan acetato, hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano y dióxido de carbono.
13. **Acidogénesis:** Segunda etapa de la metanogénesis en la que sucede el metabolismo de los productos obtenidos de la hidrólisis, a través de diferentes rutas metabólicas. Se obtienen ácidos orgánicos y alcoholes, además de amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono.
14. **Hidrólisis:** Primera etapa de la metanogénesis. Consta de la ruptura de las macromoléculas orgánicas presentes en la biomasa del biodigestor, hasta subunidades pequeñas que atraviesan la pared celular.
15. **Bioabono:** Abono orgánico producido como subproducto de la digestión anaerobia de residuos alimenticios y otros sustratos en biodigestores.
16. **Separación de sólidos y líquidos:** Proceso de separar la fracción líquida y sólida de los residuos digeridos en biodigestores para obtener bioabono líquido y sólido.
17. **Digestato:** Mezcla de residuos sólidos y líquidos digeridos en un biodigestor, que se puede utilizar como fertilizante orgánico.
18. **Reactor:** Dispositivo utilizado para alojar la digestión anaerobia de residuos orgánicos en biodigestores.

19. **Inoculante:** Preparaciones de microorganismos beneficiosos para la aplicación en suelos, con la finalidad de incrementar su número dando mayor disponibilidad de nutrientes.
20. **Impacto ambiental:** Cambio en el ambiente, como resultado de las actividades de un individuo u organización.
21. **Potencial de producción de biogás:** Es la relación entre la masa de sólidos totales y el volumen producido de biogás durante la fermentación.