UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS, RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

CARRERA DE AGROINDUSTRIAS

TEMA:

"GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES MATRICES BIOMÁSICAS COMO FUENTE DE ENERGÍA LIMPIA PARA USO DE LABORATORIO"

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Carrera de Agroindustrias.

AUTORES:

Carrera Capuz Cristhian Fernando

Sanga Gadvay Julissa Betsabeth

TUTOR:

Ing. Juan Gaibor Chávez, Phd

GUARANDA – ECUADOR

2025

TEMA

"GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES MATRICES BIOMÁSICAS COMO FUENTE DE ENERGÍA LIMPIA PARA USO DE LABORATORIO"

REVISADO Y APROBADO POR:

Ing. Juan Gaibor Chávez PhD.
TUTOR

Ing. Franz Verdezoto Mendoza MSc.
PAR LECTOR

Ing. Favián Bayas Morejón PhD.
PAR LECTOR

CERTIFICACIÓN DE AUTORIA

Yo Cristhian Fernando Carrera Capuz, con C.I. 0202100103 y Julissa Betsabeth Sanga Gadvay con C.I. 0250058526, declaro que el trabajo y los resultados presentados en este informe, no han sido previamente presentados para ningún grado o calificación profesional; y, que las referencias bibliográficas que se incluyen han sido consultadas y citadas con su respectivo autor(es).

La Universidad Estatal de Bolívar, puede hacer uso de los derechos de publicación correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, su Reglamentación y la Normativa Institucional vigente.

Ing. Juan Gaibor Chávez PhD.

CI. 0201051687

TUTOR

NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA

Carrera Capuz Cristhian Fernando

CI. 0202100103

AUTOR

Sanga Gadvay Julissa Betsabeth

CI. 0250058526

AUTOR

ESCRITURA Nº 20250201004P00758

DECLARACIÓN JURAMENTADA
OTORGAN:
JULISSA BETSABETH SANGA GADVAY Y
CRISTHIAN FERNANDO CARRERA CAPUZ
CUANTÍA: INDETERMINADA
Di 2 COPIAS

En el Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, República del Ecuador, hoy lunes a los dieciocho dias del mes de agosto del año dos mil veinticinco, ante mí **DOCTORA MSc. GINA LUCIA CLAVIJO CARRIÓN, NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA** comparecen con plena capacidad, libertad y conocimiento, a la celebración de la presente escritura los señores: **JULISSA BETSABETH SANGA GADVAY,** de estado civil soltera; y, **CRISTHIAN FERNANDO CARRERA CAPUZ,** de estado civil soltero, por sus propios y personales derechos en calidad de OTORGANTES. Los comparecientes declaran ser de nacionalidad ecuatorianos, mayores de edad, de estado civil como se deja expresado, de ocupación ambas estudiantes, domiciliada la primera en la parroquia La Matriz, Canton San Miguel y de paso por este Cantón Guaranda, Provincia, provincia Bolivar, con teléfono celular número cero nueve ocho seis cero ocho seis siete uno seis; y, con correo electrónico yulissasango25@gmail.com; y, el segundo en la parroquia Veintimilla, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, con teléfono celular número cero nueve nueve seis cuatro ocho uno tres uno nueve; y, con correo electrónico **carreracristhian778@gmail.com,** hábiles en derecho para contratar y contraer obligaciones, a quienes de conocerles doy fe, en virtud de haberme exhibido sus documentos de identificaciones, en base lo cual obtengo las certificaciónes biométricas del Registro Civil, ademas por petición expresa de los comparecientes adjunto sus documentos personales como son las cedulas y los certificados de votaciones, como habilitantes a esta escritura. Los comparecientes declaran conocer y aceptar la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales, así como también normativa secundaria y regulaciones relacionadas con la materia y manifiesta expresamente que durante el otorgamiento de la presente escritura pública se han cumplido a cabalidad con todas las disposiciones normativas de protección de datos personales. Los comparecientes autorizan el uso y tratamiento de sus datos personales, los cuales no serán recopilados, utilizados, divulgados, procesados o retenidos para ningún propósito que no sea la correcta prestación del servicio notarial conforme la legislación vigente y dentro de los parámetros establecidos en la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales, y demás normas y reglamentos de la materia. Para el otorgamiento de la presente escritura pública, se observaron todos y cada uno de los preceptos legales que el caso requiere; y, leída que les fue a los comparecientes íntegramente por mí la Notaria en alta y clara voz, aquellos se afirman y ratifican en el total de su contenido. Advertidos los comparecientes por mí la Notaria de los efectos y resultados de esta escritura, así como examinados que fueron en forma aislada y separada de que comparecen al otorgamiento de esta escritura sin coacción, amenazas, temor reverencial, ni promesa o seducción instruidos por mí de la obligación que tienen de decir la verdad con claridad y exactitud; y, advertidas sobre la gravedad del juramento y de las penas de perjurio, me solicitan que recepte su declaración juramentada: Nosotros: **JULISSA BETSABETH SANGA GADVAY,** de estado civil soltera; y, **CRISTHIAN FERNANDO CARRERA CAPUZ,** de estado civil soltero, declaramos que los criterios e ideas emitidos en el presente Proyecto de investigación de titulación es de nuestra absoluta autoría, titulado "**GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES MATRICES BIOMÁSICAS COMO FUENTE DE ENEREGÍA LIMPIA PARA USO DE LABORATORIO".** previo a la obtención del título de Ingenieros Agroindustriales, otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar, a través de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, carrera de Agroindustria.- Es todo cuanto podemos declarar en honor a la verdad.- Para su otorgamiento se observaron los preceptos de ley y leída que les fue a los comparecientes íntegramente por mí la Notaria, aquellos se afirman y ratifican en todas sus partes y firman junto conmigo en unidad de acto, incorporando al protocolo de esta Notaria la presente escritura de Declaración Juramentada, de todo cuanto doy Fe.----------

SRTA. JULISSA BETSABETH SANGA GADVAY.
0250058S2-6

Cristhian C.
SR. CRISTHIAN FERNANDO CARRERA CAPUZ.
C.C. 0202100120-3

DOCTORA MSc. GINA LUCIA CLAVIJO CARRION
NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA.

NOTARIA CUARTA DEL CANTÓN GUARANDA

Cristhian Carrera

_Tesis_Biogás_Carrera_Cristhian_Sanga_JulissaB (Recuperado automáticamente) (1).pdf

My Files

My Files

Universidad Estatal de Bolivar

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:484354495

Fecha de entrega
18 ago 2025, 12:14 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
18 ago 2025, 12:18 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
_Tesis_Biogás_Carrera_Cristhian_Sanga_JulissaB (Recuperado automáticamente) (1).pdf

Tamaño de archivo
2.7 MB

123 Páginas

23.523 Palabras

138.364 Caracteres



2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)
- Trabajos entregados
- Fuentes de Internet
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alerta de integridad para revisión

Texto oculto
142 caracteres sospechosos en N.° de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Dios y a toda mi familia, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante en cada paso de este camino. A mis padres, Ángel Carrera y Magali Capuz quienes me han brindado su amor, confianza y apoyo para seguir superándome ya que me han enseñado a valorar el esfuerzo que ellos hacen por verme realizado como todo un profesional, brindándome sus sabios consejos y buenos valores, siendo para mí un orgullo y un ejemplo a seguir.

A mis hermanas, Cinthya y Kathya por siempre estar pendientes de mí, acompañándome en este largo proceso.

Cristhian C

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este logro a Dios, por haber sido mi guía, mi refugio y mi fuerza a lo largo de este camino.

Dedico esta tesis a mis padres Lucrecia Gadvay & Miguel Sanga a quienes les debo absolutamente todo. Su apoyo ha sido el pilar más firme en cada etapa de este proceso, por estar desde el principio hasta el final, por su amor incondicional que me ha sostenido, por sus palabras llenas de fe que me animaron a seguir adelante, incluso cuando dudaba de mí. Sus sacrificios, su esfuerzo constante, sus desvelos y su paciencia han sido la base sobre la que he construido este sueño. Cada página de esta tesis lleva su huella, porque sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible. Ustedes son mi mayor ejemplo de perseverancia, de entrega y de amor verdadero.

A mis mejores amigos de la infancia Sherman R y Cristina C quienes han sido mi segunda familia a lo largo de esta etapa, por estar en los momentos más felices, pero sobre todo en los más difíciles. Por las risas que aliviaron el cansancio, por los silencios que me acompañaron sin exigir nada, por las palabras de ánimo cuando todo parecía cuesta arriba, por celebrar cada pequeño avance conmigo, por comprender cuando necesitaba espacio, y por nunca soltar mi mano. Esta meta también es de ustedes, porque su presencia hizo el camino más llevadero y lleno de memorias que atesoraré por siempre.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este capítulo tan importante de mi vida. Esta dedicatoria es una pequeña forma de expresar todo lo que han significado para mí.

Julissa S

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la realización de mi tesis. En primer lugar, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante durante todo este proceso académico. Su confianza y aliento fueron fundamentales para superar los retos que se presentaron. De igual forma, extiendo mi gratitud a mis amigos y compañeros, quienes brindaron su apoyo y comprensión en los momentos más exigentes.

Un reconocimiento muy especial a mi tutor de tesis, el Ing. Juan Gaibor Chávez, por su valiosa orientación, dedicación y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Sus consejos y su constante apoyo fueron decisivos para la culminación exitosa de este trabajo.

Cristhian C

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no es solo el resultado de esfuerzo y dedicación, sino también de todo el amor, apoyo y compañía que he recibido a lo largo de este camino.

En primer lugar, doy gracias a Dios por la fortaleza, sabiduría que él ha impartido en mi vida para la realización de este logro, por darme la vida y permitirme seguir a pesar de los obstáculos. A mis padres Lucrecia Gadvay & Miguel Sanga, los pilares de mi vida. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí: cada consejo, cada sacrificio, cada día y noche que pasaron esperando a que regresara de estudiar. Gracias por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la dedicación siempre valen la pena. Este logro también es suyo porque sin su amor incondicional no habría llegado hasta aquí.

De manera especial al Dr. Juan Gaibor Chávez, mi tutor de tesis, por su guía constante, paciencia y dedicación a lo largo de todo este proceso. Su compromiso con la excelencia académica, sus valiosas observaciones y su apoyo incondicional fueron fundamentales para la culminación de este trabajo. Ha sido un verdadero honor contar con su asesoría, y siempre recordaré con gratitud las enseñanzas y el ejemplo profesional que me brindó.

Julissa S

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I 20
1 INTRODUCCIÓN 20
1.1 PROBLEMA 21
1.1.1 Pregunta de investigación 21
1.2 JUSTIFICACIÓN 22
1.3 OBJETIVOS 23
1.3.1 Objetivo General 23
1.3.2 Objetivos Específicos 23
1.4 HIPÓTESIS 24
1.4.1 H0 = Hipótesis Nula 24
1.4.2 HA = Hipótesis Alterna 24
CAPÍTULO II 25
2 MARCO TEÓRICO 25
2.1 Biomasa residual 25
2.1.1 Residuos Agroindustriales como fuente de biocombustibles 25
2.1.2 Residuo de amaranto 26
2.1.3 Residuo de Quinua 26
2.1.4 Estiércol de Llama 27
2.1.5 Estiércol Vicuña 28
2.1.6 Estiércol Cerdo 28
2.2 Fermentación anaerobia 28
2.2.1 Etapas involucradas en la digestión anaerobia 29
2.2.2 Carga biológica microorganismos participantes de la fermentación anaerobia 30

2.2.3 Parámetros del proceso de digestión anaerobia 30
2.2.4 Condiciones operacionales 41
2.3 Biogás 42
2.3.1 Producción de biogás 43
2.3.2 Características del biogás 44
2.4 Cinética microbiana 45
2.4.1 Modelos cinéticos 46
CAPÍTULO III 50
3 MARCO METODOLÓGICO 50
3.1 Ubicación de la investigación 50
3.2 Localización de la investigación 50
3.3 Situación geográfica y climática de la fase experimental 51
3.4 Zona de vida 51
3.5 Materiales y equipos 51
3.5.1 Material Experimental 51
3.5.2 Materiales de campo 51
3.5.3 Materiales de Planta 52
3.5.4 Materiales de oficina 52
3.5.5 Equipos 52
3.6 Métodos y técnicas 53
3.6.1 Factores en estudio 53
3.6.2 Tratamientos 53
3.6.3 Características del experimento 54
3.6.4 Tipo de diseño experimental 54

3.6.5 Modelo de análisis de varianza (ANOVA) 55
3.6.6 Prueba de rangos múltiples 55
3.7 PROCEDIMIENTO 56
3.7.1 Sustratos e inóculo 56
3.7.2 Análisis proximal y elemental 59
3.7.3 Configuración general del reactor anaerobio 59
3.7.4 Montaje del Digestor anaerobio 59
3.7.5 Cálculo de materia orgánica destinada para el digestor 60
3.7.6 Métodos de evaluación y datos a tomarse 60
CAPÍTULO IV 67
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 67
4.1 Caracterización de la materia prima 67
4.1.1 Análisis proximal 67
4.1.2 Análisis estructural 68
4.1.3 Análisis Elemental 69
4.1.4 Análisis termogravimétrico 70
4.2 Resultados en el análisis de Biogás en las variables Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxígeno (O_2), Ácido Sulfhídrico (H_2S) y Carbono/Nitrógeno (C/N) 78
4.2.1 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Metano (CH_4) ... 80
4.2.2 Análisis de Varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Dióxido de Carbono (CO_2) 84
4.2.3 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Oxigeno (O_2) 87
4.2.4 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta ácido sulfhídrico (H_2S) 91

4.2.5 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta C/N 95
4.3 Análisis de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) 99
4.4 Producción de biogás y metano 99
4.4.1 Rendimiento de biogás acumulado para RE:SU 100
4.4.2 Rendimiento de metano diario para la razón I:S y RE:SU 102
4.5 Efecto del pH sobre el rendimiento de metano acumulado 102
4.6 Efecto de la relación C/N en la producción de metano. 103
CAPÍTULO V 105
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 105
5.1 Conclusiones 105
5.2 Recomendaciones 106
BIBLIOGRAFÍA 107
ANEXOS 114

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Efecto de la temperatura en la remoción de la DQO 32
2. Efecto de la temperatura en la producción de biogás..... 33
3. Efecto del pH en la producción de biogás..... 34
4. Efecto de TCO en la formación de AGV 35
5.Distribución de celulosa, hemicelulosa y lignina en la pared celular de los sustratos lignocelulósicos..... 39
6. Fases de crecimiento de la cinética microbiana 46
7. Ubicación de la investigación 50
8. Sensor de presión Delta TP 704 1 bar..... 62
9. Liberación diaria de biogás 62
10. Lectura de la composición de biogás diaria 63
11. Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados volátiles rampa temperatura 10°C 74
12. Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados volátiles rampa temperatura 200°C 76
13. Valores obtenidos en la cantidad de CH4, CO2, O2, H2S y C/N 78
14. Análisis de varianza de la variable Metano (CH4) 80
15. Gráfico de medias 81
16. Gráfico de Interacción..... 82
17. Gráfico de medias 85
18. Gráfico de Interacción para Tipo de Sustrato 86
19. Gráfico de medias 88
20.Gráfico de Interacción para tipo de residuo 89
21. Gráfico de medias 92
22. Interacción..... 93
23. Gráfico de medias 96
24. Interacción..... 97
25. Biogás acumulado para razones diferentes de RE:SU 101

CONTENIDO DE TABLAS

1. Datos de la localización de la investigación 50
2. Datos de la situación geográfica y climática 51
3. Factores de estudio y sus respectivos niveles 53
4. Tratamientos 53
5. Características del diseño factorial AxB 54
6. Análisis de varianza (ANOVA) para el diseño factorial AxB 55
7. Métodos para la caracterización de las materias primas 59
8. Relación inoculo sustrato 60
9. Análisis proximal 67
10. Análisis estructural 68
11. Análisis elemental 69
12. Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados análisis cenizas rampa temperatura 10°C 70
13. Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados análisis cenizas rampa temperatura 200°C 72
14. Prueba de rangos múltiples para el factor tipo residuos 83
15. Pruebas de Múltiple Rangos para Metano (CH4) por Tipo sustrato 83
16. Análisis de varianza de la variable CO2 84
17. Prueba de múltiples rangos para el factor tipo de residuos 86
18. Pruebas de múltiples rangos para CO2 por tipo de sustrato 87
19. Análisis de varianza de la variable O2 87
20. Prueba de rangos múltiples para el factor tipo residuo 90
21. Pruebas de Múltiple Rangos para O2 por Tipo de Sustrato 91
22. Análisis de varianza de la variable H2S 91
23. Prueba de rangos múltiples para el factor tipo de residuos 94
24. Pruebas de Múltiple Rangos para H2S por Tipo de Sustrato 94
25. Análisis de varianza de la variable C/N 95
26. Prueba de rangos múltiples para el factor tipo de residuos 97

27. Pruebas de múltiples rangos para C/N por tipo de sustrato 98
28. Producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) del mejor tratamiento (T3; Amaranto-Cerdo) 99
29. Biogás acumulado promedio con relación de I:S..... 100
30. Variación del pH durante la digestión anaerobia 102
31. Variación de la relación C/N ocurrida durante la codigestión de RE y SU 104

ÍNDICE DE ANEXOS

1. Mapa del laboratorio general de la UEB 114
2. Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Cerdo 115
3. Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Llama.... 116
4. Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Vicuña .. 117
5. Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa del Residuo de Amaranto 118
6. Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa del Residuo de Quinua 119
7. Resultados de análisis de Sólidos totales – Sólidos volátiles del Inóculo..... 120
8. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 1 121
9. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 2 122
10. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 3 123
11. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 4 124
12. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 5 125
13. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 6 126

14. Evidencia fotográfica de la fase de campo..... 127
15. Evidencia fotográfica de la fase de campo..... 128
16. Evidencia fotográfica de la fase de laboratorio..... 129
17. Evidencia fotográfica de la fase de campo..... 130

Resumen

El objetivo de la investigación fue generar biogás como fuente de energía limpia, empleando diferentes matrices biomásicas no convencionales, específicamente residuos de amaranto (*Amaranthus spp.*) y quinua (*Chenopodium quinoa*), combinados con estiércol de vicuña (*Vicugna vicugna*), llama (*Lama glama*) y cerdo (*Sus scrofa domesticus*) como sustratos. La materia prima fue recogida de la parte norte del Cantón Guaranda - Ecuador. Se evaluó la caracterización físico-química de las materias primas mediante análisis proximal, estructural, elemental y termogravimétrico, así como parámetros de la digestión anaerobia (C/N, ácidos grasos volátiles y CH_4). Se aplicó un diseño experimental en arreglo factorial AxB (2x3), con 2 repeticiones. Para determinar la diferencia entre tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), y para identificar el mejor tratamiento se utilizó la prueba de Diferencia mínima significativa (LSD). Se estudiaron cinco variables de respuesta: % de CH_4, CO_2, O_2, H_2S y relación C/N. El análisis de varianza aplicado a la variable respuesta producción de metano (CH_4) reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) para ambos factores principales y su interacción. Para a la variable respuesta dióxido de carbono (CO_2) reveló diferencias estadísticamente significativas ($p< 0.001$) para ambos factores principales y su interacción. Para la variable respuesta sulfuro de hidrógeno (H_2S) mostró resultados contrastantes entre los factores evaluados, para la variable relación carbono nitrógeno (C/N) no mostró efectos estadísticamente significativos para ninguno de los factores evaluados: factor A (tipo de residuo), el factor B (tipo de sustrato) o su interacción AB. El estudio demostró que es factible generar biogás a partir de diferentes matrices biomásicas, confirmando su viabilidad como fuente de energía limpia para uso en laboratorios.

Palabras clave: Biogás, codigestión, amaranto, quinua, estiércol, metano, energía renovable, digestión anaerobia.

Abstract

The objective of the research was to generate biogas as a source of clean energy, using different unconventional biomass matrices, specifically amaranth (Amaranthus spp.) and quinoa (Chenopodium quinoa) residues, combined with vicuña (Vicugna vicugna), llama (Lama glama), and pig (Sus scrofa domesticus) manure as substrates. The raw material was collected from the northern part of the Guaranda Canton in Ecuador. The physical and chemical characteristics of the raw materials were evaluated using proximate, structural, elemental, and thermogravimetric analyses, as well as anaerobic digestion parameters (C/N, volatile fatty acids, and CH_4). An experimental design was applied in an AxB (2x3) factorial arrangement, with two replicates. To determine the difference between treatments, an analysis of variance (ANOVA) was applied, and to identify the best treatment, the least significant difference (LSD) test was used. Five response variables were studied: % CH_4, CO_2, O_2, H_2S, and C/N ratio. The analysis of variance applied to the methane (CH_4) production response variable revealed statistically significant differences ($p < 0.001$) for both main factors and their interaction. For the carbon dioxide (CO_2) response variable, it revealed statistically significant differences ($p < 0.001$) for both main factors and their interaction. For the hydrogen sulfide (H_2S) response variable, it showed contrasting results between the factors evaluated, while for the carbon-nitrogen ratio (C/N) variable, it showed no statistically significant effects for any of the factors evaluated: factor A (type of waste), factor B (type of substrate), or their interaction AB. The study demonstrated that it is feasible to generate biogas from different biomass matrices, confirming its viability as a clean energy source for use in laboratories.

Keywords: Biogas, co-digestion, amaranth, quinoa, manure, methane, renewable energy, anaerobic digestion.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es un proceso natural que transforma materiales biodegradables en biogás, un combustible renovable, en ausencia de oxígeno. Este proceso, ampliamente utilizado en países como China, India y algunos países africanos, se presenta como una alternativa ecológica y económicamente viable para el desarrollo de países en desarrollo. En Europa y Estados Unidos, la tecnología para el tratamiento de aguas residuales y la producción de biogás ha experimentado avances significativos, permitiendo procesar una variedad de residuos, como estiércol, biomasa agrícola y residuos de la industria láctea y municipal.

En Ecuador, el potencial de la digestión anaerobia para la generación de energía renovable es considerable. El país cuenta con abundantes recursos de materiales biodegradables, como excretas de ganado y desechos vegetales, que pueden ser tratados para obtener productos con valor agregado. Estudios realizados en Ecuador han demostrado la viabilidad de la producción de biogás a partir de cáscaras de cacao, estiércol de vaca, residuos de col y estiércol de ganado.

Sin embargo, para optimizar la producción de biogás y metano, es necesario equilibrar la proporción de nitrógeno y carbono en la materia prima. El estiércol animal, rico en nitrógeno, pero pobre en carbono, puede ser enriquecido con materiales lignocelulósicos, que proporcionan una fuente de carbono. Estudios como el de Aguilar et al. (2017) han demostrado la efectividad de la codigestión de residuos alimentarios y lodos primarios para la producción de biogás y su conversión en energía y calor.

1.1 PROBLEMA

La producción de biogás es una práctica extendida a nivel mundial en ecuador se lo utiliza principalmente para la generación de electricidad y como biocombustible para la producción de llama en cocinas a nivel rural realiza para la generación de energía limpia y su utilización.

El uso de estos residuos se restringe a aplicaciones parciales o se realiza sin criterios técnicos adecuados, lo que reduce su eficiencia y beneficios potenciales. Aunque en los últimos años se ha observado un creciente interés científico por caracterizar y optimizar la producción y uso de biocombustibles a partir de biomasa en el Ecuador, la mayoría de las investigaciones se centran en fuentes convencionales, dejando en segundo plano otras alternativas prometedoras. En la actualidad, existe una brecha notable en la evidencia científica respecto al aprovechamiento de materias primas consideradas no convencionales, como ciertos subproductos agrícolas o residuos pecuarios poco estudiados. En particular, no se ha documentado suficientemente el uso de estiércoles provenientes de especies animales propias de la zona andina —como llamas, alpacas u ovinos—, cuyas características físico-químicas podrían ofrecer ventajas únicas en procesos de conversión energética. Esta carencia de información limita el desarrollo de estrategias integrales para el aprovechamiento sostenible de la biomasa disponible y dificulta la formulación de políticas públicas orientadas a fortalecer la bioeconomía rural.

1.1.1 Pregunta de investigación

¿Como generar biogás a partir de materias primas no convencionales, para su utilización como fuente de energía limpia?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La producción de biogás a partir de diversas fuentes de biomasa se presenta como una solución innovadora a la crisis energética y los problemas ambientales actuales. Dada la dependencia de combustibles fósiles y el exceso de residuos orgánicos, la biomasa como energía renovable ofrece numerosas ventajas.

La producción de biogás a partir de biomasa no solo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el metano, que es liberado cuando la biomasa se descompone de manera natural en presencia de oxígeno, sino que también permite una diversificación de la matriz energética. Al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, se mejora la seguridad energética y se reduce la exposición a las fluctuaciones en los precios del petróleo. Esto convierte al biogás en una alternativa eficaz tanto para combatir el cambio climático como para fortalecer la estabilidad energética.

La producción de biogás puede convertirse en una fuente de ingresos adicionales para agricultores y comunidades rurales, especialmente en áreas donde los recursos económicos son limitados. Al transformar residuos orgánicos en energía, se promueve una economía circular y se reduce la dependencia de insumos externos, por último, este brinda una ayuda que reduce la emisión de partículas y compuestos orgánicos volátiles, mejorando la calidad del aire, especialmente en áreas rurales donde la leña y otros combustibles sólidos son comúnmente utilizados para cocina.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Generar biogás a partir de diferentes matrices biomásicas como fuente de energía limpia para uso de laboratorio

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar análisis proximal, elemental, estructural y termogravimétrico de los residuos biomásicos a utilizar en este estudio
- Determinar las mejores combinaciones del tipo de residuo y sustrato mediante los análisis físicos-químicos de C/N, AGV y CH_4
- Utilizar el producto obtenido (Biogás) como biocombustible en la generación de energía calórica para ser utilizado en laboratorios

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 H0 = Hipótesis Nula

La utilización de materias primas no convencionales no constituye en una fuente de energía limpia

1.4.2 HA = Hipótesis Alterna

La utilización de materias primas no convencionales constituye en una fuente de energía limpia.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Biomasa residual

Son los subproductos que se generan durante la producción, procesamiento y transformación de productos agrícolas, estos pueden incluir desde tallos y hojas de cultivos hasta cáscaras de frutas, bagazo de caña de azúcar, amaranto y quinua entre otros más (Vargas, 2021).

a) ¿Por qué son importantes?

Sostenibilidad: Reducen la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Economía circular: Promueven la reutilización de recursos, disminuyendo el desperdicio y generando ingresos adicionales.

Disponibilidad: Son una fuente abundante y renovable de materia prima.

2.1.1 Residuos Agroindustriales como fuente de biocombustibles

La producción de biocombustibles a partir de residuos agroindustriales representa una oportunidad para diversificar la matriz energética, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover una economía más sostenible, sin embargo, es necesario continuar investigando y desarrollando tecnologías más eficientes y económicas para superar los desafíos actuales y lograr una mayor implementación a escala industrial (Saval, 2022). La creciente demanda de energía y la preocupación por el cambio climático han impulsado la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y renovables, en este contexto, los residuos agroindustriales se presentan como una fuente prometedora para la producción de biocombustibles a través de procesos de fermentación (Gomez S. , 2021).

2.1.2 Residuo de amaranto

El residuo de amaranto se refiere a los subproductos que quedan después de procesar el grano de amaranto para obtener su semilla, harina u otros productos comestibles, estos residuos pueden incluir:

- **Tallo:** La parte aérea de la planta de amaranto que sostiene las inflorescencias y las semillas.
- **Hojas:** Las hojas de la planta, ricas en nutrientes, pero a menudo descartadas.
- **Raíces:** La parte subterránea de la planta, que puede contener compuestos bioactivos.
- **Cascarilla:** La capa externa de la semilla, a menudo rica en fibra.

El residuo de amaranto representa una oportunidad para desarrollar productos de alto valor agregado y promover una economía circular en la producción de alimentos, al aprovechar los nutrientes y compuestos bioactivos presentes en estos residuos, podemos contribuir a una agricultura más sostenible y a la mitigación del cambio climático (Nardo, 2020).

2.1.3 Residuo de Quinua

Los residuos de quinua son los subproductos que se generan durante el procesamiento de los granos de quinua para su consumo humano, tradicionalmente, estos residuos se consideraban como desechos y se desechaban, sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que poseen un alto valor nutricional y pueden ser utilizados para diversas aplicaciones.

- **Alimentación animal:** Los residuos de quinua pueden ser incorporados en la alimentación de animales como cuyes, aves de corral y ganado, aportando nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo.
- **Producción de biocombustibles:** La celulosa y hemicelulosa presentes en los residuos de quinua pueden ser convertidas en bioetanol, una alternativa sostenible a los combustibles fósiles.

- **Producción de biofertilizantes:** Los residuos de quinua pueden ser compostados o utilizados para producir biofertilizantes, enriqueciendo el suelo y mejorando la productividad de los cultivos.
- **Obtención de compuestos bioactivos:** Los residuos de quinua contienen compuestos bioactivos como saponinas, flavonoides y antioxidantes, que pueden ser utilizados en la industria farmacéutica y cosmética (Carrillo, 2021).

La valorización de los residuos de quinua promueve la economía circular al reducir el desperdicio de alimentos, generar energía renovable y crear nuevos productos de alto valor agregado, además, contribuye a la sostenibilidad ambiental al disminuir la presión sobre los recursos naturales y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Fernandez, 2021).

2.1.4 Estiércol de Llama

El estiércol de llama es un recurso orgánico de gran valor en las regiones andinas, donde estos camélidos sudamericanos son criados en grandes cantidades que, a pesar de ser considerado un desecho por muchos, este material posee propiedades que lo convierten en un excelente fertilizante natural y una fuente de energía renovable, el estiércol de llama es un recurso valioso que puede contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y a la generación de energía limpia debido a que el aprovechamiento integral puede generar múltiples beneficios ambientales, sociales y económicos para las comunidades rurales.

- **Disponibilidad estacional**: La producción de estiércol de llama varía según la época del año y las condiciones climáticas.
- **Manejo adecuado**: Es importante manejar el estiércol de llama de manera adecuada para evitar la contaminación del agua y del suelo.
- **Escalamiento**: Para aprovechar al máximo el potencial del estiércol de llama, es necesario desarrollar tecnologías y sistemas de gestión adecuados a gran escala (Monteros, 2021).

2.1.5 Estiércol Vicuña

El estiércol de vicuña, al igual que el de llama, es un recurso orgánico de gran valor en los ecosistemas andinos, esta especie de camélido sudamericano, adaptada a las duras condiciones de altura, produce un estiércol con características particulares que lo hacen especialmente valioso para la agricultura y la producción de energía y que a pesar de los desafíos, el estiércol de vicuña representa una oportunidad para desarrollar prácticas agrícolas más sostenibles y aprovechar los recursos naturales de manera eficiente, donde su uso podría contribuir a mejorar la calidad de los suelos, reducir la dependencia de fertilizantes químicos y promover la conservación de los ecosistemas andinos (Santillán, 2022).

2.1.6 Estiércol Cerdo

El estiércol de cerdo es un subproducto de la producción porcina que, lejos de ser un desecho, representa un valioso recurso para la agricultura. Su alto contenido de nutrientes lo convierte en un excelente fertilizante natural, capaz de mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos.

- **Contenido de patógenos**: El estiércol de cerdo puede contener patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud humana y animal. Por esta razón, es importante compostarlo adecuadamente antes de aplicarlo al suelo.
- **Salinidad**: Un exceso de estiércol de cerdo puede aumentar la salinidad del suelo, lo que puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas.
- **Olor**: El estiércol de cerdo tiene un fuerte olor, por lo que su manejo debe realizarse de manera adecuada para evitar molestias a las personas y al medio ambiente (Tadeo, 2021).

2.2 Fermentación anaerobia

La fermentación anaerobia es un proceso biológico en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, estos microorganismos, principalmente bacterias, utilizan los compuestos orgánicos como fuente de energía y

producen diversos subproductos, como gases (principalmente metano y dióxido de carbono) y ácidos orgánicos.

La fermentación anaerobia es un proceso biológico versátil con un gran potencial para abordar los desafíos ambientales y energéticos actuales. Su aplicación en diversos sectores, como la agricultura, la energía y el tratamiento de residuos, contribuye a la construcción de un futuro más sostenible (Gutierrez, 2020).

2.2.1 Etapas involucradas en la digestión anaerobia

Por lo general, la hidrolisis y la acidogénesis son breves, y durante este tiempo, el pH del digestor debe mantenerse en un nivel específico (tal como 6.5) y luego debe recuperarse a niveles favorables para las bacterias metalogénicas (6.6-7.8). (Kong et al., 2018). Las etapas involucran son:

Hidrólisis. Los polisacáridos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos se dividen en monosacáridos, ácidos grasos, aminoácidos, purinas y pirimidinas durante la etapa de hidrolisis.

Acidogénesis: Los ácidos grasos volátiles (AGV, como ácido acético, propiónico, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico) e hidrogeno, CO2, metanol y metilaminas se forman durante esta etapa.(Kong et al., 2018).

Acetogénesis. Un consorcio microbiano sintrófico convierte los ácidos grasos volátiles (sin incluir el ácido acético) en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono (Schwede et al., 2017).

Metanogénesis finalmente, dos tipos de organismos producen metano: acetoclasticos metalogénicos e hidrógeno-metanógenos. Los acetoclasticos metalogénicos convierten el acetato en metano y CO2, mientras que los hidrógeno-metanógenos convierten el CO2 e hidrogeno en metano. (Boe, 2006).

2.2.2 Carga biológica microorganismos participantes de la fermentación anaerobia

La fermentación anaerobia es un proceso complejo que involucra a una comunidad diversa de microorganismos, cada uno con un papel específico en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, estos microorganismos trabajan en sinergia, transformando los sustratos complejos en productos más simples y liberando energía en forma de biogás.

Los microorganismos que participan en la fermentación anaerobia se pueden clasificar en los siguientes grupos funcionales:

- **Bacterias hidrolíticas:** Estas bacterias son las primeras en actuar, descomponiendo las moléculas orgánicas complejas (proteínas, carbohidratos, lípidos) en moléculas más simples como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Ejemplos: *Clostridium*, *Bacteroides*.
- **Bacterias acidogénicas:** Convierten las moléculas simples producidas por las bacterias hidrolíticas en ácidos orgánicos de cadena corta, como el ácido acético, butírico, propiónico y láctico. Ejemplos: *Clostridium*, *Streptococcus*.
- **Bacterias acetogénicas:** Transforman los ácidos orgánicos de cadena corta en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Ejemplos: *Acetobacterium*, *Clostridium*.
- **Arqueas metalogénicas:** Utilizan el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano, el principal componente del biogás. Ejemplos: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*.

2.2.3 Parámetros del proceso de digestión anaerobia

2.2.3.1 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más influyentes que afectan el rendimiento y la estabilidad de la digestión anaeróbica (Neshat et al., 2017). La digestión anaerobia es aplicada bajo tres diferentes rangos de temperatura (Sciencebio, 2016):

Condiciones psicrofílica (<15°C).

Condición mesofílica (15–45°C).

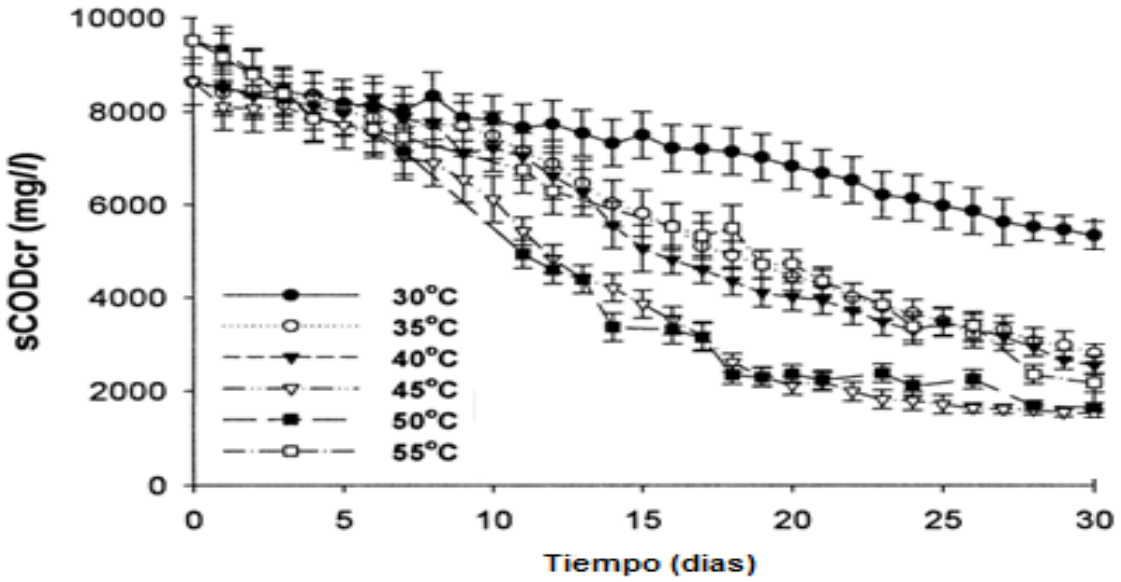
Condición termófila (45–65°C).

2.2.3.2 Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia.

La actividad metabólica de los organismos puede verse afectada por la temperatura (Figura 1). La eficiencia de la remoción de la demanda química de oxígeno aumenta al realizar la digestión anaerobia de desechos alimentarios en condiciones termofílicas. Sin embargo, la temperatura aumentada reduce la eficiencia de remoción. (Kim et al., 2019). Las bacterias hidrolíticas, que son responsables de la degradación de materiales complejos, pueden verse afectadas por cambios de temperatura. Además, las bacterias acidógenas están activas en un rango de temperatura específico porque no pueden tolerar los cambios de temperatura. Debido a la acumulación de AGV, la disminución de la temperatura óptima puede causar acidificación. Las bacterias metanogénicas tampoco pueden tolerar cambios de temperatura mayores a 1 °C por día. (Inc Metcalf, 2023).

Figura 1

Efecto de la temperatura en la remoción de la DQO



Fuente: Tomado de Kim et al, (2019)

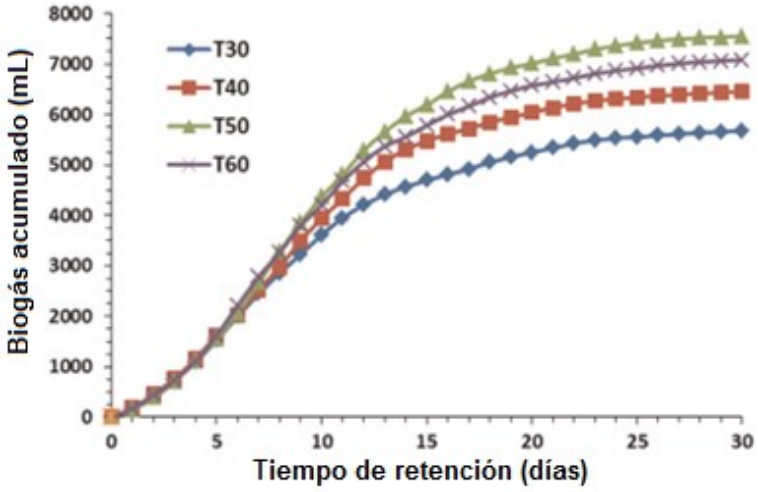
Trabajar en condiciones termófilas (más de 45 °C) puede mejorar el desempeño de la digestión anaeróbica debido a una mayor solubilidad de los compuestos orgánicos y velocidades de reacción bioquímicas, una menor solubilidad del gas en el líquido, una mayor desactivación de patógeno y una menor emisión de olores. Sin embargo, desde el punto de vista microbiano y en general, el proceso mesofílico con frecuencia involucra una mayor diversidad de microorganismos y es más estable que el proceso termofílico, que tiene menos microorganismos activos y disponibles (Appels et al., 2018).

Las temperaturas más altas no aumentan los rendimientos de metano. En realidad, las temperaturas más altas aumentan la producción de biogás (Figura 2), pero no aumentan los rendimientos de metano. Considerando que el metano y el CO_2 son los principales componentes del biogás, una mayor producción de biogás con un contenido de metano más bajo resulta en una mayor cantidad de CO_2. (Neshat et al., 2017). Trabajar en

condiciones mesofílicas requiere menos energía y puede mejorar la estabilidad del proceso y la inactivación de patógenos como ya se ha mencionado.

Figura 2

Efecto de la temperatura en la producción de biogás



Fuente: Tomado de Deepanraj et al, (2015)

2.2.3.3 pH

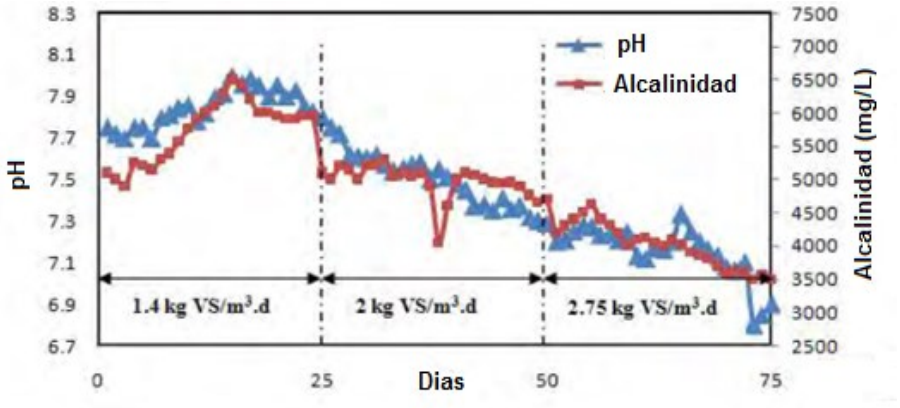
El pH es un parámetro muy sensible y crucial que afecta directamente el funcionamiento de los sistemas de digestión anaeróbica. La dependencia del pH de la digestión anaeróbica está relacionada con las reacciones enzimáticas de los microorganismos. (Neshat et al., 2017). En la digestión anaerobia, el rango de pH más favorable para obtener un máximo rendimiento de metano es de alrededor de 6.8-7.2 (Hagos et al., 2017). El crecimiento de las bacterias metanogénicas se reduce altamente a valores de pH por debajo de 6.8, pues estas bacterias son muy sensibles a la variación y prefieren un pH de alrededor de 7 (Hagos et al., 2017).

Los valores de pH disminuyen cuando la TCO aumenta (Figura 3) por debajo de los rangos metanogénicos, lo que resulta en un bajo rendimiento de biogás y metano (Babaee y Shayegan 2011). Los microorganismos acidogénicos son menos sensibles al

pH y toleran un rango de pH de 4.0-8.5. Sin embargo, el pH óptimo para la hidrolisis y acidogénesis está entre 5.5 y 6.5, (Kwietniewska y Tys, 2014).

Figura 3

Efecto del pH en la producción de biogás



Fuente: Tomado de Babaee y Shayegan (2011)

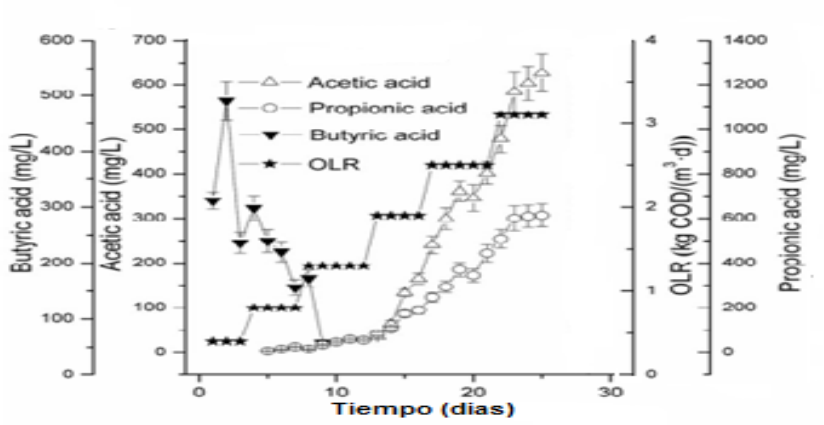
2.2.3.4 Tasa de carga orgánica

La tasa de carga orgánica (TCO) es una medida de la cantidad de sólidos orgánicos secos cargados por volumen del sistema durante un período de tiempo. TCO es crucial para la actividad y la viabilidad de los microorganismos. (Neshat et al., 2017).

El aumento de TCO afecta directamente la formación de AGV (Figura 4); la acumulación de AGV en el medio acabará eventualmente con la inactivación de todas las bacterias debido al bajo pH.

Figura 4

Efecto de TCO en la formación de AGV



Fuente: Tomado de Shen et al, (2018)

La TCO afecta negativamente la producción de biogás. Debido a la inestabilidad del sistema causada por la reducción del pH y la sobrecarga del sistema, al aumentar la TCO, el rendimiento de biogás y metano disminuye. (Babaee y Shayegan 2011). Es recomendable añadir una cantidad total de SV de 20 a 60g SV/L (Holliger et al., 2016).

2.2.3.5 Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo requerido para degradar completamente la materia orgánica, y está relacionada con la tasa de crecimiento microbiano (Kwietniewska y Tys, 2014). Dado que cualquier microorganismo necesita un tiempo específico para consumir su sustrato y sintetizar el producto, el TRH adecuado debe determinarse cuidadosamente en cualquier bioproceso. (Neshat et al., 2017).

Uno de los principales factores que afectan el rendimiento del metano es el tiempo de digestión, que depende del tipo de sustrato y la carga orgánica.(Kwietniewska y Tys., 2016). El aumento del TCO provoca una disminución del TRH como resultado de la acumulación de AGV. Por otro lado, al disminuir el TCO, el TRH se prolonga. La producción de biogás aumenta cuando el TRH es corto, mientras que el rendimiento de

metano disminuye. Esto indica que los sólidos volátiles no se han consumido completamente (Karim et al., 2015).

2.2.3.6 Razón de carbono a nitrógeno (C/N)

Cualquier entorno de crecimiento, así como los sistemas de digestión anaeróbica, requiere carbono y nitrógeno. Hay varios informes sobre el rango ideal de C/N; se ha informado que un valor entre 15 y 35 es el ideal de C/N. (Risberg K, 2013). La producción de biogás se ve afectada por la desviación de la relación C/N óptima. Las mayores relaciones C/N conducen a una deficiencia de nitrógeno para el crecimiento microbiano y a un menor rendimiento de producción de metano debido a la desactivación de metanógenos, además de la posibilidad de una falla general en el proceso. Sin embargo, debido a la escasez de carbono, que puede provocar la acumulación de amoníaco, nitrógeno y AGV en el digestor, las relaciones C/N más bajas limitan el crecimiento microbiano. (Li Y, 2011).

Para los experimentos en codigestión y como se mencionó antes, para la materia vegetal, la relación C/N es demasiado alta y su complicada estructura lignocelulósica los hace inapropiados para la producción de biogás (Risberg K, 2013) La baja relación C/N del estiércol y su deficiencia de carbono, por otro lado, retrasan la digestión anaeróbica. Sin embargo, la codigestión de estos dos sustratos puede ser una solución para abordar el desequilibrio de la relación C/N de cada sustrato. (Zahan et al., 2018) descubrieron que agregar material lignocelulósico al sistema mejora la relación C/N y el rendimiento de biogás, aumentando el porcentaje de residuos lignocelulósicos en codigestión mientras se reduce el porcentaje de residuos de pollo. También descubrieron que cuando el porcentaje de desechos de pollo y otros desechos agroindustriales tiene una relación C/N entre 26 y 27.5, la producción de biogás aumenta, mientras que cuando la relación C/N es superior a 29.

2.2.3.7 Concentración de Ácidos grasos volátiles (AGV)

Los productos intermedios de la vía de producción de metano son los ácidos grasos volátiles (AGV). La fermentación produce principalmente ácidos acéticos, propiónicos, butíricos, isobutíricos, valericos e isovaléricos. (Kong et al., 2021). Estos

ácidos grasos son indicadores y se pueden usar para evaluar el rendimiento de la digestión anaeróbica (Bah H., 2020). Las bacterias metanógenas utilizan directamente el ácido acético, mientras que las bacterias productoras de ácido acético necesitan convertir el ácido propiónico y butírico en ácido acético. Debido a que las bacterias metanógenas no lo usan con facilidad, el ácido propiónico se acumula fácilmente. Este ácido es el más dañino de los AGV para las bacterias metanógenas. La concentración de AGV aumenta con el TCO, pero la acumulación de estos ácidos orgánicos puede reducir el nivel de pH por debajo de 6. La inactivación de los microorganismos metalogénicos y/o el cambio de la ruta de los microorganismos en el consorcio microbiano son las consecuencias de este pH bajo, lo que finalmente conduce a la producción de productos sin valor esperado. (Bah H, 2014). Una concentración de aproximadamente 1500-2000 mg/L de VFAs puede inhibir la digestión anaeróbica.

2.2.3.8 Potencial Bioquímico de Metano (BPM)

El Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que se utiliza a nivel mundial y se caracteriza por su simplicidad, relativa rapidez y bajo costo, determina la posibilidad de emplear un sustrato específico en el proceso de digestión anaerobia, para lo cual se realizan pruebas a escala de laboratorio. (Owen et al., 2019). El ensayo de PBM se basa en la mezcla de un sustrato orgánico con un inóculo anaerobio en condiciones experimentales y operacionales específicas. El CH4 producido durante la digestión anaeróbica se mide utilizando un método de medición específico (método volumétrico, manométrico o cromatografía de gases). (Esposito, Frunzo, Liotta, Panico, & Pirozzi, 2022)

2.2.3.9 Factores que influyen en Potencial Bioquímico de Metano (BPM)

En el Potencial Bioquímico de Metano (BPM), influyen diferentes factores que pueden agruparse en cuatro grandes grupos: los relacionados con el sustrato, con el inóculo, con las condiciones operacionales y con las experimentales.

2.2.3.9.1 Sustratos

Los materiales orgánicos utilizados en los procesos de digestión anaerobia para producir biogás, un combustible renovable, se conocen como sustratos. Estos sustratos

incluyen una variedad de residuos, como los provenientes de la industria ganadera (estiércol y purines), que son altamente eficientes debido a su alta carga orgánica. Según (Gonzales & Jurado, 2021), mezclar el estiércol con residuos alimentarios puede aumentar significativamente la producción de metano, mejorando así la eficiencia del proceso de obtención de biogás

2.2.3.9.2 Sólidos totales (ST) y Sólidos volátiles (SV)

Los sólidos totales (ST) representan el material residual que queda después de la evaporación de una muestra de agua a una temperatura específica. Estos sólidos incluyen tanto los disueltos como los suspendidos, y su determinación es esencial en el análisis de la calidad del agua, ya que afectan características como la turbidez y el color. Los ST se utilizan comúnmente en estudios sobre el tratamiento de aguas residuales y en la regulación de vertimientos a cuerpos de agua. (López, Veliz, Fernandez, & Espinosa, 2021)

Los sólidos volátiles (SV) representan la parte de los sólidos totales que se vaporizan cuando se calientan a 550°C en una mufla. Esta parte está compuesta principalmente por materia orgánica, como la presente en las aguas residuales, y es una medida de la cantidad de material que puede ser descompuesto por microorganismos. Por esta razón, los SV son importantes en estudios sobre digestión anaerobia y producción de biogás, ya que indican la cantidad de sustrato que las bacterias pueden utilizar para generar energía. (Pérez J. , 2021)

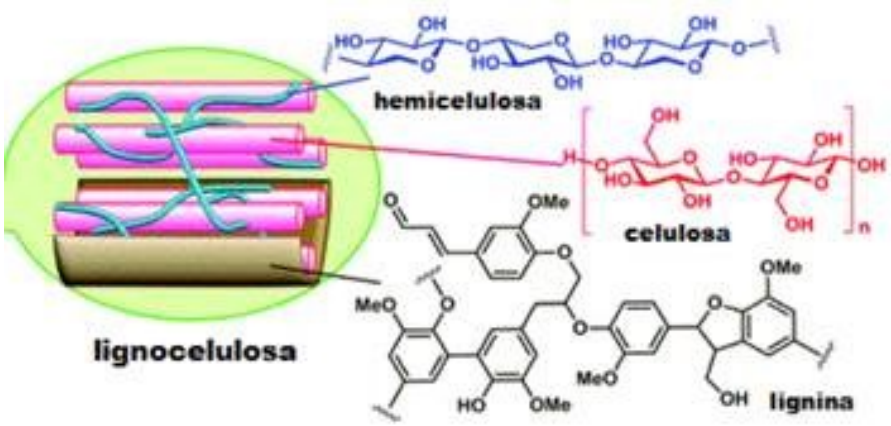
2.2.3.9.3 Celulosa, hemicelulosa y lignina

Además, se debe determinar el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 5) de los sustratos con el fin de conocer posibles inhibiciones (Martínez J. , 2021) y mejores relaciones entre los sustratos y los co-sustratos para maximizar el rendimiento de metano. La biomasa rica en celulosa, en comparación con la rica en hemicelulosa, tiene un mayor potencial para producir metano. Sin embargo, combinar la digestión de ambas biomasas crea un efecto sinérgico positivo, aumentando la producción de metano en un 15.5%. Esto demuestra que la interacción entre la celulosa y la

hemicelulosa durante la digestión anaeróbica mejora la eficiencia del proceso de generación de metano (Gonzáles de León & Rodríguez, 2023)

Figura 5

Distribución de celulosa, hemicelulosa y lignina en la pared celular de los sustratos lignocelulósicos



Fuente: Tomado de Rodríguez et al, (2017)

La materia orgánica que contiene altos niveles de lignina genera muy poco metano durante el proceso de digestión anaerobia (DA). Esto se debe a que la lignina es más susceptible a la degradación en ambientes aeróbicos, mientras que, en condiciones anaeróbicas, tiende a persistir por largos períodos. La lignina, al ubicarse en la superficie de los sustratos, forma una barrera que impide la acción de las enzimas hidrolíticas. Esta interferencia ralentiza el proceso de hidrólisis, lo que da lugar a un proceso de digestión anaerobia ineficiente y a una producción reducida de metano. (Gonzáles, Pérez, Wong, Bello, & Yañez, 2022)

2.2.3.9.4 Biodegradabilidad

La biodegradación es el proceso mediante el cual los microorganismos descomponen químicamente una sustancia. La biodegradabilidad (BD) hace referencia a la habilidad de un material para descomponerse de manera segura en un entorno y ser consumido

por microorganismos bajo condiciones anaerobias. Este proceso está influenciado por diversos factores ambientales, como la biodisponibilidad, la bioaccesibilidad, la temperatura, el pH, la humedad y la concentración de las sustancias presentes. (Luongo, Gikas, & Othman, 2022)

La biodegradación anaeróbica, aunque compleja, es crucial para el desarrollo de los microorganismos. En los sistemas de codigestión anaerobia, la descomposición y la fase de hidrólisis de la biomasa son factores determinantes que influyen en la biodegradabilidad, la bioaccesibilidad y la tasa de degradación. La codigestión anaerobia mejora la biodegradabilidad de los sustratos dependiendo de sus niveles de celulosa, hemicelulosa y lignina. Tanto la celulosa como la hemicelulosa son altamente biodegradables, y su combinación ayuda a equilibrar los nutrientes, favoreciendo el crecimiento de diversas bacterias involucradas en el proceso. Sin embargo, un alto contenido de lignina dificulta la biodegradación, ya que actúa como una barrera que inhibe la degradación de la biomasa lignocelulósica. (García & Sánchez, 2022)

2.2.3.9.5 Inóculo

Es una pequeña cantidad de microorganismos o sustancia biológica introducida en un medio de cultivo o un organismo para promover el crecimiento de estos organismos, estudiar sus efectos o para mejorar algún proceso biotecnológico. En microbiología y salud, el inóculo juega un papel fundamental en la investigación de enfermedades, el desarrollo de tratamientos, y en procesos industriales como la fermentación (Sangabriel, 2021)

La concentración de biomasa y la actividad del inóculo, así como la concentración del sustrato y su biodegradabilidad, determinan el volumen relativo de inóculo a utilizar (Angelidaki et al., 2019). Cuando hay una concentración alta de microorganismos activos, se usa poco inóculo, pero cuando la densidad microbiana es baja, se necesita más inóculo (lodo de aguas residuales, residuos de digestatos). La cantidad adecuada de inóculo evita la acumulación de ácidos grasos volátiles y condiciones acidas. (Angelidaki et al., 2019).

2.2.3.9.6 Razón de sustrato a inóculo

La mayoría de las veces, la relación sustrato/inóculo (S/I) se representa en términos de los SV (gSVsustrato/gSVinóculo). En algunos estudios, también se presenta como la relación I/S, lo que es equivalente al valor inverso de la relación S/I. (Torres y Perez 2021). La relación S/I sugerida varía según el tipo de sustrato e inóculo y debe evaluarse individualmente (Sarabia Méndez et al., 2017), siendo las relaciones más empleadas inferiores o iguales a 0,5-1,0; sin embargo, (Lesteur et al., 2021) afirman que cada sustrato tiene una relación S/I óptima, considerando la producción potencial de AGV y su capacidad de amortiguamiento.

Al emplear inóculo proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales el rendimiento acumulado de metano se reduce al disminuir la cantidad de inóculo añadido con respecto al sustrato. (Li et al., 2018) estudió la relación inóculo a sustrato con lodo de una planta de tratamiento de aguas residuales. Él demostró que, al aumentar la proporción de sustrato en el reactor con respecto al inóculo, el rendimiento acumulado de metano disminuía. Sus hallazgos demostraron que los reactores con relaciones sustrato a inóculo superiores a 2 experimentarán acidificación.

2.2.4 Condiciones operacionales

2.2.4.1 Capacidad del reactor, réplicas y blanco

El ensayo de PBM se realiza generalmente en reactores en batch cuyo volumen total puede variar entre 100mL y 2L dependiendo de la homogeneidad de los sustratos (Angelidaki et al., 2019); El volumen útil representa la fase sólida-líquida, mientras que el volumen libre representa la fase gaseosa necesaria para almacenar los gases producidos. (Ame et al., 2021) recomienda que el volumen libre debe estar entre 20 al 25% del volumen total del reactor.

Las réplicas garantizan la reproducibilidad de los resultados, (Angelidaki et al., 2019) dependiendo de la complejidad del sustrato y la reproductibilidad del ensayo, se recomienda al menos tres copias para cada dilución. Para resultados más confiables, se

debe utilizar más de tres copias cuando se utilizan sustratos con alta heterogeneidad. El Blanco está constituido por inóculo y agua destilada y se emplea para determinar el CH_4 generado por el sustrato residual presente en el inóculo y su producción se resta de la de cada reactor para cuantificar únicamente la que se debe al sustrato (Angelidaki et al., 2019)

2.2.4.2 Duración del ensayo y agitación

La duración del ensayo de PBM depende principalmente de la biodegradabilidad del sustrato, por lo que no es posible establecer un período fijo. Sin embargo, se ha observado que la producción de CH4 comienza aproximadamente a los 30 días. (Angelidaki et al., 2019)

(Rozzi y Remigi 2004) afirman que la agitación continua puede dañar las asociaciones sintróficas que se establecen entre los diferentes grupos de microorganismos que intervienen en la DA. Además, (Ame et al., 2011) encontró que la producción de CH4 se reduce cuando se realiza agitación magnética continua, por lo que se recomienda realizar agitación manual intermitente.

2.3 Biogás

El biogás es una fuente de energía renovable generada mediante la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos, como estiércol y residuos agrícolas. Este proceso produce una mezcla de metano y dióxido de carbono, que puede sustituir al gas natural para generar electricidad y calor. Además, el uso de biogás contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuye la dependencia de los combustibles fósiles (Reina, 2021). Además de generar energía, es clave en la economía circular al tratar residuos orgánicos de manera eficiente mediante la digestión anaeróbica. Esta tecnología también permite producir biometano, una versión refinada y más utilizable del biogás. A nivel global, el biogás se presenta como una herramienta

importante para combatir el cambio climático, con el potencial de reducir hasta un 14% de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2050. (LibreTexts, 2023)

Está compuesto mayormente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), es una fuente de energía renovable similar al gas natural. Su producción no solo facilita la gestión de residuos, sino que también ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al capturar y utilizar el metano, evitando su liberación a la atmósfera. (Hernández, 2023). El interés por explorar nuevas aplicaciones del biogás ha crecido significativamente en los últimos años, impulsado por las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático y la creciente atención hacia las energías renovables. Aunque tradicionalmente el biogás se ha utilizado principalmente en usos de menor valor, como la calefacción, el suministro de combustible para motores o su quema directa, una nueva tendencia está ganando terreno: la refinación del biogás. Este proceso permite convertirlo en gas de síntesis, lo cual abre la puerta a su transformación en combustibles líquidos y productos químicos de alto valor añadido. (Zhao, 2020).

2.3.1 Producción de biogás

La producción de biogás es un proceso complejo que involucra la descomposición anaeróbica de materiales orgánicos, como residuos agrícolas, estiércol y residuos urbanos, bajo condiciones controladas. Este proceso se lleva a cabo en biodigestores, que son tanques herméticos donde microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás, compuesto principalmente de metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2). La calidad y cantidad de biogás generados dependen de varios factores, como el tipo de materia prima utilizada, las condiciones del biodigestor y el tiempo de retención (Rodríguez, 2022). Un aspecto clave para optimizar este proceso es la selección de la materia prima, ya que residuos agrícolas, estiércol y desechos industriales son comúnmente utilizados, aunque su eficiencia varía en función de su contenido de carbono y nitrógeno. Por ejemplo, una materia prima con alto contenido de carbono, como los residuos vegetales, genera mayores cantidades de biogás, mientras que los residuos ricos en nitrógeno, como el estiércol, permiten una descomposición más rápida y estable (García M. , 2022).

La eficiencia en la producción de biogás no solo depende de las etapas bioquímicas, sino también del diseño y operación del biodigestor. Existen diversos tipos de biodigestores, como los de flujo continuo y los de lote, cada uno con niveles de eficiencia distintos en función de la cantidad de materia prima disponible y del tipo de energía que se desea generar. Además, la temperatura es un factor crucial en este proceso, ya que los biodigestores operan de manera más eficiente en condiciones mesofílicas (20-40 °C) o termofílicas (45-60 °C) (Martínez P. , 2022). Finalmente, la purificación del biogás es un paso esencial antes de su utilización, ya que el biogás crudo contiene impurezas como sulfuro de hidrógeno (H2S) y vapor de agua, que deben ser eliminadas para evitar la corrosión de los equipos y mejorar la eficiencia energética. Tras la purificación, el biogás se convierte en biometano, el cual puede ser empleado para la generación de electricidad, como combustible vehicular, o incluso inyectarse en las redes de gas natural, lo que lo convierte en una alternativa energética sostenible y versátil (López R. , 2023)

2.3.2 Características del biogás

Las soluciones de biogás abarcan diversos sectores como la gestión de residuos, la generación de energía y el transporte, lo que puede ser una ventaja frente a otras fuentes de energía renovable. Sin embargo, esta versatilidad también da lugar a una estructura política compleja, lo que dificulta la revisión de políticas y la evaluación de sus efectos, especialmente cuando los cambios no están directamente vinculados al biogás (Gustafsson, 2021). La creciente preocupación por la sostenibilidad del planeta ha impulsado el desarrollo de fuentes alternativas de energía. Un ejemplo de esto es la producción de biogás a partir de desechos como lodos de depuradoras, residuos forestales y de la agroindustria, entre otros (Bragança, 2020)

La creciente crisis energética global ha impulsado una búsqueda activa de fuentes de energía sostenibles y eficientes para garantizar el suministro en las próximas décadas. En este contexto, el biogás ha emergido como una alternativa versátil y ecológica que no solo permite la producción de electricidad y calor, sino que también destaca por sus bajas emisiones contaminantes. En comparación con los combustibles fósiles

tradicionales, las emisiones de CO2 provenientes de la combustión de biogás son significativamente menores, situándose en aproximadamente 83,6 kg por GJ (Paolini, 2018), frente a cifras mucho más elevadas como los 741 kg por GJ del diésel o los 1096 kg por GJ de la madera (Quaschning, 2019). Además, la creciente preocupación por la biodiversidad ha llevado a gobiernos y agricultores a investigar el uso de cultivos alternativos en la producción de biogás, lo que podría garantizar un suministro más sostenible de biomasa para el futuro (Gansberger, 2018). Estas características han hecho que el biogás gane popularidad como una fuente clave en la transición energética global (Giwa, 2020)

2.4 Cinética microbiana

Un consorcio microbiano diferente participa en cada una de estas etapas. La evolución de un grupo microbiano en un reactor en lote se puede observar a través de la variación de la concentración celular. Las siguientes son las definiciones:

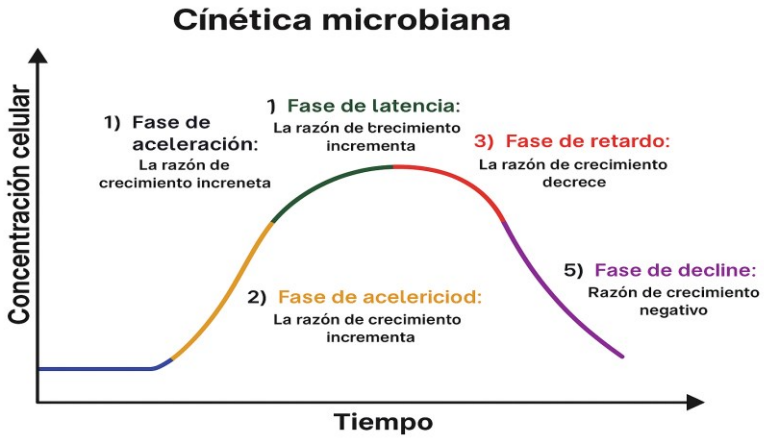
1) Fase de latencia: Razón de crecimiento nula
2) Fase de aceleración: La razón de crecimiento incrementa
3) Fase exponencial: Razón de crecimiento constante
4) Fase de retardo: La razón de crecimiento decrece
5) Fase de decline: Razón de crecimiento negativo

Al principio, los microorganismos responsables de la digestión tienen una concentración baja y deben adaptarse al medio. La fase de latencia es la etapa anterior a la fase de aceleración, que es un rápido aumento en la razón de crecimiento celular. La fase exponencial ocurre cuando la razón de crecimiento celular permanece constante. Sin embargo, llega un momento en el que la razón de crecimiento celular disminuye, lo que se conoce como fase de retardo. La fase estacionaria ocurre cuando las células compiten por el sustrato y la cantidad de células producidas es igual a la cantidad de células muertas. Este es el final de la fase de crecimiento. Cuando el

número de células muerta es más grande que las generadas y la razón de crecimiento es negativa, ocurre la fase de decline o fase de muerte (Monod, 1949).

Figura 6

Fases de crecimiento de la cinética microbiana



Fuente: tomado de (Madigan, 2017)

Una o varias de estar fases podrían estar ausentes. Bajo condiciones adecuadas, la fase de latencia y fase de aceleración podrían suprimirse. La fase de retraso es frecuentemente corta e imperceptible. Lo mismo es a veces verdadero para la fase estacionaria.

2.4.1 Modelos cinéticos

Para lograr el enfoque correcto en el proceso de digestión anaeróbica, es crucial conocer la producción potencial de biogás y metano de una mezcla de materia orgánica. Esto permite optimizar el proceso y da un control sobre las variables del mismo (Schievano, y otros, 2019). Como la PBM es un proceso que requiere de tiempo, de 60-90 días. Los modelos matemáticos son métodos más rápidos para predecir cuanto metano es posible generar a partir de un sustrato dado sin el empleo de costos al experimento.

El modelo cinético de primer orden, la ecuación modificada de Gompertz , el modelo de la función de transferencia y el modelo del cono han sido satisfactoriamente

aplicados para describir el proceso de digestión anaerobia de diferentes residuos usando diferentes tipos de reactores (Kafle y Chen 2016).

2.4.1.1 Modelo de Gompertz

El modelo modificado de Gompertz ha sido ampliamente utilizado para evaluar el rendimiento del proceso de digestión anaerobia (Li et al., 2018). Los parámetros estimados del modelo indican la eficiencia de digestión y el tiempo que tarda en iniciar el proceso de hidrolisis. Una fase de latencia (λ) baja indica un rápido inicio del proceso de digestión y una razón de producción máxima de metano (R_m) alta indica una elevada eficiencia de digestión (Zhang et al., 2018)**.** Además, un alto coeficiente de correlación (R^2) indica que la producción de metano podría simularse muy bien por el modelo.

(Li et al., 2018) encontró que la razón de producción de metano máximo (R_m) se incrementa en la codigestión de celulosa y hemicelulosa en comparación con la mono digestión, indicando una mejora en la eficiencia de la digestión. Estos parámetros indican que la combinación de sustratos acorta o prolongan la producción de metano.

$$B = B_0 \, exp\left\{-exp\left[\frac{R_m * e}{B_0}(\lambda - 1) + 1\right]\right\}$$

Donde:

B: rendimiento de metano acumulado en el tiempo t (mL/g VS)

B_0: rendimiento máximo de metano a partir del sustrato (mL/g VS)

t: *Tiempo de digestión (d)*

λ: *Tiempo de la fase de latencia (d)*

R_m: *razón máxima de producción de metano (mL/g VS)*

2.4.1.2 Modelo de la función de transferencia

El modelo de la función de transferencia permite predecir la producción de metano máxima, basada solamente en la producción de metano acumulado en un tiempo específico (Li et al., 2012). Un estudio que realizó (Zahan et al., 2018) con residuos agroindustriales y determino que el modelo se ajusta muy bien a los datos, los coeficientes de correlación estimados oscilaban entre 0.93 a 0.99. Igual que en el modelo de Gompertz, la fase de latencia (λ) y razón de producción máxima de metano (R_m), son parámetros a estimar e indican la eficiencia del proceso de digestión

$$B = B_0 \left\{1 - exp\left[\frac{-R_m}{B_0}(t - \lambda)\right]\right\}$$

Donde:

B: rendimiento de metano acumulado en el tiempo t (mL/g VS)

B_0: rendimiento maximo de metano a partir del sustrato (mL/g VS)

t: Tiempo de digestión (d)

λ: Tiempo de la fase de latencia (d)

R_m: Razón máxima de producción de metano (mL/g VS)

2.4.1.3 Modelo de Cono

Según varios investigadores, el modelo del cono ajusta mejor la producción de metano en codigestión. En un reactor en codigestión, los parámetros aumentan, pero en mono digestión disminuyen debido al efecto sinérgico de los sustratos. Igual que en el modelo de primer orden, el parámetro k es específico del sustrato utilizado.(El-Mashad 2019).

$$M = \frac{M_e}{1 + (k.t)^{-n}}$$

Donde:

$M =$ Rendimiento acumulado de metano en un tiempo t (mL/g VS o la unidad utilizada en el estudio).

M_e = *Rendimiento máximo de metano que se puede obtener a partir del sustrato (mL/g VS).*

k = *Constante de velocidad específica del sustrato utilizado (1/día), relacionada con la rapidez de la degradación.*

t = *Tiempo de digestión (días).*

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Ubicación de la investigación

La presente investigación se desarrollará en la Universidad Estatal de Bolívar, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Carrera de Ingeniería Agroindustrial, Laboratorios de Investigación y Vinculación.

Figura 7

Ubicación de la investigación



Nota: Toma de la ubicación mediante "Google Maps"

3.2 Localización de la investigación.

Tabla 1

Datos de la localización de la investigación

Ubicación	Localidad
Provincia	Bolívar
Cantón	Guaranda
Sector campus	Laguacoto II
Dirección	Vía Guaranda – San Simón Km 1 ½

Fuente: Universidad Estatal de Bolívar (2024)

3.3 Situación geográfica y climática de la fase experimental

Tabla *2*

Datos de la situación geográfica y climática

Parámetro	Valor
Altitud	2640 msnm
Latitud	01°34'15" S
Longitud	79°0'02" W
Temperatura mínima	8°C
Temperatura media anual	14.8°C
Temperatura máxima	21°C
Humedad relativa promedio	75%

Fuente: Estación Meteorológica de la Universidad Estatal de Bolívar. Laguacoto II (2023).

3.4 Zona de vida

Está ubicada en el centro del Ecuador, dentro de la región andina; en una zona climática no muy fría, teniendo una temperatura promedio de 16 °C, (Puga, 1998)

3.5 Materiales y equipos

3.5.1 Material Experimental

- Residuo de amaranto
- Residuo de quinua
- Estiércol de llama
- Estiércol de vicuña
- Estiércol de cerdo

3.5.2 Materiales de campo

- Mandil o Uniforme
- Guantes desechables
- Cofia

- Mascarilla
- Botas

3.5.3 Materiales de Planta

- Vaso de precipitación
- Varilla de agitación
- Probetas
- Bandeja plástica
- Crisoles
- Mortero y pistilo
- Sellador
- Tapa de aluminio y sellador de goma
- Frasco color ámbar de 311 mL

3.5.4 Materiales de oficina

- Libreta de apuntes
- Esferográficos
- Cámara fotográfica digital
- Computadora

3.5.5 Equipos

- Biogás 5000 Gas Analvser
- Manómetro-termómetro HD2124.2
- Mufla F47915
- Balanza DHAUS (0,001g)
- Estufa memmert 100-800
- Incubadora – Esterilizador snb200

- Vitrina de gases VA180960ADSG
- Elementar vario MACRO cube

3.6 Métodos y técnicas

3.6.1 Factores en estudio

Se utilizó un diseño en arreglo factorial A*B donde el factor A: Tipo de materia prima y el factor B: Sustrato

En la tabla 3 se expresan los factores de estudios para la investigación:

Tabla 3

Factores de estudio y sus respectivos niveles

Factor	Código	Nivel
Tipo de residuo	A	a1: Amaranto a2: Quinua
Tipo de Sustrato	B	b1: Estiércol de vicuña b2: Estiércol de llama b3: Estiércol de cerdo

3.6.2 Tratamientos

En la tabla 4 se expresan los tratamientos de los factores con sus respectivos niveles.

Tabla 4

Tratamientos

Tratamiento	Código	Niveles	
		Tipo de Materia Prima	Sustrato
T1	a_1b_1	Amaranto	Vicuña
T2	a_1b_2	Amaranto	Llama
T3	a_1b_3	Amaranto	Cerdo
T4	a_2b_1	Quinua	Vicuña
T5	a_2b_2	Quinua	Llama
T6	a_2b_3	Quinua	Cerdo

3.6.3 Características del experimento

Tabla *5*

Características del diseño factorial AxB

Atributos del Diseño Factorial	
Número de factores experimentales	2
Número de niveles factor A	2
Número de niveles factor B	3
Número de replicas	2
Unidades experimentales	18
Tamaño de la muestra	311 mL
Respuestas experimentales	5

3.6.4 Tipo de diseño experimental

Se empleará un Diseño A*B donde: El factor A: tipo de materia prima, presenta 2 niveles, 1: residuos de amaranto y 2: residuos de quinua. El factor B: tipo de sustrato, presenta 3 niveles: 1: estiércol de vicuña, 2: estiércol de llama, 3: estiércol de cerdo.

El modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$\mu = Efecto\ medio\ global$

$\alpha_i = Efecto\ incremental\ sobre\ la\ media\ causado\ por\ el\ nivel\ i\ del\ factor\ A$

$\beta_j = Efecto\ incremental\ sobre\ la\ media\ causado\ por\ el\ nivel\ j\ del\ factor\ B$

$(\alpha\beta)_{ij} = Efecto\ incremental\ sobre\ la\ media\ causado\ por\ la\ interacción\ del\ nivel\ i\ del\ factor\ A\ y\ el\ nivel\ j\ del\ factor\ B$

$\varepsilon_{ijk} = El\ término\ del\ error$

3.6.5 Modelo de análisis de varianza (ANOVA)

Para determinar la diferencia entre tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), en donde se presenta el modelo ANOVA, considerando las fuentes de variación y los grados de libertad que se detallan en la tabla 6

Tabla *6*

Análisis de varianza (ANOVA) para el diseño factorial AxB

FV	SC	GL	CM	F_0	Valor – P
Efecto A	$SC_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$	$a-1$	$CM_A = \frac{SC_A}{a-1}$	$\frac{CM_A}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Efecto B	$SC_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N}$	$b-1$	$CM_B = \frac{SC_B}{b-1}$	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Efecto AB	$SC_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{Y_{ij.}^2}{n} - - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$	$(a-1)(b-1)$	$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	
Error	$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$	$ab(n-1)$	$= \frac{SC_E}{ab(b-1)}$	CM_E	
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$	$abn-1$			

3.6.6 Prueba de rangos múltiples

$$LSD = t_{\frac{\propto}{2}, N-k} \frac{\sqrt{2CM_E}}{n}$$

Donde:

$t: T\ de\ student$

$N - k: grados\ de\ libertad$

$CM_E: cuadrado\ medio\ del\ error$

$n: número\ de\ observaciones$

3.7 PROCEDIMIENTO

3.7.1 Sustratos e inóculo

Las materias primas, tanto residuo de quinua y amaranto, como estiércol de llama, vicuña y cerdo se recolectarán de acuerdo con el lugar de procedencia.

3.7.1.1 Residuo de quinua

Ahumada et al., (2020) mencionan que los residuos de quinua provienen de partes de la planta, como hojas, tallos y raíces, así como de subproductos producidos durante el procesamiento de las semillas, como pieles y saponinas residuales, aunque estos residuos generalmente se desechan, tienen un alto valor como materia prima para la producción de biocombustibles, biogás o compost, por su contenido en nutrientes y materia orgánica.

En la provincia de Bolívar, Ecuador, el cultivo de quinua se concentra principalmente en zonas montañosas, donde las condiciones climáticas y de suelo favorecen su crecimiento. Ciudades como Guaranda, San Miguel y Chillanes se destacan por sus actividades agrícolas, entre ellas el cultivo de quinua, estas zonas están ubicadas en la región andina de la provincia que ofrecen un entorno propicio para el desarrollo de este cultivo, que ha cobrado importancia en la región por su valor nutricional y potencial para contribuir a la seguridad alimentaria y la economía local (Vilca & Carrasco, 2021).

3.7.1.2 Residuo de amaranto

Los residuos de amaranto se obtienen de partes de la planta que no se utilizan en la producción de alimentos, como hojas, tallos, flores, raíces y subproductos de la misma, aunque estos suelen considerarse de gran potencial para aplicaciones bioenergéticas, como la producción de biocombustibles o biogás, debido a su alto contenido orgánico (Gómez, 2019).

En la provincia de Bolívar, Ecuador, especialmente en las zonas agrícolas del altiplano como Guaranda y San Miguel donde se cultiva amaranto, estos residuos se generan luego de su recolección y procesamiento y pueden usarse para la producción de bioenergía o compostaje.

3.7.1.3 Estiércol de llama

El estiércol de llama es un desecho orgánico que se obtiene de las heces de este animal y es muy utilizado como fertilizante natural en las regiones andinas debido a su alto contenido de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que este fertilizante no sólo mejora la estructura del suelo y promueve el crecimiento saludable de las plantas, sino que también puede usarse para producir biogás, que es una fuente de energía renovable a partir de desechos animales (Barroso, Masabanda, & Echeverría, 2024).

En Guaranda, provincia de Bolívar, el estiércol de llama se encuentra principalmente en zonas rurales y comunidades de altura donde se crían estos animales, como los páramos y zonas cercanas a la sierra. En las comunidades indígenas y campesinas dedicadas a la cría de llamas, los animales son utilizados tanto como carga como para utilizar su estiércol como fertilizante natural. Estas zonas son ideales para la cría de llamas debido a las condiciones climáticas de los Andes y es allí donde los agricultores recolectan estiércol para utilizarlo en sus actividades agrícolas o para la producción de biogás.

3.7.1.4 Estiércol de vicuña

Iglesias, (2019) menciona que el estiércol de vicuña es un subproducto orgánico obtenido del estiércol de camello andino, aunque las vicuñas son animales silvestres protegidos y no se crían comercialmente en cautiverio como las llamas, sus excrementos se pueden encontrar en las zonas donde viven, especialmente en los páramos y tierras altas de los Andes, este fertilizante tiene un alto contenido en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que puede utilizarse como fertilizante natural, aumentando la fertilidad del suelo y favoreciendo el crecimiento de las plantas en zonas rurales.

En la provincia de Bolívar, Ecuador, los excrementos de vicuña se pueden encontrar en áreas protegidas y reservas naturales donde viven estos animales, como los páramos cercanos a Guaranda, sin embargo, debido a su estado de conservación, el uso del estiércol de vicuña no es tan común ni explotado comercialmente como el de otros camélidos, y cualquier recolección debe realizarse bajo regulaciones que aseguren la protección de la especie y su hábitat.

3.7.1.5 Estiércol de cerdo

Becerra & Sánchez, (2020) mencionan que el estiércol de cerdo es un subproducto animal que se obtiene de las heces de estos animales y es uno de los fertilizantes orgánicos más utilizados en la agricultura, debido a su alto contenido de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, es un excelente acondicionador del suelo cuando se usa adecuadamente, sin embargo, debe manipularse con cuidado ya que puede contener patógenos o causar problemas de contaminación si se manipula incorrectamente, además de su uso como fertilizante, el estiércol de cerdo se puede utilizar para producir biogás mediante digestión anaeróbica, lo que lo convierte en una fuente potencial de energía renovable.

En la provincia de Bolívar, Ecuador, el estiércol de cerdo es común en las zonas rurales donde se crían estos animales, como las zonas agrícolas de Guaranda y San Miguel. Los pequeños y medianos productores utilizan este recurso para mejorar sus suelos y aumentar la productividad de sus cultivos. También existen iniciativas que promueven

su uso en plantas de biogás para producir energía limpia, contribuyendo así a prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Para la presente investigación se recolectará principalmente del canal de Guaranda.

3.7.2 Análisis proximal y elemental

3.7.2.1 Caracterización de las materias primas

La caracterización de la materia prima se realizó en el Centro de Investigación de la Universidad Estatal de Bolívar, de acuerdo con la siguiente normativa:

Tabla 7

Métodos para la caracterización de las materias primas

Análisis	Método
Determinación de humedad, humedad total	UNE-EN 14774-2
Humedad de la muestra para análisis general	UNE-EN 14774-3
Determinación del contenido de cenizas	UNE-EN 14775
Determinación del contenido en materias volátiles	UNE-EN 15148
Análisis elemental	UNE-EN 15104

3.7.3 Configuración general del reactor anaerobio

Se utilizaron 21 digestores con un volumen total de 311 mL. El volumen ocupado para los gases fue de 125 mL Estos digestores tenían una válvula ubicada en el tapón (3 vías) Durante este proceso, la tapa del digestor juega un papel fundamental, centrándose los pasos adicionales en monitorear y analizar la presión. Los digestores se midieron a 38°C (temperatura mesófila)

3.7.4 Montaje del Digestor anaerobio

El montaje de los digestores consistirá en añadir el volumen de inoculo, seguido del sustrato diluido para completar un volumen de 186 mL. Las configuraciones para los reactores con sus diferentes relaciones inoculo a sustrato se detallan a continuación.

Tabla 8

Relación inoculo sustrato

Descripción	Relación Inoculo a Sustrato					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Volumen ocupado por los sustratos (mL)	16,48	30,38	37,37	16,3	30,02	36,9
Volumen ocupado por el inoculo (mL)	28,4	30,43	31,72	16,04	17,17	17,89
Masa del volumen de inóculo (g)	141,12	125,19	116,91	153,66	138,8	131,2

3.7.5 Cálculo de materia orgánica destinada para el digestor

El digestor anaerobio se alimenta con una cantidad específica de materia orgánica (SV), determinada por el contenido de sólidos volátiles presentes en el inóculo fresco. La cantidad de materia orgánica que se puede agregar al digestor está limitada por la cantidad de SV del inóculo. La masa de SV en volúmenes de 125 mL (relación 2:1), 93 mL (relación 1:1) y 62 mL (relación 1:2) se detallan en la tabla 7, correspondiendo a una tasa de carga orgánica de 18 $gSVL^{-1}$. Para determinar la cantidad de SV añadida al digestor, se realizó un balance de masa basado en los SV, tanto para los sustratos como para el inóculo. Como se mencionó previamente, las relaciones I son de 2:1, 1:1 y 1:2.

3.7.6 Métodos de evaluación y datos a tomarse

Las respuestas para medir serán: presión del biogás, composición química del biogás y rendimiento diario y acumulado de biogás.

Además, se empleará el Modelo Modificado de Gompertz, Modelo de función de Transferencia, Modelo de Primer Orden y Modelo del Cono para ajustar el rendimiento de metano acumulado. Tres parámetros serán calculados con el fin de validar el ajuste de los modelos de acuerdo a las siguientes ecuaciones (El-Mashad 2013).

Raíz cuadrática media del error (RCME)

$$RCME = \sqrt{\sum_{n=1}^{n} \frac{(Pv_i - Mv_i)^2}{n}}$$

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Pv_i - Mv_i)^2}{\sum(Pv_i - \overline{Mv_i})^2}$$

Porcentaje de Desviación

$$\%\ Desviacion = \frac{(P - M)}{P}\ x\ 100$$

Las ecuaciones Pv_i, Mv_i, $\overline{Mv_i}$ son el rendimiento de metano estimado, medido y rendimiento de metano medio promedio respectivamente. P y M son el rendimiento estimado y medido de metano acumulado promedio y n es el número de observaciones.

3.7.6.1 Presión del biogás

Para medir la presión diariamente (Figura 8), se utilizará un sensor de presión Delta TP 704 de 1 bar, conectado a un medidor de presión Delta OHM HD 2124.2. Este sensor de presión estará interconectado directamente al digestor al momento de realizar la medición de presión.

Figura 8

Sensor de presión Delta TP 704 1 bar



Fuente: tomado por los autores

3.7.6.2 Liberación del biogás

El biogás ocupado por el volumen libre será liberado diariamente mediante la extracción con una jeringa graduada de 200mL (figura 9). La liberación del biogás terminará al momento en que la presión en el volumen libre sea cercana a la presión atmosférica. En ese momento el experimento finalizará.

Figura 9

Liberación diaria de biogás



Fuente: tomado por los autores

3.7.6.3 Composición del biogás

Para conocer la composición diaria del biogás resultante, se empleará Gas Analyser Safety Booklet (BIOGAS 5000) equipado con sondas de medición de CH_4, CO_2, O_2 y

H_2S, mediante la transferencia del biogás a través de una jeringa graduada de 200mL, como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Lectura de la composición de biogás diaria



Fuente: tomado por los autores.

3.7.6.4 Rendimiento de biogás

El rendimiento de biogás experimental será calculado a partir de la diferencia de presión generada cada día en los digestores (Valero et al., 2019). Partiendo de la ecuación del gas ideal; el volumen libre (V_L) es el espacio donde se acumulará las moles de biogás ($n_{biogás}$) a una temperatura (T_e) de 38°C.

$$P_{biogas} * V_L = n_{biogas} * R * T_e$$

Al reordenar la ecuación anterior, obtenemos:

$$n_{biogas} = \frac{P_{biogas} * V_L}{R * T_e}$$

El volumen de biogás ($V_{Biogás}$) fue reportado a condiciones de temperatura (T_{CE}) y presión (P_{CE}) estándar, entonces, por la ecuación del gas ideal:

$$P_{CE} * V_{biogas} = n_{biogas} * R * T_{CE}$$

Reordenamos la ecuación anterior para obtener el volumen de biogás, obtenemos:

$$V_{biogas} = \frac{n_{biogas} * R * T_{CE}}{P_{CE}}$$

Reemplazando el número de moles de biogás en la ecuación anterior, obtenemos:

$$V_{biogas} = \frac{P_{biogas} * V_L}{R * T_e} * \frac{R * T_{CE}}{P_{CE}}$$

Puesto que, $\frac{R*T_{CE}}{P_{CE}}$ representa el volumen molar de biogás (C=22.41L/mol) a condiciones de temperatura y presión estándar, la ecuación para el volumen de biogás que se genera es:

$$V_{biogas} = \left(\frac{\Delta P * V_L * C}{R * T_e}\right)$$

Donde.

ΔP: Diferencia de presión absoluta (KPa)

C: Volumen molar de un gas a presión y temperatura estándar (22.41L/mol).

R: Constante ideal de los gases (8.314 L kPa/K/mol)

T_e: temperatura de trabajo (mesofílico 38°C) 311.15 K

3.7.6.5 Rendimiento de metano máximo teórico y biodegradabilidad

El rendimiento de metano máximo teórico (RMT, mL/g-VS) se calculará a partir de la composición elemental de los sustratos, usando la fórmula de Buswell (Buswell y Muellepi 1952), mostrada en la ecuación:

$$C_aH_bO_cN_d + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8}\right)CO_2 + dNH_3$$

$$RMT = \frac{22.41 * 1000 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8}\right)}{12a + b + 16c + 14c} * (1 - \%cenizas)$$

Donde, los coeficientes a, b, c y d provienen del análisis elemental y la formula empírica del sustrato y co-sustrato.

La biodegradabilidad (BD) se calculó a partir del rendimiento de metano acumulado más alto (rendimiento de metano experimental, RME) dividido para el rendimiento de metano máximo teórico (RMT), mostrada en la ecuación:

$$BD = \frac{RME}{RMT} * 100\%$$

3.7.6.6 Índice de efecto sinérgico

El índice de efecto sinérgico (SEI) para la codigestión anaerobia se calculará empleando la siguiente ecuación:

$$\mathrm{SEI} = \frac{\mathrm{RME_{co}} - (\mathrm{X_1} * \mathrm{RME_1} + \mathrm{X_2} * \mathrm{RME_2} + \cdots + \mathrm{X_n} * \mathrm{RME_n})}{\mathrm{X_1} * \mathrm{RME_1} + \mathrm{X_2} * \mathrm{RME_2} + \cdots + \mathrm{X_n} * \mathrm{RME_n}} * 100\% \qquad (1)$$

Donde:

RME_{co}: Representa el rendimiento de metano experimental de la codigestión.

X_1, X_2, X_n: Son las fracciones de los sólidos volátiles del primer, segundo y nuevo sustrato en la codigestion, respectivamente.

RME_1, RME_2, RME_n: Representa el rendimiento de metano experimental de la mono-digestion del primer, segundo y nuevo sustrato, respectivamente.

3.7.6.7 Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulico será el número de días en los que finalizará la producción de biogás en los digestores. Usualmente, este periodo tomará entre 30 y 45 días, dependiendo del sustrato utilizado en la digestión anaerobia.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la materia prima

4.1.1 Análisis proximal

Para el análisis proximal se evaluó parámetros mediante métodos de UNE-EN-ISO adquiriendo resultados que contribuyen al presente estudio

Tabla 9

Análisis proximal

Parámetro	Unidad	Estiércol vicuña	Estiércol llama	Estiércol Cerdo	Residuo Amaranto	Residuo Quinua
Humedad	%	9,86	53,52	74,43	8,43	1,73
Cenizas	%	38,11	26,04	29,52	9,78	10,85
Carbono Fijo	%	3,4	8,05	-0,61	12,27	12,84
Sólidos Volátiles	%	58,49	65,91	71,09	77,95	76,31

La tabla muestra que los residuos de quinua y amaranto presentan un alto contenido de sólidos volátiles (76,31% y 77,95%, respectivamente) y bajo porcentaje de cenizas, lo que indica una alta proporción de materia orgánica biodegradable. Sin embargo, su bajo contenido de humedad (1,73% y 8,43%) requiere hidratación previa para adecuarlos al proceso anaerobio. En cambio, el estiércol de cerdo presenta un balance adecuado entre humedad (74,43%), sólidos volátiles (71,09%) y cenizas moderadas, siendo apto para usarse directamente como sustrato. Los estiércoles de llama y vicuña por su alto contenido de cenizas y bajo contenido de Sólidos Volátiles. En comparación con un estudio de (Mojica, Vidal, Rueda, & Acosta, 2016), se observan diferencias en composición en este caso, la humedad fue menor (64,68%), los sólidos volátiles más altos (79,68%) y las cenizas más bajas (20,32%), pero ambos coinciden en que el estiércol de cerdo es un co-sustrato con alto potencial energético para digestión anaerobia.

4.1.2 Análisis estructural

Para el análisis estructural se evaluó parámetros mediante métodos de UNE-EN-ISO adquiriendo resultados que contribuyen al presente estudio.

Tabla 10

Análisis estructural

Parámetro	Unidad	Residuo Amaranto	Residuo Quinua
Fibra Detergente Neutra	%	69,2	46,05
Fibra Detergente Ácida	%	50,77	30,63
Lignina	%	9,93	13,28
Celulosa	%	40,48	17,36
Hemicelulosa	%	18,43	15,42

La tabla muestra que el amaranto destaca por su alto contenido de celulosa (40,48%), FDN (69,2%) y hemicelulosa (18,43%), lo que indica una mayor disponibilidad de carbohidratos estructurales degradables por microorganismos anaerobios, estas características lo convierten en un sustrato con buen potencial para procesos biológicos. Por otro lado, la quinua muestra un contenido de lignina (13,28%) y menor celulosa (17,36%), lo que dificulta su degradación y reduce su rendimiento. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de (Trino, y otros, 2017), quienes también identificaron al amaranto como un sustrato más favorable que la quinua. Asimismo, (Soriano, 2019) reportó un bajo contenido de fibra en residuos de quinua (3.24%), significativamente menor al 5.9% mencionado en otro estudio del mismo autor. Por lo tanto, los datos confirman que el residuo de amaranto muestra una composición más adecuada para su aprovechamiento en procesos de degradación biológica que la quinua.

4.1.3 Análisis Elemental

Tabla 11

Análisis elemental

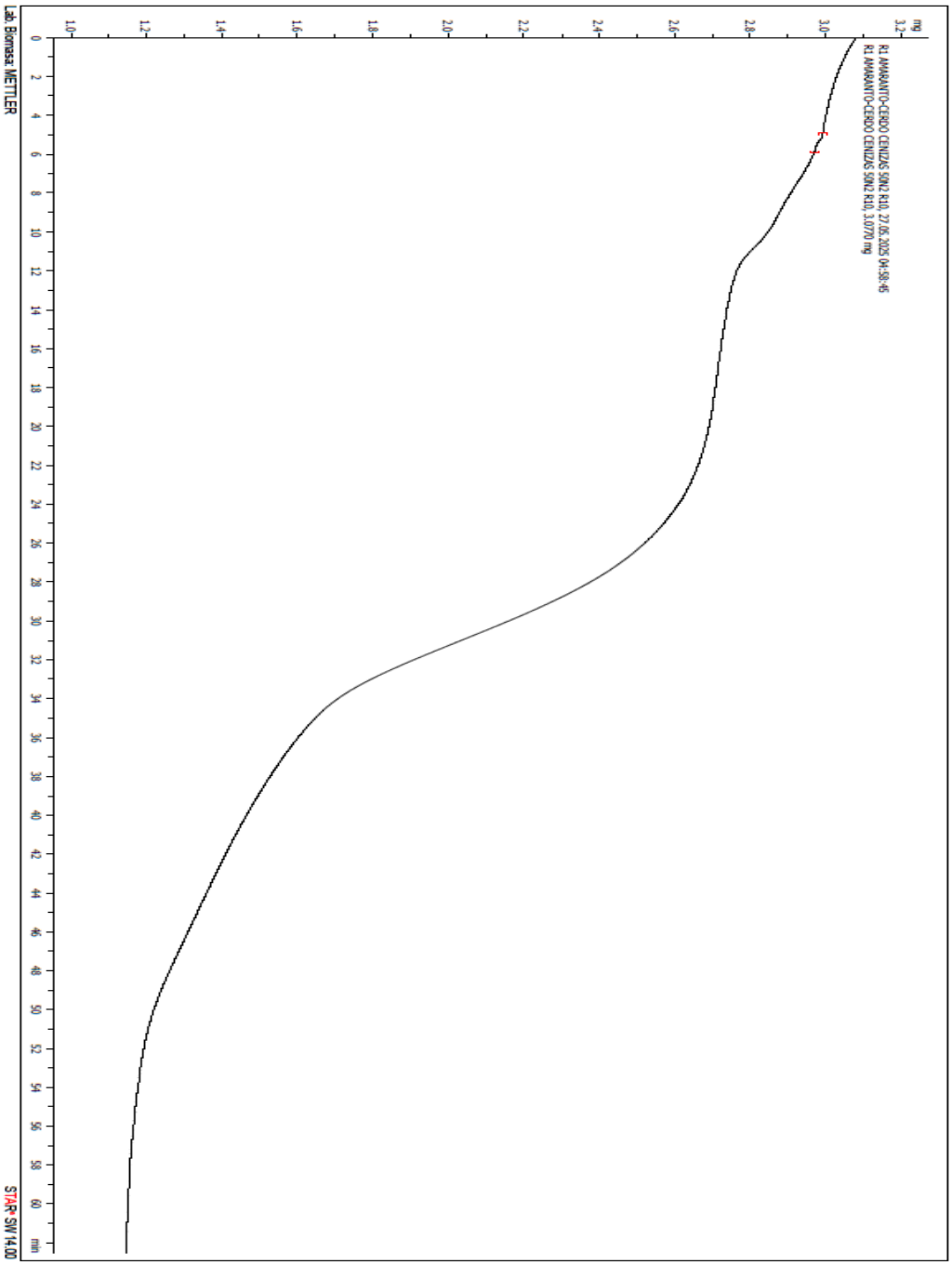
Parámetro	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
		RQ+ELla	RQ+EVic	RQ+ECer	RA+Ella	RA+EVic	RA+ECer	In+Ag
pH	-	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Nitrógeno	%	0,2	0,14	0,29	0,13	0,11	0,25	0,06
Carbono	%	1,98	1,13	3,11	1,43	0,91	1,92	0,02
Hidrogeno	%	10,49	10,16	10,38	9,31	10,38	9,67	6,78
Azufre	%	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01
C/N	%	10,29	7,88	10,38	11,50	8,80	7,88	0,74
C/H	%	0,19	0,12	0,31	0,17	0,09	0,21	0,01

El análisis elemental de las mezclas demostró que el potencial del residuo de amaranto se maximiza al combinarse con estiércol de cerdo (T3 y T6), ya que estas mezclas presentaron relaciones C/N equilibradas (10,38 y 7,88) y alto contenido de carbono (3,11% y 1,92%), condiciones favorables para la producción de biogás. En contraste las mezclas con estiércol de vicuña (T2 y T5) o el inóculo solo (T7) fueron menos eficientes. Estos resultados difieren de lo reportado por (Cortés, 2019), quien analizo estiércol con una riqueza mucho mayor en carbono (42,1%), nitrógeno (1,56%) e hidrógeno (5,1%). De forma similar, el estudio de (Ruiz & Cadavid, 2022) reporto porcentajes elevados de carbono (42,72%), hidrogeno (5,68%), nitrógeno (2,66%) azufre (0,34%) superando los valores obtenidos en las mezclas estudiadas. Esta comparación permite concluir que, aunque el residuo de amaranto presenta una mejor composición estructural, su eficiencia en la producción de biogás depende en gran medida del co-sustrato, siendo el estiércol de cerdo el más adecuado para mejorar sus propiedades y optimizar el proceso.

4.1.4 Análisis termogravimétrico

Figura 12

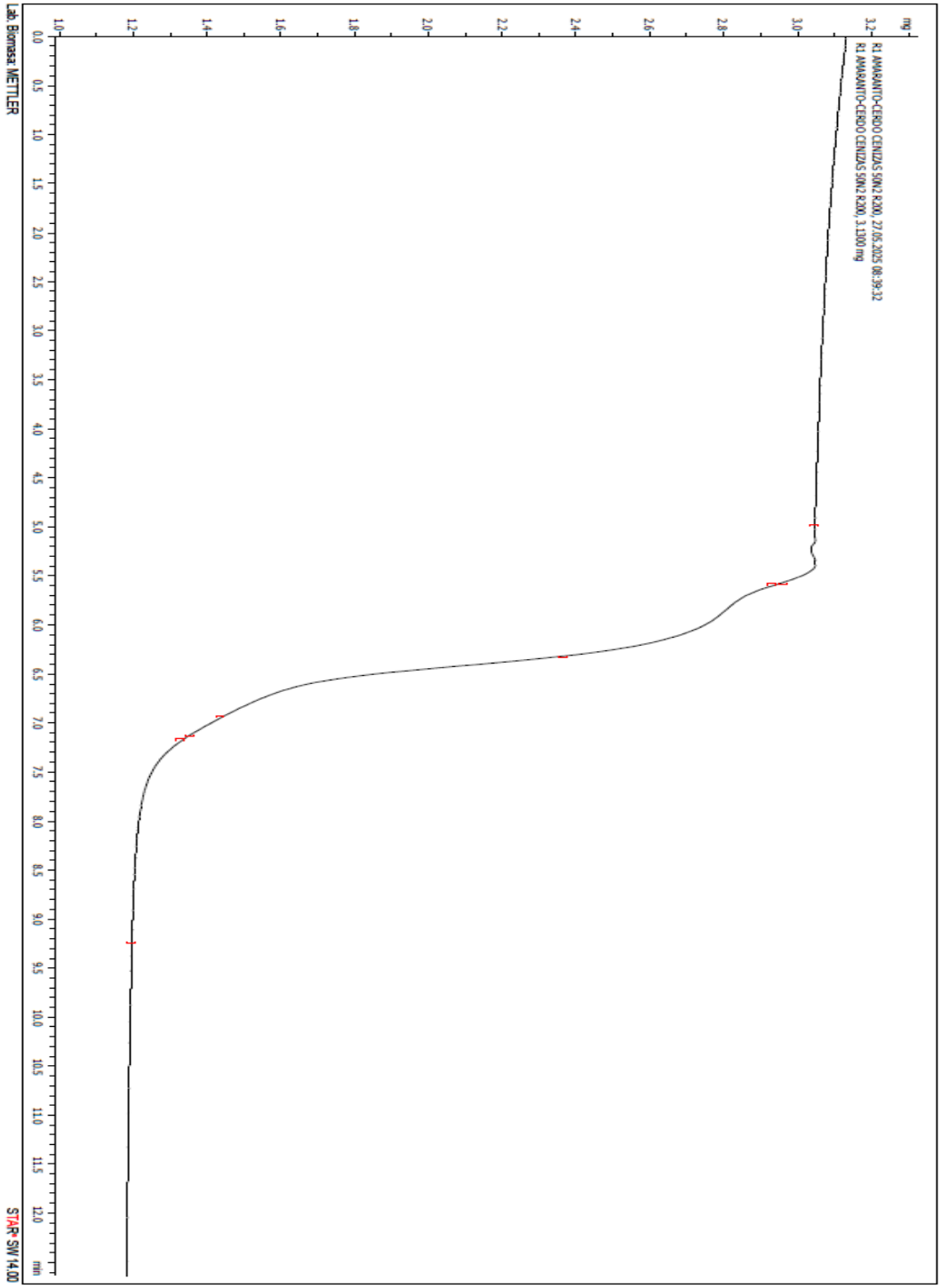
Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados análisis cenizas rampa temperatura 10°C



El análisis presenta una pérdida de masa gradual que inicia aproximadamente a los 50°C, correspondiente a la eliminación de humedad residual y compuestos volátiles de bajo peso molecular presentes en la matriz biomásica. Entre los 200-400°C se observa la primera etapa de descomposición térmica principal, donde ocurre la degradación de componentes como hemicelulosa y celulosa, evidenciada por una pendiente moderada en la curva que indica una pérdida de masa controlada de aproximadamente 30-40% del peso inicial. La segunda etapa de descomposición significativa se presenta entre 400-600°C, caracterizada por una pendiente más pronunciada que corresponde al pirólisis de la lignina y otros compuestos aromáticos complejos, así como la descomposición de proteínas y lípidos provenientes del estiércol porcino, resultando en una pérdida adicional del 20-30% de la masa original. Posteriormente, entre 600-800°C se observa una estabilización relativa con pérdida mínima de masa, indicando la formación de residuos carbonosos estables y el inicio de la carbonización completa. El residuo final (cenizas) representa aproximadamente el 15-20% de la masa inicial, valor que es consistente con el contenido mineral esperado en la mezcla amaranto-estiércol de cerdo, incluyendo óxidos de potasio, fósforo, calcio y otros elementos inorgánicos que permanecen después de la combustión completa. Esta información termogravimétrica es fundamental para determinar las condiciones óptimas de digestión anaerobia, ya que permite establecer la estabilidad térmica de la biomasa y predecir el comportamiento durante los procesos de fermentación para la generación de biogás, contribuyendo así a la optimización de los parámetros operacionales del biodigestor.

Figura 13

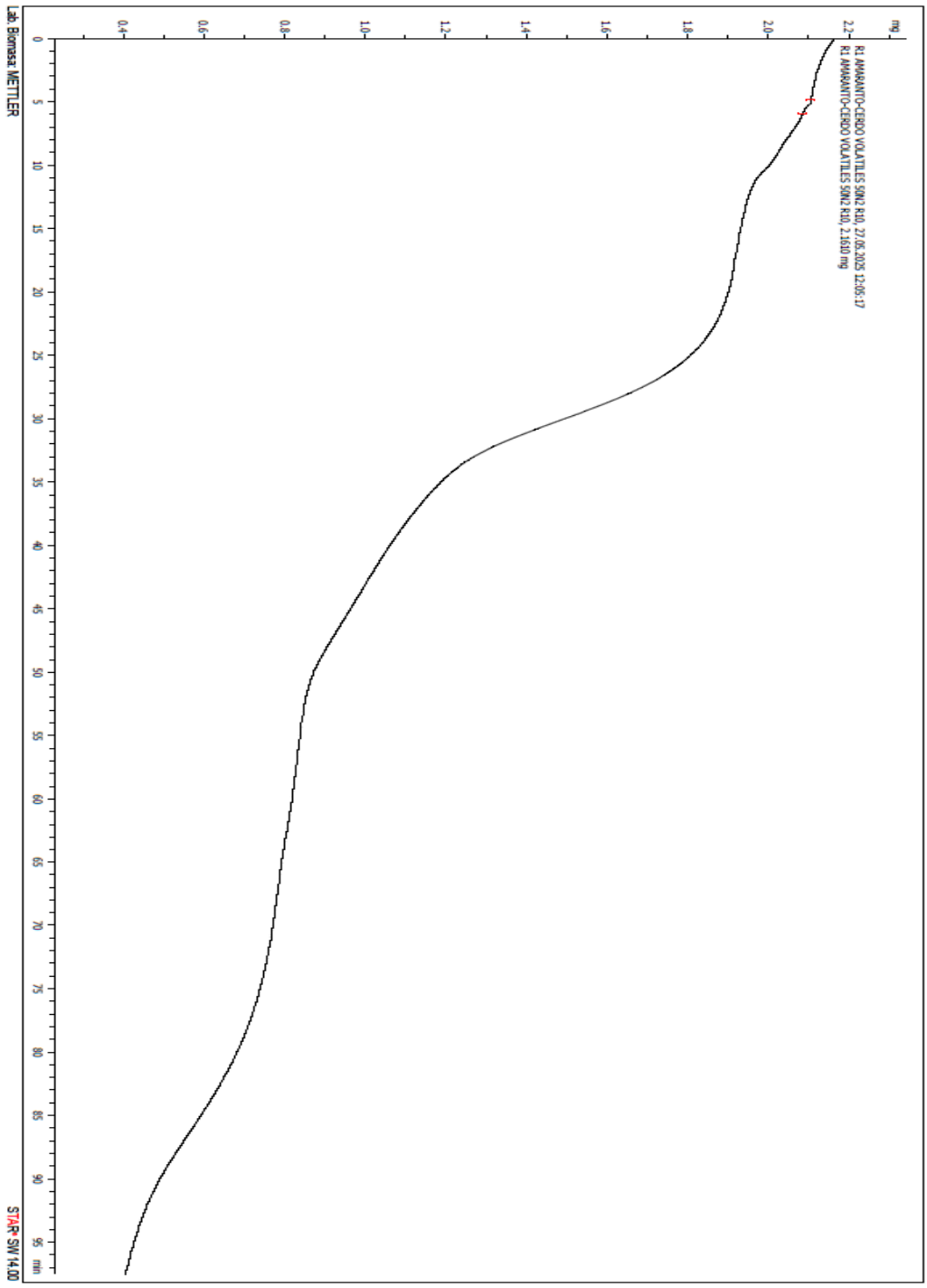
Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados análisis cenizas rampa temperatura 200°C



La curva TGA de volátiles del residuo de amaranto con estiércol de cerdo bajo una rampa de calentamiento de 10°C/min revela un patrón de descomposición térmica que proporciona información fundamental sobre el contenido de materia volátil presente en esta matriz biomásica. El análisis muestra una pérdida inicial gradual de masa que comienza alrededor de 100°C, correspondiente a la eliminación de humedad superficial y moléculas de agua ligadas débilmente a la estructura celular del amaranto y componentes orgánicos del estiércol porcino. Entre 200-350°C se observa la primera etapa significativa de pérdida de volátiles, caracterizada por una pendiente moderada que indica la descomposición controlada de hemicelulosa y componentes orgánicos de bajo peso molecular, representando aproximadamente el 15-20% de la masa inicial y evidenciando la presencia de compuestos fácilmente degradables que contribuirán positivamente a la producción de biogás durante la digestión anaerobia. La etapa más pronunciada ocurre entre 350-500°C, donde la curva presenta una pendiente más acentuada que corresponde a la volatilización masiva de celulosa, lignina parcialmente descompuesta y compuestos orgánicos complejos del estiércol, resultando en una pérdida adicional del 25-30% de la masa original, lo que indica un alto potencial de generación de gases combustibles durante los procesos de pirólisis y gasificación. Entre 500-700°C se observa una pérdida continua pero menos intensa, asociada con la descomposición de lignina residual y compuestos aromáticos de mayor estabilidad térmica, así como la volatilización de compuestos nitrogenados y azufrados provenientes del sustrato animal. La pérdida total de volátiles alcanza aproximadamente el 65-70% de la masa inicial, valor que es altamente favorable para la producción de biogás, ya que indica una elevada disponibilidad de materia orgánica degradable que puede ser convertida en metano y dióxido de carbono durante la fermentación anaerobia. El residuo final representa aproximadamente el 30-35% de la masa original, compuesto principalmente por carbono fijo y cenizas minerales que permanecen después de la volatilización completa, información crucial para estimar la eficiencia teórica de conversión de biomasa a biogás y optimizar las condiciones operacionales del biodigestor para maximizar la producción de energía limpia en aplicaciones de laboratorio.

Figura 12

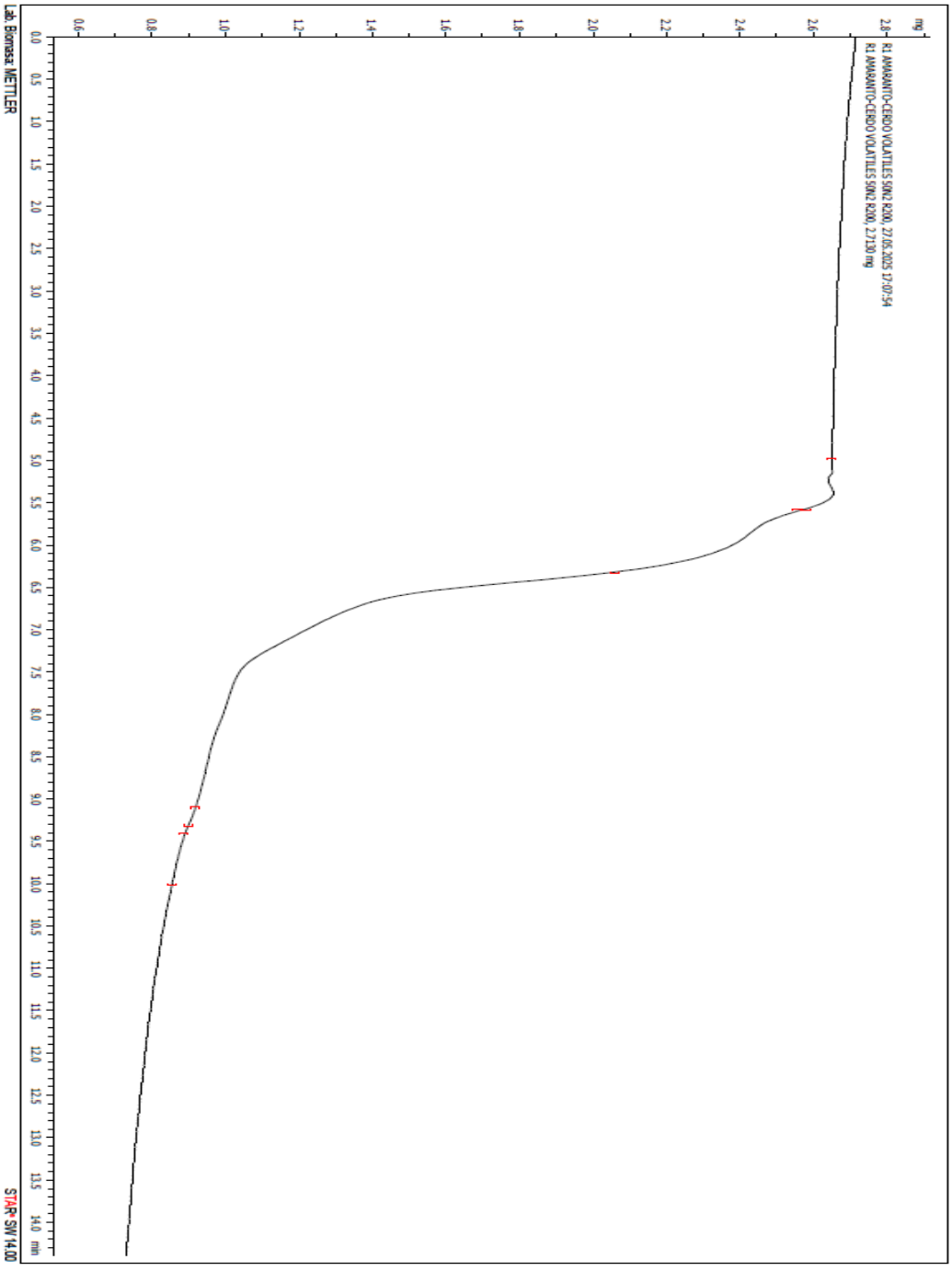
Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados volátiles rampa temperatura 10°C



La curva TGA de volátiles del residuo de amaranto con estiércol de cerdo bajo una rampa de calentamiento de 10°C/min revela un patrón de descomposición térmica que proporciona información fundamental sobre el contenido de materia volátil presente en esta matriz biomásica. El análisis muestra una pérdida inicial gradual de masa que comienza alrededor de 100°C, correspondiente a la eliminación de humedad superficial y moléculas de agua ligadas débilmente a la estructura celular del amaranto y componentes orgánicos del estiércol porcino. Entre 200-350°C se observa la primera etapa significativa de pérdida de volátiles, caracterizada por una pendiente moderada que indica la descomposición controlada de hemicelulosa y componentes orgánicos de bajo peso molecular, representando aproximadamente el 15-20% de la masa inicial y evidenciando la presencia de compuestos fácilmente degradables que contribuirán positivamente a la producción de biogás durante la digestión anaerobia. La etapa más pronunciada ocurre entre 350-500°C, donde la curva presenta una pendiente más acentuada que corresponde a la volatilización masiva de celulosa, lignina parcialmente descompuesta y compuestos orgánicos complejos del estiércol, resultando en una pérdida adicional del 25-30% de la masa original, lo que indica un alto potencial de generación de gases combustibles durante los procesos de pirólisis y gasificación. Entre 500-700°C se observa una pérdida continua pero menos intensa, asociada con la descomposición de lignina residual y compuestos aromáticos de mayor estabilidad térmica, así como la volatilización de compuestos nitrogenados y azufrados provenientes del sustrato animal. La pérdida total de volátiles alcanza aproximadamente el 65-70% de la masa inicial, valor que es altamente favorable para la producción de biogás, ya que indica una elevada disponibilidad de materia orgánica degradable que puede ser convertida en metano y dióxido de carbono durante la fermentación anaerobia. El residuo final representa aproximadamente el 30-35% de la masa original, compuesto principalmente por carbono fijo y cenizas minerales que permanecen después de la volatilización completa, información crucial para estimar la eficiencia teórica de conversión de biomasa a biogás y optimizar las condiciones operacionales del biodigestor para maximizar la producción de energía limpia en aplicaciones de laboratorio.

Figura 13

Análisis termogravimétrico combinación Amaranto – Cerdo. resultados volátiles rampa temperatura 200°C



La curva TGA de volátiles del residuo de amaranto con estiércol de cerdo bajo una rampa de calentamiento acelerada de 200°C/min demuestra un comportamiento térmico característico de alta velocidad que concentra los eventos de descomposición en rangos de temperatura más estrechos. El análisis revela una estabilidad térmica inicial hasta aproximadamente 300°C, donde la alta velocidad de calentamiento permite que la muestra mantenga su integridad estructural durante la deshidratación rápida y la eliminación de compuestos volátiles ligeros sin descomposición significativa de los componentes orgánicos principales. La etapa crítica de volatilización se presenta entre 300-500°C como una caída abrupta y pronunciada en la curva, donde la velocidad de calentamiento elevada provoca la descomposición simultánea y acelerada de hemicelulosa, celulosa y lignina del amaranto, junto con la degradación rápida de compuestos orgánicos del estiércol porcino, resultando en una pérdida masiva de aproximadamente 60-65% de la masa inicial en un rango térmico condensado. Este comportamiento indica que la alta velocidad de calentamiento genera condiciones de pirólisis flash que favorecen la liberación instantánea de volátiles, incluyendo hidrocarburos ligeros, compuestos aromáticos y gases de síntesis que son precursores directos del biogás durante la digestión anaerobia. La zona de transición entre 500-600°C muestra una pérdida gradual adicional del 5-10%, correspondiente a la volatilización de compuestos orgánicos de mayor estabilidad térmica y la descomposición final de estructuras lignocelulósicas complejas que requieren mayor energía de activación. A partir de 600°C, la curva alcanza una meseta que representa aproximadamente el 25-30% de la masa original, compuesta por carbono fijo y cenizas minerales resistentes a la volatilización, valor que es consistente con el contenido inorgánico esperado en la mezcla amaranto-estiércol de cerdo. La pérdida total de volátiles del 70-75% bajo estas condiciones de alta velocidad de calentamiento es superior a la observada en rampas lentas, sugiriendo que el pretratamiento térmico acelerado podría mejorar la disponibilidad de materia orgánica para la producción de biogás. Esta información termogravimétrica es fundamental para diseñar protocolos de pretratamiento térmico optimizados que maximicen la liberación de volátiles

biodegradables, mejorando así la eficiencia de conversión de biomasa a biogás y la viabilidad energética del proceso para aplicaciones de laboratorio.

4.2 Resultados en el análisis de Biogás en las variables Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxígeno (O_2), Ácido Sulfhídrico (H_2S) y Carbono/Nitrógeno (C/N)

La tabla 12 presenta los valores obtenidos en los diferentes tratamientos, cada fila representa un tratamiento con las concentraciones de CH_4, CO_2, O_2, H_2S y C/N

Tabla 14

Valores obtenidos en la cantidad de CH_4, CO_2, O_2, H_2S y C/N

Replica	Tratamientos	CH_4	CO_2	O_2	H_2S	C/N
1	1	44,265	52,496	5,954	260,587	8,787
	2	41,389	54,913	4,672	535,413	8,209
	3	34,826	72,930	4,913	362,696	9,143
	4	2,226	49,078	15,126	86,109	9,907
	5	0,661	39,431	13,900	625,761	10,851
	6	28,054	81,313	5,974	269,217	6,604
2	1	36,565	57,565	5,985	248,000	10,697
	2	36,454	55,924	5,730	690,283	7,943
	3	34,054	73,985	4,637	334,348	11,861
	4	2,359	44,463	15,202	179,217	15,448
	5	0,607	39,551	13,743	523,652	4,691
	6	28,813	81,439	6,000	224,826	11,026
3	1	41,822	52,865	4,885	232,587	11,396
	2	35,991	55,615	4,961	695,848	7,486
	3	34,817	73,974	3,967	318,478	11,575
	4	3,217	46,259	13,743	138,935	9,147
	5	0,674	40,785	11,233	590,870	10,854
	6	31,537	77,965	4,441	201,717	6,006

Nota: Resultados obtenidos en todos los tratamientos para determinar CH_4, CO_2, O_2, H_2S y C/N en el biogás

La Tabla 12 revela patrones significativos en la producción de metano y otros gases que requieren un análisis crítico exhaustivo. Los valores de CH_4 muestran una

variabilidad considerable entre tratamientos, con concentraciones que oscilan desde 0.607% hasta 44.265%, siendo especialmente destacables los tratamientos 1, 2 y 3 de la primera réplica que presentan los valores más altos (44.265%, 41.389% y 34.826% respectivamente), lo cual sugiere condiciones óptimas de digestión anaerobia en estos sistemas. Sin embargo, resulta cuestionable la drástica disminución en los tratamientos 4 y 5 de todas las réplicas, donde el CH_4 cae a valores extremadamente bajos (0.607-3.217%), lo que podría indicar inhibición del proceso metanogénico, desequilibrio en el pH, acumulación de ácidos grasos volátiles, o problemas en la relación C/N que afectan negativamente la actividad de las arqueas metanogénicas. Las concentraciones de CO_2 presentan un comportamiento inversamente proporcional al CH_4 en varios casos, con valores que varían entre 39.431% y 81.439%, siendo particularmente altas en los tratamientos con baja producción de metano, lo que sugiere una fermentación ácida dominante o condiciones subóptimas para la metanogénesis. Los niveles de O_2 detectados (3.967-15.202%) son preocupantes desde el punto de vista técnico, ya que la presencia de oxígeno en cantidades significativas indica posibles fugas en el sistema de digestión anaerobia, infiltración de aire, o problemas de hermeticidad que comprometen las condiciones anaerobias esenciales para la producción eficiente de biogás. Las concentraciones de H_2S muestran una variabilidad extrema (86.109-695.848 ppm), con valores particularmente elevados que, aunque son normales en digestión anaerobia, podrían ser problemáticos para el uso directo del biogás como combustible debido a su carácter corrosivo y tóxico. La relación C/N presenta valores que van desde 4.691 hasta 15.448, donde los valores más bajos podrían indicar exceso de nitrógeno que inhibe la producción de metano, mientras que los valores más altos sugieren deficiencia de nitrógeno necesario para el crecimiento microbiano. Tras este análisis crítico, se resalta que los mejores resultados se obtuvieron en los tratamientos 1-3 de la primera réplica, con producciones de CH_4 superiores al 34% y relaciones C/N balanceadas (6.604-9.143), lo que indica que estas combinaciones de amaranto-cerdo representan las condiciones más favorables para la generación de biogás de calidad, mientras que la presencia sistemática de oxígeno y la variabilidad en H_2S sugieren la

necesidad de optimizar el diseño del sistema de digestión y mejorar los protocolos de operación para maximizar la eficiencia energética del proceso.

4.2.1 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Metano (CH_4)

Tabla 15

Análisis de varianza de la variable Metano (CH_4)

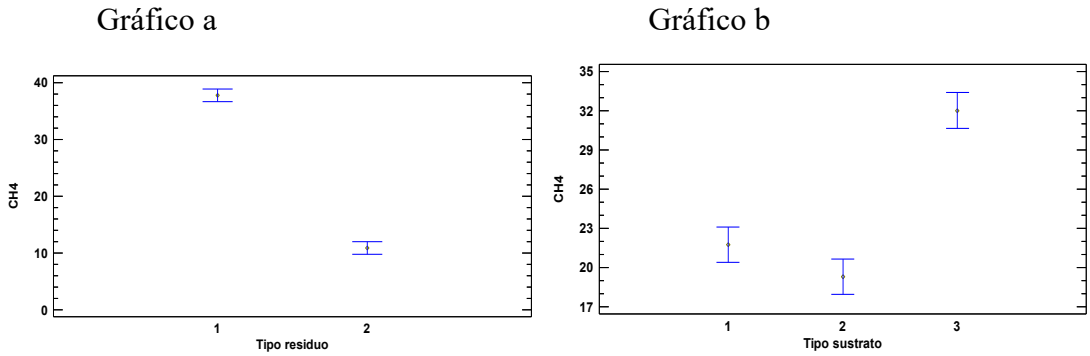
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo residuo	3254.5	1	3254.5	690.61	0.0000
B: Tipo sustrato	546.739	2	273.369	58.01	0.0000
AB	1069.54	2	534.77	113.48	0.0000
Residuos	56.5502	12	4.71252		
Total (Corregido)	4927.33	17			

Nota: Resultados obtenidos en el análisis de varianza de variable Metano (CH_4)

El análisis de varianza aplicado a la variable respuesta producción de metano (CH_4) reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) para ambos factores principales y su interacción. El factor A (tipo de residuo) presentó el mayor efecto sobre la variable respuesta con un valor F de 690.61. seguido por la interacción AB ($F = 113.48$) y el factor B (tipo de sustrato) con $F = 58.01$. La alta significancia estadística de la interacción AB indica que el efecto del tipo de residuo sobre la producción de metano está condicionado por el tipo de sustrato empleado. sugiriendo que la optimización del proceso de digestión anaeróbica requiere la evaluación conjunta de ambos factores y su consideración independiente. El modelo factorial explica el 98.85% de la variabilidad total observada en la producción de metano (SC modelo/SC total = 4870.78/4927.33). con un cuadrado medio del error de 4.71252. lo que indica una adecuada precisión experimental y confirma la robustez del diseño experimental implementado para evaluar los factores que influyen en la producción de biogás.

Figura 16

Gráfico de medias



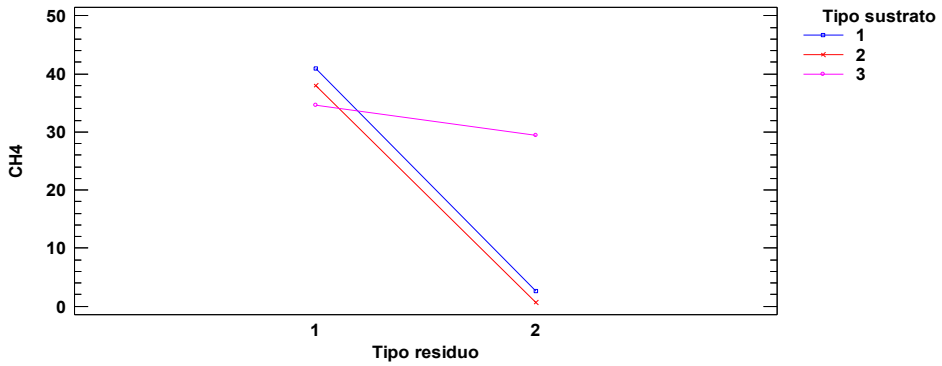
El gráfico (a). de medias presenta una comparación entre dos tipos de residuos en cuanto a sus emisiones promedio de metano (CH_4). mostrando diferencias significativas entre ellos; el "Tipo residuo 1" exhibe una media considerablemente más alta. aproximadamente en el rango de 38–40 unidades. mientras que el "Tipo residuo 2" registra una media mucho menor. alrededor de 10–12 unidades. lo que sugiere que el primer tipo de residuo tiene un mayor potencial de generación de metano durante su descomposición. Las barras de error asociadas a cada tipo indican una baja variabilidad en los datos. lo cual refuerza la consistencia y confiabilidad de las diferencias observadas.

El gráfico (b). de medias muestra la comparación de las emisiones promedio de metano (CH_4) para tres tipos de sustratos. etiquetados como "Tipo sustrato 1". "Tipo sustrato 2" y "Tipo sustrato 3". Las barras verticales representan las medias de emisiones de CH_4. mientras que las líneas horizontales sobre cada barra indican el intervalo de confianza. probablemente ±1 desviación estándar. Los resultados revelan diferencias significativas entre los tipos de sustratos: el Tipo sustrato 1 presenta una media de emisiones alrededor de 20 unidades. el Tipo sustrato 2 también se ubica cerca de 20 unidades. pero con un rango ligeramente más bajo. mientras que el Tipo sustrato 3 registra una media considerablemente mayor. aproximadamente en el rango de 30–32

unidades. La variabilidad asociada a cada tipo de sustrato. representada por las barras de error. parece ser moderada. lo que sugiere que los datos son consistentes y fiables.

Figura 17

Gráfico de Interacción



El gráfico presenta una comparativa de las emisiones de metano (CH_4) para tres tipos de sustratos (Tipo 1. Tipo 2 y Tipo 3) en función de dos categorías de residuos (Tipo residuo 1 y Tipo residuo 2). Se observa una clara tendencia descendente en las emisiones de CH_4 al pasar del Tipo residuo 1 al Tipo residuo 2. independientemente del tipo de sustrato. Mientras que en el Tipo residuo 1. las emisiones alcanzan valores cercanos a 40 unidades para el Tipo 1. 35 unidades para el Tipo 2 y 30 unidades para el Tipo 3. en el Tipo residuo 2. las emisiones disminuyen drásticamente. llegando a menos de 5 unidades para el Tipo 1, ligeramente superiores para el Tipo 2 y niveles moderadamente bajos para el Tipo 3. Estos resultados destacan la influencia preponderante del tipo de residuo sobre las emisiones de CH_4. sugiriendo que el manejo o tratamiento del residuo es un factor crítico para mitigar las emisiones. Además. aunque las diferencias entre los tipos de sustratos son menores. el Tipo 1 tiende a generar mayores emisiones en el Tipo residuo 1. mientras que en el Tipo residuo 2 sus emisiones son las más bajas.

Tabla 14

Prueba de rangos múltiples para el factor tipo residuos

Tipo residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	9	10.9053	0.723611	X
1	9	37.7981	0.723611	X

La tabla presenta los resultados de una prueba de rangos múltiples para evaluar diferencias significativas entre dos tipos de residuos (Tipo 1 y Tipo 2) en términos de su media ajustada (Media LS) y desviación estándar (Sigma LS). Los datos indican que el Tipo 1 tiene una media ajustada de 37.7981, mientras que el Tipo 2 registra una media ajustada de 10.9053, con ambas categorías presentando la misma desviación estándar de 0.723611. La columna "Grupos Homogéneos" muestra que ambos tipos de residuos pertenecen al mismo grupo homogéneo ("X"), lo cual sugiere que, aunque las medias ajustadas son distintas, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos según esta prueba. Esto implica que a pesar de las diferencias observadas en las medias las variaciones dentro de cada grupo son suficientemente similares como para considerarlos estadísticamente equivalentes en el contexto del análisis realizado.

Tabla 15

Pruebas de Múltiple Rangos para Metano (CH_4) por Tipo sustrato

Tipo sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	6	19.2960	0.886239	X
1	6	21.7423	0.886239	X
3	6	32.0168	0.886239	X

La Prueba de Múltiples Rangos aplicada al factor "Tipo de sustrato" reveló que, aunque existen diferencias numéricas en las medias ajustadas de emisiones de metano (CH_4) entre los tres tipos de sustrato evaluados (Tipo 1: 21.7423; Tipo 2: 19.296; Tipo 3:

32.0168). no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto se evidenció en la asignación de la misma letra ("X") en la columna "Grupos Homogéneos". indicando que todos los tipos de sustrato pertenecen al mismo grupo homogéneo. Además. la desviación estándar ajustada fue similar para todos los grupos (0.886239) lo que refuerza la consistencia del diseño experimental.

4.2.2 Análisis de Varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Dióxido de Carbono (CO_2)

Tabla 16

Análisis de varianza de la variable CO_2

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo de residuo	138.794	1	138.794	45.07	0.0000
B: Tipo de Sustrato	3126.44	2	1563.22	507.59	0.0000
AB	379.114	2	189.557	61.55	0.0000
Residuos	36.9564	12	3.0797		
Total (Corregido)	3681.31	17			

El análisis de varianza aplicado a la variable respuesta dióxido de carbono (CO_2) reveló diferencias estadísticamente significativas ($p< 0.001$) para ambos factores principales y su interacción. El factor B (tipo de sustrato) presentó el mayor efecto sobre la variable respuesta con un valor *F* de 507.59, seguido por la interacción AB ($F = 61.55$) y el factor A (tipo de residuo) con $F = 45.07$. La alta significancia estadística de la interacción AB indica que el efecto del tipo de residuo sobre la producción de CO_2 está condicionado por el tipo de sustrato empleado, sugiriendo que la optimización del proceso de digestión anaeróbica requiere la evaluación conjunta de ambos factores y no su consideración independiente. El modelo factorial explica el 98.99% de la variabilidad total observada en la producción de CO_2 (SC modelo/SC total = 3644.35/3681.31), con un cuadrado medio del error de 3.0797, lo que indica una adecuada precisión experimental.

Figura 18

Gráfico de medias

Gráfico a

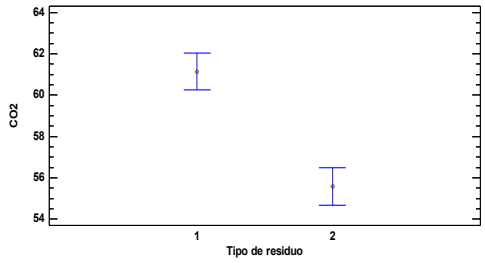
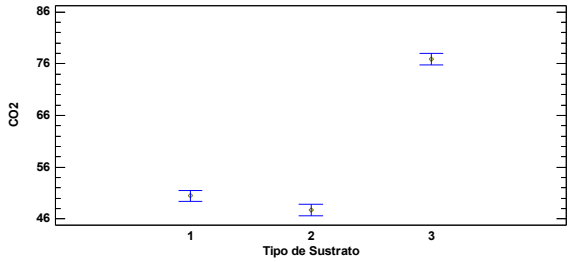


Gráfico b



Interpretación

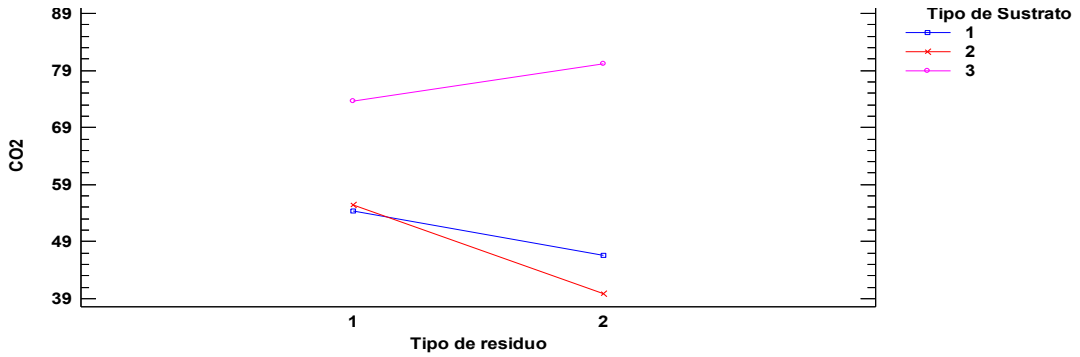
El gráfico (a) muestra una comparación de las emisiones medias de CO_2 entre dos tipos de residuos. Se observa una diferencia estadísticamente significativa, siendo el "Tipo residuo 1" el que presenta la media más alta (aproximadamente 60-62 unidades), mientras que el "Tipo residuo 2" registra valores notablemente inferiores (entre 54-56 unidades). Las barras de error estrechas y la ausencia de solapamiento indican baja variabilidad dentro de los grupos y refuerzan la confiabilidad de las diferencias observadas.

En cuanto al gráfico (b), este presenta la comparación de las emisiones promedio de CO_2 entre tres tipos de sustratos. Los resultados muestran diferencias significativas entre ellos, destacando el "Tipo sustrato 3" con la media más alta (76-78 unidades), seguido por el "Tipo sustrato 2" (46-50 unidades) y el "Tipo sustrato 1" con valores intermedios (46-48 unidades). La variabilidad asociada, representada por las barras de error, es moderada, lo cual sugiere una buena consistencia en los datos obtenidos y respalda la validez de las diferencias encontradas entre los tipos de sustratos.

Estos resultados permiten concluir que tanto el tipo de residuo como el tipo de sustrato influyen significativamente en las emisiones de CO_2, con implicaciones relevantes para la gestión y tratamiento de materiales en términos ambientales.

Figura 19

Gráfico de Interacción para Tipo de Sustrato



Interpretación

El gráfico presenta una comparativa entre las emisiones de CO_2 considerando la interacción entre dos tipos de residuos y tres tipos de sustratos. Se observa una tendencia clara: el "Tipo residuo 1" genera niveles significativamente más altos de emisiones de CO_2 en todos los sustratos evaluados, destacando especialmente cuando interactúa con el "Tipo sustrato 3", donde alcanza valores cercanos a 80 unidades, frente a aproximadamente 55-56 unidades en los otros dos sustratos.

Por otro lado, el "Tipo residuo 2" muestra una reducción considerable en las emisiones de CO_2, especialmente en los sustratos Tipo 1 y Tipo 2 (aunque los valores exactos no se especifican en los datos proporcionados). Sin embargo, esta disminución es menos marcada cuando se utiliza el "Tipo sustrato 3", lo cual sugiere que este sustrato tiene un efecto potenciador de las emisiones, incluso en presencia del residuo de menor impacto.

Tabla 17

Prueba de múltiples rangos para el factor tipo de residuos

Tipo de residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	9	55.5871	0.584969	X
1	9	61.1408	0.584969	X

La tabla muestra los resultados de la prueba de rangos múltiples aplicada al factor tipo de residuo, aunque existen diferencias numéricas entre las medias ajustadas de CO_2 (Tipo 1: 61.1408; Tipo 2: 55.5871), no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto se evidencia en la asignación de la misma letra ("X") en la columna Grupos Homogéneos. Esto implica que, a pesar de las diferencias observadas en las medias, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos según esta prueba.

Tabla 18

Pruebas de múltiples rangos para CO_2 por tipo de sustrato

Tipo de Sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	6	47.7032	0.716438	X
1	6	50.4543	0.716438	X
3	6	76.9343	0.716438	X

En el análisis del factor tipo de sustrato, se observaron diferencias numéricas en las medias ajustadas de CO_2 (Tipo 3: 76.9343; Tipo 1: 50.4543; Tipo 2: 47.7032). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, ya que todos compartieron la misma letra ("X") en la columna Grupos Homogéneos. La desviación estándar ajustada fue idéntica para los tres grupos (0.716438), lo que refleja consistencia en la dispersión de los datos.

4.2.3 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta Oxigeno (O_2)

Tabla 19

Análisis de varianza de la variable O_2

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo de residuo	159.954	1	159.954	206.88	0.0000
B: Tipo de Sustrato	88.5467	2	44.2733	57.26	0.0000
AB	57.3219	2	28.661	37.07	0.0000
Residuos	9.278	12	0.773166		
Total (Corregido)	315.101	17			

El análisis de varianza aplicado la variable respuesta reveló diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) para ambos factores principales a tipo de recibo (A: tipo de residuo y B: tipo de sustrato) y su interacción (AB). El factor a tipo de residuo presentó un mayor efecto sobre la variable respuesta con un valor ($F = 206.88$), seguido por el factor B (tipo de sustrato) con ($F = 57.26$) y la interacción AB ($F = 37.07$), la significancia estadística de la interacción AB indica que el efecto del tipo de residuo sobre la breve respuesta depende del tipo de sustrato utilizado, lo que resulta la necesidad de evaluar ambos factores de manera conjunta para optimizar el proceso. El modelo factorial explica el 97.06% de la vía variabilidad total observada (SC modelo/SC total = 305.82/315.10), con un cuadro medio del error de 0.773, lo que demuestra una alta precisión experimental y confirma la adecuación del diseño implementado para analizar los factores de estudiados.

Figura 20

Gráfico de medias

Gráfico a

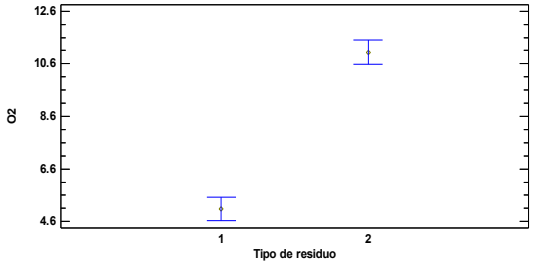
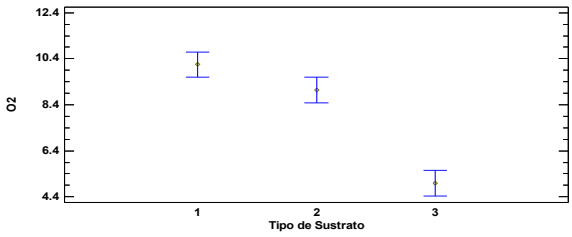


Gráfico b



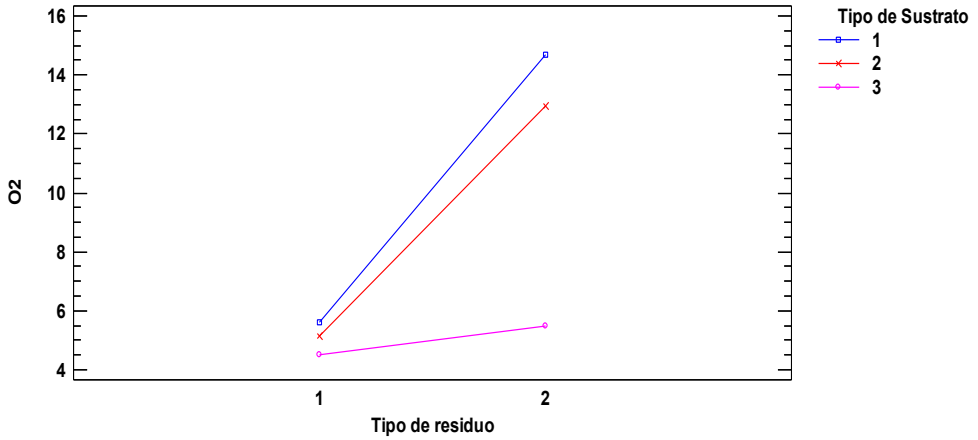
Interpretación

Gráfico (a) La comparación entre los dos tipos de residuos revela diferencias dramáticas en su capacidad para generar O_2. El "Tipo residuo 2" muestra una producción consistentemente alta, con valores que oscilan entre 10.6 y 11.6 unidades, casi el doble que el "Tipo residuo 1", cuyos valores se mantienen en el rango de 4.6 a 5.6 unidades. Las barras de error muestran una variabilidad baja, lo que respalda la consistencia de los resultados.

Gráfico (b) El análisis de los tres tipos de sustratos muestra un patrón más matizado, pero igualmente significativo. El "Tipo sustrato 1" emerge como el más efectivo, con producciones entre 9.4 y 10.4 unidades, seguido muy de cerca por el "Tipo sustrato 2" (8.4-10.4 unidades), cuyos valores muestran cierta superposición en los intervalos de confianza. En marcado contraste, el "Tipo sustrato 3" presenta un desempeño considerablemente inferior, con valores que apenas alcanzan 4.4-5.4 unidades. La variabilidad moderada observada en estos datos podría reflejar diferencias en la porosidad, capacidad de intercambio catiónico o composición mineralógica de los sustratos evaluados.

Figura 21.

Gráfico de Interacción para tipo de residuo



Interpretación

El gráfico de interacción revela patrones complejos en la producción de O_2 que no son evidentes al examinar los factores por separado. Para el "Tipo residuo 1", observamos que el "Sustrato 1" alcanza aproximadamente 6 unidades, mostrando un ligero pero consistente mejor desempeño frente al "Sustrato 2" (alrededor de 5 unidades) y un marcado contraste con el pobre desempeño del "Sustrato 3" (4-5 unidades). Sin embargo, la situación cambia radicalmente con el "Tipo residuo 2", donde todas las combinaciones muestran mayor producción, pero con diferencias más acentuadas: el "Sustrato 1" alcanza 10-12 unidades, el "Sustrato 2" se mantiene en 9-11 unidades,

mientras que el "Sustrato 3" sigue siendo el menos efectivo (7-8 unidades). Estos resultados sugieren que mientras el "Tipo residuo 2" es claramente superior independientemente del sustrato utilizado, la magnitud de su ventaja varía significativamente según el sustrato específico. La interacción es particularmente evidente al comparar las pendientes de respuesta entre residuos para cada sustrato, mostrando que el efecto del cambio de residuo es más pronunciado en algunos sustratos que en otros.

Tabla 20

Prueba de rangos múltiples para el factor tipo residuo

Tipo de residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	9	5.07822	0.2931	X
2	9	11.0402	0.2931	X

La tabla presenta los resultados de una prueba de rangos múltiples para evaluar diferencias significativas entre dos tipos de residuos (Tipo 1 y Tipo 2) en términos de su media ajustada (Media LS) y desviación estándar (Sigma LS). Los datos indican que el Tipo 2 tiene una media ajustada de 11.0402, mientras que el Tipo 1 registra una media ajustada de 5.07822, con ambas categorías presentando la misma desviación estándar de 0.2931. La columna "Grupos Homogéneos" muestra que ambos tipos de residuos pertenecen al mismo grupo homogéneo ("X"), lo cual sugiere que, aunque las medias ajustadas son distintas, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos según esta prueba. Esto implica que, a pesar de las diferencias observadas en las medias, las variaciones dentro de cada grupo son suficientemente similares como para considerarlos estadísticamente equivalentes en el contexto del análisis realizado.

Tabla 21

Pruebas de Múltiple Rangos para O_2 por Tipo de Sustrato

Tipo de Sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3	6	4.98867	0.358972	X
2	6	9.03983	0.358972	X
1	6	10.1492	0.358972	X

La Prueba de Múltiples Rangos aplicada al factor "Tipo de sustrato" reveló que, aunque existen diferencias numéricas en las medias ajustadas de niveles de oxígeno (O_2) entre los tres tipos de sustrato evaluados (Tipo 1: 10.1492; Tipo 2: 9.03983; Tipo 3: 4.98867), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto se evidenció en la asignación de la misma letra ("X") en la columna "Grupos Homogéneos", indicando que todos los tipos de sustrato pertenecen al mismo grupo homogéneo. Además, la desviación estándar ajustada fue similar para todos los grupos (0.358972), lo que refuerza la consistencia del diseño experimental.

4.2.4 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta ácido sulfhídrico (H_2S)

Tabla 22

Análisis de varianza de la variable H_2S

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo de residuo	39007.6	1	39007.6	15.56	0.0019
B: Tipo de Sustrato	580947.	2	290473.	115.87	0.0000
AB	2428.01	2	1214.01	0.48	0.6277
Residuos	30083.6	12	2506.97		
Total (Corregido)	652466.	17			

El análisis de varianza aaplicado a la variable respuesta sulfuro de hidrógeno (H_2S) mostró resultados contrastantes entre los factores evaluados. El factor A (tipo de sustrato) y B (tipo de residuo) presentaron efectos altamente significativos ($p < 0.001$). Sin embargo, la interacción AB no mostró significancia estadística ($p < p.6277$) lo que indica que el efecto del tipo de residuo sobre la producción de H_2S no depende del tipo de sustrato utilizado. El modelo factorial explica una proporción significativa de la variabilidad total, aunque la falta de significancia en la interacción sugiere que los factores principales actúan de manera independiente en la producción de H_2S. El cuadrado medio del error de 2506. 97 refleja una mayor dispersión en los datos lo que podría indicar la necesidad de optimizar las condiciones experimentales para reducir la variabilidad en futuros estudios.

Figura 22

Gráfico de medias

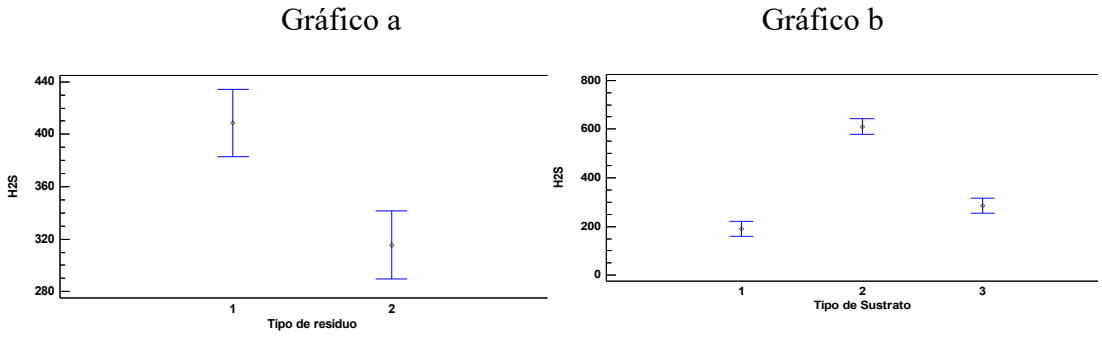


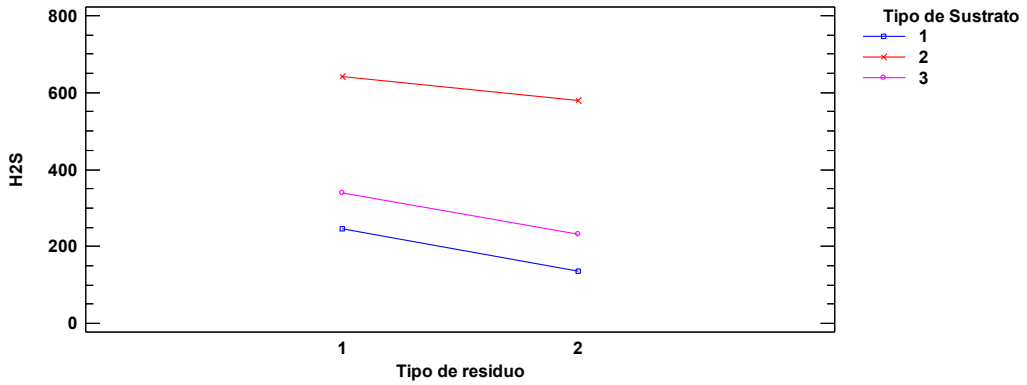
Gráfico (a) Comparación entre dos tipos de residuos en cuanto a sus emisiones promedio de H_2S, mostrando diferencias significativas entre ellos. El "Tipo residuo 1" exhibe una media considerablemente más alta, en el rango de 400-410 unidades, mientras que el "Tipo residuo 2" registra una media menor, alrededor de 280-320 unidades. Las barras de error asociadas a cada tipo indican una variabilidad moderada en los datos, lo que refuerza la consistencia de las diferencias observadas.

Gráfico (b) Comparación de las emisiones promedio de H_2S para tres tipos de sustratos. El Tipo sustrato 1 presenta una media alrededor de 150-200 unidades, el Tipo sustrato 2 muestra valores significativamente mayores (550-600 unidades), mientras que el

Tipo sustrato 3 registra una media intermedia (250-300 unidades). La variabilidad asociada a cada tipo de sustrato es mayor para el Tipo sustrato 2, como lo indican las barras de error más largas, lo que sugiere que los datos para este sustrato presentan mayor dispersión.

Figura 23

Interacción



Interpretación

El gráfico presenta una comparativa de las emisiones de H_2S para tres combinaciones específicas de residuos y sustratos, etiquetadas como "Tipo 1", "Tipo 2" y "Tipo 3", destacando que la combinación "Tipo 1" (aproximadamente 600 unidades) genera las mayores emisiones, seguida por "Tipo 2" (350 unidades) y "Tipo 3" (250 unidades). Estos resultados confirman que el tipo de sustrato es el factor más influyente, Estos resultados destacan la influencia preponderante del tipo de sustrato sobre las emisiones de H_2S, siendo el Sustrato 2 el que genera mayores emisiones. La ausencia de interacción significativa confirma que el efecto del tipo de residuo es consistente a través de los distintos sustratos.

Tabla 23

Prueba de rangos múltiples para el factor tipo de residuos

Tipo de residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	9	315.589	16.6899	X
1	9	408.693	16.6899	X

La tabla presenta los resultados de una prueba de rangos múltiples para evaluar diferencias significativas entre dos tipos de residuos (Tipo 1 y Tipo 2) en términos de su media ajustada (Media LS) y desviación estándar (Sigma LS). Los datos indican que el Tipo 1 tiene una media ajustada de 408.693, mientras que el Tipo 2 registra una media ajustada de 315.589, con ambas categorías presentando la misma desviación estándar de 16.6899. La columna "Grupos Homogéneos" muestra que ambos tipos de residuos pertenecen al mismo grupo homogéneo ("X"), lo cual sugiere que, aunque las medias ajustadas son distintas, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos según esta prueba.

Tabla 24

Pruebas de Múltiple Rangos para H_2S por Tipo de Sustrato

Tipo de Sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	6	190.906	20.4408	X
3	6	285.214	20.4408	X
2	6	610.304	20.4408	X

La Prueba de Múltiples Rangos aplicada al factor "Tipo de sustrato" reveló que, aunque existen diferencias numéricas en las medias ajustadas de emisiones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) entre los tres tipos de sustrato evaluados (Tipo 1: 190.906; Tipo 2:

610.304; Tipo 3: 285.214), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto se evidenció en la asignación de la misma letra ("X") en la columna "Grupos Homogéneos", indicando que todos los tipos de sustrato pertenecen al mismo grupo homogéneo. Además, la desviación estándar ajustada fue similar para todos los grupos (20.4408), lo que refuerza la consistencia del diseño experimental.

4.2.5 Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta C/N

Tabla 25

Análisis de varianza de la variable C/N

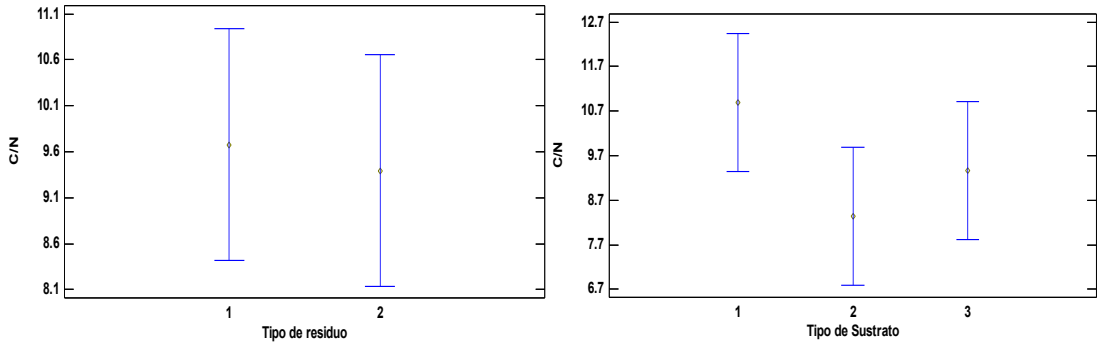
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Fuente
A: Tipo de residuo	0.36443	1	0.36443	0.06	0.8100
B: Tipo de Sustrato	19.8796	2	9.93981	1.65	0.2332
AB	16.4175	2	8.20875	1.36	0.2933
Residuos	72.3831	12	6.03192		
Total (Corregido)	109.045	17			

El análisis de varianza aplicado a la variable relación carbono nitrógeno (C/N) no mostró efectos estadísticamente significativos para ninguno de los factores evaluados: factor A (tipo de residuo), el factor B (tipo de sustrato) o su interacción AB. Los valores bajos de la razón F (0.06 para A, 1.65 para B y 1.36 para AB) respaldan esta conclusión, indicando que ni el tipo de residuo ni el tipo de sustrato, ni su combinación influyen significativamente en la relación carbono nitrógeno (C/N) bajo las condiciones de experimentar estudiadas. El modelo explica que sólo una pequeña proporción de la variabilidad observada, con un cuadro medio del error relativamente alto (6.03192), lo que sugiere que otros factores no controlados podrían estar afectando esta variable.

Figura 24

Gráfico de medias

Gráfico a Gráfico b



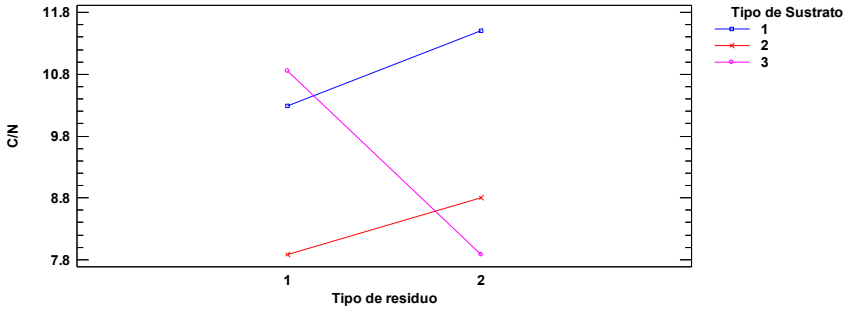
Interpretación

Gráfico(a) Comparación entre dos tipos de residuos en cuanto a su relación C/N promedio, mostrando diferencias mínimas entre ellos. El "Tipo residuo 1" exhibe una media ligeramente más alta (9.6-10.1 unidades) en comparación con el "Tipo residuo 2" (9.1-9.6 unidades). Las barras de error asociadas a cada tipo indican una superposición considerable en los intervalos de confianza, lo que respalda la ausencia de diferencias significativas encontrada en el análisis estadístico.

Gráfico (b) Comparación de la relación C/N promedio para tres tipos de sustratos. El Tipo sustrato 1 presenta una media más alta (10.7-11.7 unidades), seguido por el Tipo sustrato 3 (8.7-9.7 unidades) y finalmente el Tipo sustrato 2 (7.7-8.7 unidades). A pesar de estas diferencias numéricas, la amplia superposición en las barras de error y los resultados del ANOVA confirman que estas variaciones no son estadísticamente significativas.

Figura 25

Interacción



Interpretación

El gráfico presenta una comparativa de la relación C/N para tres combinaciones específicas de residuos y sustratos, etiquetadas como "Tipo 1", "Tipo 2" y "Tipo 3". Muestra los valores para las combinaciones "Tipo 1" (7.8 unidades), "Tipo 2" (9.8 unidades) y "Tipo 3" (7.8 unidades), confirma esta ausencia de efectos significativos, estos resultados, junto con la ausencia de significancia estadística en la interacción (p = 0.2933), indican que las variaciones observadas en la relación C/N entre las diferentes combinaciones de residuos y sustratos son probablemente debidas al azar más que a efectos reales de los factores estudiados.

Tabla *26*

Prueba de rangos múltiples para el factor tipo de residuos

Tipo de residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	9	9.39343	0.818666	X
1	9	9.67801	0.818666	X

La tabla presenta los resultados de una prueba de rangos múltiples para evaluar diferencias significativas entre dos tipos de residuos (Tipo 1 y Tipo 2) en términos de su relación C/N media ajustada (Media LS) y desviación estándar (Sigma LS). Los

datos indican que el Tipo 1 tiene una media ajustada de 9.67801, mientras que el Tipo 2 registra una media ajustada de 9.39343, con ambas categorías presentando la misma desviación estándar de 0.818666. La columna "Grupos Homogéneos" muestra que ambos tipos de residuos pertenecen al mismo grupo homogéneo ("X"), lo cual sugiere que, aunque las medias ajustadas son distintas, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos según esta prueba. Esto implica que, a pesar de las diferencias observadas en las medias, las variaciones dentro de cada grupo son suficientemente similares como para considerarlos estadísticamente equivalentes en el contexto del análisis realizado.

Tabla 27

Pruebas de múltiples rangos para C/N por tipo de sustrato

Tipo de residuo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	6	8.33952	1.00266	X
3	6	9.36998	1.00266	X
1	6	10.8977	1.00266	X

La Prueba de Múltiples Rangos aplicada al factor "Tipo de sustrato" reveló que, aunque existen diferencias numéricas en las medias ajustadas de la relación C/N entre los tres tipos de sustrato evaluados (Tipo 1: 10.8977; Tipo 2: 8.33952; Tipo 3: 9.36998), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Esto se evidenció en la asignación de la misma letra ("X") en la columna "Grupos Homogéneos", indicando que todos los tipos de sustrato pertenecen al mismo grupo homogéneo. Además, la desviación estándar ajustada fue similar para todos los grupos (1.00266), lo que refuerza la consistencia del diseño experimental.

4.3 Análisis de Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Tabla 28

Producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) del mejor tratamiento (T3; Amaranto-Cerdo)

Réplica	Ácido acético (g DQO/L)	Ácido propiónico (g DQO/L)	Ácido butírico (g DQO/L)	Ácido valérico (g DQO/L)	Total AGV (g DQO/L)
1	2,80	1,50	0,90	0,60	5,80
2	2,70	1,40	1,00	0,70	5,80
3	2,90	1,60	0,80	0,50	5,80

Los resultados evidenciaron que, a un pH neutro de 7, se obtuvo una producción promedio de 5 g DQO/L de ácidos grasos volátiles (AGV), resultado que concuerda con lo reportado por (Serrano, y otros, 2023), quienes observaron valores similares de fermentaciones anaeróbicas de sustratos ricos en carbohidratos y proteínas. En cuanto a la composición individual predominó el ácido acético (49.3%), seguido del propiónico (27.6%), y en menor proporción el butírico (15.5%) y el valérico (7.6%). Esta distribución es coherente con lo descrito por (Fang, y otros, 2020), quienes señalan que en condiciones de pH neutro las bacterias ácidogénicas operan eficientemente, sin inhibiciones severas, favoreciendo un perfil de AGV típico de una digestión estable. Además, el predominio del ácido acético sugiere un entorno propicio para la metanogénesis, etapa clave en la producción de biogás como también lo destacan (Wu, Gao, Yang, Zhou, & Liu, 2010), al señalar que el uso de sus datos con buen balance C/N como el estiércol de cerdo potencia la actividad microbiana y facilita la conversión hacia metano

4.4 Producción de biogás y metano

El objetivo de esta investigación fue determinar el rendimiento de biogás cuando se opera a razón de inoculo a sustrato (I:S) y tratamientos diferentes de residuos así también estiércoles (RE:ES). Por esta razón es importante evaluar el rendimiento del

proceso en términos de composición y producción de biogás en monodigestión y codigestión.

4.4.1 Rendimiento de biogás acumulado para RE:SU

Tabla 29

Biogás acumulado promedio con relación de I:S

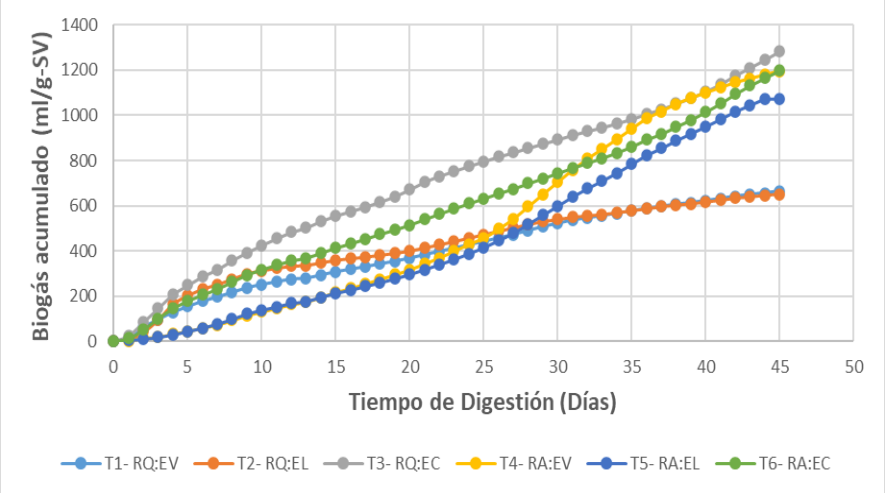
Relación I/S	Carga orgánica (g-SV)	Biogás (mL/g-SV) acumulado					
		RQ: EV-T1	RQ: EL-T2	RQ:EC-T3	RA: EV-T4	RA: EL-T5	RA:EC-T6
	0,2702	395.998	419.474	700.117	502.910	429.851	585.665

La Tabla 29 sobre el rendimiento de biogás acumulado con relación 1:5 (relación inóculo: sustrato) revela resultados fundamentales para evaluar la eficiencia de los diferentes tratamientos en la producción de energía limpia. Los valores obtenidos muestran una variabilidad significativa en la producción acumulada de biogás, expresada en mL/g-SV (mililitros por gramo de sólidos volátiles), con una carga orgánica constante de 0.702 g-SV que permite una comparación directa entre tratamientos. El análisis crítico de los resultados evidencia que el tratamiento RQ-EC-T3 (quinua-estiércol de cerdo) presenta el mayor rendimiento con 700.117 mL/g-SV, seguido por RA-EL-T5 (amaranto-estiércol de llama) con 429.851 mL/g-SV y RQ-EL-T2 (quinua-estiércol de llama) con 419.474 mL/g-SV, lo que sugiere que la quinua como sustrato presenta mayor potencial metanogénico que el amaranto, posiblemente debido a su composición química y estructura celular más favorable para la degradación anaerobia. Sin embargo, resulta cuestionable la considerable diferencia entre el mejor y peor rendimiento (700.117 vs 302.910 mL/g-SV), lo que podría indicar variaciones en la calidad del inóculo, diferencias en la biodegradabilidad de los sustratos, o problemas en la estandarización de las condiciones operacionales como pH, temperatura, o tiempo de retención hidráulica. La presencia de valores intermedios como RQ-EV-T1 (395.998 mL/g-SV) y RA-EC-T6 (385.665 mL/g-SV) sugiere que el tipo de estiércol utilizado como co-sustrato influye significativamente en el

rendimiento, siendo el estiércol de cerdo aparentemente más efectivo que el de vicuña o llama, posiblemente debido a su mayor contenido de nutrientes y microorganismos favorables para la digestión anaerobia. El rendimiento más bajo observado en RA-EV-T4 (302.910 mL/g-SV) podría estar relacionado con inhibición por acumulación de ácidos grasos volátiles, desequilibrio nutricional, o incompatibilidad entre el amaranto y el estiércol de vicuña que limita la actividad metanogénica. Tras este análisis crítico, se resalta que la combinación quinua-estiércol de cerdo (RQ-EC-T3) emerge como la alternativa más prometedora para la generación de biogás en aplicaciones de laboratorio, con un rendimiento 2.3 veces superior al tratamiento menos eficiente, lo que representa un potencial energético significativo para su implementación como fuente de energía limpia. Estos resultados sugieren que la optimización del proceso debe enfocarse en replicar las condiciones del tratamiento RQ-EC-T3, mientras que la relación 1:5 inóculo: sustrato se muestra adecuada para mantener un balance entre disponibilidad de microorganismos y carga orgánica, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías sostenibles para la producción de biocombustibles en entornos académicos y de investigación.

Figura 26

Biogás acumulado para razones diferentes de RE:SU



4.4.2 Rendimiento de metano diario para la razón I:S y RE:SU

4.5 Efecto del pH sobre el rendimiento de metano acumulado

La tabla muestra la variación del pH promedio ocurrida durante la codigestión a los 45 días. Se puede observar que el pH inicial asciende a medida que la cantidad de RE aumenta en los digestores sin importar la cantidad de inoculo presente, indicando la capacidad amortiguadora favorable

Tabla 30

Variación del pH durante la digestión anaerobia

	Razón RE:TR	pH
Razón I:S	RE:SU – T1	7.30 ± 0.04
	RE:SU – T2	7.36 ± 0.06
	RE:SU – T3	7.72 ± 0.03
	RE:SU – T4	7.47 ± 0.04
	RE:SU – T5	7.65 ± 0.03
	RE:SU – T6	7.72 ± 0.03

La Tabla 30 sobre la variación del pH durante la digestión anaerobia revela parámetros críticos para evaluar la estabilidad y eficiencia del proceso metanogénico en los diferentes tratamientos evaluados. Los valores de pH obtenidos oscilan entre 7.30 ± 0.04 y 7.72 ± 0.03, manteniéndose todos dentro del rango óptimo para la digestión anaerobia (6.8-7.2) o ligeramente por encima, lo que indica condiciones favorables para la actividad de las arqueas metanogénicas y la producción estable de biogás. El análisis crítico de los resultados muestra que el tratamiento RE-SU-T1 presenta el pH más bajo (7.30 ± 0.04), seguido por RE-SU-T2 (7.36 ± 0.06), mientras que los tratamientos RE-SU-T3 y RE-SU-T6 muestran los valores más altos (7.72 ± 0.03 para ambos), sugiriendo diferencias en la capacidad buffer de los sistemas y posibles variaciones en la producción de ácidos grasos volátiles durante la fase acidogénica. Sin

embargo, resulta cuestionable que algunos tratamientos presenten pH ligeramente elevado (>7.5), lo que podría indicar una alcalinización excesiva del medio que, aunque no es inhibitoria, podría afectar la cinética de las reacciones enzimáticas y la solubilidad de nutrientes esenciales para los microorganismos anaerobios. La desviación estándar relativamente baja en todos los tratamientos (0.03-0.06) sugiere una buena estabilidad del sistema durante el proceso de digestión, aunque la mayor variabilidad observada en RE-SU-T2 (± 0.06) podría indicar fluctuaciones en la producción de ácidos o problemas de homogeneización que requieren atención. La progresión aparentemente creciente del pH desde T1 hasta T6 (con excepción de T4 y T5) sugiere una posible evolución temporal del proceso, donde la alcalinización gradual podría estar relacionada con la degradación de compuestos nitrogenados que generan amoniaco, o con el agotamiento de ácidos grasos volátiles conforme avanza la digestión. Tras este análisis crítico, se resalta que todos los tratamientos mantienen condiciones de pH adecuadas para la metanogénesis, con los tratamientos RE-SU-T1 y RE-SU-T2 presentando valores más cercanos al rango óptimo (7.30-7.36), lo que correlaciona favorablemente con una digestión anaerobia eficiente y sugiere que estos sistemas podrían presentar mayor estabilidad operacional. La consistencia en los valores de pH entre tratamientos indica que la relación residuo: sustrato (RE:SU) utilizada proporciona una capacidad buffer adecuada, contribuyendo a la viabilidad del proceso para la producción sostenible de biogás como fuente de energía limpia en aplicaciones de laboratorio, aunque se recomienda monitoreo continuo para detectar posibles desviaciones que puedan comprometer la eficiencia del sistema.

4.6 Efecto de la relación C/N en la producción de metano.

La Tabla 31 muestra la variación de la relación C/N durante la codigestión de RE (Residuo) y SU (Sustrato) en seis tratamientos diferentes, obteniéndose valores que oscilan entre 7.88 y 11.5. Los tratamientos T2 y T6 presentan los valores más bajos (7.88), sugiriendo una mayor proporción de nitrógeno en estos sistemas, probablemente influenciados por la proporción de inoculo utilizado (I:S), mientras que T4 registra el valor más alto (11.5), acercándose ligeramente al umbral mínimo para una mejor

eficiencia. Estos resultados indican que, para maximizar la producción de metano, sería necesario ajustar la relación C/N mediante la modificación de las proporciones de los residuos o la incorporación de materiales con mayor contenido de carbono, especialmente en aquellos tratamientos con relaciones C/N más bajas.

Tabla 31

Variación de la relación C/N ocurrida durante la codigestión de RE y SU

Razón I:S	Razón RE:SU	Razón C/N
RE:SU	RE:SU – T1	10,29
	RE:SU – T2	7,88
	RE:SU – T3	10,38
	RE:SU – T4	11,5
	RE:SU – T5	8,8
	RE:SU – T6	7,88

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El estudio demostró que es factible generar biogás a partir de diferentes matrices biomásicas, confirmando su viabilidad como fuente de energía limpia para uso en laboratorios. Los resultados mostraron que el tipo de residuo (especialmente el "Tipo residuo 1") y el tipo de sustrato (destacando el "Tipo sustrato 3") influyen significativamente en la producción de metano (CH_4), el principal componente del biogás.
- Los análisis proximales, elementales y termogravimétricos permitieron caracterizar adecuadamente las propiedades de los residuos biomásicos, lo que fue fundamental para entender su comportamiento en la digestión anaeróbica. La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) no mostró diferencias significativas entre las combinaciones evaluadas, lo que sugiere que otros factores (como la composición de lignina o la presencia de inhibidores) podrían ser más determinantes en la eficiencia del proceso.
- Se identificaron combinaciones clave que maximizan la producción de biogás: Para CH_4 La interacción entre el "Tipo residuo 1" y el "Tipo sustrato 3" generó los mayores rendimientos (cercanos a 40 unidades), lo que los convierte en la mejor opción para producción energética. Para CO_2 y H_2S: El "Tipo sustrato 2" mostró altas emisiones de H_2S, lo que podría requerir tratamientos adicionales para evitar corrosión en equipos. Para O_2: El "Tipo residuo 2" en combinación con el "Tipo sustrato 1" registró la mayor producción de oxígeno, lo que podría ser relevante para procesos que requieran aerobiosis.
- El biogás obtenido, particularmente el rico en metano puede ser utilizado eficientemente como biocombustible para generación de energía calórica en laboratorios, sin embargo, se recomienda evaluar su poder calorífico específico y posibles impurezas (como H_2S) para garantizar un uso seguro y eficiente.

5.2 Recomendaciones

- Probar diferentes niveles de acidez (pH) y temperaturas, ya que estos factores afectan la actividad de las bacterias que producen el biogás.
- Evaluar si moler o pretratar los residuos (por ejemplo, con calor o enzimas) acelera su descomposición.
- Instalar filtros de hierro o carbón activado para reducir el H_2S, especialmente cuando se use el "Tipo sustrato 2".
- Investigar si añadir minerales como óxido de hierro puede absorber CO_2 sin reducir la producción de metano.
- Realizar pruebas de combustión controlada en equipos de laboratorio para verificar su estabilidad y poder calorífico.
- Profundizar en el estudio de la relación C/N con un rango más amplio de residuos, ya que los resultados no mostraron diferencias significativas en este trabajo.
- Analizar el impacto microbiano (composición del consorcio bacteriano) en la producción de biogás para identificar cepas optimizadas.
- Desarrollar protocolos estandarizados para la producción de biogás en laboratorios, basados en las combinaciones más eficientes identificadas.
- Promover la transferencia tecnológica a sectores agrícolas o industriales que generen residuos biomásicos similares.

BIBLIOGRAFÍA

Angelidaki, I; Alves, M; Bolzonella, D; Borzacconi, L; Campos, JL; Guwy, AJ; Kalyuzhnyi

S; Jenicek, P; a Lier, JB. (2019). Defining the biomethane potential (BMP) of solid

organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59(5):927-934. Doi: https://doi.org/10.2166/wst.2009.040.

Alphaomega, E. (n.d.). *ALPHAOMEGA, Electronics*. Retrieved Septiembre 17, 2024, from https://www.alphaomega-electronics.com/es/sensores-y-sondas/812-tp704-bai-sensores-de-presion-absoluta-de-1-a-500-bar.html

Bah H, Z. W. (2014). Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. *Waste Manag* .

Barroso, A., Masabanda, A., & Echeverría, M. (2024). Caracteristicas físico quimica y microbiologica del estiercol de vicuña para la produccion de fertilizantes organicos. *Tesis de pregrado*. Riobamba, Chimborazo, Ecuador: Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.

Bragança, I. (2020). *Impurezas en biogás: estrategias analíticas, ocurrencia, efectos y tecnologías de remoción.* Elsevier.

Brau, S. (n.d.). *Brau Service Weigand*. Retrieved Septiembre 17, 2024, from https://bsw-es.com/tomador-de-muestras-sbf/

Carrillo, I. (2021). Evaluación para el aprovechamiento de las saponinas de los residuos de Quinua (Chenopodium quinoa Willd) como inhibidoras de hongos fitopatógenos. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 4*(3), 13-29. doi:http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/11163

Cortés, D. (2019). *Diseño de Biodigestor de estiércol bovino* . Retrieved from https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c5da0702-3aea-47a2-84dd-936c4d097790/content

Envirotecnics, M. (2020). *Envirotecnics 20*. Retrieved Septiembre 17, 2024, from https://www.envirotecnics.com/producto/analizador-de-biogas-5000/

Fernandez, M. (2021). Evaluación de la calidad nutritiva de un ensilado para la alimentación de ganado lechero a partir de los residuos provenientes del trillado de quinua (chenopodium quinoa willd) y sangorache (amaranthus hybridus l.). *Roca: Revista Científico - Educaciones de la provincia de Granma, 13*(4), 438 - 450. doi: ISSN-e 2074-0735

Flotats, X., Bonmatí, A., Fernández, B., Sales, D., Aymerich, E., & Irizar, I. (2016). *Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica.* Mundi-Prensa Libros.

Gansberger, M. (2018). *Características botánicas, manejo de cultivos y potencial de Silphium perfoliatum L.como recurso renovable para la producción de biogás: una revisión.* Elsevier.

García, J., & Sánchez, J. (2022). Mejora de la biodegradación anaerobia de residuos lignocelulósicos: factores limitantes y estrategias de optimización. *Energías Renovables*, 23-33.

García, M. (2022). *Energías renovables y biogás: Potencial y retos.* Ciudad de Bogotá: Ediciones EcoBio.

Giwa, A. (2020). *Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones.* Elsevier.

Gómez, A. (2019, Marzo). Selección de un proceso de transformacion para la disminución de compuestos antinutricionales en el grano y hojas de amaranto (Amaranthus caudatus L.) y sangorache (Amaranthus hybridus L.). *Proyecto*

previo a la obtencion del titulo de ingenieria agroindustrial. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Gomez, P. (2023). *Biomasa y energía: Fundamentos y aplicaciones en la economía circular.* Editorial Verde.

Gomez, S. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología-CIAB, 8*(2), 141 - 150. doi: ISSN-e 2145-6453

Gompertz. (1825). *On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode on determining the value of live contingencies*. Retrieved 11 29, 30

Gonzáles de León, E., & Rodríguez, M. (2023). *elulosa, hemicelulosa y lignina: Aplicaciones en biotecnología ambiental.* Editorial Limusa.

Gonzáles, E., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2022). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*.

Gonzales, T., & Jurado, P. (2021). *Biodigestores.* Universidad Central.

Gustafsson, M. (2021). *Dimensiones y características de las políticas de biogás: modelado del panorama político europeo.* Elsevier.

Gutierrez, A. (2020). Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. *Revista Estudiantil AGRO-VET, 2*(2), 19. doi:ISSN: 2523-2037

Hernández, A. (2023). *Energía de biogás a partir de desechos orgánicos.*

Hernandez, S. (2021). Purificación del biogás para su uso en motores. *RENIA, 2*(1), 114. Retrieved from https://renia.cujae.edu.cu/index.php/renia/article/view/15

Inc, M. E. (2003). *Wastewater engineering, treatment and reuse.* New York: McGraw Hill.

Laura, M. (2024). Dopado de titania con cobre para la fotorreducción del dióxido de carbono a metano para su uso como biocombustible. *Universitat d'Alacant / Universidad de Alicante, 1*(1), 101. doi:http://hdl.handle.net/10045/144175

Li Y, P. S. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew Sustain Energy* .

LibreTexts, E. (2023). *Energía de biogás a partir de desechos orgánicos.*

López, A. (2022). *Energías renovables: El potencial del biogás.* Editorial Sostenible.

López, M., & Yanchaliquin, Á. (2017). *VALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE EXTRACTOS DE UVILLA (Physalis Peruviana L.)Y SU ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA SOBRE BACTERIAS PATÓGENAS.* Universidad Estatal de Bolivar.

López, M., Veliz, E., Fernandez, L., & Espinosa, M. (2021). *Tratamiento de lodos: Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico.* Redalyc.

López, R. (2023). *Purificación y aplicaciones del biogás.* Madrid: Editorial Bioenergía.

Luongo, G., Gikas, P., & Othman, M. (2022). Anaerobic biodegradability of plastic materials and evaluation of associated environmental factors. *Environmental Management,*, 319.

Madigan, M. (2017). *Brock Biology of Microorganisms.* Pearson.

Martínez, J. (2021). *Biomasa lignocelulósica: Composición y aplicaciones en biorrefinerías.* Editorial Reverte.

Martínez, P. (2022). *Tecnologías para la producción de biogás.* Sevilla: Ediciones TecnoEnergía.

Martínez, R. (2022). *Aprovechamiento energético de la biomasa.* Energía Sostenible.

Mojica, C., Vidal, E., Rueda, B., & Acosta, D. (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso. *Revista de Energía Química y Física*, 18-20.

Monteros, M. (2021). Los camélidos sudamericanos; productos y subproductos usados en la Región Andina. *Actas Iberoamericanas en Conservación Animal, 11*(3), 7-9. Retrieved from https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_de_camelidos/camelidos_general/35-AICA2017_Trabajo004.pdf

Moreno, J., Moral, R., García, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2019). *Aspectos biológicos de la digestión anaerobia.* Mundi Prensa.

Nardo, E. (2020). Péptidos bioactivos de globulinas de amaranto. *Universidad Nacional de la Plata, 1*(1), 3-20. doi:https://doi.org/10.35537/10915/60636

Ondarse, D. (2024). *Punto de ebullición.* Retrieved from https://concepto.de/punto-de-ebullicion/

Paolini, V. (2018). *Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones.* Elsevier.

Pérez, C. (2022). *El biogás: Producción, tecnologías y aplicaciones.* Editorial Renovables.

Pérez, J. (2021). *Ingeniería de aguas residuales y lodos.* Ediciones Díaz de Santos.

Puga, M. (1998). *Historia y Espacio Bolivarense. Toponimias de la Provincia de Bolívar.* Municipio de Guaranda.

Quaschning, F. (2019). *Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones.* Elsevier.

Reina, J. (2021). *El biogás, una ecológica y económica fuente de energía.* Circulo Rojo.

Risberg K, S. L. (2013). Biogas production from wheat straw and manure–impact of pretreatment and process operating parameters. *Bioresour Technol*.

Rodríguez, A. (2022). *Producción de biogás: Tecnologías y aplicaciones.* Ciudad de México: UNAM.

Ruiz, R., & Cadavid, L. (2022). Effect of natural zeolite on methane production from pig manure. *Red Iberoamericana de Tecnologias de Biomasa y Bioenergia Rural*, 236-237.

Sanchez, J. (2020). Determinación de las bacterias participantes en la degradación biológica anaerobia de la biomasa en condiciones mesofílicas y termofílicas. *Repositorio Dspace, 1*(1), 63. doi:http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx:8080//xmlui/handle/123456789/821

Sangabriel, R. (2021). *Aplicación y beneficios de los inóculos bacterianos en la remoción de contaminantes.* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Santillán, D. (2022). Caracterización del estiércol de vicuña en la reserva faunística Chimborazo para formular un biofertilizante. *Universidad Superior Politécnica de Chimborazo, 1*(1), 54-58. doi:http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/17574

Sarabia, P., Fernandez, J., & Torres, J. (2021). *Tecnologías de gestión de residuos orgánicos y generación de biogás.* Editorial Universitaria.

Saval, S. (2022). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnologia, 16*(2), 25-28. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37368310/Saval_Residuosagroindustriales-libre.pdf?1429589530=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSoluciones_agroindutriales.pdf&Expires=1726109564&Signature=aLQsMKf3UBSiXuxu7tAXO6jFFVg6kS4k8blPjeZBIUhkX

Schievano, A., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Malagutti, L., Gozzi, A., & Adani, F. (2019). *Prediction of biogas potentials using quick laboratory analyses:*

Upgrading previous models for application to heterogeneous organic matrices. Bioresource Technology.

Soltis, D. (2000). *Filogenia de las angiospermas inferida a partir de secuencias de 18S rDNA, rbcL y atpB.* Botanical Journal of the Linnean Society.

Soriano, C. (2019). *"CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y DETERMINACION DEL PERFIL DE AMINOACIDOS ESENCIALES DEL KICHAU QUINUA (Chenopodium Quinoa Willd).* Retrieved from https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/31191e29-3593-4ff2-88c7-bea32dfd5537/content

Tadeo, J. (2021). Construcción de un prototipo de biodigestión anaerobia, para residuos alimenticios y estiércol de cerdo. *Universidad de Quintana Roo, 1*(1), 56. doi:http://hdl.handle.net/20.500.12249/1934

Trino, R., Grados, R., Gutierrez, M., Mamani, D., Perez, J., Magariños, W., . . . Gonzales, E. (2017). Evaluation of the nutritional contribution of amaranto (amaranthus caudatus linnaeus),. *Scielo*, 20-21.

Vargas, Y. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas, 14*(1), 15. doi:https://doi.org/10.18359/rfcb.3108

Vilca, J., & Carrasco, G. (2021). Retrieved from grobanco.com: https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/038-d-quinua.pdf

Winsor. (1932). *The Gompertz curve as a growth curve. Proceedings of the national academy of sciences* . Retrieved Noviembre 29, 2018

Zhao, X. (2020). *Reforma del biogás a gas de síntesis: una revisión.* Sciencedirect.

ANEXOS

Anexo 1

Mapa del laboratorio general de la UEB



Nota: Toma de la ubicación mediante ‘‘Google Earth’’

Anexo 2

Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Cerdo

UEB VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS N°024-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Sustrato - Estiércol de cerdo
Código asignado UEB	INV 027
Estado de la muestra	Semisólido
Envase de recepción	Balde plástico con aprox. 3000 g de contenido de muestra
Análisis requerido(s)	Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	18 de marzo de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado Base Seca	Resultado Base Fresca
Sustrato - Estiércol de cerdo INV 027	Humedad	%	UNE-EN-ISO 18134-3	—	74.43
	Cenizas	%	UNE-EN-ISO 18122	29.52	—
	Volátiles	%	UNE-EN-ISO 18123	71.09	—
	Carbono fijo	%	CALCULADO	-0.61	—
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	2.90
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	—	38.27
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	5.01
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.15
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	—	13.21
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	—	7.81
	Oxigeno	%	CALCULADO	—	24.15

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 3

Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Llama

UEB VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS N°025-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Sustrato - Estiércol de llama
Código asignado UEB	INV 028
Estado de la muestra	Solido
Envase de recepción	Balde plástico con aprox. 3000 g de contenido de muestra
Análisis requerido(s)	Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	18 de marzo de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado Base Seca	Resultado Base Fresca
Sustrato - Estiércol de llama INV 028	Humedad	%	UNE-EN-ISO 18134-3	—	53.52
	Cenizas	%	UNE-EN-ISO 18122	26.04	—
	Volátiles	%	UNE-EN-ISO 18123	65.91	—
	Carbono fijo	%	CALCULADO	8.05	—
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	2.22
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	—	38.66
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	3,29
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.21
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	—	17.45
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	—	11.76
	Oxigeno	%	CALCULADO	—	29.57

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 4

Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno del Estiércol de Vicuña

UEB Universidad Estatal de Bolívar — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS N°026-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Sustrato - Estiércol de vicuña
Código asignado UEB	INV 029
Estado de la muestra	Solido
Envase de recepción	Balde plástico con aprox. 3000 g de contenido de muestra
Análisis requerido(s)	Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	18 de marzo de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado Base Seca	Resultado Base Fresca
Sustrato - Estiércol de vicuña INV 029	Humedad	%	UNE-EN-ISO 18134-3	—	9.86
	Cenizas	%	UNE-EN-ISO 18122	38.11	—
	Volátiles	%	UNE-EN-ISO 18123	58.49	—
	Carbono fijo	%	CALCULADO	3.4	—
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	1.73
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	—	29.90
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	3.37
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.15
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	—	17.25
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	—	8.99
	Oxigeno	%	CALCULADO	—	26.75

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 5

Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa del Residuo de Amaranto

UEB UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº027-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Residuo - Amaranto
Código asignado UEB	INV 030
Estado de la muestra	Solido
Envase de recepción	Bolsa de papel con aprox. 500 g de contenido de muestra
Análisis requerido(s)	Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa.
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	18 de marzo de 2025
Técnico asignado	ECCR – MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado Base Seca	Resultado Base Fresca
Residuo - Amaranto INV 030	Humedad	%	UNE-EN-ISO 18134-3	—	8.43
	Cenizas	%	UNE-EN-ISO 18122	9.78	—
	Volátiles	%	UNE-EN-ISO 18123	77.95	—
	Carbono fijo	%	CALCULADO	12.27	—
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.62
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	—	40.42
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	6.48
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.26
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	—	64.80
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	—	6.24
	Oxigeno	%	CALCULADO	—	42.44
	Fibra Detergente Neutra	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	69.20
	Fibra Detergente Ácida	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	50.77
	Lignina	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	9.93
	Celulosa	%	CALCULADO	—	40.48
	Hemicelulosa	%	CALCULADO	—	18.43

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 6

Resultados de análisis de Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa del Residuo de Quinua

UEB VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS N°028-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Residuo - Quinua
Código asignado UEB	INV 031
Estado de la muestra	Solido
Envase de recepción	Bolsa de papel con aprox. 500 g de contenido de muestra
Análisis requerido(s)	Humedad - Cenizas –Volátiles – Carbono Fijo - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H - Oxigeno - Fibra Detergente Neutra - Fibra Detergente Ácida – Lignina – Celulosa – Hemicelulosa.
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	18 de marzo de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado Base Seca	Resultado Base Fresca
Residuo - Amaranto INV 030	Humedad	%	UNE-EN-ISO 18134-3	—	1.73
	Cenizas	%	UNE-EN-ISO 18122	10.85	—
	Volátiles	%	UNE-EN-ISO 18123	76.31	—
	Carbono fijo	%	CALCULADO	12.84	—
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	1.76
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	—	40.46
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	—	6.48
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	—	0.10
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	—	23.02
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	—	6.24
	Oxigeno	%	CALCULADO	—	40.36
	Fibra Detergente Neutra	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	46.05
	Fibra Detergente Ácida	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	30.63
	Lignina	%	Van Soest (Sistema ANKOM)	—	13.28
	Celulosa	%	CALCULADO	—	17.36
	Hemicelulosa	%	CALCULADO	—	15.42

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 7

Resultados de análisis de Sólidos totales – Sólidos volátiles del Inóculo

UEB UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº029-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	Inóculo
Código asignado UEB	INV 032
Estado de la muestra	Líquido
Envase de recepción	Botella plástica con aprox. 3000 g
Análisis requerido(s)	Sólidos totales – Sólidos volátiles
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
Inóculo INV 032	Sólidos totales	mg sólidos totales/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2540B	2.83
	Sólidos Volátiles	mg sólidos volátiles/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2540E	0.58

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

ISIDRO FAVIAN BAYAS MOREJON

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 8

Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 1

UEB VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº030-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T1 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiercol de llama
Código asignado UEB	INV 033
Estado de la muestra	Mezcla sólido-líquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ambar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T1 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiércol de llama INV 033	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.20
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	1.98
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	10.49
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0.00
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	10.29
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.19

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.



Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 9

Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 2

UEB Universidad Estatal de Bolívar — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº031-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T2 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiércol de vicuña
Código asignado UEB	INV 034
Estado de la muestra	Mezcla sólido-líquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ámbar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T2 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiércol de vicuña INV 034	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.14
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	1.13
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	10.16
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0.00
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	7.88
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.12

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.



Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 10

. Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 3

UEB VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº032-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T3 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiércol de cerdo
Código asignado UEB	INV 035
Estado de la muestra	Mezcla sólido-líquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ámbar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T3 - 50% Residuo de quinua + 50% Sustrato de estiércol de cerdo INV 035	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.29
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	3.11
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	10.38
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	10.86
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.31

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.



Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 11

Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 4

UEB UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	**LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN** Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	**Código**	**FPG12-01**
		Versión	**1**
	INFORME DE RESULTADOS	**Año**	**2025**
		Pagina	**Página 1 de 1**

INFORME DE ENSAYOS N°033-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T4 - 50% Residuo de amaranto + 50% Sustrato de estiércol de llama
Código asignado UEB	INV 036
Estado de la muestra	Mezcla sólido-líquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ámbar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T4 - 50% Residuo de Amaranto + 50% Sustrato de estiércol de llama INV 036	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.13
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	1.43
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	9.31
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0.02
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	11.50
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.17

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.



Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 12

Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 5

UEB UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº034-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T5 - 50% Residuo de amaranto + 50% Sustrato de estiércol de vicuña
Código asignado UEB	INV 037
Estado de la muestra	Mezcla sólido-líquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ámbar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T5 - 50% Residuo de amaranto + 50% Sustrato de estiércol de vicuña INV 037	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.11
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	0.91
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	10.38
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0.03
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	8.80
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.09

Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

ISIDRO FAVIAN BAYAS MOREJON

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

Anexo 13

Resultados de pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H del Tratamiento 6

UEB UNIVERSIDAD ESTATAL BOLÍVAR — VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN	LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN Laguacoto II, Km 1 1/2, vía a San Simón, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, Ecuador.	Código	FPG12-01
		Versión	1
	INFORME DE RESULTADOS	Año	2025
		Pagina	Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYOS Nº035-2025

Descripción de la muestra	
Solicitantes	Cristhian Fernando Carrera Capuz - Julissa Betsabeth Sanga Gadvay
Muestra	T6 - 50% Residuo de amaranto + 50% Sustrato de estiércol de cerdo
Código asignado UEB	INV 038
Estado de la muestra	Mezcla sólido-liquido
Envase de recepción	Frascos de vidrio color ámbar de 186 mL
Análisis requerido(s)	pH - Nitrógeno – Carbono – Hidrogeno – Azufre - C/N - C/H
Fecha de recepción	06 de enero de 2025
Fecha de análisis	06 al 30 de enero de 2025
Fecha de informe	03 de febrero de 2025
Técnico asignado	ECCR - MIPV

RESULTADOS OBTENIDOS

Matriz de ensayo	Parámetro	Unidad	Método	Resultado
T6 - 50% Residuo de amaranto + 50% Sustrato de estiércol de cerdo INV 038	pH	-	Potenciométrico	7.00
	Nitrógeno	%	UNE-EN-ISO 16948	0.25
	Carbono	%	UNE-EN-ISO 16948	1.92
	Hidrogeno	%	UNE-EN-ISO 16948	9,67
	Azufre	%	UNE-EN-ISO 16948	0.00
	C/N	%	UNE-EN-ISO 16948	7.88
	C/H	%	UNE-EN-ISO 16948	0.21

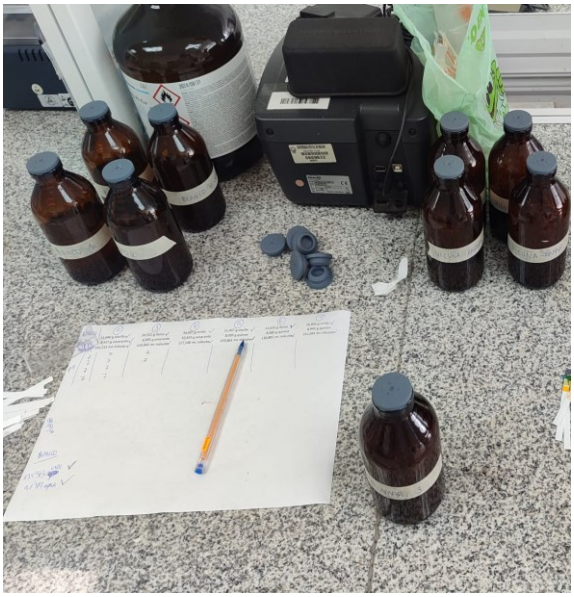
Los resultados de los análisis corresponden a 3 determinaciones por muestra.

ISIDRO FAVIAN BAYAS MOREJON

Ing. Favian Bayas Morejón PhD.
Director DIVIUEB
Teléf. (+593) 99 031 6224

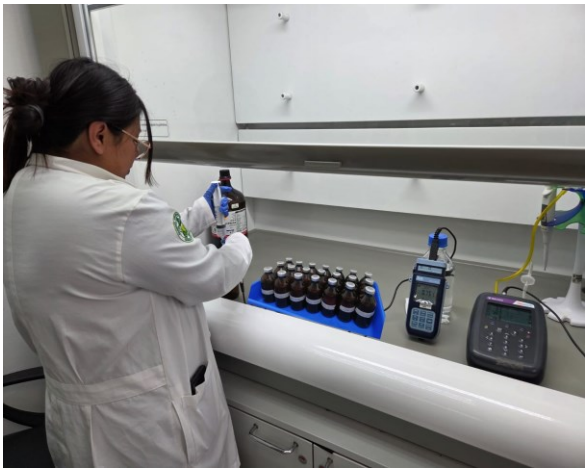
Anexo 14

Evidencia fotográfica de la fase de campo

Pesaje de muestras	Análisis de humedad
	
Análisis de pH en biodigestores	Montaje de biodigestores
	

Anexo 15

Evidencia fotográfica de la fase de campo

Biodigestores	Extracción de gas en biodigestores
	
Medición de presión en biodigestores	**Medición de gas en biodigestores**
	

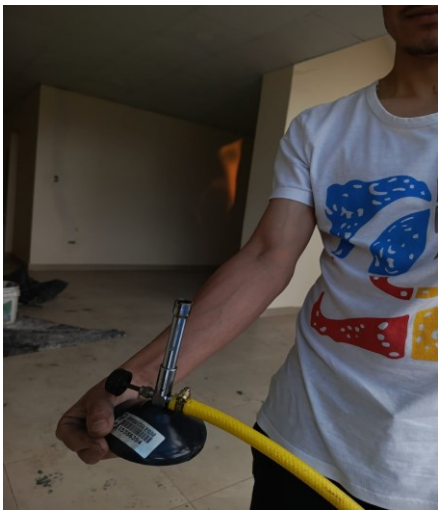
Anexo 16

Evidencia fotográfica de la fase de laboratorio

Pesaje de muestras para análisis elemental	Análisis elemental
	
Análisis termogravimétrico	Montaje del mejor tratamiento al biodigestor
	

Anexo 17

Evidencia fotográfica de la fase de campo

Montaje con el mechero	Prueba de llama con el mechero
	
Prueba con el mechero	**Resultado final**
	