



UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS, RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TEMA:

**OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y DIGESTATO A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROPECUARIOS EN LA ORGANIZACIÓN INTI
CHURI, CANTÓN GUARANDA, PROVINCIA BOLÍVAR**

**Perfil de proyecto de investigación previo a la obtención de título de Ingeniero
Agroindustrial, otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar, a través de la
Facultad de Ciencias Agropecuarias Recursos Naturales y del Ambiente**

AUTORES:

Cuillor Samuel Vallejo Tualombo

Remigio Curicama Yumbay Yallico

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

Ing. Juan Gaibor Chávez PhD

GUARANDA-ECUADOR

TEMA

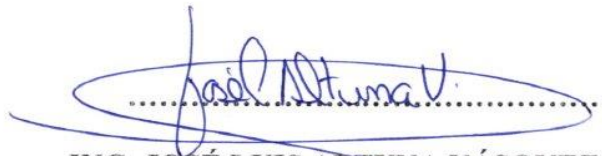
OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y DIGESTATO A PARTIR DE LA
CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROPECUARIOS EN LA
ORGANIZACIÓN INTI CHURI, CANTÓN GUARANDA, PROVINCIA
BOLÍVAR.

REVISADO Y APROBADO POR:



ING. JUAN ALBERTO GAIBOR CHAVÉZ PhD

DIRECTOR



ING. JOSÉ LUIS ALTUNA VÁSQUEZ MSc

BIOMETRISTA



LIC. JUAN ELOY BONILLA MSc

REDACCIÓN TÉCNICA



CERTIFICACIÓN DE AUDITORIA

Nosotros, Cuillor Samuel Vallejo Tualombo, portador de la CI.- 020213989-5 & Remigio Curicama Yumbay Yallico, portador de la CI.- 020238892-2, declaramos que el trabajo y los resultados presentados en este informe, no han sido previamente presentado 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 correspondiente a este trabajo, según por lo establecido por la ley de propiedad intelectual de su reglamento y por la normativa intelectual vigente.

Cuillor Samuel Vallejo Tualombo

020213989-5

Remigio Curicama Yumbay Yallico

020238892-2

Ing. Juan Alberto Gaibor Chavéz PhD

020105168-7

Ing. José Luis Altuna Vásquez MSc

180253805-6

Lic. Juan Eloy Bomilla MSc

020115994-4



Di 2 copias.

**ESCRITURA PÚBLICA
DECLARACION JURADA
SEÑORES CUILLOR SAMAUUEL VALLEJO TUALOMBO Y REMIGIO CURICAMA
YUMBAY YALLICO**

En la ciudad de Guaranda, Capital de la Provincia de Bolívar, República del Ecuador, hoy día MIÉRCOLES, VEINTE DE OCTUBRE DE DOS MIL VEINTE Y UNO, ante mí, Doctor GUIDO FABIAN FIERRO BARRAGAN, NOTARIO PÚBLICO PRIMERO DEL CANTÓN GUARANDA, comparecen los señores **CUILLOR SAMAUUEL VALLEJO TUALOMBO Y REMIGIO CURICAMA YUMBAY YALLICO**, portadores de las cédulas de ciudadanía números cero dos cero dos uno tres nueve ocho nueve guion cinco y cero dos cero dos tres ocho ocho nueve dos guion dos en su orden. Los comparecientes son de nacionalidad ecuatoriana, mayores de edad, de estado civil solteros, capaces de contraer obligaciones, domiciliados en la comunidad Vinchoa, parroquia Veintimilla, cantón Guaranda, provincia Bolívar, a quienes de conocerles doy fe en virtud de haberme exhibido sus cédulas de ciudadanía y papeletas de votación cuyas copias adjunto a esta escritura. Advertidos por mí el Notario de los efectos y resultados de esta escritura, así como examinados en forma separada, de que comparecen al otorgamiento de la misma sin coacción, amenazas, temor reverencial, ni promesa o seducción, juramentados en debida forma, prevenidos de la gravedad del juramento, de las penas del perjurio y de la obligación que tienen de decir la verdad con claridad y exactitud, bajo juramento declaran lo siguiente: " Previo a la obtención del Título de Ingeniero Agroindustrial: Que los criterios e ideas emitidas en el presente trabajo de investigación titulado "OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y DIGESTATO A PARTIR DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROPECUARIOS EN LA ORGANIZACIÓN INTI CHURI, CANTÓN GUARANDA, PROVINCIA BOLÍVAR", es de nuestra exclusiva responsabilidad en calidad de autores. Es todo cuanto podemos decir en honor a la verdad." (Hasta aquí la declaración juramentada rendida por los comparecientes, la misma que queda elevada a escritura pública con todo el valor legal). Para el otorgamiento de esta escritura pública se observaron todos los preceptos legales del caso; y leída que les fue a los comparecientes íntegramente por mí el Notario, se ratifican en todo su contenido y firman conmigo en unidad de acto. Incorporo esta escritura pública al protocolo de instrumentos públicos, a mi cargo. De todo lo cual doy fe.-

SR. CUILLOR SAMAUUEL VALLEJO TUALOMBO

SR. REMIGIO CURICAMA YUMBAY YALLICO

**Doctor Guido Fabián Fierro Barragán
NOTARIO PÚBLICO PRIMERO DEL CANTÓN GUARANDA.**

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a mis padres: Abelito Vallejo y Victoria Tualombo, a mis hermanos: Natasha, Faccha, Zumi, y Awki a mis sobrinas: Lesly, Aytana y Valentina. Ya que, ellos han sido la principal motivación para seguir adelante y cumplir una de mis tantas metras trazadas en esta vida.

Samuel Vallejo

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación dedico en primeras instancias a la Pachamama, al taita Inti y a los cuatro elementos de vida por darme la sabiduría y las energías para seguir en este trajinar, para poder afrontar las dificultades que se me han presentado en estos cinco años de estudio y poder cumplir con mis objetivos propuestos con mucho esmero y sacrificio.

También a mi padre Juan Yumbay, a mi madre Rosario Yallico y a mis hermanos, ya que ellos han sido un pilar fundamental en mi vida académica inculcándome buenos valores y costumbres.

A mis tíos Abel Vallejo y Victoria Tualombo y a mis primos de igual manera han sido un apoyo incondicional en mis estudios.

Remigio Yumbay

AGRADECIMIENTO

Por este pequeño logro quiero agradecer a mis padres: Abelito Vallejo, Victoria Tualombo y también a mis hermanos, por brindarme su apoyo económico y moral durante los años cursados en esta institución educativa.

Samuel Vallejo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer infinitamente a mis padres Juan Yumbay, Rosario Yallico por haberme dado salud y vida. Y siempre ayudarme moral y económicamente en mi formación académica y por darme esa enseñanza de superación por ser mejor persona cada día, pese a los duros momentos de la vida, por siempre acompañarme y ayudarme a superarme como persona y profesional, por eso les dedico estos títulos queridos padres.

También quiero agradecer a mis tíos Abel Vallejo y Victoria Tualombo por ayudarme siempre a seguir adelante brindándome su apoyo moral y económico durante estos cinco años de estudios.

Como no agradecer a mis hermanos Israel, Diego, Juan, Vilka y Yaguar Yumbay Yallico por brindarme su apoyo incondicional en esta etapa de formación.

Remigio Yumbay

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS	XV
RESUMEN	XVI
SUMMARY	XVII
CAPÍTULO I	1
1. Introducción	1
CAPITULO II	3
2. Problema	3
2.1 Planteamiento del problema	3
2.2 Situación del problema	3
2.3 Formulación del problema	3
2.4 Sistematización de problema	3
CAPITULO III	5
3. Marco teórico	5
3.1 Origen y descripción de la cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	5
3.1.1 Origen	5
3.1.2 Cebada	5
3.1.3 Taxonomía	6
3.1.4 Producción	6
3.1.5 Descripción de la planta	8

3.1.6	Residuos de la cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) y su contaminación	8
3.1.7	Composición química de la paja de la cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.).....	9
3.2	Origen y descripción del maíz (<i>Zea mays</i> L.)	9
3.2.1	Origen	9
3.2.2	Maíz	10
3.2.3	Taxonomía.....	10
3.2.4	Producción.....	10
3.2.5	Descripción de la planta de Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	12
3.2.6	Residuos del maíz (<i>Zea mays</i> L.) y su contaminación.....	13
3.2.7	Composición química de la paja del maíz (<i>Zea mays</i> L.)	13
3.3	Estiércol bovino	14
3.4	Lactosuero	15
3.5	Inóculo	16
3.6	Biogás	16
3.6.1	Características del biogás.....	17
3.6.2	Producción de biogás	18
3.7	Análisis proximal y físico-químico de las materias primas	19
3.8	Co-digestión anaerobia	21
3.8.1	Etapas de la co-digestión anaerobia.....	21
3.8.2	Descripción de las fases de la co-digestión anaerobia.....	21
3.8.3	Parámetros de la co-digestión anaerobia.....	25
3.8.4	Parámetros ambientales de la co-digestión anaerobia	26
3.8.5	Parámetros operacionales.....	30
3.8.6	Cinética microbiana	33
3.8.7	Crecimiento microbiano.....	33
3.8.8	Fases de crecimiento	34
3.8.9	Cinética microbiana en la co-digestión anaerobia.....	35

3.8.10	Modelo cinético de Gompertz	36
3.8.11	Aplicación del modelo modificado de Gompertz a la producción acumulada de metano.....	37
CAPITULO IV		38
4.	Marco metodológico	38
4.1	Ubicación de la investigación.....	38
4.2	Ubicación de la fase experimental.....	38
4.3	Situación geográfica y climática de la fase experimental	39
4.4	Ubicación de la fase de campo	39
4.5	Situación geográfica y climática de la fase de campo	40
4.6	Materiales y equipos	41
4.6.1	Equipos.....	41
4.6.2	Materiales de laboratorio.....	42
4.6.3	Materiales de campo	43
4.7	Análisis estadístico	45
4.7.1	Diseño experimental	45
4.7.2	Factores de estudio	45
4.7.3	Características del experimento.....	46
4.7.4	Diseño experimental	47
4.7.5	Análisis estadísticos.....	47
4.8	Modelo Pruebas Rangos Múltiples	48
4.8.1	Método LSD (diferencia mínima significativa)	48
4.9	Normas para la caracterización de las materias primas	48
4.10	Caracterización de las materias primas.....	49
4.11	Preparación de los biodigestores	50
4.11.1	A nivel laboratorio	50
4.11.2	A nivel campo.....	52

4.12	Cálculo y montaje de los biodigestores.....	54
4.12.1	A nivel de laboratorio	54
4.13	Métodos de evaluación y datos obtenidos.....	59
4.13.1	A nivel laboratorio	59
4.13.2	A nivel de campo	61
CAPITULO V.....		62
5.	Resultados y discusiones.....	62
5.1	Caracterización físico química de las materias primas (residuos agropecuarios e inóculos utilizados).....	62
5.2	Definición de las condiciones óptimas de operación en la co-digestión anaerobia.....	63
5.2.1	Descripción de las características obtenidas de los sustratos e inóculo	63
5.2.2	Volumen diario producido de biogás (ml)	64
5.2.3	Volumen acumulado de la producción	65
5.2.4	Volumen diario producido de CH ₄	67
5.2.5	Volumen acumulado de la producción de CH ₄	68
5.3	Evaluación de los parámetros de funcionamiento y caracterización del biogás obtenidos del digestor.....	68
5.3.1	Rendimiento diario de biogás.....	68
5.3.2	Porcentaje diario de producción de metano (CH ₄)	71
5.3.3	Porcentaje diario de dióxido de carbono (CO ₂) producido	72
5.4	Análisis de varianza	74
5.4.1	ANOVA para la producción de biogás	74
5.4.2	ANOVA para el porcentaje de metano (CH ₄) producido.....	78
5.4.3	ANOVA para el porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂) producido	81
5.4.4	Análisis de la cinética microbiana	86
5.5	Producción de biogás y metano a nivel de campo	90

5.5.1	Rendimiento diario de biogás.....	90
5.5.2	Porcentaje diario de producción de metano (CH ₄).....	92
5.5.3	Porcentaje diario producido de dióxido de carbono (CO ₂).....	94
CAPITULO VI		98
6.	Comprobación de la hipótesis	98
6.1	Hipótesis a comprobarse	98
6.1.1	Hipótesis nula	98
6.1.2	Hipótesis alterna	98
CAPITULO VII		99
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	99
7.1	Conclusiones.....	99
7.2	Recomendaciones	100
BIBLIOGRAFÍA		102
ANEXOS		127
GLOSARIO DE TERMINOS.....		140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de la cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.).....	6
Tabla 2. Producción de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) por provincias año 2019	7
Tabla 3. Composición de la paja de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L).....	9
Tabla 4. Taxonomía del maíz (<i>Zea mays</i>).....	10
Tabla 5. Producción de maíz (<i>Zea mays</i> L.) Por provincias año 2019	11
Tabla 6. Composición química de paja del maíz (<i>Zea mays</i> L.)	13
Tabla 7. Número de cabezas de ganado de la Organización Inti Churi	14
Tabla 8. Composición química del estiércol fresco de ganado bovino.....	14
Tabla 9. Composición química del lactosuero.....	16
Tabla 10. Sustratos y productos presentes en la fase hidrolíticas.....	23
Tabla 11. Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables	32
Tabla 12. Situación geográfica y climática	39
Tabla 13. Situación geográfica y climática	40
Tabla 14. Equipos	41
Tabla 15. Factores de estudio para el proceso de fermentación anaerobia	45
Tabla 16. Tratamientos y descripción de niveles.....	46
Tabla 17. Características del experimento	46
Tabla 18. Análisis de varianza utilizado	47
Tabla 19. Normas técnicas para la caracterización de las materias primas.....	48
Tabla 20. Cálculo de los SV para cada componente de la mezcla, según la TCO determinada	56
Tabla 21. Valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores	56
Tabla 22. Carga de los distintos materiales utilizados para la co-digestión a introducir en los digestores en laboratorio	57
Tabla 23. Capacidad de carga de los biodigestores y TCO	58
Tabla 24. Carga de los distintos materiales utilizados para la co-digestión a introducir en los digestores en campo.....	58
Tabla 25. Características fisicoquímicas de los residuos agropecuarios, e inóculo a utilizarse	62

Tabla 26. Volumen diario producido de ml de biogás	64
Tabla 27. Volumen acumulado de ml de biogás en los 20 días.....	65
Tabla 28. Volumen CH ₄ producido diariamente (ml).....	67
Tabla 29. Volumen acumulado de ml de CH ₄ durante 20 días.....	68
Tabla 30. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de ml de biogás de los nueve tratamientos	75
Tabla 31. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción de ml de biogás.....	76
Tabla 32. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B.....	77
Tabla 33. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción del porcentaje de metano (CH ₄) de los nueve tratamientos	78
Tabla 34. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción del porcentaje de metano (CH ₄).....	79
Tabla 35. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B.....	80
Tabla 36. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂) producido diariamente de los nueve tratamientos	81
Tabla 37. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para el porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂) producido diariamente.....	82
Tabla 38. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de estiércol y lactosuero por el factor A	82
Tabla 39. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B.....	84
Tabla 40. Resultados de la molaridad acumulada de metano para el modelo modificado de Gompertz	87
Tabla 41. Comparación datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	5
Figura 2 . Producción/Rendimiento de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en Ecuador 1994-2019.....	6
Figura 3. Descripción de la planta de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	8
Figura 4. Producción/Rendimiento de Maíz (<i>Zea mays</i>) en Ecuador 1994-2019	11
Figura 5. Descripción de las partes del maíz (<i>Zea mays</i> L.)	12
Figura 6. Fases de la co-digestión anaerobia.....	22
Figura 7. Velocidad de caga orgánica	33
Figura 8. Fases del crecimiento microbiano.....	35
Figura 9. Evolución de la concentración celular en la co-digestión anaerobia	36
Figura 10. Mapa político de la Provincia Bolívar.....	38
Figura 11	38
Figura 12. Ubicación de la fase de campo.	39
Figura 13. Esquema del digester utilizado en laboratorio.....	52
Figura 14. Planos de la caseta para los biodigestores en campo.	53
Figura 15. Producción acumulada de biogás de los 9 tratamientos para los 20 días (ml)	66
Figura 16. Producción diaria de biogás en los 20 días.....	69
Figura 17. Volumen de biogás generado del tratamiento T2	70
Figura 18. Volumen de biogás generado del tratamiento T5	70
Figura 19. Volumen de biogás generado del tratamiento T8	70
Figura 20 . Porcentaje de CH ₄ producido en 20 días	71
Figura 21. Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T2	71
Figura 22. Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T5	72
Figura 23. Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T8	72
Figura 24. Porcentaje de dióxido de carbono obtenido en los 20 días.....	73
Figura 25. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T2	73
Figura 26. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T5	74

Figura 27. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T8	74
Figura 28. Grafico LDS del factor B respecto a la producción de biogás	77
Figura 29. Interacciones de los distintos niveles del factor B	78
Figura 30. Grafico LDS del factor B respecto a la producción del porcentaje de metano (CH ₄)	80
Figura 31. Interacciones de los distintos niveles del factor B	81
Figura 32. Grafico LDS del factor A respecto a la producción del porcentaje del dióxido de carbono (CO ₂).....	83
Figura 33. Interacciones de los distintos niveles del factor A.....	84
Figura 34. Grafico LDS del factor B respecto al porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂) producido diariamente	85
Figura 35. Interacciones de los distintos niveles del factor B.....	85
Figura 36. Diferencias de los datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz.....	89
Figura 37. Porcentaje de metano producido diariamente en los seis digestores	91
Figura 38. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 2.	92
Figura 39. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 5.	93
Figura 40. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 8.	93
Figura 41. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente en los seis digestores.....	94
Figura 42. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 2.	95
Figura 43. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 5.....	96
Figura 44. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 8.	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	34
Ecuación 2	37
Ecuación 3	37
Ecuación 4	47
Ecuación 5	48
Ecuación 6	49
Ecuación 7	49
Ecuación 8	50
Ecuación 9	55
Ecuación 10	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Fotografías del experimento a nivel laboratorio	127
Anexo 2 Fotografías del experimento a nivel laboratorio	132

RESUMEN

El biogás es una fuente de energía renovable y amigable con el medio ambiente que puede ser producida a partir de cualquier tipo de residuo orgánico. La utilización de estiércoles en el proceso de co-digestión anaerobia ayuda enormemente a la reducción de los gases de efecto invernadero que estos producen, y además, supone un método de valorización de residuos en forma de energía térmica. En comunidades y poblados alejados de las ciudades donde el suministro de gas es limitado, los biodigestores son una opción excelente, ya que su construcción y mantenimiento son de bajo costo. Sumado a esto, las materias primas utilizadas para este proceso se pueden obtener en la misma localidad. El proceso de la co-digestión sobre los 3200 msnm en el Ecuador está mínimamente estudiado. El presente trabajo de investigación se realizó en dos fases: fase experimental de laboratorio y fase de aplicación en campo. La misma se estructuró de forma que en laboratorio se realizase el ensayo en las condiciones óptimas de funcionamiento del proceso, de modo que, se comparan las condiciones existentes en campo con estas. Se obtuvo una producción diaria de biogás con un porcentaje de metano superior al 70% en ambas fases. Cabe recalcar que el factor más influyente al momento de realizar el proceso de la co-digestión anaerobia fue la temperatura.

SUMMARY

Biogas is a renewable and environmentally friendly energy source that can be produced from any type of manure and agricultural waste. The use of manure in the anaerobic co-digestion process helps greatly in the reduction of the greenhouse gases they produce, and also represents a method of waste valorization in the form of thermal energy. In communities and towns far from cities where gas supply is limited, biodigesters are an excellent option, since their construction and maintenance are low cost, and the raw materials used for this process can be obtained locally. The co-digestion process above 3200 meters above sea level in Ecuador is minimally studied. The present research work was carried out in two phases: laboratory experimental phase and field application phase. It was structured in such a way that in the laboratory the test was carried out under the optimum operating conditions of the process, so that the existing field conditions for the process were compared with these. Daily biogas production was obtained with a methane percentage higher than 70% in both phases. It should be emphasized that the most influential factor at the time of carrying out the anaerobic co-digestion process was the temperature.

CAPÍTULO I

1. Introducción

Las energías renovables son amigables con el medio ambiente, ya que son obtenidas de forma limpia mediante el aprovechamiento de la biomasa que se genera de la producción agropecuaria, en nuestra provincia existen condiciones propicias para el aprovechamiento de algunas de estas fuentes, que pueden dar su contribución no solo a la solución de parte de nuestra demanda energética, sino a la protección del ambiente. La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. Energéticamente el término biomasa se usa para denominar una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica conformada normalmente por desechos.

La biomasa tiene carácter de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar fijada por las plantas en forma de cadenas de carbono en un proceso que se lleva a cabo llamado fotosíntesis vegetal. Esta energía es liberada al romper los enlaces de los compuestos orgánicos a través de dos procesos, el primero es el proceso termoquímico de la combustión directa de la biomasa; y, el segundo es el proceso bioquímico de la co-digestión anaerobia de los residuos vegetales y animales.

El biogás es un biocombustible proveniente de la biomasa (materia orgánica de origen animal o vegetal) que es generado en nuestro entorno, la mayor parte de este material orgánico es desperdiciado convirtiéndose en un foco de contaminación ambiental. Entre los biocombustibles renovables sustentables se encuentra el biogás, es un gas combustible producto de la descomposición de la materia orgánica (MO) en condiciones de ausencia de oxígeno (Navarro, 2017). En la Organización Inti Churi, la ganadería es una de las principales actividades económicas del sector, los comuneros que realizan esta actividad tienen problemas con la acumulación de los estiércoles y residuos agropecuarios, por ello la presente investigación va dirigida a la valorización de estos residuos mediante la utilización de biodigestores anaerobios.

Objetivo General

Obtener biogás y digestato a partir de la co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios en la organización Inti Churi cantón Guaranda provincia Bolívar.

Objetivos específicos:

- Caracterizar física y químicamente las materias primas que serán utilizadas en el proceso.
- Definir las condiciones óptimas de operación de la co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios de la zona andina.
- Evaluar los parámetros de funcionamiento y caracterizar los productos obtenidos del biodigestor.
- Analizar los procesos cinéticos.

CAPITULO II

2. Problema

2.1 Planteamiento del problema

La contaminación del medio ambiente por la presencia de residuos orgánicos en vertederos, y directamente en el terreno, tiene efectos muy negativos en el medio ambiente. La contaminación de acuíferos causa malos olores en las zonas habitadas y sus alrededores. Por lo cual se pretende desarrollar biodigestores alimentados con los residuos agropecuarios para generar biogás a fin de disminuir la contaminación y crear una alternativa en el abastecimiento del gas licuado de petróleo (GLP) mismo que no es recurrente por estas zonas debido a su geografía irregular y su distancia con los núcleos urbanos más grandes.

2.2 Situación del problema

La contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) generado por el estiércol de los animales, y, los desechos de la producción láctea (lactosuero), en la organización Inti Churi son un problema latente, debido a que existe una planta de procesamiento, en la cual no se aprovecha en su totalidad el lactosuero, el mismo que es expulsado al ambiente y contribuye a la contaminación.

2.3 Formulación del problema

Para la realización de esta investigación es necesario despejar interrogantes científicos y metodológicos que contribuirán al cumplimiento del objetivo general; para ello nos planteamos la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo generar biogás y digestato a partir de la co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios en la organización Inti Churi cantón Guaranda provincia Bolívar?

2.4 Sistematización de problema

¿Cuál es la composición del estiércol, lactosuero, residuos de cebada y que se generan en la organización “Inti Churi”?

¿Cuáles son los factores técnicos que intervienen en la creación de un biodigestor?

¿Cuáles son las condiciones de operación del proceso de la co-digestión anaerobia en zonas andinas?

¿Cuáles son la composición del biogás obtenido mediante el proceso de co-digestión anaerobia?

¿Cuál es el modelo matemático que mejor explica el proceso de crecimiento microbiano?

CAPITULO III

3. Marco teórico

3.1 Origen y descripción de la cebada (*Hordeum vulgare* L.)

3.1.1 Origen

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es uno de los cultivos de la agricultura del viejo mundo. En varios sitios se encontraron restos arqueológicos de granos de cebada en la región del Creciente Fértil, Mesopotamia, indicando que el cultivo fue domesticado alrededor del año 8000 A.C. La cebada probablemente es el grano más antiguo cultivado, creciendo tanto dentro del círculo polar ártico en Finlandia, en la India tropical a una altura de 500 m.s.n.m. y también en los Andes ecuatorianos por encima de 3000 msnm (Molina et al., 2020).

3.1.2 Cebada

La cebada (*Hordeum vulgare* L.), actualmente está en el quinto puesto de los cereales más cultivados en el mundo, según la revista Infoagro. En la región interandina ecuatoriana la cebada es cultivada por los campesinos de esta zona y en áreas marginales de producción, ubicadas sobre los 3.300 metros de altitud. Este cereal se ha constituido en uno de los alimentos básicos de las poblaciones rurales en el Ecuador, después del maíz, es el de más amplia distribución a nivel nacional (Savira et al., 2017).

Figura 1. Cebada (*Hordeum vulgare*)



Fuente: (Castro et al., 2017)

3.1.3 Taxonomía

A continuación, en la Tabla 1 se detalla la taxonomía de la cebada (*Hordeum vulgare* L.)

Tabla 1. Taxonomía de la cebada (*Hordeum vulgare* L.)

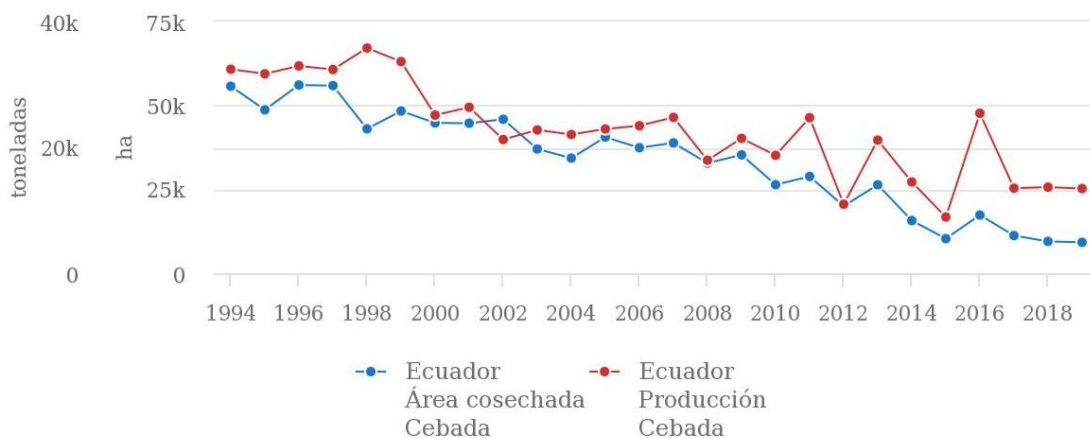
Reino	Plantea-Plantas
Subreino:	Tracheobionta – Plantas vasculares
Superdivisión:	Spermatophyta – Plantas con semilla
División:	Magnoliophyta – Plantas que florecen
Clase:	Liliopsida – Monocotiledóneas
sub Clase:	Commelinidae
Orden:	Cyperales
Familia:	Poaceae – Familia de las gramíneas
Género:	Hordeum – Cebada
Especie:	vulgare L. – Cebada común
Nombre científico:	<i>Hordeum vulgare</i> L.
Nombre Común:	Cebada

Fuente: (Molina et al., 2020)

3.1.4 Producción

En la organización Inti Churi la cebada (*Hordeum vulgare* L.) es un cereal ampliamente apreciado por los productos culinarios derivados de su grano, y la amplia utilización de su paja (alimento y cama de ganado, uso en adobes, etc.). Anualmente se producen alrededor de 4 Tn anuales en esta organización mayoritariamente para su consumo.

Figura 2 . Producción/Rendimiento de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en Ecuador 1994-2019



Fuente: FAOSTAT 2019

Tabla 2. Producción de cebada (*Hordeum vulgare L.*) por provincias año 2019

Región y Provincia		Superficie (Has.)		Producción (Tm.)	Ventas (Tm.)
		Sembrada	Cosechada		
Total nacional		11.634	11.155	14.107	10.792
Región sierra					
AZUAY	Solo	49	46	54	4
	Asociado				
BOLÍVAR	Solo	1.408	1.355	1.127	696
	Asociado				
CAÑAR	Solo	37	36	27	5
	Asociado				
CARCHI	Solo	1.392	1.370	3.203	3.082
	Asociado				
COTOPAXI	Solo	1.105	1.013	1.490	968
	Asociado				
CHIMBORAZO	Solo	3.325	3.117	3.217	2.241
	Asociado				
IMBABURA	Solo	777	777	1.141	1.090
	Asociado				
LOJA	Solo	7	7	1	
	Asociado				
PICHINCHA	Solo	2.304	2.288	1.944	1.364
	Asociado				
TUNGURAHUA	Solo	1.206	1.122	1.893	1.340
	Asociado				
SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS	Solo				
	Asociado				

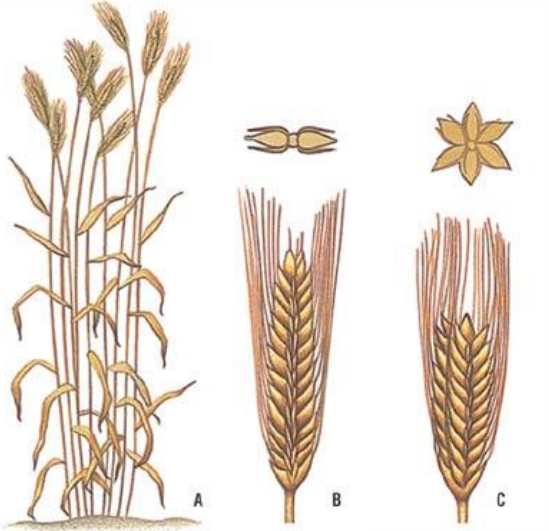
Fuente: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (SPAC), elaborado por INEN 2020

Como se observa en la Tabla 2, la provincia de Chimborazo tiene la mayor superficie sembrada y cosechada en el país. La provincia de Bolívar se encuentra en el tercer lugar de producción de cebada, lo que es uno de los motivos por los que se ha decidido la utilización en la presente investigación.

3.1.5 Descripción de la planta

La cebada es un cereal de hojas muy finas de una coloración verde donde el 60% de su peso se encuentra a los 25cm del suelo. La parte del tallo es de mediadas muy cortas, las flores tienen tres estambres y un pistilo de dos estigmas. Es una planta autógama, el fruto es una cariósida con las glumillas adheridas, salvo en el caso de la cebada desnuda (Molina et al., 2020).

Figura 3. Descripción de la planta de cebada (*Hordeum vulgare* L.)



Fuente : (Benítez, 2017)

- **Tallo**

La cebada tiene un tallo cañoso y con nudos muy cortos. Los nudos son gradualmente más largos hacia el ápice, donde pueden llegar a medir hasta un metro.

- **Hojas**

Las hojas son lanceoladas, se presenta en número de 4 a 6 en cada tallo y cada una está formada por dos partes principales, la vaina y la lámina. Además, posee dos estructuras accesorias, lígula y aurículas (Rodríguez, 2018).

3.1.6 Residuos de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y su contaminación

El cultivo de cebada produce un 60% de biomasa que en su mayoría se desperdicia en los campos donde se cultiva quedando en parvas, o a su vez son quemados por los agricultores afectando directamente al calentamiento global debido a los gases que emanan, una parte de estos residuos son aprovechados utilizándose como alimento para los animales, pero debido a su gran volumen es casi imposible utilizar en su totalidad. El

gran de reto de la agroindustria es buscar nuevos métodos de aprovechamiento de estos residuos mediante la utilización de nuevas tecnologías limpias y amigables con el ambiente (Martínez & Leyva, 2014).

3.1.7 Composición química de la paja de la cebada (*Hordeum vulgare* L.)

Por lo general los residuos lignocelulósicos agropecuarios están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en las paredes celulares de estos (Moreno, 2019). En la Tabla 3 se detalla la composición química de la paja de cebada (*Hordeum vulgare* L.).

Tabla 3. Composición de la paja de cebada (*Hordeum vulgare* L.)

Contenido químico (%)	Paja de cebada
Materia Seca (MS)	91,01
Cenizas	13,02
Materia Orgánica	86
Proteína Bruta	6,71
Extracto de Éter	1,43
Extracto libre de Nitrógeno	37,1
Fibra Bruta	41,7
Fibra de Detergente Neutra	73,8
Fibra de Detergente Ácida	46,7
Lignina de Detergente Ácida	6,78
Energía Metabolizable (MJ/kg de MS)	6,32

Fuente: (Haile et al., 2017)

3.2 Origen y descripción del maíz (*Zea mays* L.)

3.2.1 Origen

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta de la familia de las gramíneas originaria de Latinoamérica, aunque su origen concreto a día de hoy no está del todo aclarado, se cree que se originó en el sur de México (Caballero García et al., 2019).

3.2.2 Maíz

La planta de maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y producción anual; el tallo es simple, erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar fácilmente los dos metros de altura, es robusto y sin ramificaciones, por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entre nudos y sí una medula esponjosa (Vázquez Sánchez Yolanda, 2012).

3.2.3 Taxonomía

En la Tabla 4 se puede ver detalladamente la clasificación taxonómica de esta especie.

Tabla 4. *Taxonomía del maíz (Zea mays)*

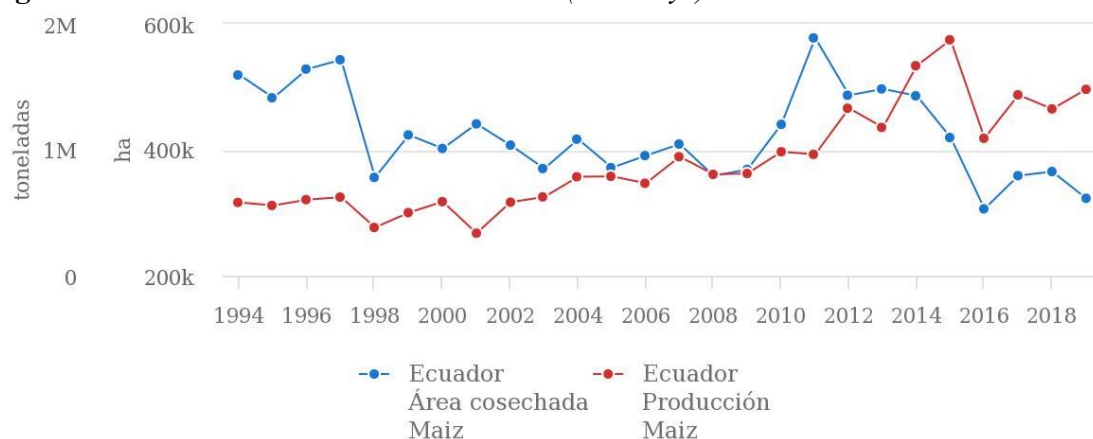
Reino	Plantae
Sub-Reino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Sub-Clase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceas
Sub-Familia	Panicoideae
Tribu	Maydeae
Género	Zea
Especie	Mays

Fuente: (Utrera Velázquez & Jiménez Jerez, 2021)

3.2.4 Producción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más cultivados en la provincia Bolívar y a nivel nacional, específicamente en las zonas rurales, por ello se decidió utilizar los residuos (fucas) para esta investigación.

Figura 4. Producción/Rendimiento de Maíz (*Zea mays*) en Ecuador 1994-2019



Source: FAOSTAT (jun. 25, 2021)

Fuente: FAOSTAT 2019

Tabla 5. Producción de maíz (*Zea mays* L.) Por provincias año 2019

Región y Provincia		Superficie (Has.)		Producción (Tm.)	Ventas (Tm.)
		Sembrada	Cosechada		
TOTAL NACIONAL		15,505	14,612	53,741	45,871
Región sierra					
AZUAY	Solo	779	764	1,053	87
	Asociado	339	314	425	37
BOLÍVAR	Solo	1,087	1,084	4,769	4,645
	Asociado				
CAÑAR	Solo	352	301	288	84
	Asociado	100	72	96	6
CARCHI	Solo	835	835	3,592	3,522
	Asociado				
COTOPAXI	Solo	2,645	2,394	6,168	4,620
	Asociado	131	125	287	259
CHIMBORAZO	Solo	2,000	1,858	8,822	7,965
	Asociado	21	21	31	31
IMBABURA	Solo	1,013	902	2,786	2,361
	Asociado	183	183	270	227
LOJA	Solo	893	884	2,634	2,150
	Asociado				
PICHINCHA	Solo	2,312	2,133	9,937	8,408
	Asociado	104	98	192	157
TUNGURAHUA	Solo	2,585	2,517	12,040	11,018
	Asociado	88	88	271	234
SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS	Solo	13	13	61	61
	Asociado				

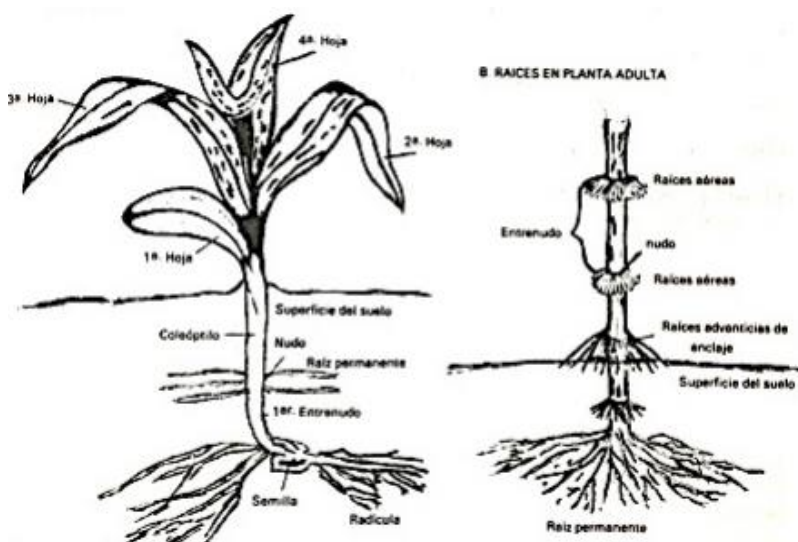
Fuente: Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), elaborado por el INEC en 2020

Como se puede apreciar en la Tabla 5, la provincia en la que se desarrolló este proyecto es una de las principales productoras de este cultivo, lo que aún se acrecienta más en las comunidades indígenas guarandeanas, donde el maíz es con diferencia la especie más cultivada.

3.2.5 Descripción de la planta de Maíz (*Zea mays L.*)

El sistema radicular del maíz se desarrolla a partir de la propia semilla, la radícula emerge y de ahí van desarrollándose las raíces. El crecimiento de las raíces disminuye cuando la plúmula emerge de la vaina, y se detiene completamente bajo condiciones climáticas adecuadas, o normalmente cuando aparecen las tres primeras hojas de la plántula (Deras Floras, 2020).

Figura 5. Descripción de las partes del maíz (*Zea mays L.*)



Fuente: (Delgado Hernández, 2018)

- **Hoja**

Son largas, lanceoladas, alternas y de gran tamaño. Se encuentran abrazando al tallo y con presencia de vellosidad en el haz (Coral, 2017).

- **Tallo**

El tallo conforma más del 50% de biomasa de toda la planta de maíz y representa la mayor cantidad de contenido de la fibra de mayor digestibilidad que la mazorca y el grano (Fassio A., 2019).

3.2.6 Residuos del maíz (*Zea mays L.*) y su contaminación

El maíz como todo cultivo agrícola genera residuos, que muy pocas veces son aprovechadas por el hombre. Este cultivo está compuesto por una gran cantidad de biomasa (rastreo de maíz o chala), a la hora de la cosecha el grano de maíz constituye un 40% o 50%, mientras que el resto son desechos (tallos, hojas, limbos y tusa entre otras.), es decir que los residuos generados a partir de la producción del maíz son alrededor de 20 y 25 ton/ha, esto dependerá en gran magnitud de la variedad de maíz y del suelo donde sean producidas. Unos de los métodos más utilizados para la eliminación de los restos del maíz es mediante la quema, esta práctica es muy perjudicial por el humo que genera afectando directamente a las zonas aledañas y también libera el gas carbono que afecta directamente al calentamiento global del planeta (Burgos, F.; Michilena, 2015).

3.2.7 Composición química de la paja del maíz (*Zea mays L.*)

Se detalla la composición química de la paja de maíz.

Tabla 6. Composición química de paja del maíz (*Zea mays L.*)

Contenido químico (%)	Paja de maíz
Materia Seca (MS)	90,6
Cenizas	7,59
Materia Orgánica	92,4
Proteína Bruta	7,68
Extracto de Éter	0,82
Extracto libre de Nitrógeno	45,6
Fibra Bruta	38,3
Fibra de Detergente Neutra	66,4
Fibra de Detergente Ácida	37
Lignina de Detergente Ácida	18,3
Energía Metabolizable (MJ/kg de MS)	7,14

Fuente: (Haile et al., 2017)

3.3 Estiércol bovino

El estiércol son expulsiones sólidas de los animales, el estiércol ovino, aviar, vacuno, porcino y de otros animales domésticos pueden llegarse a descomponer de manera automática pero lenta, este proceso se puede acelerar al incorporar material vegetal, ya que se encarga de contribuir con nitrógeno y de esta forma se incita al proceso de descomposición (Rea, 2018). El estiércol bovino es uno de los más abundantes en las Comunidades de la Organización Inti Churi, dónde son desperdiciados en su mayoría, ya que no se da ninguna utilidad a esta materia orgánica por falta de conocimiento. En muchos de los casos estas materias orgánicas son desechadas en los ríos, vertientes o en los mismos lugares de pastoreos.

En la organización Inti Churi, según los datos obtenidos por parte de los dirigentes, actualmente cuentan con alrededor de 3000 cabezas de ganado bovino, las cuales están divididas en tres líneas como se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7. *Número de cabezas de ganado de la Organización Inti Churi*

	Toros/vacas	Torettes/vaconas	Terberos
Número de cabezas	1500	650	500
T de estiércol anual	27.375	11.862,5	4.927,5
Total (Tn/Año)		44.165	

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de los dirigentes de la Organización Inti Churi.

En la Tabla 8 se muestra la composición química del estiércol fresco de bovino con el que se trabajó en esta investigación.

Tabla 8. *Composición química del estiércol fresco de ganado bovino*

Nutrientes	Vacunos
Materia orgánica (%)	48,9
Nitrógeno total (%)	1,27
Fosforo asimilable (P ₂ O ₅ %)	0,81
Potasio (K ₂ O %)	0,84

Calcio (CaO %)	2,03
Magnesio (MgO %)	0,51

Fuente: (Rea Galeas, 2014)

3.4 Lactosuero

En los últimos años la industria quesera ha ido aumentando paulatinamente su producción, por ello se ha incrementado la generación de suero de leche a nivel mundial. Hoy en día el suero de leche es utilizado ampliamente como alimento para animales de granja tales como ganado porcino y terneros, sin embargo a nivel agroindustrial no es empleado para la elaboración de nuevos productos de ningún tipo (Cargua Alcocer J, 2017). De acuerdo con Lappa et al.,(2019) la producción de lactosuero se ha incrementado cerca del 3% anual en los últimos 21 años, en el año 2016 la producción mundial alcanzó casi 200 millones de toneladas.

El lactosuero, o suero de leche, es el líquido que se separa durante la elaboración del queso y contiene los componentes que no se integran en la coagulación de la caseína. Posee alto contenido nutricional, sin embargo, un porcentaje mínimo es utilizado como alimento para animales de granja y el restante desechado, causando problemas de contaminación en ríos y suelos (Brito et al., 2015). Actualmente a la quesera de la organización Inti Churi, diariamente llegan unos 250 litros de leche aproximadamente para la elaboración del queso. Normalmente por cada kilo de queso se producen 9 lt de suero, esto quiere decir que alrededor del 90% del volumen de leche es suero. En el caso de la organización se obtendrían uno 225 lt de suero al día, que son distribuidos a los productores para la alimentación de animales y el restante es desechado en las fuentes de agua causando una gran contaminación.

De acuerdo a Vera, (2019) el suero de leche se puede clasificar de dos maneras, en función de su pH. El suero de queso se clasifica de acuerdo a su nivel de acidez en suero dulce o ácido. El suero ácido tiene un pH de 5, que se obtiene después de la fermentación o adición de ácidos orgánicos o minerales. El suero dulce cuenta con un pH de entre 6 y 7, y se genera por la adición de enzimas proteolíticas como quimosina.

Tabla 9. *Composición química del lactosuero*

Componentes	Lactosuero dulce	Lactosuero ácido
Agua	93	93
Grasa	0,3	0,1
Proteína	9,8	0,6
Lactosa	4,9	4,3
Ceniza	0,56	0,46
Ácido láctico	0,2-0,3	0,7-0,8

Fuente: (Chacón et al., 2017)

3.5 Inóculo

El inóculo o iniciador, como es llamado generalmente, es un conjunto de microorganismos en un medio determinado, que se pueden encontrar en las plantas de tratamiento de aguas residuales, específicamente en los lodos aerobios, o también, se podrán obtener en los laboratorios de investigación. Así que, los inóculos tienen como propósito acelerar el proceso de descomposición de las materias orgánicas (Rojas Gracia, 2020).

3.6 Biogás

El biogás es principalmente una combinación de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) producido por la co-digestión Anaeróbica (DA) de la materia orgánica. El metano es un componente energético con un alto valor calorífico ($\sim 9,4 \text{ MJ/m}^3$), que puede ser usado con diferentes propósitos como la generación de calor para distintas aplicaciones o la producción de electricidad, mediante un motor de cogeneración. Si el biogás es refinado y convertido en biometano, es posible emplearlo como combustible para los vehículos (Suárez, 2019). Se puede producir a partir de residuos agrícolas, desechos biológicos municipales o industriales y biomasa sostenible, resulta especialmente interesante cuando se usan materiales que están disponibles localmente (Kasinath, 2021). El creciente interés hacia la generación de biogás a partir de residuos biológicos a través de la co-digestión anaeróbica compleja (DA) abrió nuevas vías en la mejora de los procesos de producción de biogás y su graduación (Mishra, 2021).

El interés en los usos novedosos del biogás ha aumentado recientemente debido a las preocupaciones sobre el cambio climático y un mayor énfasis en las fuentes de energía renovables. Aunque el biogás se utiliza con frecuencia en aplicaciones de bajo valor como calefacción y combustible en motores, o incluso simplemente en antorcha, el refinado es una estrategia emergente para convertir el biogás en gas de síntesis, que luego podría usarse para obtener combustibles líquidos y químicos de alto valor agregado (Zhao, 2020)

La presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el biogás afecta negativamente a la salud humana y corroe el metal. Por lo tanto, la eliminación del H_2S del biogás antes de su uso es un requisito esencial en muchos casos. Recientemente, los filtros biperickling (BTF) se han aplicado ampliamente al tratamiento de H_2S , tanto a escala de laboratorio como industrial (Nhut, 2020). En China los digestores de biogás domésticos coexisten con plantas de biogás de mediana y gran escala (MLBP). Aunque el número de MLBP en China fue casi dos veces mayor que en Europa, el rendimiento de la producción de biogás anulado fue solo la mitad de los de Europa (Xue, 2020).

3.6.1 Características del biogás

Las soluciones de biogás suelen abarcar varios sectores, como la manipulación de residuos, la energía y el transporte. Si bien esto puede ser una ventaja en comparación con otras alternativas, también crea una estructura de política intrincada que es difícil de revisar, lo que dificulta la evaluación de las consecuencias de los diferentes cambios de política que podrían no estar directamente relacionados con el biogás (Gustafsson, 2021). La creciente preocupación por la sostenibilidad de nuestro planeta ha marcado el camino hacia el desarrollo de formas de energías alternativas y renovables. Un ejemplo es el uso de desechos (por ejemplo, lodos de depuradora, residuos forestales, agroindustria y procesamiento de alimentos) para producir biogás (Bragança, 2020).

La crisis energética mundial ha impulsado la búsqueda exhaustiva de la utilización de recursos energéticos eficaces para los próximos 200 años. El biogás se considera un recurso energético holístico y flexible que no solo genera electricidad, calor y energía, sino que también presenta propiedades ecológicas. Estas características incluyen una baja emisión de compuestos tóxicos (Giwa, 2020). La combustión de biogás genera CO_2 , con una tasa de 83,6 kg por GJ (Paolini, 2018), lo que comparándolo con los combustibles convencionales, cuyas cifras son 741 kg CO_2 por GJ en el caso del diésel, 733 kg por GJ de petróleo crudo, 774 kg por GJ en el caso de fuelóleos, 1012 kg por GJ en el caso de

lignito, 1096 kg por GJ en el caso de madera y 1060 kg por GJ en el caso de turba, explica que el biogás haya ganado recientemente una popularidad creciente en todo el mundo (Quaschnig, 2019). La creciente conciencia de la importancia de la biodiversidad en los agro ecosistemas para aumentar y asegurar el suministro de biomasa ha despertado el interés de gobiernos, agricultores y operadores de plantas de biogás en cultivos alternativos para la producción de biogás (Gansberger, 2018).

3.6.2 Producción de biogás

La producción de biogás es una estrategia ecológica para la producción de energía a partir de biomasa, siendo además que el residuo se puede utilizar como acondicionador del suelo. El biogás se produce por la descomposición biológica anaeróbica de materia orgánica. Se compone principalmente de metano y dióxido de carbono. El metano inflamable es su principal componente (50% -85%) y representa la principal fuente de energía. Se puede utilizar en calderas para generación de calor (Choong, 2018). Se estudió el efecto del pretratamiento hidrotermal (HTP) del residuo de tofu (TR) y la co-digestión de TR con hidrocarburo (HC) y una fracción líquida (LF) del pretratamiento hidrotermal sobre la producción de biogás. El rendimiento más alto de biogás y metano observado con el TR pretratado a una temperatura de HTP de 140 ° C alcanzó 288 y 207 L / Kg SV (sólidos volátiles), 24 y 37% por encima del TR crudo (control), respectivamente, y el contenido más alto de metano 72% (Choe, 2021).

El consumo de energía final ha aumentado continuamente. Las políticas gubernamentales utilizadas para aumentar el consumo de energía alternativa en todos los sectores; especialmente la agroindustria, que es en la que más agua residual procede de la producción y tiene potencial para producir biogás. Actualmente, Tailandia tiene más de 1.700 plantas de biogás y más de 150 plantas de residuos industriales que se unieron al proyecto de promoción del biogás para la industria apoyado por el Fondo de Conservación de Energía del Ministerio de Energía (Tonrangklang, 2019), si bien una gran cantidad de literatura ha analizado las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas de producción de biogás y los impactos potenciales de la producción de biogás en el suministro de alimentos, es necesario considerar cuidadosamente cuestiones más amplias relacionadas con los pilares económicos, ambientales y sociales de la sostenibilidad (Zhu, 2019).

La producción de biogás a partir de paja es una forma eficaz de gestionar la paja de los cultivos. Sin embargo, existen problemas técnicos difíciles de atajar en el proceso de fermentación del biogás, porque es difícil para las bacterias anaeróbicas degradar la paja de la cosecha para producir biogás. Actualmente, el pretratamiento de la paja se considera una buena forma de mejorar la tasa de co-digestión anaeróbica y mejorar la producción de biogás (Yu, 2019). Actualmente la producción de biogás a partir de vinaza tiene beneficios tanto económicos como medioambientales. Sin embargo, la vinaza tiene una relación de carbono a nitrógeno baja; por lo tanto, sustancias complementarias, por ejemplo, estiércol animal, desechos industriales orgánicos y fertilizantes de cal, deben agregarse para mejorar el rendimiento del biogás (Parsaei, 2019).

Si bien una gran cantidad de literatura ha analizado las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas de producción de biogás y los impactos potenciales de la producción de biogás en el suministro de alimentos, es necesario considerar cuidadosamente cuestiones más amplias relacionadas con los pilares económicos, ambientales y sociales de la sostenibilidad (Tong Zhu, 2019). La producción y el uso de biogás pueden representar una estrategia de beneficio mutuo que brinda múltiples oportunidades para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero responsables del cambio climático, al tiempo que ofrece una serie de importantes beneficios sociales, ambientales y económicos. Sin embargo, al igual que con otras vías de bioenergía, la sostenibilidad del biogás debe evaluarse cuidadosamente y monitorearse continuamente a la luz del contexto geográfico y temporal específico en el que se desarrolla (Pirelli, 2021).

La biorrefinación es un componente esencial para lograr una economía sostenible. Este enfoque hace uso de tecnologías de desperdicio cero y genera energía renovable. Además de convertir los desechos orgánicos en ganancias, la tecnología también evita la competencia con la biomasa y diferentes materias primas basadas en alimentos, el uso del agua y los impactos en la biodiversidad, lo que la convierte en una alternativa viable a los cultivos energéticos (Cruz, 2021).

3.7 Análisis proximal y físico-químico de las materias primas

Los análisis que se realizaron a las materias primas utilizadas en este proyecto fueron: humedad, volátiles, cenizas y el análisis elemental, todos estos análisis fueron realizados con las normas UNEN.

- **Humedad**

La humedad puede influir en gran medida en la fluidez de un material o materia prima. Se define como humedad la presencia de agua, podemos encontrar la humedad de dos maneras en los alimentos o materias primas estudiadas: humedad ligada y humedad no ligada.

- **Volátiles**

El contenido volátil de las materias orgánicas se puede evaporar con facilidad a temperatura ambiente, pero para la optimización del tiempo generalmente este análisis se lo realiza en una estufa.

- **Cenizas**

Las cenizas se definen como el residuo inorgánico que se obtiene al incinerar la materia orgánica de un producto cualquiera. Cuando los alimentos son tratados térmicamente a temperaturas entre 500 y 600°C, el agua y otros constituyentes orgánicos son transformados en presencia del oxígeno del aire en dióxido de carbono (CO₂) y óxido de nitrógeno (NO₂) mientras el hidrógeno es expulsado en forma de vapor de agua (Lucano Moreno, 2021).

- **Análisis proximal y elemental**

El análisis proximal está pensado para alimentos, por lo que el número de estudios o ensayos a realizar habrá de ser modificado, de tal forma que se lleven a cabo aquellos que tienen relevancia o significado en el caso de caracterizar biocombustibles. Para alimentos se estudia la humedad, el contenido en cenizas y/o volátiles, proteínas, lípidos, grasas, carbohidratos solubles y fibra (Gabbai et al., 2016). En este caso los análisis de humedad, cenizas y volátiles son los únicos que resultan interesantes, ya que permiten conocer la parte biodegradable de la muestra.

El análisis elemental, por su parte permite conocer cualitativamente la composición de una muestra orgánica (Artigue, 1998). En el caso de analizar biocombustible resulta especialmente interesante porque permite calcular la relación C/N, lo que facilita la comparación de distintas materias orgánicas, de acuerdo a su capacidad para poder suponer un sustrato nutritivo para las familias de microorganismos encargadas de la co-digestión anaerobia.

3.8 Co-digestión anaerobia

La co-digestión anaerobia posibilita la degradación de la fracción orgánica biodegradable presente en los residuos orgánicos, transformándola en biogás, con alto contenido en metano, por tanto, de aprovechamiento energético y en un residuo final estabilizado, con una alta tasa de destrucción de microorganismos patógenos, que reúne las condiciones para poder ser utilizado como mejorador del suelo (Aguilera, 2017) . Por ello, la co-digestión anaerobia presenta un balance energético positivo posibilitando tanto la prevención de la contaminación como la recuperación sostenible de la energía (Abuabdou, 2020).

3.8.1 Etapas de la co-digestión anaerobia

El proceso de co-digestión anaerobia en fases separadas es un esquema novedoso que mantiene dos reactores en serie, en los que se llevan a cabo las fases de acidogénesis y metanogénesis, respectivamente con el objetivo de conseguir un tiempo de retención global inferior al de un único reactor (Castellanos, 2017). En la etapa acidogénica (fermentación oscura) se genera un biogás con alto contenido en hidrógeno, lo que tiene especial interés ya que el hidrógeno se considera el vector energético del futuro próximo y su producción a partir de la degradación de residuos orgánicos presenta un especial interés (Angeriz, 2018), ya que, como se mencionó anteriormente, reciclar tomando el residuo como materia prima es la estrategia más afín al principio de sostenibilidad, y las biorefinerías constituyen una de las aplicaciones más avanzadas de la misma. (Muñoz-Menéndez, 2020).

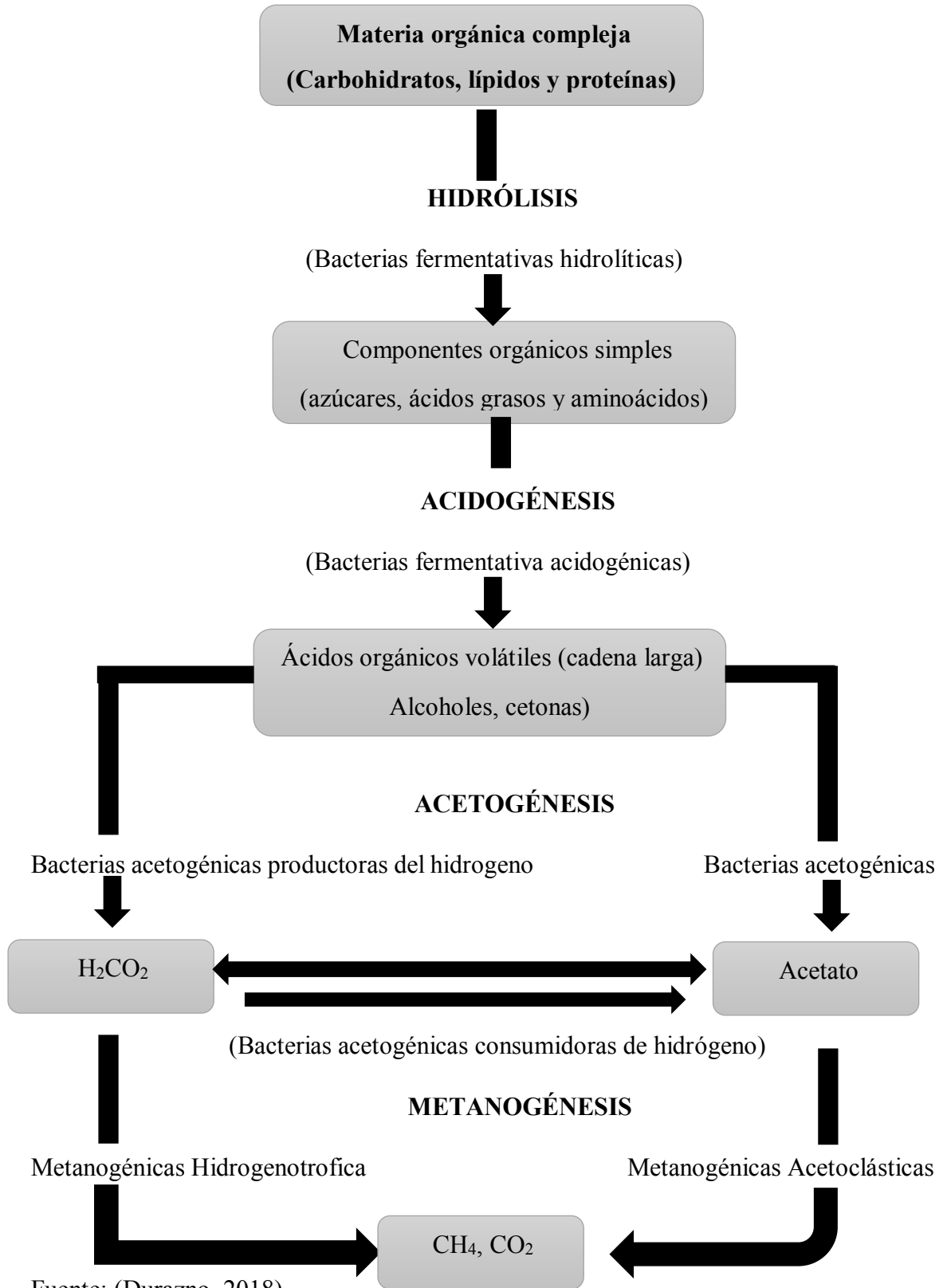
Los problemas en el control y estabilización de los sistemas convencionales de co-digestión anaerobia han llevado al desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, entre estas la separación de fases, que implica una configuración de reactores separados; una primera fase para la hidrólisis y acidogénesis y una segunda para la acetogénesis y metanogénesis, conectados en serie, permitiendo la optimización de cada proceso por separado. (Angeriz, 2018).

3.8.2 Descripción de las fases de la co-digestión anaerobia

El proceso de co-digestión anaerobia consta de varias etapas que se diferencian por la degradación del sustrato y en las cuales intervienen diferentes microorganismos. En la Figura 6 se puede visualizar un modelo más detallado del proceso de co-digestión anaerobia. El biogás contiene un porcentaje alto en metano, que oscila entre 60-70%; así

también dióxido de carbono el cual oscila entre 30-40 % y 1 % de sulfuro de hidrógeno que aporta un olor desagradable antes de que sea filtrado (Martinez, 2021).

Figura 6. Fases de la co-digestión anaerobia



A continuación, se describe paso a paso todas las fases involucradas en el proceso de la co-digestión anaerobia.

- **Hidrólisis**

La primera etapa del proceso de biodigestión es la hidrólisis, en la cual los compuestos particulados (carbohidratos, proteínas y lípidos) son degradados a compuestos químicos solubles por acción enzimática de distintas familias de bacterias (Chumacero, 2019). Por lo tanto, la fermentación acidogénica se presenta como una plataforma que consolida el concepto de biorefinería en lugar de una etapa de tratamiento convencional (Bentsen, 2019). La hidrólisis depende principalmente de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (% de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partícula, del pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Reyes Aguilera, 2017).

En esta etapa se da la transformación enzimática de materia orgánica insoluble y compuestos de mayor masa molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas, grasas) en materiales orgánicos solubles (monosacáridos, aminoácidos, azúcares) adecuados para la asimilación de los microorganismos como fuente de energía y carbono (Romero, 2020). A continuación en la Tabla 10 se muestran algunos ejemplos de las exoenzimas utilizadas para la degradación de distintos sustratos, las bacterias que las producen y los productos obtenidos en esta fase.

Tabla 10. *Sustratos y productos presentes en la fase hidrolíticas*

Sustratos	Exoenzimas	Ejemplo	Bacterias	Productos
Polisacáridos	Sacarolíticas	Celulasa	Cellulomonas	Monosacáridos
Proteínas	Proteolíticas	Proteasa	Bacillus	Aminoácidos
Lípidos	Lipolíticas	Lípasa	Mycobacterium	Ácidos grasos

Fuente: Adaptado de “The microbiology of anaerobic digesters (Chumacero, 2019)

La facilidad con la que los compuestos orgánicos son hidrolizados influye significativamente en el tiempo requerido para completar el proceso de biodigestión anaerobia y, por tanto, en la cantidad de biomasa que el biodigestor puede procesar por unidad de tiempo.

- **Acidogénesis**

En la acidogénesis, los productos de la hidrólisis son fermentados en ácidos grasos de cadena larga (LCFA) y ácidos grasos volátiles (VFA). Como productos adicionales se obtienen también dióxido de carbono e hidrógeno (Chumacero, 2019). En esta fase, las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos que proceden de la hidrólisis transformándolos en ácidos grasos volátiles (AGV) tales como el acético, propiónico, butírico y valérico (Reyes Aguilera, 2017). Las bacterias acetogénicas producen H₂, y la formación de acetato por oxidación de los ácidos grasos de cadena larga, se da espontáneamente y es termodinámicamente posible a una baja presión del hidrógeno. Estas bacterias pueden tomar la energía necesaria para su supervivencia y crecimiento, solamente a una baja concentración de hidrógeno (Maria Celeste Canales Garcia, 2018).

En esta etapa se obtienen dos tipos de ácidos orgánicos: las primeras producen ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de los ácidos grasos, mientras que las segundas producen ácido acético a partir del dióxido de carbono e hidrógeno (Reyes Aguilera, 2017).

- **Acetogénesis**

La acetogénesis es la etapa en la cual las bacterias acetogénicas actúan sobre esos ácidos grasos intermedios produciendo ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Las primeras producen ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de los ácidos grasos, mientras que las segundas producen ácido acético a partir del dióxido de carbono e hidrógeno. (Reyes Aguilera, 2017). Los microorganismos que desarrollan esta oxidación son bacterias sintróficas denominadas "acetogénicas" u "organismos protón-reductores obligados" (Calderon, 2017). En esta etapa predominan condiciones totalmente anaerobias y la proporción de metano se incrementa, mientras el contenido CO₂ decrece, los ácidos grasos se transforman en biogás y su concentración disminuye, en esta fase los productos que se obtuvieron en la fase anterior se consumen como sustrato por otros microorganismos para convertirlos en productos: metanogénicos, alcoholes y ácidos grasos volátiles (Melany, 2020).

- **Metanogénesis**

De acuerdo a (Arantes, 2017) en la etapa metanogénica se produce un rápido consumo de oxígeno, del nitrato y sulfato por los microorganismos, produciéndose la

metanogénesis. Las bacterias metanogénicas (producen metano como parte de su metabolismo energético) actúan sobre el hidrógeno y/o CO₂, transformándolos en gas metano (CH₄). En estas condiciones, el nitrato se transforma en amonio y el fósforo queda como fosfato. Por otro lado (Calderon, 2017), menciona que existen diferentes parámetros que intervienen en el proceso y deben ser controlados con el fin de sostener el equilibrio y la composición del biogás (Rey, 2014), de esta forma, el CH₄ es elaborado a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂, pudiendo crearse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol (Reyes Aguilera, 2017).

Las arqueas metanogénicas se pueden clasificar en dos subpoblaciones dependiendo del compuesto que metabolizan. Acetoclásticas son aquellas bacterias encargadas de transformar el acetato, metanol y algunas metilaminas en metano, produciendo el 70% del metano total. Hidrogenotróficas son aquellas bacterias encargadas de transformar el H₂, CO₂ y el ácido fórmico en metano, produciendo el 30% del metano total (Chumacero, Diseño e implementación de reactor anaerobio, 2019). La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados (Castellanos, 2017).

3.8.3 Parámetros de la co-digestión anaerobia

Como se expuso anteriormente, el proceso de la co-digestión o fermentación anaerobia es un proceso muy complejo que involucra diversas familias de microorganismos, por lo que esto aumenta exponencialmente la cantidad de factores ambientales a los que son susceptibles los mismos. De acuerdo al informe de la FAO et al., (2011) sobre biogás, estos son: la naturaleza y composición bioquímica de las materias primas, la relación carbono-nitrógeno de las mismas, los niveles de sólidos totales y volátiles presentes en la digestión, la temperatura en el proceso, el tiempo de retención hidráulica y la velocidad de carga orgánica, el pH o acidez, el potencial redox, la presencia de nutrientes (sales), la presencia de tóxicos o inhibidores del proceso (metales pesados), y la presencia de promotores de la metanogénesis (inoculantes biológicos).

Estos factores se pueden clasificar en factores ambientales y en factores operacionales. Los primeros, por tanto, serán los que condicionen el proceso de la co-digestión anaeróbica, mientras que los segundos serán los que habrán de programarse para tener la producción más óptima posible.

3.8.4 Parámetros ambientales de la co-digestión anaerobia

Estos parámetros son indicadores del desarrollo de la co-digestión anaerobia dentro de un biodigestor, también mediante estos parámetros se pueden detectar posibles problemas, así como también posibles soluciones que se generen dentro de este proceso.

- **Ph**

El potencial de hidrógeno (pH) tiene un papel muy importante en los procesos de producción de metano. Con un pH por debajo de la establecido aumenta la actividad metanogénica, esto da lugar a la acumulación de los sólidos volátiles dentro del biodigestor (Alvares Macias & García Lino, 2020). El pH puede variar dependiendo de las materias primas y las características que estas tengan al momento de ingresar al biodigestor y también debido a los procesos que ocurren allí dentro (por ejemplo, acidosis). Resulta fundamental entonces realizar controles periódicos del pH, tanto del material que ingresa (materia prima) como del que sale (biol), a fin de evitar problemas de acumulación de sólidos volátiles, lo que pueden disminuir la producción de biogás. Un pH óptimo se encuentra en el rango de 7, pero también se puede trabajar con un pH de 6,5 a 7,5 según la bibliografía (FAO, 2019).

- **Alcalinidad**

Este parámetro determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes (Lorenzo Acosta, 2018). La alcalinidad es una mejor alternativa que el pH para prever inestabilidades en el medio del reactor, pues la acumulación de los ácidos grasos volátiles consumirá primero la alcalinidad del medio antes que los cambios de pH sean notables en sistemas con una capacidad tampón alta o moderada. La alcalinidad intermedia indica el nivel de acumulación de ácidos grasos volátiles, por tanto, es un indicador relevante de la situación del proceso; en cambio la alcalinidad parcial, representa la alcalinidad del bicarbonato en el medio y es una medida de la capacidad tampón del reactor (Lorenzo, 2017).

Las concentraciones altas de alcalinidad, por encima de 6500 mg/L, y valores de pH superiores a 7,4, sugieren que la actividad bacteriana puede verse afectada debido a varios efectos tóxicos de alcalinidad. Cabe destacar también el efecto negativo de las sales, que pueden disminuir la actividad bacteriana, algunas de ellas, como sales de potasio y

amonio, causan efectos tóxicos, sin embargo, la utilización de algunas sales en los digestores para el control de pH es común (Yenigun, 2017). El monitoreo de la alcalinidad en reactores anaerobios es más eficiente que el monitoreo de pH, principalmente debido a que la alcalinidad es expresada en escala lineal mientras el pH se expresa en escala logarítmica. Por lo tanto, una pequeña disminución en pH implica un gran consumo de alcalinidad, resultando es una considerable pérdida de capacidad buffer (Moraes & Zaiat, 2017).

- **Relación carbono-nitrógeno de las materias primas**

Las bacterias dentro del digestor deben tener contenidos de carbono nitrógeno (C/N) adecuados para su correcto crecimiento. De esta forma, los nutrientes dependerán de la composición del material introducido en el digestor. La relación carbono nitrógeno (C/N) debe estar en torno a 30/1, valores inferiores pueden disminuir la velocidad de reacción (Elias, 2018). Las excretas de humanos y de animales son ricos en nitrógeno, con una relación C/N inferior a 25:1, durante la fermentación tienen una mejor velocidad de biodegradación y de generación de gas; en cambio los residuos agrícolas son ricos en carbono, con una relación C/N superior a 30:1, pero con una generación más lenta de gas en el proceso de co-digestión (Lorenzo Acosta, 2018). La combinación adecuada de la materia prima a digerir condiciona el desarrollo del proceso y la producción de biogás (Palau Estevan, Carmen Virginia, 2020).

En general las materias primas ricas en carbono producen más gas que las ricas en nitrógeno, así mismo es más rápida la producción de gas a partir de materias primas nitrogenadas (excretas), que las ricas en carbono (materiales lignocelulósicos). Mientras en los primeros 10 días de fermentación las materias primas nitrogenadas generan de 34,4%-46% del total de gas producido, las ricas en carbono solo aportan el 8,8% (Elias, 2018).

- **Demanda química de oxígeno**

Mediante la medición de la demanda química de oxígeno (DQO) se determina el contenido de la materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra. Mediante este parámetro se define la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar completamente la biomasa presente en los biodigestores. La carga realizada a un biodigestor es la cantidad

máxima asimilable que tiene el mismo y se puede medir de la siguiente manera, DBO o SV / m³ del biodigestor (Rodríguez, 2018).

- **Nutrientes**

Generalmente las bacterias que intervienen en el proceso de fermentación anaerobia tienen requerimientos nutritivos simples para su desarrollo. Los principales nutrientes son carbono, nitrógeno, fósforo y pequeñas cantidades de azufre, vitaminas, ácidos grasos, aminoácidos (que pueden ser aportados por otras bacterias) y una serie de elementos minerales como K, Na, Ca, Mg y Fe en muy bajas concentraciones (Lorenzo Acosta, 2018). Las bacterias en el proceso de co-digestión anaerobia (DA) requieren micronutrientes y elementos traza como nitrógeno, fósforo, sulfuros, potasio, calcio, magnesio, hierro, níquel, cobalto, zinc, manganeso y cobre para el crecimiento óptimo. A pesar que estos elementos son necesarios en concentraciones extremadamente bajas, la ausencia de estos nutrientes tiene efectos adversos sobre el crecimiento y rendimiento microbiano adversos (Parra Huertas, 2019).

El sustrato debe contener ciertos elementos y compuestos necesarios para que las bacterias los utilicen para su crecimiento y reproducción, tales como el carbono, nitrógeno, fósforo y algunos elementos traza como azufre, potasio, calcio, sodio, magnesio y hierro. Todas estas sustancias se pueden encontrar en los lodos residuales. Se han estudiado diversas proporciones de nutrientes mayoritarios requeridos para llevar a cabo el proceso de la co-digestión anaerobia (DA): la relación carbono-nitrógeno (C:N) oscila entre 15-30:1 y la relación carbono-fósforo (C:P) entre 75-113:1, lo cual se basa en la escasa necesidad de nutrientes requeridos por los microorganismos anaerobios, debido a los bajos índices de producción de biomasa (BERNAL-MARTINEZ, 2020).

- **Potencial redox**

De acuerdo a Martí Herrero(2019), el potencial de reducción-oxidación indica el tipo de ambiente que se está generando dentro del reactor, las reacciones tienden a la donación o aceptación de electrones. Las bacterias anaerobias requieren de un ambiente reductor para su óptimo desempeño que va de -300 a -330 mV. La alta eficiencia de un proceso de co-digestión anaerobia está relacionada con un bajo potencial redox (ORP), esto se logra si se evita el ingreso de agentes oxidantes como oxígeno, sulfatos, nitratos o nitritos. La medición del ORP se realiza mediante un electrodo que determina el voltaje entre las

sustancias oxidantes (donadores de electrones) y las sustancias reductoras (captadores de electrones) que están disueltas en el digestato (Lorenzo, 2017).

- **Tóxicos inhibidores**

Existen varias sustancias tóxicas que pueden estar constituidas por la misma materia prima, que a su vez pueden afectar a la co-digestión anaerobia y estas pueden desarrollar actividad inhibidora y afectar a las bacterias (BERNAL-MARTINEZ, 2020).

- **Sólidos totales**

De acuerdo a Rodriguez (2018), están compuestos por sólidos fijos (SF) y por los sólidos volátiles (SV), ya que estos abarcan todos los compuestos orgánicos e inorgánicos. Mediante estas medidas se puede calcular el porcentaje de materia sólida inerte y la cantidad materia orgánica existente en la biomasa.

- **Sólidos volátiles**

Demuestran la cantidad de material que se queda tras una incineración del material orgánico. En vista que la materia orgánica es primordial para el crecimiento de los microorganismos, es muy importante realizar los análisis de la cantidad de sólidos volátiles para saber el porcentaje de material orgánico que existe en la muestra (Mirales Pascual, 2018). En la mayoría de los sustratos utilizados para la co-digestión anaerobia se requieren períodos largos de retención, para disminuir la cantidad de SV y que ocurra la conversión a biogás. Cuanto mayor sea la carga orgánica, mayor será el tiempo de retención hidráulico para la disminución de los sólidos volátiles (Herrera, 2018).

- **Contenido de ácidos grasos**

Los ácidos grasos volátiles (AGVs) producidos durante la co-digestión anaerobia tienden a reducir el pH, esta reducción es normalmente contrarrestada por la actividad de las bacterias metanogénicas, que también producen alcalinidad en la forma de dióxido de carbono, amonio y bicarbonato (S., 2019). Los AGVs son los intermediarios más importantes del proceso de la co-digestión anaerobia, donde ellos son degradados por las bacterias acetogénicas en asociación con las metanogénicas, sin embargo, la producción de AGVs puede ser tóxico para los microorganismos, especialmente para los metanógenos a una concentración de 6,7 a 9 mol/m³ (Batstone D. J., 2020).

Estas concentraciones son el resultado de la acumulación provocada por un desbalance, que puede ser ocasionado por diferentes factores como la variación de la temperatura, una sobrecarga orgánica y/o la presencia de algún compuesto tóxico, entre otros (S., 2019). En tal caso los metanógenos no podrán eliminar el hidrógeno y los AGVs aumentarán su concentración con rapidez. Como resultado los ácidos se acumulan y el pH del proceso disminuye pudiendo llegar hasta un valor tal que la hidrólisis y/o la acetogénesis pueden ser inhibidas (C., 2017).

3.8.5 Parámetros operacionales

- **Temperatura**

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la co-digestión anaerobia, la temperatura afecta a la cinética de los microorganismos, incluyendo la tasa de crecimiento específico, la constante de saturación media, la tasa crecimiento y la tasa de mortandad. A mayor temperatura, mayor es la tasa de crecimiento de los microorganismos, y por tanto, mayor es la producción de biogás, es por ello que el control de la temperatura es fundamental en un biodigestor (Núñez-Pintado, 2017).

En el proceso de la co-digestión anaerobia existen tres rangos de temperatura que se detallan a continuación:

- ✓ Psicrofílico. En este rango la actividad de los microorganismos es baja, ya que, las bajas temperaturas disminuyen la velocidad de crecimiento de los microorganismos, en este rango la temperatura está por debajo de los (25 °C), en esta etapa la co-digestión anaerobia tarda alrededor de 100 días en completarse (Marco, 2019).
- ✓ Mesofílico. Comprende un rango de temperatura de 25 a 45 °C, en esta etapa la actividad bacteriana es media. En un medio con estas temperaturas la co-digestión anaerobia tarda alrededor de 20 a 60 días en completarse (Castro Granado, 2018).
- ✓ Termofílico. Este rango de temperatura está comprendido por temperaturas de 45 a 80 °C. A estas temperaturas se eliminan algunos microorganismos patógenos, pero también corre el riesgo de que el proceso de la biodigestión anaerobia sea inestable (Castro Granado, 2018).

Es muy importante mantener una temperatura constante en el reactor, dado que el proceso anaerobio se considera muy sensible a cambios bruscos de temperatura, pudiendo dar lugar a un desequilibrio de las poblaciones microbianas con el consiguiente fallo del proceso (Barbazán, 2018). El incremento de la temperatura aumenta la presencia de amoníaco libre en el digestato lo cual produce inhibición en los microorganismos. Para la medición de la temperatura normalmente se utilizan sensores termoresistivos, como los PT100, o los termómetros láser, los cuales son usados normalmente en la industria alimentaria y en biotecnología (M. Schon, 2018).

- **Agitación**

La homogenización del medio es un parámetro muy importante porque mediante la agitación se puede distribuir correctamente la biomasa y la temperatura dentro del biodigestor, también mediante la agitación se evitará la formación de sedimentos y espumas que dificultan el proceso de la co-digestión anaerobia (Sanz Herrero, 2018). Los procesos de agitación pueden ser clasificados en dos grupos, el primero es aquel en el que se necesita algún tipo de uniformidad en el medio de cultivo, y el segundo es para aquellos en los que se necesite algún tipo de transferencia de masa o reacción química como criterio de operación (Aldo Hernández, 2019).

Los tipos de agitación aplicada en los digestores pueden ser mecánica o neumática por recirculación del gas o líquido (éste último sistema ofrece más ventajas que el primero). La agitación mecánica consiste en la aplicación de un dispositivo de paletas o hélice dentro del digestor (Aldo Hernández, 2019). La agitación neumática por recirculación del gas consiste en inyectar de nuevo parte del gas producido, por la parte inferior del digestor con lo que se crea un flujo turbulento en el interior; este método proporciona una mayor producción de gas y una más rápida estabilización de la materia orgánica (Fe, 2019). La velocidad de agitación ha resultado ser un factor que influye en la producción de gas. Se ha comprobado que altas velocidades resultan ser perjudiciales ya que pueden romper los agregados bacterianos entre las bacterias productoras de (IDAE, 2020).

- **Tiempo de retención hidráulica**

El tiempo de retención hidráulica (TRH) no es más que el tiempo que la materia orgánica permanece en el interior del biodigestor hasta su salida, esto depende mucho de la

temperatura con la que se trabaje, el tiempo de retención puede variar de 15 a 45 días (Sánchez Almagro, 2016).

Para calcular el tiempo de retención de la carga orgánica se debe tomar en cuenta los días y la temperatura del biodigestor.

$$TR = \text{Tiempo de carga del biodigestor}_{\text{días}} \times T^a_{\text{de las bacterias}}$$

Como se muestra a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. *Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables*

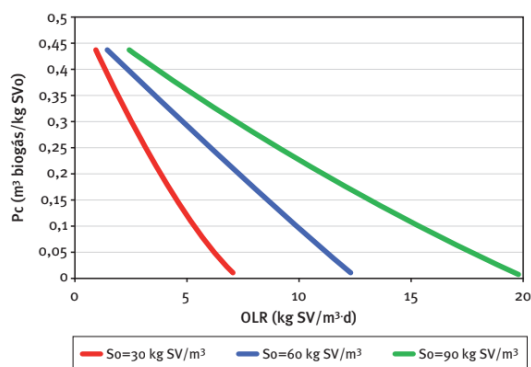
Temperatura	Tiempo de Retención (TR)
35 °C	25-30 días
30 °C	30-40 días
25 °C	35-50 días
20 °C	50-65 días
15 °C	65-90 días

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

- **Velocidad de carga orgánica**

Es el porcentaje de material orgánico introducido de acuerdo al volumen del biodigestor por un determinado tiempo. En ausencia de agentes inhibidores, elevadas cargas orgánicas llevan a una elevada producción de metano, es muy importante también recalcar el riesgo de alterar el pH y por ende la acidificación del material dentro del biodigestor (Cecilio & Yanes, 2020).

Figura 7. Velocidad de caga orgánica



Fuente: (BESEL, 2007)

- **Tipo de residuo**

Los residuos que se pueden utilizar en la co-digestión anaerobia son residuos orgánicos de origen animal, vegetal, agroindustrial, doméstico y forestal. Estos residuos deben tener las características para un correcto desarrollo de los microorganismos anaerobios. Para un correcto desarrollo del proceso microbiológico se necesitan fuentes de carbono y nitrógeno, además, tiene que estar presentes sales minerales en un porcentaje equilibrado. Por ello, la composición de las materias orgánicas que se vayan a utilizar en la co-digestión anaerobia tiene que ser estudiadas detenidamente (Rodríguez, 2018).

3.8.6 Cinética microbiana

La cinética microbiana busca explicar el desarrollo de los distintos microorganismos implicados en un proceso químico mediante modelos matemáticos predictivos. En procesos relacionados con la industria, o con un fin específico, resulta realmente importante este estudio porque del mismo dependerá el rendimiento o producción del proceso (V. E. Córdoba, 2016). Los principios de la cinética microbiana se postularon en la mitad del siglo XX. Los científicos Jacques Monod, Francois Jacob y André Lwoff desarrollaron este trabajo, pero con el paso de los años, sus estudios han sido corregidos y mejorados para distintos procesos químicos, centrándose en el desarrollo específico de los consorcios microbianos para cada proceso (Gallegos et al., 2014).

3.8.7 Crecimiento microbiano

En el crecimiento microbiano se tienen en cuenta principalmente dos factores, la tasa de crecimiento específico (μ) de los microorganismos estudiados y la concentración de

sustrato (S) que supondrá el alimento de los microorganismos. La relación entre estos dos factores determinará la velocidad de crecimiento de los microorganismos, y de esta derivaran las leyes empíricas que se conocen como modelos teóricos. (Velázquez Marti et al., 2016). Los modelos clásicos entendían el crecimiento microbiano de una forma lineal, mientras que los modelos más modernos, que tienen como máximo representante la función o modelo de Gompertz, van más allá y basan la relación entre la tasa de crecimiento específico y la densidad de población microbiana en una función exponencial, o más bien, sigmoideal (Gallegos et al., 2014).

La ecuación de Gompertz se corresponde con la Ecuación 1.

Ecuación 1

$$N_t C \exp\{\exp[-B(t - M)]\}$$

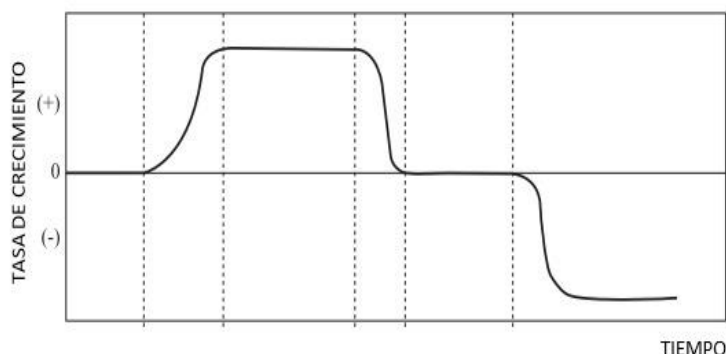
En esta ecuación la t corresponde al tiempo N_t hace referencia a la densidad de población microbiana en el tiempo determinado, C es la máxima densidad de población microbiana, M es el tiempo en el que la tasa absoluta del crecimiento microbiano es máxima, y B es la tasa de crecimiento microbiano relativo para M .

3.8.8 Fases de crecimiento

Según explico (Monod, 1949) las distintas fases que describió en el crecimiento microbiano son las siguientes:

1. Fase de retraso, donde la tasa de crecimiento es nula.
2. Fase de aceleración, donde empieza a aumentar la fase de crecimiento.
3. Fase exponencial, donde la tasa de crecimiento se mantiene constante.
4. Segunda fase de retraso, donde se reduce la fase de crecimiento.
5. Fase estacionaria, donde la tasa de crecimiento vuela a ser nula.
6. Fase de declive, con una tasa de crecimiento negativo.

Figura 8. *Fases del crecimiento microbiano.*



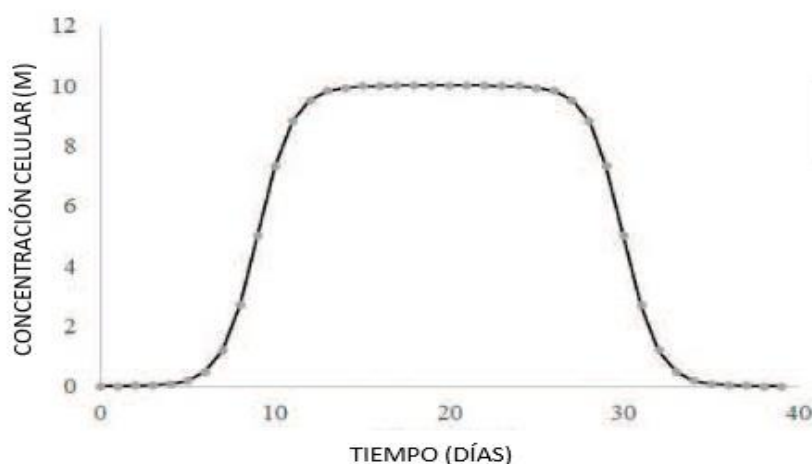
Fuente: (Monod, 1949)

3.8.9 Cinética microbiana en la co-digestión anaerobia

En el caso de la co-digestión anaerobia encontramos un proceso químico que comprende tres etapas principales: una primera fase hidrolítica, una segunda aceto/acidogénica y una última metanogénica. Como se ha manifestado anteriormente, en cada una de estas etapas intervienen distintos consorcios microbianos, con la peculiaridad de que, en cada fase los microorganismos que intervienen utilizan de sustrato el producto generado en la fase anterior. Por ello, las fases de crecimiento microbiano son distintas a las descritas anteriormente. Estas fases son las siguientes:

1. Fase de letargia, esta primera fase corresponde a un crecimiento lento de los microorganismos de la co-digestión anaerobia.
2. Fase de crecimiento, una vez adaptados al medio se produce un rápido incremento en la concentración celular, que termina cuando los microorganismos no tienen suficiente alimento y empiezan a competir por el sustrato.
3. Fase estacionaria, debido a los escasos de alimento los microorganismos no se multiplican y se mantienen estables durante un periodo de tiempo.
4. Fase de decrecimiento, en esta fase el sustrato ya es tan reducido que ni siquiera puede mantener a un número de microorganismos constante y estos van muriendo conforme va desapareciendo su alimento. (Velázquez Martí et al., 2016).

Figura 9. Evolución de la concentración celular en la co-digestión anaerobia



Fuente: (Velazquez Marti et al., 2016)

3.8.10 Modelo cinético de Gompertz

En realidad, el modelo de Gompertz es una función desarrollada por el mismo autor mucho tiempo antes de que Monod y sus compañeros empezaran a desarrollar los modelos de cinética microbiana, ya que fue en el siglo XIX. Gompertz postuló esta función para explicar mediante un modelo matemático, en forma de una función sigmoide, la evolución en la demografía del ser humano (Willekens, 2001). No fue hasta 1990 cuando (Zwietering et al., 1990) propusieron modificaciones en el modelo de Gompertz para ajustarlo al caso del crecimiento microbiano. Esto suponía un cambio radical, tal y como se explicó anteriormente, a lo que los modelos clásicos de Monod y compañía propusieron. De esta forma, empezó a entenderse y modelizarse el crecimiento microbiano de forma sigmoideal, suponiendo que este no tenía un punto a partir del cual parase, sino que se ralentizaba de forma gradual (Velázquez Martí et al., 2016).

La comprobación matemática de que no existe un máximo para el crecimiento microbiano se realiza derivando la ecuación de Gompertz e igualándola a cero. La contribución de (Zwietering et al., 1990) fue darle significado a las variables que existían en esta función, de acuerdo al crecimiento microbiano. De esta forma surge el llamado modelo modificado de Gompertz, el cual queda representado tal y como muestra la Ecuación 2. Siendo “X” la concentración celular microbiana para un tiempo determinado, “ t_{lag} ” el tiempo de latencia o de adaptación celular, “ $v_{máx}$ ” la velocidad máxima de crecimiento celular, “ t ” el tiempo estimado en el proceso, “ a ” la máxima concentración celular obtenible y “ e ” es considerado una constante.

Modelo modificado de Gompertz

Ecuación 2

$$X = a * e^{-e^{\left(\frac{v_{m\acute{a}x} * e}{a} * (t_{lag} - t) + 1\right)}}$$

3.8.11 Aplicación del modelo modificado de Gompertz a la producción acumulada de metano

El interés de este modelo para el caso de este estudio reside en aplicar, tal y como distintos autores apuntan, el modelo modificado de Gompertz en el rendimiento o producción acumulada de metano en un proceso de co-digestión anaerobia (V. Córdoba et al., 2018; Jeong et al., 2007; Varsha et al., 2020; Velázquez Martí et al., 2016). Partiendo del ratio de producto respecto a la biomasa utilizada, este se considera como el máximo, y tras realizar una integral definida de esta ecuación se obtiene la ecuación para la producción de metano acumulada. Después, se vuelve a derivar esta ecuación de forma que se obtiene la velocidad máxima de producción de metano acumulado.

Con la obtención matemática de estos parámetros ya se pueden aplicar al modelo modificado de Gompertz, obteniendo así un modelo matemático representativo de la cinética microbiana que supone la producción acumulada de metano. Esta función sería la que aparece en la Ecuación 3, en la que “M” es la producción acumulada de metano para un tiempo determinado, “ M_e ” es el potencial de metano producible, “ $v_{Mm\acute{a}x}$ ” es la velocidad máxima de producción de metano acumulado, “ t_{lag} ” es el tiempo de latencia o de adaptación del proceso para comenzar a producir metano, y “t” y “e”, al igual que en el modelo modificado de Gompertz simple, son el tiempo determinado y una constante.

Ecuación 3

Modelo modificado de Gompertz aplicado a la producción acumulada de metano en la co-digestión anaerobia.

$$M = M_e * e^{-e^{\left(\frac{v_{Mm\acute{a}x} * e}{M_e} * (t_{lag} - t) + 1\right)}}$$

CAPITULO IV

4. Marco metodológico

4.1 Ubicación de la investigación

Figura 10. Mapa político de la Provincia Bolívar.



Fuente: Paucar, 2016

4.2 Ubicación de la fase experimental

El estudio se realizó en fases. La fase experimental se realizó en los Laboratorios de Investigación, localizados en el sector de Laguacoto II. La fase de campo se realizó en las Comunidades de la Organización Inti Churi, Cantón Guaranda – Ecuador.

Figura 11

Ubicación de la fase experimental



Fuente: (Google Earth)

4.3 Situación geográfica y climática de la fase experimental

Se detalla la situación geográfica y climática correspondiente a la fase experimental de la investigación.

Tabla 12. *Situación geográfica y climática*

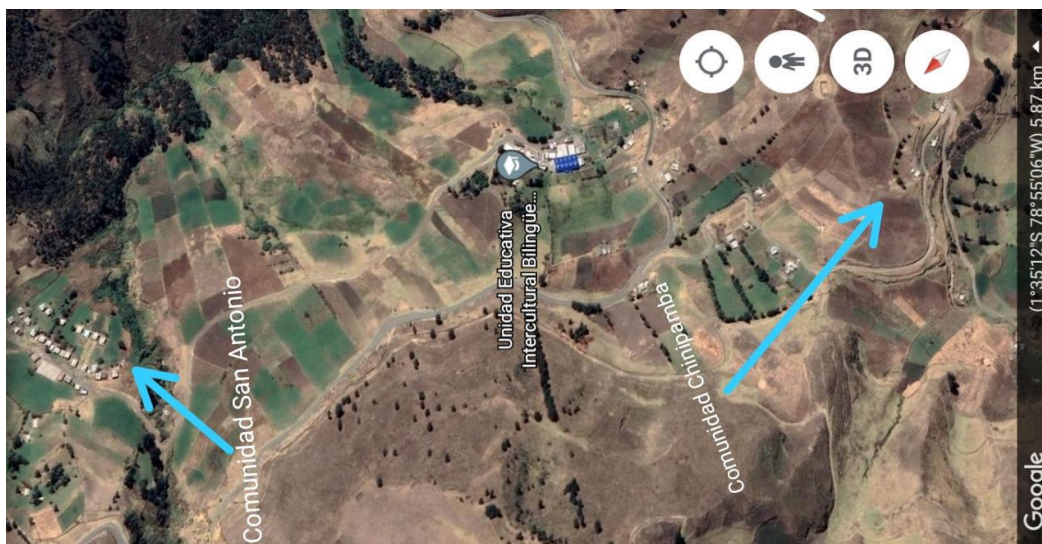
Ubicación	Localidad	Parámetros	Valor
Provincia	Bolívar	Altitud	2800 msnm
Cantón	Guaranda	Latitud	0.1° 34" 15" sur
Sector	Laguacoto II	Longitud	79° 0" 0.2" oeste
Dirección	Vía Guaranda-San Simón km 1 ½	Temperatura mínima	8 °C
		Temperatura media anual	13 °C
		Temperatura máxima	18 °C
		Humedad	75%

Fuente: Estación meteorológica, de la Universidad estatal de Bolívar. Laguacoto II

4.4 Ubicación de la fase de campo

La organización Inti Churi está ubicada a 19 km de la ciudad de Guaranda por la vía antigua a Riobamba, esta organización está compuesto por siete comunidades indígenas.

Figura 12. *Ubicación de la fase de campo.*



Fuente: (Google Earth, 2019)

4.5 Situación geográfica y climática de la fase de campo

A continuación, en la Tabla 13 se detalla los parámetros correspondientes a la situación geográfica de la fase de campo de la presente investigación.

Tabla 13. *Situación geográfica y climática*

Ubicación:	Localidad	Parámetros	Valor
Provincia	Bolívar	Altitud	3.335 m.s.n.m
Cantón	Guaranda	Latitud	0.1° 35'' 12'' sur
Parroquia	Veintimilla	Longitud	78° 55''0.6'' oeste
Organización:	Inti Churi	Temperatura mínima	7 °C
Comunidad	Chinipamba (1)	Temperatura media anual	12 °C
Comunidad	San Antonio (2)	Temperatura máxima	18 °C
Comunidad	Erapamba (3)	Humedad	75%
Región:	Sierra Centro		
Dirección	Vía Guaranda -Riobamba gallo rumi km 19		

Fuente: Unidad Educativa Inti Churi

4.6 Materiales y equipos

4.6.1 Equipos

Los equipos utilizados para la realización de la investigación fueron:

Tabla 14. *Equipos*

Equipo	Modelo	Función	Imagen
Incubadora-Esterilizador	Nplus / sfplus – memmert	<ul style="list-style-type: none"> • Esterilizar • Secar • incubar 	
Molino de cuchillas	GM 200 Retsch GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • homogeneizar muestras • Triturar materias secas 	
Mufla	F47915 Thermo scientific	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas de altas temperaturas • Pruebas de calentamiento • Incineración de muestras orgánicas e inorgánicas 	
Balanza analítica	DHAUS (0.001 g)	Pesar muestras	
Medidor de gases	Biogás 5000 Gas Analyser	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de CH₄ • Medición de CO₂ • Medición de O₂ 	

		<ul style="list-style-type: none"> • Medición de H₂S 	
Manómetro-termómetro	OHM HD2124.2	<p>Medición de presión de 10 a 500 bar</p> <p>Medición de temperatura</p>	
Potenciómetro	HACH HQ 40D	<ul style="list-style-type: none"> • Lecturas de PH • Lecturas de conductividad • Temperatura 	
Termómetro Infrarrojo Digital	Lica BZ-R	<ul style="list-style-type: none"> • Medir temperatura 	

Fuente: trabajo experimental

4.6.2 Materiales de laboratorio

- Crisoles y tapas
- Piseta
- Probeta
- Plato de aluminio
- Filtros de papel
- Vasos de precipitación
- Capsulas
- Mortero
- Parafilm
- Taype

- Soporte universal
- Pera
- Pipeta
- Frascos de color ámbar de 311 ml
- Tapas de aluminio
- Sellador de goma
- Sellador
- Cuchillo
- Tabla de picar
- Papel aluminio
- Recipientes de plástico
- Bolsas de papel
- Desecador
- Espátulas
- Pinzas
- Guantes de látex
- Guantes de resistencia a temperaturas de hasta 1000°C
- Tijera

4.6.3 Materiales de campo

- Geomembrana de alta densidad HDPE para biodigestor
- Tupas PVC
- Metro
- Marcador
- Plomada
- Piola
- Codo PVC
- Manguera de agua PVC
- Pegamento (Calipega, Pega tubo, Goma Blanca, Flex tape, Visarcol)
- Cinta industrial
- Choba
- T para manguera de agua PVC

- Uniones PVC
- Abrazaderas
- Teflón
- Desarmador
- Caucho de bicicleta y automóvil
- Clavos
- Plástico de invernadero
- Adobes
- Madera
- Capuchones para clavos
- Martillo
- Serrucho
- Carretilla
- Azadón
- Pala
- Manguera transparente de agua
- Machete
- Fósforos
- Llaves de bola
- Rosca universal
- Silicona
- Pistola de silicona
- Malla metálica
- Carbón activado
- Botellas plásticas
- Tina de 250 lt
- Baldes de 20 lt
- Oses
- Molde para adobes

4.7 Análisis estadístico

4.7.1 Diseño experimental

Se aplicó un diseño completamente aleatorizado en arreglo factorial AxB (2x2) con 3 repeticiones a nivel de laboratorio y 2 repeticiones a nivel de campo. De los resultados obtenidos se seleccionaron los 3 mejores tratamientos para su aplicación en campo.

4.7.2 Factores de estudio

Se consideró dos factores; factor A: estiércol y lactosuero, factor B: materiales lignocelulósicos (cebada y maíz) como se describe en la Tabla 15.

- Relación (estiércol-lactosuero)
- Materiales lignocelulósicos (cebada-maíz)

Tabla 15. Factores de estudio para el proceso de fermentación anaerobia

Factores	Código	Niveles
		a1: 50: 50%
Relación (estiércol-lactosuero)	A	a2: 75:25 % a3: 25: 75 %
Materiales lignocelulosicos (cebada-maíz)	B	b1: 50:50 % b2: 75: 25 % b3: 25: 75 %

Fuente: trabajo experimental 2021

De la combinación de los distintos niveles de cada una de los factores surgen los nueve tratamientos.

Tabla 16. *Tratamientos y descripción de niveles*

Tratamiento	Código	Niveles	
		A	B (Materiales lignocelulosicos (cebada-maíz))
		Relación (estiércol-lactosuero)	
T1	a ₁ b ₁	50:50 %	50:50 %
T2	a ₁ b ₂	50:50 %	75:25 %
T3	a ₁ b ₃	50:50 %	25:75 %
T4	a ₂ b ₁	75:25 %	50:50 %
T5	a ₂ b ₂	75: 25 %	75:25 %
T6	a ₂ b ₃	75: 25 %	25:75 %
T7	a ₃ b ₁	25:75 %	50:50 %
T8	a ₃ b ₂	25:75 %	75:25 %
T9	a ₃ b ₃	25:75 %	25:75 %

4.7.3 Características del experimento

Se presentan las características del experimento.

Tabla 17. *Características del experimento*

	Laboratorio	Campo
Número de factores	2	2
Numero de niveles factor A	3	2
Numero de niveles factor B	3	2
Numero repeticiones	2	2
Número de unidades experimentales	27	6
Tamaño unidad experimental	186 ml	2000 lt
Variable respuesta	10	5
Aleatorizar	Si	Si

Fuente: trabajo experimental

4.7.4 Diseño experimental

Se aplicó un diseño completamente aleatorizado (DCA), en arreglo factorial AxB (3x3) con dos repeticiones.

Ecuación 4

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

Donde:

$\mu =$ media general

$\alpha_i =$ efecto del nivel i –ésimo del factor A

$B_j =$ efecto del nivel j del factor B

$\gamma_k =$ efecto del nivel k del factor C

$(\alpha\beta)_{ij} =$ efectos de la interacción

$\varepsilon_{ijk} =$ error aleatorio

4.7.5 Análisis estadísticos

4.7.5.1 Modelo de Análisis de varianza

Para la determinación de diferencias entre los tratamientos, se aplicó el siguiente modelo de análisis de varianza.

Tabla 18. Análisis de varianza utilizado

Fuente de Variabilidad	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F_0	Valor - P
A	SC_A	1	CM_A	$\frac{CM_A}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
B	SC_B	1	CM_B	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
AB	SC_{AB}	1	CM_{AB}	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	$2^2(n - 1)$	CM_{AB}		
Total	SC_T	$n2^2 - 1$			

Fuente: (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008)

4.8 Modelo Pruebas Rangos Múltiples

4.8.1 Método LSD (diferencia mínima significativa)

El método LSD de Fisher se utiliza en el ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores, controlando al mismo tiempo la tasa de error individual en un nivel especificado.

Ecuación 5

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

Simbología

LSD = Método diferencia mínima significativa

$t_{\alpha/2, N-k}$ = Grados de libertad que corresponde al error

CM_E = Cuadrado medio del error

n = Número de observaciones

4.9 Normas para la caracterización de las materias primas

Las caracterizaciones de las materias primas utilizadas se las realizaron en los laboratorios de la UEB con las siguientes normas técnicas:

Tabla 19. Normas técnicas para la caracterización de las materias primas

Análisis	Norma técnica
Determinación de la Humedad	UNE-EN ISO 18134-3
Determinación de los Volátiles	UNE-EN ISO 18123
Determinación de las Cenizas	UNE-EN ISO 18122
Análisis Elemental	
Presión	Manómetro Hach
Ph	pHmetro Hach
Composición gas	Gasometro GEOTECH
Volumen	Jeringuilla 60mL

Fuente: trabajo experimental

4.10 Caracterización de las materias primas

Se realizó los siguientes análisis:

- **Humedad**

Para determinar este parámetro se trabajó con la norma (UNE -EN ISO 18134-3, 2016). En la misma se señala que es muy importante esterilizar los crisoles durante un periodo de 60 minutos para evitar la humedad del ambiente, después se pesan 1 gramo de las muertas y se deja en la estufa por un lapso de tres a cuatro horas a una temperatura constante de $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$, transcurrido ese tiempo se pesa la muestra más el crisol y la tapa y se calcula el porcentaje de humedad, como se muestra en la Ecuación 6.

Ecuación 6

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Donde:

m_1 Es la masa en gramos del plato vacío y la tapa;

m_2 Es la masa en gramos del plato, tapa y la porción de ensayo antes del secado;

m_3 Es la masa en gramos del plato, la tapa y la porción de ensayo después del secado.

- **Volátiles**

Para la determinación de este parámetro se utilizó la norma, (UNE-EN ISO 18123, 2016). En la norma se menciona que es muy importante esterilizar lo crisoles durante siete minutos a 900°C para eliminar la humedad que contenga el crisol, tras esto se pesó 1 gramo de muestra de la materia prima utilizada, se colocó la muestra más el crisol y la tapa en la mufla a 900°C en un lapso de siete minutos, luego se enfría en un desecador a temperatura ambiente, y ya se pesa la materia volátil más el crisol y finalmente se calcula el porcentaje de volátil con la Ecuación 7.

Ecuación 7

$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \times \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right)$$

Donde:

m_1 = Es la masa, en gramos, del crisol vacío y su tapa;

m_2 = Es la masa, en gramos, del crisol, su tapa y la porción de ensayo antes del calentamiento;

m_3 = Es la masa, en gramos, del crisol, su tapa y el residuo después del calentamiento;

M_{ad} = Es la humedad, como porcentaje, de la porción de ensayo determinada según la norma ISO 18134-3

- **Cenizas**

Este parámetro se determinó mediante la utilización de la norma (UNE-EN ISO 18122, 2016). Esta manifiesta que se esterilice el crisol durante una hora, luego se pese el crisol más la muestra que supone un peso de 1.0 g para ser llevado a la mufla a una temperatura de $550 \pm 10^\circ\text{C}$ durante un periodo de tiempo de 120 minutos, una vez transcurrido este tiempo se deja enfriar a temperatura ambiente, para finalmente pesar el crisol más la muestra final, el cálculo de la ceniza se la realiza con la Ecuación 8.

Ecuación 8

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Donde:

m_1 = Es la masa, en gramos, del plato vacío;

m_2 = Es la masa, en gramos, del plato más la porción de ensayo;

m_3 = Es la masa, en gramos, del plato más la ceniza;

M_{ad} = Es el contenido de humedad en porcentaje de la porción de ensayo usada para la determinación.

4.11 Preparación de los biodigestores

4.11.1 A nivel laboratorio

Para esta investigación se utilizó 27 unidades experimentales con 9 tratamientos y 3 repeticiones a 35°C , cada uno de estas unidades cuentan con un volumen de 311 ml y con una relación inóculo-sustrato de 2 a 1 para todos ellos. El primer tratamiento correspondió

a la relación 50%-50% de estiércol y lactosuero, y 50%-50% de cebada y maíz. En el segundo tratamiento se utilizó una relación de 50-50 de estiércol y lactosuero y 75%-25% de cebada y maíz. Para el tercer tratamiento se utilizó 50%-50% de estiércol y lactosuero y 25%-75% de cebada y maíz. Para el cuarto tratamiento se utilizó una relación de 75%-25% de estiércol y lactosuero y 50%-50% de cebada y maíz. Para el quinto tratamiento se utilizó una relación 75%-25% de estiércol y lactosuero y 75%-25% de cebada y maíz. Para el sexto tratamiento se utilizó una relación 75%-25% de estiércol y lactosuero y 25%-75% de cebada y maíz. Para el séptimo tratamiento se utilizó una relación 25%-75% de estiércol y lactosuero y 50%-50% de cebada y maíz. Para el octavo tratamiento se utilizó una relación 25%-75% estiércol-lactosuero y 75%-25% de cebada y maíz. Por último, para el noveno tratamiento se utilizó la relación 25%-75% de estiércol y lactosuero y 25%-75% de cebada y maíz. Además, se preparó un tratamiento con 3 repeticiones de lactosuero para observar el nivel de producción de CO₂ que puede tener esta materia prima a temperatura ambiente, y también se experimentó con un tratamiento y 3 repeticiones a 35°C. El volumen que se ocupó de inóculo, sustrato y agua fue de 186 ml, los 125 ml restantes fueron ocupados por el gas.

Para cerrar el digestor se utilizó un tapón de goma y para evitar fugas se colocó una arandela metálica que rodea al tapón en la entrada del digestor, para esto se utilizó un sellador industrial. Para la medición de los gases generados en los biodigestores se utilizó una válvula de 3 vías como se muestra en la Figura 13, siendo la vía inferior (1) la salida del gas, la vía superior (2) fue dirigida para la medición de presión y la vía lateral se usó a medir el volumen de gas generado en el digestor.

Figura 13. Esquema del digester utilizado en laboratorio.



Fuente: trabajo experimental 2021

4.11.2 A nivel campo

Como desde un principio fue evidente que emular las condiciones existentes en el campo a nivel de laboratorio iba a ser prácticamente imposible, se decidió configurar el ensayo a nivel laboratorio en las condiciones óptimas para la co-digestión anaeróbica, de acuerdo a la bibliografía. De esta forma, se buscó que el proceso fuera lo más rápido y tuviera una producción lo más óptima posible para poder compararlo y escalarlo a la situación existente en campo. Cabe recalcar que la diferencia más notable fue en la temperatura, mientras que el laboratorio se pudieron mantener unas condiciones constantes de 35⁰c en campo debido a la climatología la temperatura ha ido variando cada día desde los 10 a los 30⁰C. También se construyó casetas con el fin de conservar la temperatura en el biodigester y evitar daños por animales o por las condiciones meteorológicas. Para ello se utilizó adobes para construir las paredes, plástico de invernadero para el tejado y paja de cebada como cama para el biodigester, de forma que ayude a su aislamiento.

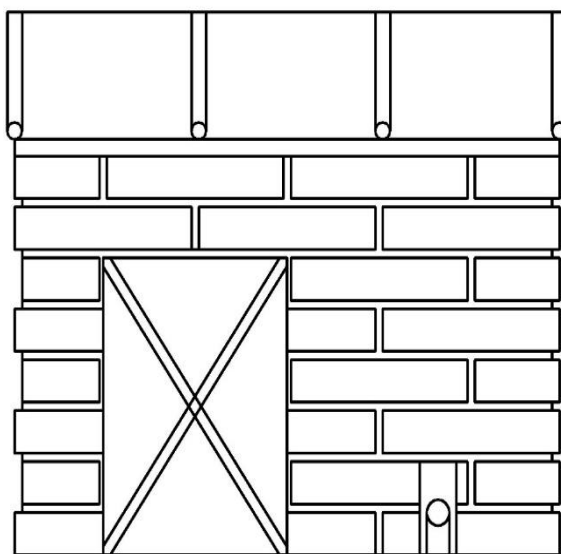
Para la aplicación en campo se seleccionaron los 3 tratamientos que arrojaron mejores resultados de los llevados a cabo en el laboratorio siendo estos los tratamientos: 2, 5 y 8, con sus dos repeticiones respectivamente. Estos tratamientos fueron introducidos en los digestores de campo, para los que se utilizó geomembranas de alta densidad (HDPE) de

500 micras con una longitud de 2 m más 50 cm de entrada y 50 cm de salida, el volumen del biodigestor es de 1800 lt. El volumen que ocupó el sustrato, inóculo y agua fue de 1296 los 504 lt restantes fueron ocupados por el gas producido en el biodigestor.

Para la entrada de la materia orgánica se utilizó un tubo de 4" de 1.5 m de largo, para la salida del biol se utilizó otro tubo de las mismas dimensiones, para evitar fugas entre el tubo y la geomembrana se utilizó un caucho de neumático de automóvil y también se cubrió con pegatubo para asegurar el sellado del tubo con el digestor. Para la salida del gas se utilizó una rosca universal a la cual se conectó una manguera de salida para el gas. También se colocó una trampa de gas casera que se realizó con una botella de plástico de 3 lt, a continuación, se colocó una llave de bola para controlar la salida del gas hacia la cocina. Tras esto se colocó un filtro de gas realizado con tubería PVC de 4", carbón activado y malla metálica para evitar el olor del ácido sulfhídrico (H₂S).

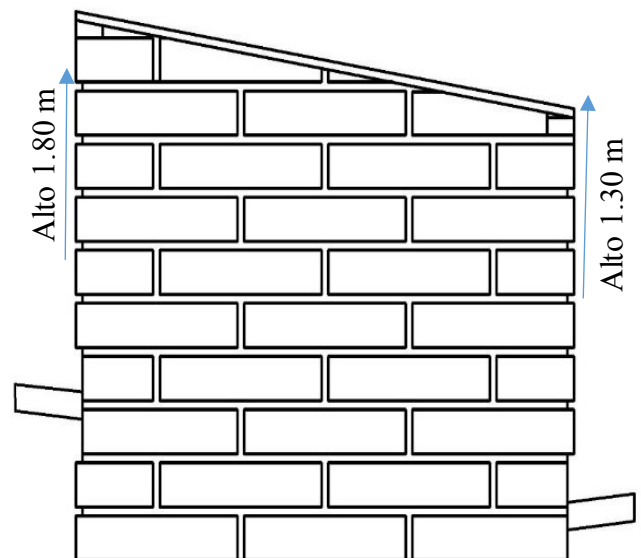
Figura 14. Planos de la caseta para los biodigestores en campo.

Alzado

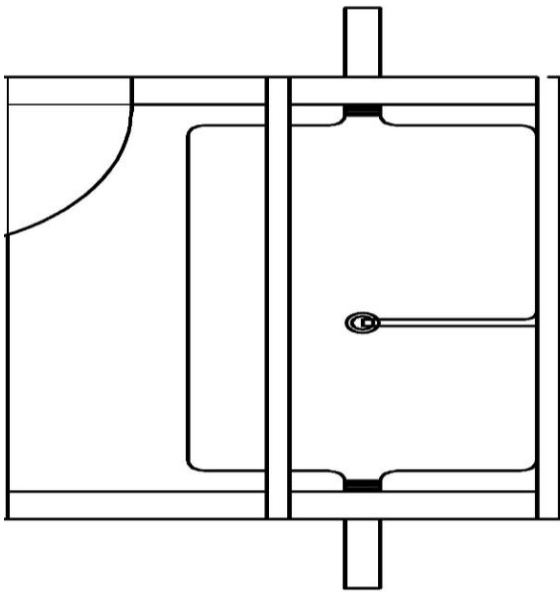


Largo 3 m

Perfil



Planta



Fuente: trabajo experimental 2021

4.12 Cálculo y montaje de los biodigestores

4.12.1 A nivel de laboratorio

El cálculo de la cantidad de materia orgánica con la que se cargó los digestores, se realizó de acuerdo al contenido en sólidos volátiles (SV) del inóculo y las cuatro materias que componen el sustrato. De esta forma, a partir de la fracción conocida de las materias que va a ser volatilizada, y que, por tanto, comprenderá la parte que es susceptible de ser transformada en biogás, se calculó cuánto correspondería en términos de materia húmeda. Es decir, se realizó un cálculo a la inversa al que se hace para conocer el contenido en materia volátil, ya que este se calculó en función de la humedad de las distintas materias.

Se fijó una tasa de carga orgánica (TCO, en g SV/lit), se puede obtener los SV que corresponderían al volumen de los digestores con que se trabaja, y conociendo la proporción de SV que hay en los sólidos totales (SV/ST), calcular para cada materia cuántos ST supondrían estos SV. Una vez obtenidos los ST necesarios para completar la tasa de carga orgánica fijada, se divide entre el que se obtuvo de las experiencias de laboratorio para cada materia, y así se obtiene la masa (en gramos) de materia fresca que habría de introducirse en los digestores. Hay que tener en cuenta antes de realizar este cálculo la relación inóculo-sustrato con la que se va a trabajar, en este caso al ser 2:1, el

cálculo de los sólidos volátiles quedaría tal y como se puede apreciar en la siguiente fórmula:

Ecuación 9

$$TCO_{digestor} \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{SV_{inóculo}(g)}{V_{inóculo}(L)} + \frac{SV_{sustrato}(g)}{V_{sustrato}(L)} \rightarrow TCO_{digestor} = 2 * \frac{SV_{sustrato}}{V_{total} * \frac{2}{3}} + \frac{SV_{sustrato}}{V_{total} * \frac{1}{3}} \rightarrow$$

$$SV_{sustrato} = \frac{TCO_{digestor}}{\frac{2}{2} * \frac{2}{3} + \frac{1}{1} * \frac{1}{3}} \rightarrow SV_{sustrato} = \frac{15 \frac{gSV}{L} * 2}{\frac{2}{186L} * \frac{2}{3} + \frac{1}{186L} * \frac{1}{3}} \rightarrow SV_{sustrato} = 0,93 g \rightarrow$$

$$ST_{sustrato}(g) = \frac{SV_{sustrato}(g)}{\frac{SV_{sustrato}(\%)}{100}} \rightarrow MF_{sustrato}(g) = \frac{ST_{sustrato}(g)}{\frac{ST_{sustrato}(\%)}{100}}$$

Donde:

TCO = Tasa de carga orgánica

SV = Sólidos volátiles

ST = Sólidos totales

MF = Muestra fresca

De estos 0,93 gramos la mitad corresponderá al factor A (estiércol-lactosuero) y la mitad al factor B (cebada-maíz). Por tanto, para cada tratamiento, los 0.47 gr correspondiente a cada relación, deberá multiplicarse por su respectiva proporción. Tal y como se explicó anteriormente, al dividir estos SV entre los SV/ST, se obtienen los ST. La cantidad de muestra fresca (MF) a introducir, se obtiene al dividir estos ST (g) entre la proporción de ST, proporcionalmente a cada tratamiento, y por cada materia. De la misma forma se calculan los SV correspondientes al inóculo para la TCO determinada.

La TCO determinada fue de 15 g SV/L, de acuerdo a la revisión bibliográfica (Babaee & Shayegan, 2011; Comino et al., 2010; Nagao et al., 2012), y teniendo en cuenta las condiciones del digestor utilizado. En la Tabla 20 se puede ver la cantidad de SV que fueron determinados para las dos partes de la mezcla a introducir en los digestores.

Tabla 20. *Cálculo de los SV para cada componente de la mezcla, según la TCO determinada*

	Relación	V (mL)	V (L)	TCO (gSV/L)	SV (g)	pH	T ^a (°C)
Sustrato	1	62	0,062	15,00	0,93	7,79	35
Inóculo	2	124	0,124	15,00	1,86		

Fuente: trabajo experimental

En la Tabla 21 se detallan los valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores, tal y como fue descrito con anterioridad.

Tabla 21. *Valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores*

Parámetro	Cebada	Maíz	Estiércol	Lactosuero	Lodo
Humedad (%)	80.69	84.29	86.05	80.88	96.02
ST (%)	19.31	15.71	13.95	19.12	3.98
SV (g)	76.09	78.95	52.08	80.52	39.15
SV (%)	14.70	12.40	7.27	15.40	1.56
SV/ST (%)	76.09	78.95	52.08	80.52	39.15

Fuente: trabajo experimental

Por último, en la Tabla 22, se puede apreciar las cargas obtenidas en gramos, de los distintos materiales involucrados en la co-digestión (estiércol, cebada, lactosuero, maíz y lodo activado).

Tabla 22. Carga de los distintos materiales utilizados para la co-digestión a introducir en los digestores en laboratorio

Relación	Sv mezcla (g)	Sustrato Inóculo	Factor	SV (g)	ST (g)	Muestra húmeda (g)	Estiércol Cebada (g)	Lactosuero Maíz (g)
I:S 2:1	0,93	T1	B	0,47	0,70	4,24	2.12	2.12
			A	0,47	0,60	3,43	1.71	1.71
		T2	B	0,47	0,70	4,24	2.12	2.12
			A	0,47	0,61	3,81	2.86	0.95
		T3	B	0,47	0,70	4,24	2.12	2.12
			A	0,47	0,59	3,58	0.89	2.68
		T4	B	0,47	0,79	5,15	3.86	1.29
			A	0,47	0,60	3,43	1.71	1.71
		T5	B	0,47	0,79	5,15	3.86	1.29
			A	0,47	0,61	3,81	2.86	0.95
		T6	B	0,47	0,79	5,15	3.86	1.29
			A	0,47	0,59	3,58	0.89	2.68
		T7	B	0,47	0,63	3,55	0.89	2.66
			A	0,47	0,60	3,43	1.71	1.71
		T8	B	0,47	0,63	3,55	0.89	2.66
			A	0,47	0,61	3,43	2.86	0.95
		T9	B	0,47	0,63	3,55	0.89	2.66
			A	0,47	0,59	3,58	0.89	2.68
	1,86	Lodo activo		1.86	4,75	119,47		

Fuente: trabajo experimental

A nivel de campo

En lo que respecta a la parte de campo, el método de cálculo seguido ha sido exactamente el mismo, utilizándose la misma TCO, y tan solo variando el volumen del digestor, que en este caso fue de 1800 lt. Además, para facilitar la carga del mismo, se diluyó este volumen en un 10% de agua, con lo que el volumen a ocupar por los distintos materiales a introducir fue de 1296 lt. De esta forma, la carga de los digestores, en este caso calculadas en kg, queda tal y como aparece en la Tabla 23.

Tabla 23. Capacidad de carga de los biodigestores y TCO

Relación	V (L)	TCO (gSV/L)	SV (g)	Dilución 0.1
0:1	1800.00	15.00	27000.00	1296

Fuente: Trabajo experimental 2021

A continuación, en la Tabla 24 se detallan las cantidades de las materias primas utilizadas para realizar la carga de los biodigestores a nivel de campo.

Tabla 24. Carga de los distintos materiales utilizados para la co-digestión a introducir en los digestores en campo.

Sv (g)	mezcla	Tratamiento	Factor	MV (g)	ST (g) secos	Muestra húmeda (g)	Muestra húmeda (kg)	Estiércol Cebada (kg)	Lactosuero Maíz (kg)
19440,00		T2	B	9720,00	14660,36	88643,49	88,64	44,32	44,32
			A	9720,00	12655,39	79617,37	79,62	59,71	19,90
		T5	B	9720,00	16421,38	107704,90	107,70	80,78	26,93
			A	9720,00	12655,39	79617,37	79,62	59,71	19,90
		T8	B	9720,00	13240,47	74257,43	74,26	18,56	55,69
			A	9720,00	12655,39	79617,37	79,62	59,71	19,90

Fuente: trabajo experimental

4.13 Métodos de evaluación y datos obtenidos

4.13.1 A nivel laboratorio

Los parámetros medidos fueron: presión, volumen, composición del gas, pH y tiempo de retención hidráulica. Cabe recalcar que la temperatura a la que se trabajó en este experimento fue de 35°C, controlada en una incubadora.

4.13.1.1 Presión del biogás

Se midió la presión del gas con el sensor de presión Delta TP 704 de un bar, conectado directamente a un medidor de presión Delta OHM OD 2124.2. Este medidor de presión está conectado a la válvula de tres vías, que a su vez está directamente conectado al biodigestor diariamente al momento de la medición. Como se puede ver en la Figura 13, la vía dos es donde se mide la presión del gas.

4.13.1.2 Volumen del biogás

El volumen del biogás fue medido diariamente en jeringas de 200ml, como se puede observar en la Figura 13, se utilizó la vía 3 para este procedimiento. Este volumen de gas contenido en la jeringa posteriormente fue utilizado para medir la composición del mismo.

4.13.1.3 Composición del biogás

Para la medición del gas se hizo uso del Gas Analyser Safety Booklet (BIOGAS 500), este aparato mide la composición de gases y líquidos (CH₄, CO₂, O₂, y H₂S), esta medición se la realiza con el gas obtenido de la medición del volumen.

4.13.1.4 pH

Esta medición se realizó con la sonda de electrodo de pH c101 directamente conectado a un potenciómetro HACH HQ 40D. El pH se midió introduciendo la sonda de electrodo aproximadamente 5 centímetros en la muestra.

4.13.1.5 Rendimiento del biogás

Para calculara el rendimiento del biogás producido se tomó en cuenta la presión generada diariamente dentro de los biodigestores. Como menciona (Valero et al., 2016), en la ecuación del gas ideal; el volumen libre (V_L) será el espacio donde se acumula los moles de biogás (n_{biogas}) a un temperatura (T_e) de 38°C.

Ecuación 10

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

Al reordenar la Ecuación 10 obtenemos:

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

El volumen de biogás (V_{biogas}) será puesto a temperatura (T_{CE}) y presión (P_{CE}) estándar, entonces la ecuación del gas ideal es:

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

Ordenando nuevamente la ecuación anterior se obtiene el volumen de biogás:

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

Al reemplazar el número de moles de biogás se obtiene lo siguiente:

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

Dado que $\frac{R * T_{CE}}{P_{CE}}$ supone el volumen molar de biogás ($C= 22,41$ L/mol) a temperatura y presión normales, la siguiente ecuación será utilizada para el volumen de biogás generado.

$$V_{biogas} = \frac{\Delta P * V_L * C}{R * T_e}$$

Donde

ΔP = Diferencia de presión absoluta (KPa).

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

R = Constante de los gases ideales (8.314 L kPa / K /mol)

T_e = Temperatura de trabajo (mesofílico 38^oc) 311,15 K

4.13.1.6 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Para el cálculo de este parámetro se tomó en cuenta los días de producción de biogás en los digestores, este tiempo de retención varió dependiendo del sustrato que se utilizó para este proceso, en la mayoría de los casos este proceso puede durar de 30 a 45 días.

4.13.2 A nivel de campo

Los parámetros que se midieron en los experimentos en campo fueron: composición del gas, pH, temperatura y tiempo de retención hidráulica.

4.13.2.1 Composición del biogás

Este parámetro fue medido directamente de la manguera adaptado con una jeringa por donde sale el gas, este parámetro fue medido con el Gas Analyser Satefy Booklet (BIOGAS 500), este aparato mide (CH₄, CO₂, O₂, y H₂S).

4.13.2.2 Ph

Esta medición se realizó con la sonda de electrodo de pH c101 directamente conectado a un potenciómetro HACH HQ 40D. El pH se midió introduciendo la sonda de electrodo aproximadamente 5 centímetros por el tubo donde se realizó la carga al biodigestor.

4.13.2.3 Temperatura

La temperatura fue medida con el termómetro laser de la Universidad Estatal de Bolívar.

4.13.2.4 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Para el cálculo de este parámetro se tomó en cuenta los días de producción de biogás en los digestores, este tiempo de retención vario dependiendo del sustrato y la temperatura que se utilizó para este proceso, en la mayoría de los casos este proceso puede durar de 30 a 45 días.

CAPITULO V

5. Resultados y discusiones

5.1 Caracterización físico química de las materias primas (residuos agropecuarios e inóculos utilizados)

En la Tabla 25 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los diferentes análisis realizados en el laboratorio de la Universidad Estatal de Bolívar.

Tabla 25. *Características fisicoquímicas de los residuos agropecuarios, e inóculo a utilizarse*

Parámetro (%)	Cebada	Maíz	Estiércol	Lactosuero	Lodo
Sólidos volátiles (SV)	14,70	12,40	7,27	15,40	1,56
Sólidos totales (ST)	19,31	15,71	13,95	19,12	3,98
SV/ST	76,09	78,95	52,08	80,52	39,15
Humedad	2,87	2,41	2,95	10,25	2,13
Cenizas	9,21	13,28	38,25	9,68	55,73
Carbono fijo	14,70	7,77	9,67	9,80	5,13
N	1,76	2,62	1,58	6,34	2,34
C	44,46	43,50	33,31	8,11	5,45
H	6,09	6,13	4,22	7,78	4,32
O	35,31	32,05	19,74	8,35	3,67
C/N	24,28	16,59	21,87	1	1,56

Fuente: trabajo experimental

5.2 Definición de las condiciones óptimas de operación en la co-digestión anaerobia

5.2.1 Descripción de las características obtenidas de los sustratos e inóculo

Como se muestra en la Tabla 25 la cebada (76,09%), el maíz (78,95%), el estiércol (52,8%) y el lactosuero (80,52%) poseen una elevada cantidad de SV/ST respectivamente, por tanto, estos sustratos poseen un bajo porcentaje de SV, siendo el estiércol de vaca el residuo agropecuario que se sitúa en cabeza. Mientras que el lodo activo, utilizado como inóculo en esta investigación, posee un 39,15% de SV/ST y un 55,63 % de cenizas, lo que da una idea sobre el porcentaje de materia orgánica disponible. Los resultados obtenidos son lógicos de acuerdo a la naturaleza de los residuos agropecuarios, donde se puede apreciar que el lodo activo es el que se degrada más fácil, seguido del estiércol, de los materiales lignocelulósicos, y, por último, del lactosuero.

La relación C/N del material agropecuario e inóculo se muestra también en la Tabla 25, los valores obtenidos aportaran un alto nivel de relación de C/N entre los sustratos para el proceso de la co-digestión anaerobia. Lo lógico, tal y como se explicó anteriormente, sería que las relaciones de C/N mayores fuesen las de los materiales lignocelulósicos, sin embargo, en el caso concreto de esta investigación esto no se cumple debido a que en el momento de recolección y análisis de estos aún se encontraban en el momento de engrosamiento del fruto, por lo que la cantidad de nitrógeno contenida en los cultivos era mucho mayor que si la comparásemos con el residuo de la cosecha, donde el nitrógeno acumulado en los frutos ya ha desaparecido. La mezcla entre los sustratos y el inóculo suponen un balance estable de nutrientes ayudando a incrementar la carga de materia orgánica degradable en el digestor, lo que a su vez ayuda a tener una mayor producción de metano.

5.2.2 Volumen diario producido de biogás (ml)

De acuerdo al experimento realizado la medición del biogás se realizó diariamente durante los 20 días que duro el mismo, los datos obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 26.

Tabla 26. *Volumen diario producido de ml de biogás*

Día	ml biogás								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	39,61	39,80	39,80	37,84	46,62	49,74	58,05	54,36	54,36
2	58,05	83,92	67,29	80,23	109,79	76,53	65,44	76,53	72,84
3	38,51	48,67	33,22	40,35	48,71	30,16	56,72	68,21	64,38
4	35,88	46,97	28,49	39,58	46,97	32,19	41,02	32,19	35,88
5	25,13	36,21	29,86	36,21	43,61	25,13	42,31	39,43	37,36
6	25,94	30,89	20,35	29,16	34,30	24,68	33,15	35,52	33,15
7	27,46	37,88	20,18	35,84	37,32	28,12	26,57	26,50	24,50
8	25,90	32,22	20,69	29,90	35,44	26,75	20,29	21,99	18,88
9	18,37	23,47	17,11	23,61	29,41	21,88	19,18	21,32	15,67
10	15,15	20,21	14,45	19,84	22,84	17,77	16,59	19,59	16,59
11	16,33	18,59	15,11	18,99	22,50	15,85	15,52	13,08	14,01
12	15,52	16,33	14,23	18,66	20,62	17,52	17,41	18,07	18,70
13	15,45	15,22	12,93	15,26	18,44	12,97	15,48	14,89	13,78
14	12,93	13,86	11,34	13,82	15,59	13,01	12,56	15,78	14,45
15	11,71	14,41	11,71	15,19	15,30	12,79	13,16	13,34	12,75
16	14,78	16,22	13,71	12,01	16,56	15,71	15,08	13,78	11,75
17	11,86	13,71	10,98	12,93	14,12	12,23	10,86	12,31	12,19
18	11,35	14,68	13,01	14,43	14,72	12,87	15,12	12,98	11,13
19	12,43	12,80	11,85	11,78	12,18	10,48	11,56	12,18	14,25
20	15,08	13,45	11,09	16,53	11,71	11,67	10,08	12,29	11,67

Fuente: trabajo experimental

5.2.3 Volumen acumulado de la producción

Este volumen acumulado se lo realizó sumando la producción del día, más la producción del día anterior de tal forma que el último día se obtiene la producción del total en los 20 días medidos. A continuación, en la Tabla 27 se detallan los valores obtenidos.

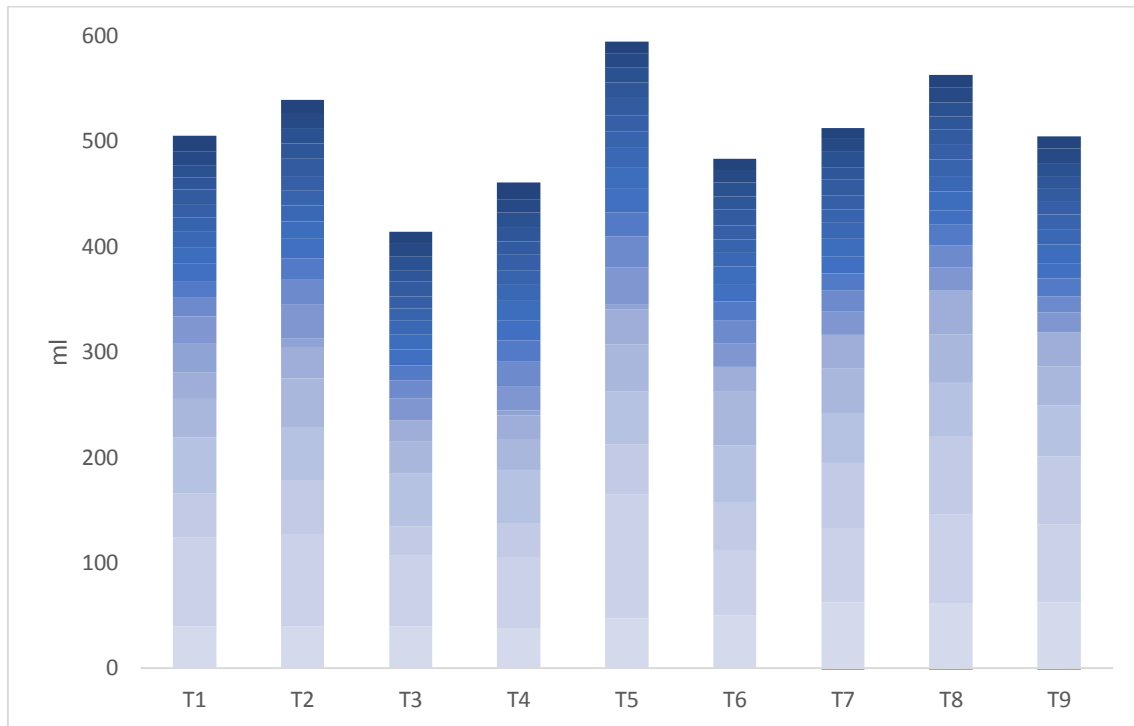
Tabla 27. Volumen acumulado de ml de biogás en los 20 días

Día	ml biogás								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	39,61	39,80	39,80	37,84	46,62	49,74	61,75	54,36	61,75
2	123,54	123,72	107,09	105,13	163,80	111,49	127,19	138,28	134,58
3	166,24	175,86	135,31	138,53	212,50	158,85	191,57	214,16	198,96
4	202,13	222,82	163,81	167,02	259,47	209,52	239,19	264,82	238,54
5	227,25	259,04	193,66	184,76	303,08	249,43	281,50	311,05	275,90
6	253,20	289,93	214,01	208,38	337,37	274,11	314,65	353,76	309,05
7	280,65	296,92	213,84	212,64	340,40	273,04	308,07	342,48	300,40
8	306,56	329,14	234,53	235,53	375,84	295,43	330,52	364,46	319,28
9	324,92	352,60	251,64	259,15	405,25	317,31	349,70	385,79	334,95
10	340,08	372,82	266,09	278,99	428,09	335,08	366,29	405,37	351,54
11	340,08	391,41	281,21	297,98	450,59	350,94	381,81	418,45	365,55
12	355,60	407,74	295,43	316,65	471,21	368,45	399,21	436,52	384,25
13	371,04	422,96	308,37	331,91	489,65	381,42	414,70	451,42	398,03
14	383,98	436,82	319,71	345,73	505,25	394,43	427,26	467,19	412,48
15	395,69	451,23	331,43	360,92	520,55	407,22	440,42	481,83	425,23
16	410,47	467,46	345,14	372,93	537,10	422,92	455,49	495,61	436,98
17	422,33	481,87	356,11	385,86	551,22	435,15	466,69	507,92	449,18
18	433,68	496,55	369,12	400,29	565,93	448,02	481,81	520,89	460,30
19	446,11	509,34	380,98	412,07	578,11	458,50	493,37	534,49	474,55
20	461,19	522,79	392,07	428,59	589,82	470,17	503,45	546,77	486,22

Fuente: trabajo experimental

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, los tratamientos 2 (T2), 5 (T5) y 8 (T8) fueron los que tuvieron una mayor producción acumulada de biogás, hecho que fue uno de los motivos principales para elegirlos como los tratamientos más interesantes a la hora de llevarlos a campo.

Figura 15. Producción acumulada de biogás de los 9 tratamientos para los 20 días (ml)



Fuente: trabajo experimental 2021

5.1.4 Volumen diario producido de CH₄

Como se mencionó anteriormente las mediciones se realizaron por 20 días, en los cuales gracias a la medición del volumen de biogás generado diariamente y del porcentaje de CH₄ contenido en el mismo se pudo calcular, gracias a la fórmula de los gases ideales, los ml de CH₄ producidos diariamente, tal y como se aparece a continuación en la Tabla 28. Estos datos obtenidos posteriormente fueron utilizados para obtener el volumen acumulado.

Tabla 28. *Volumen CH₄ producido diariamente (ml)*

Volumen de CH ₄ (ml)									
DÍA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	11,34	12,16	12,08	11,51	13,46	15,04	15,04	15,85	16,44
2	44,52	45,23	36,69	35,91	57,34	35,35	41,21	41,21	37,11
3	21,31	30,95	5,20	17,43	26,59	25,15	37,15	44,58	38,08
4	20,00	29,57	9,97	17,22	27,04	29,89	25,94	30,80	25,17
5	11,58	21,55	13,71	8,56	26,81	24,66	12,35	29,49	19,99
6	15,47	18,87	8,75	16,11	20,43	13,13	15,83	26,91	18,07
7	15,85	17,30	0,93	14,14	25,34	6,29	13,30	21,51	14,74
8	6,35	15,74	1,36	18,80	21,93	15,65	14,07	16,10	11,05
9	10,95	12,32	9,52	13,42	18,30	13,19	10,16	13,02	8,52
10	8,50	12,20	7,58	12,48	13,52	10,19	8,75	11,81	9,30
11	9,31	11,04	8,35	10,97	13,35	8,78	7,53	11,12	5,23
12	8,60	9,56	7,27	10,52	12,04	10,24	9,25	10,43	11,09
13	8,58	8,03	6,85	8,41	9,98	6,76	8,59	8,71	7,24
14	6,73	8,09	4,82	7,73	8,63	5,54	7,03	9,07	7,88
15	0,40	8,14	0,27	9,25	7,80	8,00	6,54	8,14	6,86
16	8,43	9,16	7,24	3,79	9,29	0,00	9,11	7,86	5,63
17	5,51	7,87	0,25	3,47	7,28	6,94	5,01	7,59	6,96
18	2,57	7,58	0,77	8,20	8,13	6,42	8,04	7,29	3,78
19	1,46	6,94	5,06	0,55	7,78	0,28	4,09	6,75	8,03
20	9,01	6,31	0,45	10,32	7,74	3,79	3,40	6,28	6,21

Fuente: trabajo experimental

5.1.5 Volumen acumulado de la producción de CH₄

A continuación, en la Tabla 29 se muestran los datos acumulados de ml de CH₄ obtenidos durante los 20 días que se realizó la medición.

Tabla 29. *Volumen acumulado de ml de CH₄ durante 20 días*

DÍA	Volumen CH ₄ (ml)								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	11,34	12,16	12,08	11,51	13,46	14,16	15,04	15,85	16,44
2	55,86	57,40	48,77	47,42	70,80	49,51	46,64	57,06	53,55
3	77,16	88,34	53,97	64,85	97,39	74,66	83,79	101,63	91,63
4	97,16	117,92	63,94	82,07	124,44	104,55	109,72	132,44	116,81
5	108,75	139,46	77,65	90,63	151,25	129,21	122,07	161,93	136,79
6	124,21	158,33	86,40	106,75	171,68	142,35	137,90	188,84	154,86
7	140,06	181,03	87,33	120,89	197,02	148,64	151,20	204,32	169,60
8	146,41	199,77	88,69	139,69	218,95	164,29	165,27	220,42	180,65
9	157,37	212,09	98,21	153,11	237,24	177,48	175,43	233,44	189,17
10	165,87	224,30	105,79	165,59	250,76	187,67	184,18	245,24	198,47
11	175,18	235,33	114,14	176,56	264,11	196,46	191,72	250,47	203,70
12	183,77	244,89	121,41	187,08	276,15	206,69	200,97	260,91	214,79
13	192,35	252,93	128,26	195,49	286,13	213,46	209,56	269,62	222,04
14	199,09	260,04	133,08	203,22	294,76	219,00	216,59	278,69	229,91
15	199,49	268,18	133,35	212,47	302,56	227,00	223,13	286,82	236,77
16	207,91	277,34	140,59	216,25	311,85	227,00	232,24	289,49	242,40
17	213,42	285,21	140,84	219,72	319,13	233,94	237,24	297,08	249,36
18	215,99	292,78	141,62	227,92	327,25	240,35	245,29	304,37	253,13
19	217,45	298,50	146,68	228,47	328,03	240,63	249,38	308,82	261,17
20	226,46	304,81	147,13	238,79	331,78	244,42	253,17	315,10	267,37

Fuente: trabajo experimental

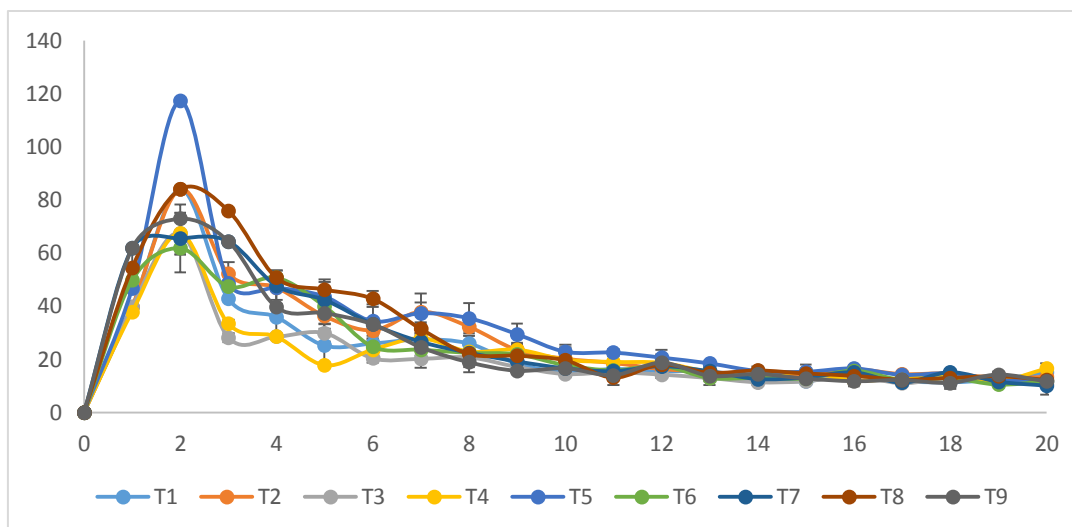
5.3 Evaluación de los parámetros de funcionamiento y caracterización del biogás obtenidos del digestor

5.3.1 Rendimiento diario de biogás

Los biodigestores fueron cargados con el 66.66 % de inóculo y un 33.33 % de los sustratos en los 9 tratamientos con sus respectivas repeticiones, obteniendo los siguientes resultados de volumen en los 20 días Como se puede apreciar en el Figura 16 en los tres primeros días obtuvimos los picos de producción en cuanto al volumen de biogás en todos los tratamientos, transcurridos los primeros días el volumen de biogás disminuyó

notablemente hasta el día 10, del día 10 en adelante la producción fue constante con un mínimo decrecimiento del biogás cada día

Figura 16. Producción diaria de biogás en los 20 días

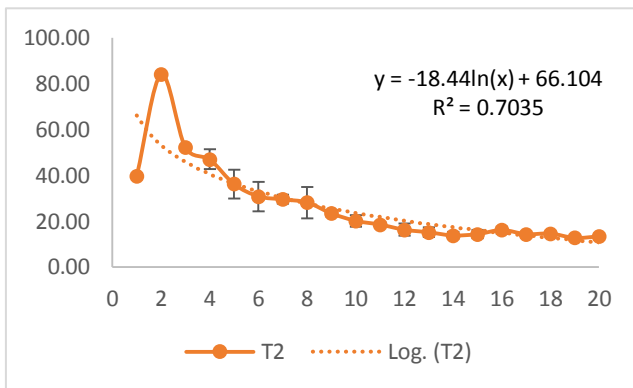


Fuente: trabajo experimental

Según los datos obtenidos de los nueve tratamientos realizados en el laboratorio se seleccionó los tres mejores tratamientos como se muestran en la Figura 17, 18 y 19. El tratamiento T2 fue seleccionado por que tuvo uno de los picos más altos de producción en los primeros días llegando a producir un volumen de 83,92 ml, más de la mitad del espacio libre del biodigestor, en los días posteriores la disminución del volumen fue paulatina. El tratamiento T5 obtuvo el pico más alto de producción, en comparación con los demás tratamientos, llegando a obtener un volumen de 117,18 ml en el segundo día, ocupando casi en su totalidad el espacio libre para la producción del biogás, siendo este el punto más alto alcanzado en todos los tratamientos. Además, mantuvo una producción de casi 50ml diarios hasta el día ocho.

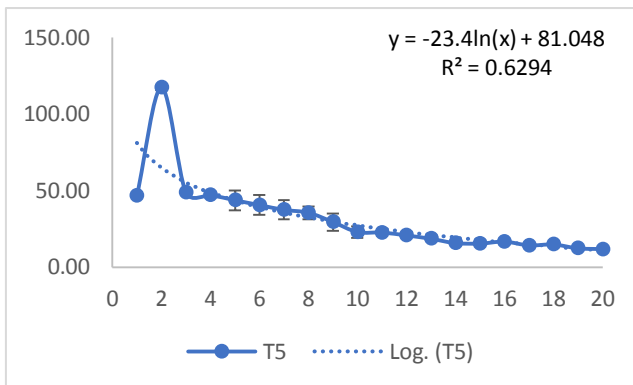
El tratamiento T8 mantuvo su producción por encima de 75 ml en los días dos y tres. Por otra parte, el descenso en la producción de biogás tuvo una disminución menos repentina que en el resto de tratamientos, llegándose en el día ocho a 22 ml, a partir de ahí, el descenso fue más regular hasta llegar a los 12,29 ml del último día, caso muy similar a los otros dos tratamientos.

Figura 17. *Volumen de biogás generado del tratamiento T2*



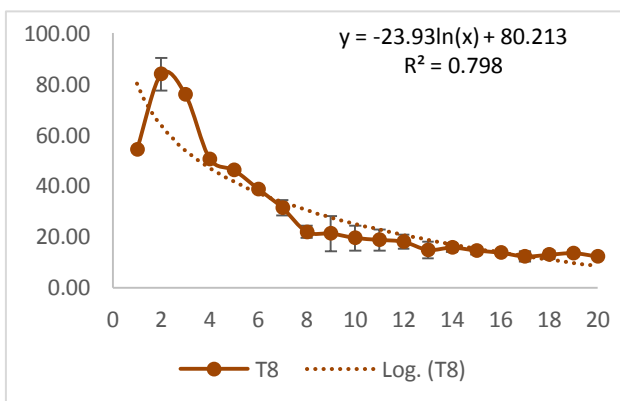
Fuente: trabajo experimental

Figura 18. *Volumen de biogás generado del tratamiento T5*



Fuente: trabajo experimental

Figura 19. *Volumen de biogás generado del tratamiento T8*



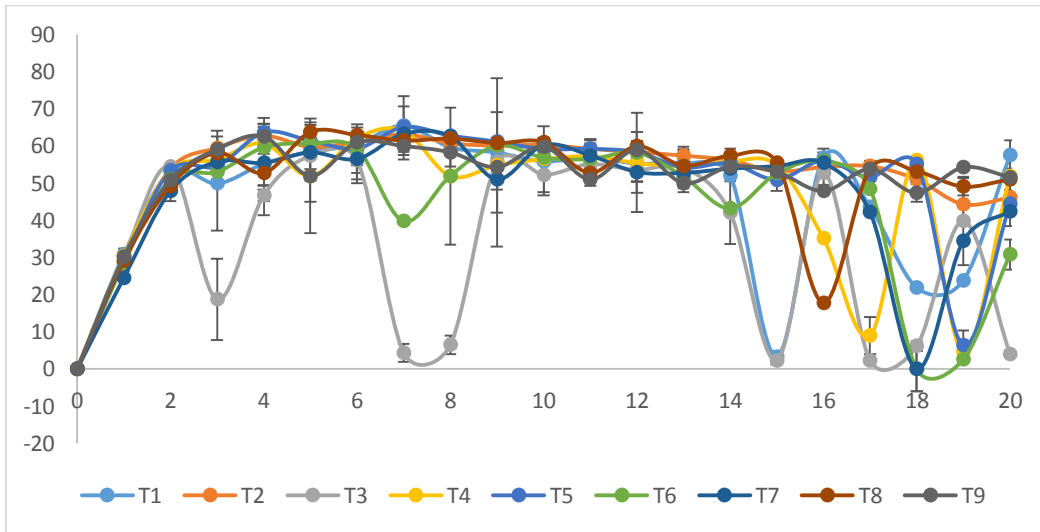
Fuente: trabajo experimental

5.3.2 Porcentaje diario de producción de metano (CH₄)

Como se muestra en el correcta.

Figura 20, todos los tratamientos tuvieron un rendimiento similar hasta el día el 14, excepto el tratamiento T3 porque presentó fugas que no pudieron ser solucionadas. Los últimos seis días, tal y como se vio en el punto anterior, los volúmenes obtenidos fueron muy pequeños, lo que para el equipo GEA 5000 supuso un caudal de entrada insuficiente para obtener una lectura precisa o correcta.

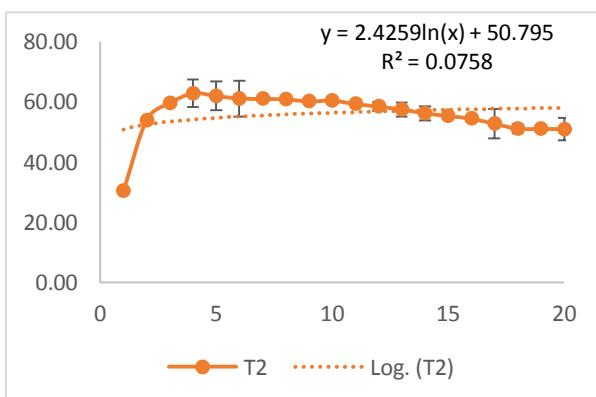
Figura 20 . Porcentaje de CH₄ producido en 20 días



Fuente: trabajo experimental

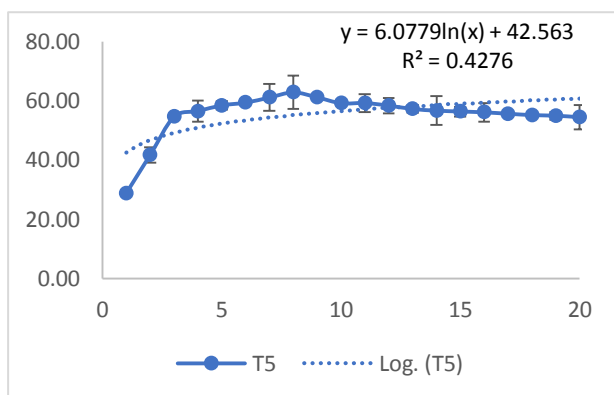
Como se puede apreciar en la Figura 21, 22 y 23 los tratamientos T2, T5 y T8 tiene la misma tendencia de producción de metano a comparación al resto de tratamientos. Los tres tratamientos mencionados fueron los únicos que no tuvieron una disminución notable durante el tiempo que se llevó a cabo la investigación, por tanto, esto supuso otro punto a favor de que los tres tratamientos fuesen los elegidos para la replicación en campo.

Figura 21 . Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T2



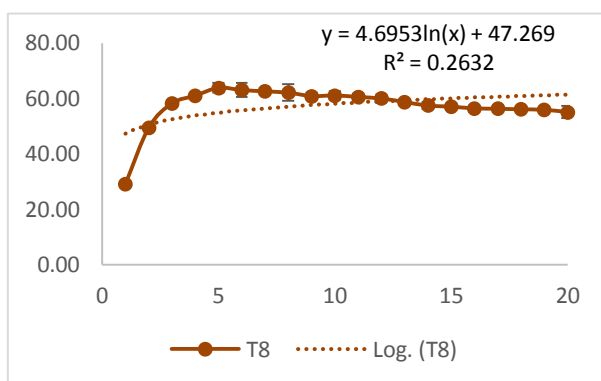
Fuente: trabajo experimental

Figura 22. Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T5



Fuente: trabajo experimental

Figura 23. Porcentaje de producción de metano diario del tratamiento T8

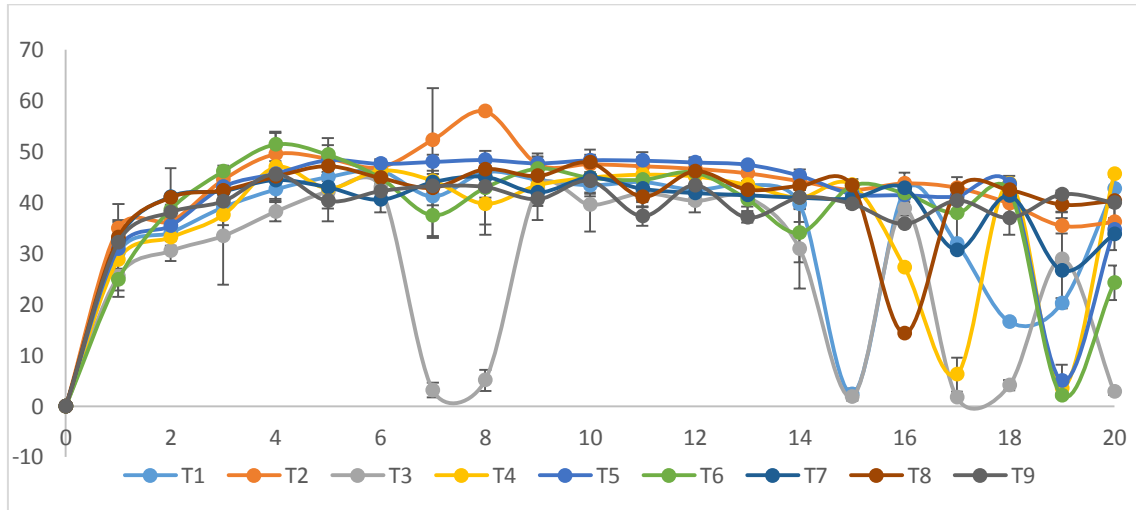


Fuente: trabajo experimental

5.3.3 Porcentaje diario de dióxido de carbono (CO₂) producido

Como se muestra en la Figura 24, la producción de dióxido de carbono fue ascendente en todos los tratamientos hasta el día 4, los próximos 10 días la producción del dióxido de carbono fue constante, del día 14 en adelante la producción del dióxido de carbono fue muy irregular en 6 tratamientos. Los únicos tratamientos que producción regularmente fueron T2, T5 y T8, recalcando que T2 tuvo el pico más alto de producción. Los motivos de estas irregularidades son las mismas que las explicadas anteriormente, las fugas que no pudieron atajarse en nto T3, así como un volumen insuficiente para obtener lecturas precisas durante los últimos días del ensayo.

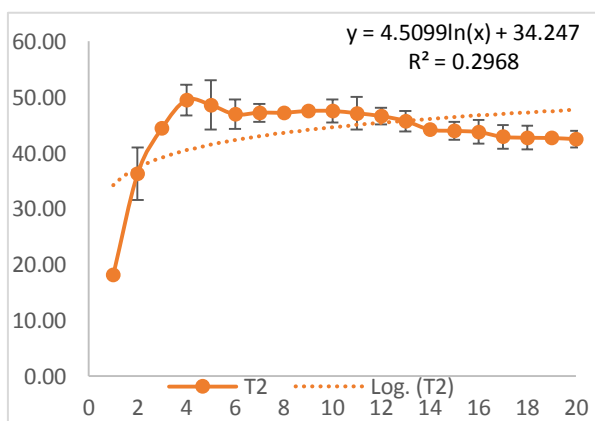
Figura 24. Porcentaje de dióxido de carbono obtenido en los 20 días



Fuente: trabajo experimental

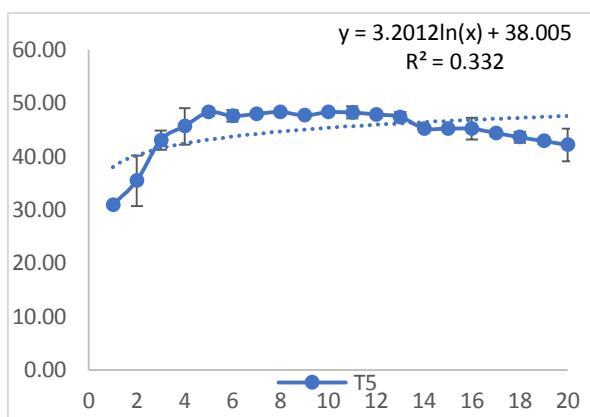
Como se puede observar en la Figura 25, 26 y 27 tanto T5 como T8 tuvieron una producción de dióxido de carbono mucho más súbita que en el caso de T2, donde el aumento en las concentraciones de este elemento en el biogás producido aumentó de forma más gradual. Una vez alcanzado el pico, en torno al 50% en T2 y T5, pero más cerca del 40% en T8, hubo un descenso paulatino en las concentraciones de este elemento.

Figura 25. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T2



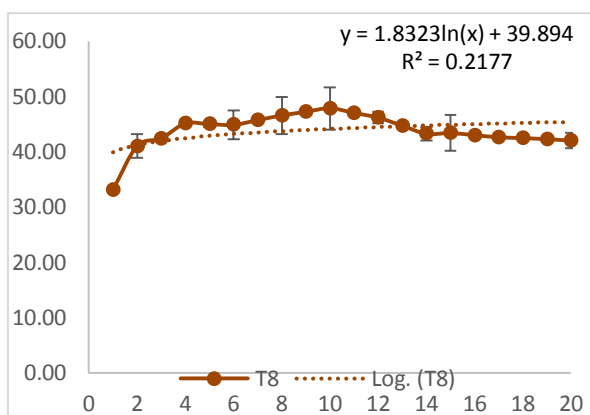
Fuente: trabajo experimental

Figura 26. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T5



Fuente: trabajo experimental

Figura 27. Porcentaje de producción de dióxido de carbono diario del tratamiento T8



Fuente: trabajo experimental

5.4 Análisis de varianza

5.4.1 ANOVA para la producción de biogás

Para el análisis estadístico se utilizó el programa Statgraphics. Se calculó cada parámetro analizado (ml de biogás, porcentaje de metano y porcentaje de dióxido de carbono), utilizando los valores acumulados de los 20 días.

Tabla 30. *Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de ml de biogás de los nueve tratamientos*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
Factor A	15539,4	2	7769,72	1,37	0,2798
Factor B	59005,7	2	29502,8	5,19	0,0166
Interacciones					
AB	20240,0	4	5060,0	0,89	0,4894
Residuos	102228,	18	5679,36		
Total (corregido)	197014,	26			

Fuente: Trabajo experimental 2021

En la tabla 30 se muestran la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre las variables analizadas. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el total biogás con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 31. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción de ml de biogás

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
Media global	27	505,26			
Factor A					
a1	9	471,463	25,1205	418,687	524,24
a2	9	524,732	25,1205	471,956	577,509
a3	9	519,586	25,1205	466,809	572,362
Factor B					
b1	9	495,262	25,1205	442,486	548,039
b2	9	566,856	25,1205	514,079	619,632
b3	9	453,663	25,1205	400,887	506,44
Factor A por Factor B					
a1,b1	3	447,463	43,51	356,052	538,875
a1,b2	3	549,51	43,51	458,099	640,921
a1,b3	3	417,417	43,51	326,005	508,828
a2,b1	3	522,177	43,51	430,765	613,588
a2,b2	3	616,73	43,51	525,319	708,141
a2,b3	3	435,29	43,51	343,879	526,701
a3,b1	3	516,147	43,51	424,735	607,558
a3,b2	3	534,327	43,51	442,915	625,738
a3,b3	3	508,283	43,51	416,872	599,695

Fuente: Trabajo experimental 2021

En la Tabla 31 se muestran los tres niveles del factor a y los tres niveles de factor b, con sus respectivas combinaciones, para los que se realiza una prueba de medias por mínimos cuadrados. De las nueve combinaciones realizadas podemos observar claramente que existen tres con mayor producción de biogás con un intervalo de confianza de 95 %. Estas combinaciones son: T2 (a1, b2), T5 (a2, b2) y T8 (a3, b2).

Tabla 32. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B

Factor B	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
b3	9	453,663	25,1205	X
b1	9	495,262	25,1205	XX
b2	9	566,856	25,1205	X

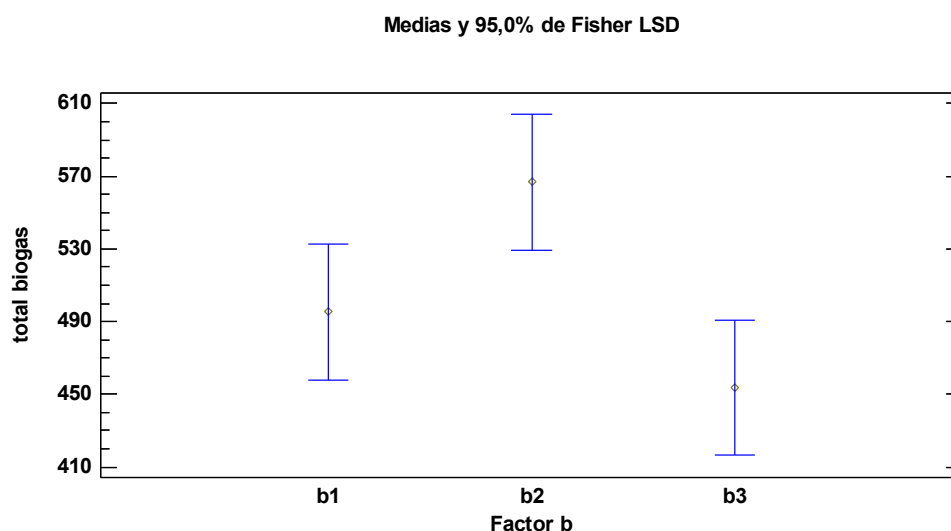
Fuente: Trabajo experimental 2021

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
b1 - b2		-71,5933	74,637
b1 - b3		41,5989	74,637
b2 - b3	*	113,192	74,637

* indica una diferencia significativa.

En la Tabla 32 se puede apreciar el análisis por mínimos cuadrados para el factor B, donde se observa que en este caso si existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles b2 y b3. Esto quiere decir que la utilización de los niveles b1 o b2 y b1 o b3, no supondrá una diferencia significativa en la producción de biogás, pero la utilización de los niveles b2 o b3 si tienen influencia estadísticamente significativa en la producción de biogás.

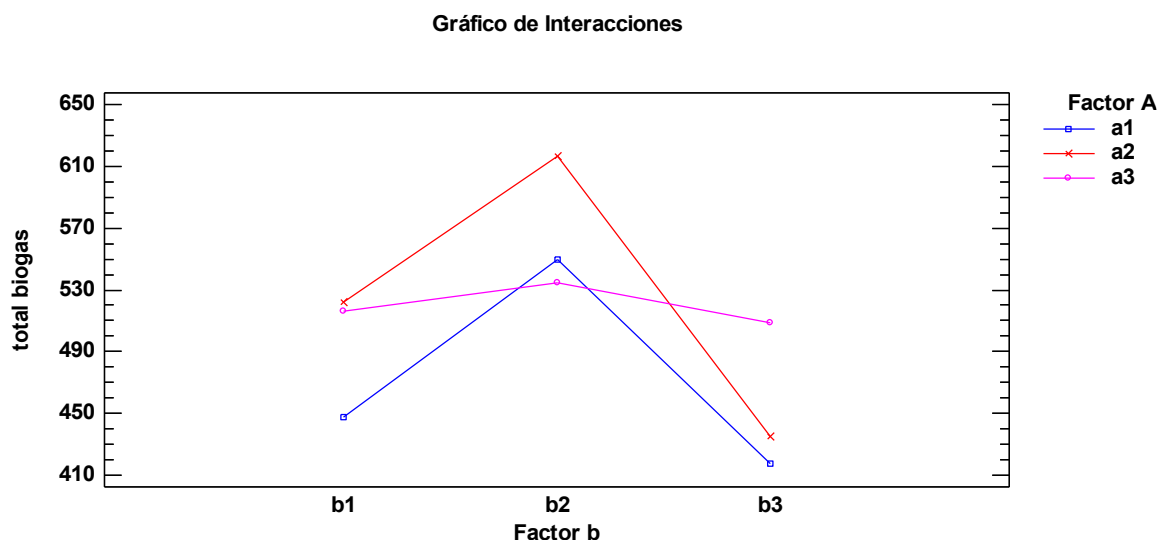
Figura 28. Grafico LDS del factor B respecto a la producción de biogás



Fuente: Trabajo experimental 2021

En la Figura 28 se observa que los niveles b2 y b3 son diferentes, estos dos niveles tienen diferencia estadísticamente significativa en la producción de biogás, con un nivel de confianza de 95.0%.

Figura 29. Interacciones de los distintos niveles del factor B



Fuente: Trabajo experimental 2021

En la Figura 29 se muestra que no hay interacción entre el nivel a1 y a2 pero se puede evidenciar que entre el nivel a2, a1 y a3 sí existe interacción.

5.4.2 ANOVA para el porcentaje de metano (CH₄) producido

A continuación, se presentan los ANOVAs realizados para determinar la significancia entre los distintos niveles de cada factor empleado en los nueve tratamientos, en cuanto al porcentaje de CH₄ producido diariamente.

Tabla 33. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción del porcentaje de metano (CH₄) de los nueve tratamientos

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
Factor A	9640,23	2	4820,11	1,06	0,3673
Factor B	48716,9	2	24358,5	5,35	0,0150
Interacciones					
AB	5074,03	4	1268,51	0,28	0,8878
Residuos	81897,0	18	4549,83		
Total (corregido)	145328,	26			

Fuente: Trabajo experimental 2021

En la Tabla 33 se muestran la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre los factores analizados. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0,05 este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la producción diaria de CH₄ con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 34. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción del porcentaje de metano (CH₄)

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
Media global	27	448,317			
Factor A					
a1	9	425,314	22,4842	378,077	472,552
a2	9	471,597	22,4842	424,359	518,834
a3	9	448,041	22,4842	400,804	495,279
Factor B					
b1	9	458,35	22,4842	411,112	505,588
b2	9	494,594	22,4842	447,357	541,832
b3	9	392,008	22,4842	344,77	439,245
Factor A por Factor B					
a1, b1	3	418,097	38,9437	336,279	499,915
a1, b2	3	469,853	38,9437	388,035	551,671
a1, b3	3	387,993	38,9437	306,175	469,811
a2, b1	3	490,277	38,9437	408,459	572,095
a2, b2	3	531,957	38,9437	450,139	613,775
a2, b3	3	392,557	38,9437	310,739	474,375
a3, b1	3	466,677	38,9437	384,859	548,495
a3, b2	3	481,973	38,9437	400,155	563,791
a3, b3	3	395,473	38,9437	313,655	477,291

Fuente: Trabajo experimental 2021

En la Tabla 34 se muestra una prueba de mínimos cuadrados, donde se puede observar que el T5 (a2, b2) produjo un biogás con una mayor proporción de metano (CH₄).

Tabla 35. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B

Factor B	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
b3	9	392,008	22,4842	X
b1	9	458,35	22,4842	XX
b2	9	494,594	22,4842	X

Fuente: Trabajo experimental 2021

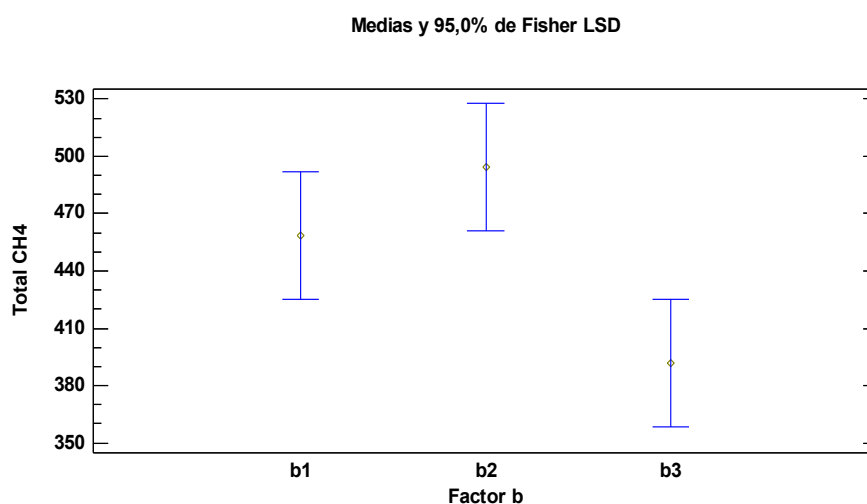
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
b1 - b2		-36,2444	66,804
b1 - b3		66,3422	66,804
b2 - b3	*	102,587	66,804

* indica una diferencia significativa.

En la

Tabla 35 se puede observar el análisis por mínimos cuadrados para el factor B, donde se observa que en este caso si existe diferencia estadísticamente significativa con un intervalo de confianza del 95.0 %, entre los niveles b2 y b3.

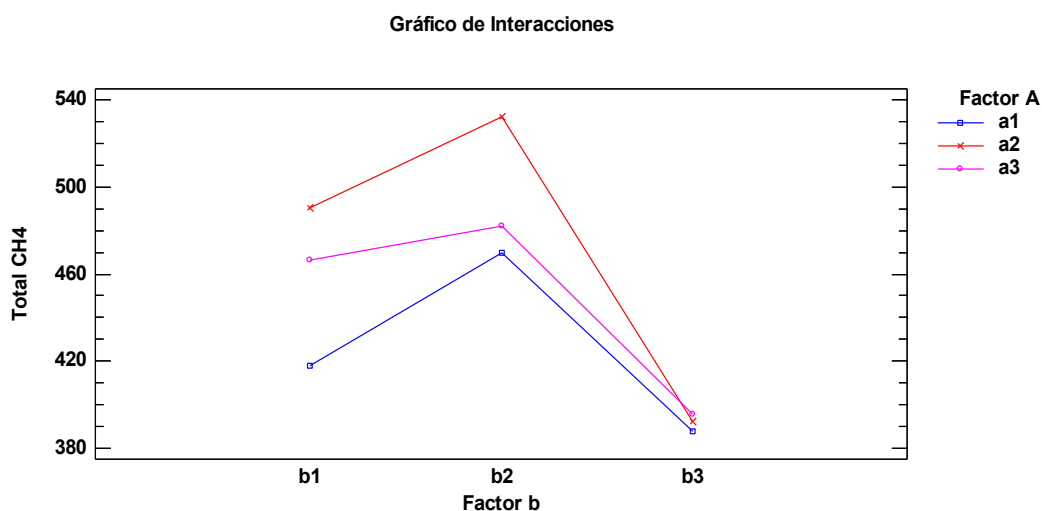
Figura 30. Grafico LDS del factor B respecto a la producción del porcentaje de metano (CH4)



Fuente: trabajo experimental 2021

En la Figura 30 podemos observar que los niveles b1 y b2 no muestran diferencias estadísticamente significativas, mientras que los niveles b2 y b3 sí, ya que sus límites para el método de Fisher se superponen, todo ello con un intervalo de confianza de 95.0%.

Figura 31. Interacciones de los distintos niveles del factor B



Fuente: trabajo experimental 2021

En la Figura 31 se evidencia que existe interacción entre los niveles a2 y a3, mientras que el nivel a1 no interacciona con ninguno de los niveles.

5.4.3 ANOVA para el porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) producido

A continuación, se presentan los anovas realizados para determinar la significancia entre los distintos niveles de cada factor empleado en los nueve tratamientos, en cuanto al porcentaje de CO₂ producido diariamente.

Tabla 36. Análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) producido diariamente de los nueve tratamientos

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
Factor A	73186,4	2	36593,2	2,91	0,0804
Factor B	84840,2	2	42420,1	3,37	0,0571
Interacciones					
AB	42782,4	4	10695,6	0,85	0,5120

Residuos	226477,	18	12582,0
Total (corregido)	427286,	26	

Fuente: trabajo experimental 2021

En la Tabla 36 se muestran la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre los factores analizados. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0,05, ninguno de los factores o interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el porcentaje de CO₂, con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 37. Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para el porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) producido diariamente

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	27	659,455			
Factor A					
a1	9	602,822	37,3899	524,269	681,376
a2	9	728,52	37,3899	649,967	807,073
a3	9	647,022	37,3899	568,469	725,576
Factor B					
b1	9	662,1	37,3899	583,547	740,653
b2	9	726,748	37,3899	648,194	805,301
b3	9	589,517	37,3899	510,963	668,07
Factor A por Factor b					
a1, b1	3	620,6	64,7612	484,541	756,659
a1, b2	3	716,1	64,7612	580,041	852,159
a1, b3	3	471,767	64,7612	335,708	607,825
a2, b1	3	719,433	64,7612	583,375	855,492
a2, b2	3	810,577	64,7612	674,518	946,635
a2, b3	3	655,55	64,7612	519,491	791,609
a3, b1	3	646,267	64,7612	510,208	782,325
a3, b2	3	653,567	64,7612	517,508	789,625
a3, b3	3	641,233	64,7612	505,175	777,292

Fuente: trabajo experimental 2021

En la Tabla 37 se detallan los nueve tratamientos, siendo los tratamientos T5, T4 y T8 los que representaron mayor producción de dióxido de carbono, durante los 20 días de medición.

Tabla 38. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de estiércol y lactosuero por el factor A

Factor A	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
a1	9	602,822	37,3899	X
a3	9	647,022	37,3899	XX
a2	9	728,52	37,3899	X

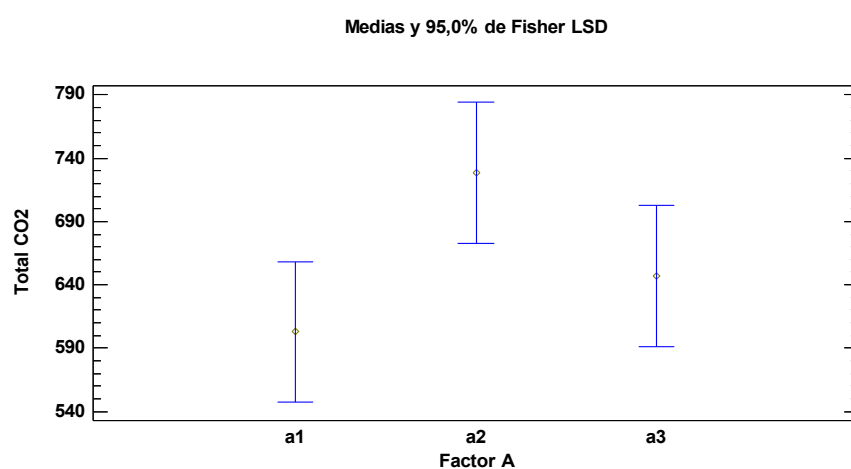
Fuente: Trabajo experimental 2021

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
a1 - a2	*	-125,698	111,091
a1 - a3		-44,2	111,091
a2 - a3		81,4978	111,091

* indica una diferencia significativa.

En la Tabla 38 se muestra claramente que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los niveles a1 y a2 del factor A, la utilización de uno de estos dos niveles puede afectar los niveles de la producción del dióxido de carbono.

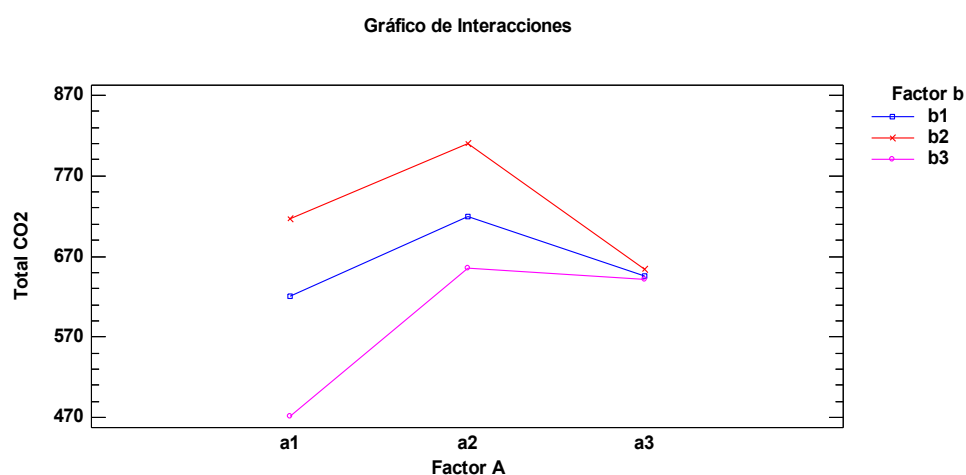
Figura 32. Grafico LDS del factor A respecto a la producción del porcentaje del dióxido de carbono (CO2)



Fuente: Trabajo experimental 2021

El límite superior del nivel a1 está por debajo del límite inferior del nivel a2, mientras que el límite superior del nivel a3 sí está por encima del límite inferior del nivel a2, por lo que se superponen de acuerdo a este método. Esto quiere decir que el nivel a2 y a3 son estadísticamente significativos con un intervalo de confianza de 95.0%.

Figura 33. Interacciones de los distintos niveles del factor A



Fuente: trabajo experimental 2021

En la Figura 33 se observó que todos los niveles del factor B interaccionan en el nivel a3 del factor A.

Tabla 39. Pruebas de medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95.0% para la mezcla de maíz y cebada del factor B

Factor b	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
b3	9	589,517	37,3899	X
b1	9	662,1	37,3899	XX
b2	9	726,748	37,3899	X

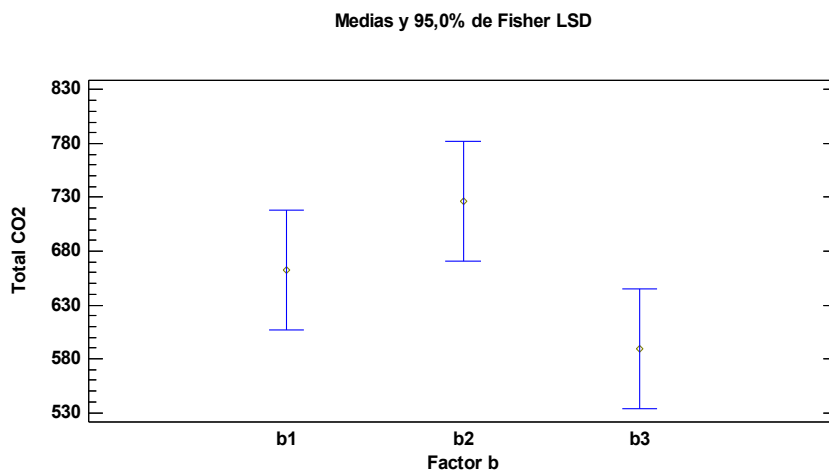
Fuente: Trabajo experimental 2021

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
b1 - b2		-64,6478	111,091
b1 - b3		72,5833	111,091
b2 - b3	*	137,231	111,091

* indica una diferencia significativa.

La Tabla 39 muestra que los niveles b2 y b3 tienen una diferencia estadísticamente significativa entre los niveles del factor B, con un intervalo de confianza de 95,0%.

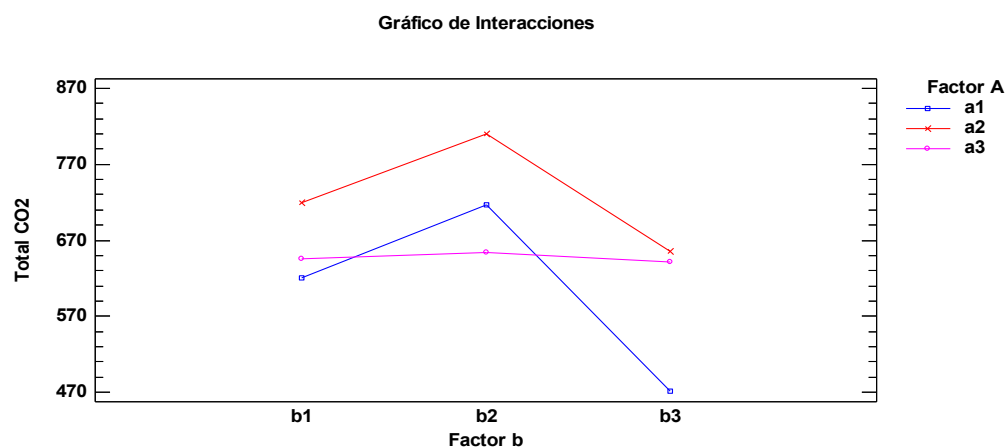
Figura 34. *Grafico LDS del factor B respecto al porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) producido diariamente*



Fuente: trabajo experimental 2021

El límite superior del nivel b3 está por debajo del límite inferior del nivel b2, mientras que el límite superior del nivel b1 está por encima del límite inferior del nivel b2, por lo que estos dos niveles del factor B se encuentran superpuestos para este método. Esto quiere decir que el nivel b2 y b3 son estadísticamente significativos con un intervalo de confianza de 95,0%.

Figura 35. *Interacciones de los distintos niveles del factor B*



Fuente: trabajo experimental 2021

En la Figura 35 muestra que los niveles a1 y a3 del factor A, interaccionan entre sí. Mientras que el nivel a2 no interacciona con ninguno de los otros niveles.

5.4.4 Análisis de la cinética microbiana

Tal y como se explicó en el marco teórico se ha analizado la producción de metano acumulada según el modelo modificado de Gompertz. Para la obtención de los parámetros deseados (M_e , $v_{Mmáx}$ y t_{lag}) se utilizó el programa Statistica, ya que es capaz de resolver funciones no lineales, como la del modelo.

Para desarrollar este modelo se tomó como variables conocidas “M” (cantidad de metano acumulado producido) y “t” (tiempos estimados). En cuanto a M se tomaron los valores de la molaridad acumulada del metano producida. Estos datos se obtuvieron mediante la ecuación de los gases ideales ($P \cdot V = n \cdot R \cdot T$), con la que se puede obtener fácilmente los números de moles producidos para cada volumen de metano (n/V), ya que el resto de parámetros son conocidos. Este valor es conocido también como molalidad. Una vez conocida la molalidad, multiplicando por la masa molecular del metano se obtienen los gramos contenidos en dichos moles (Masa molecular = masa en gramos/número de moles). De esta forma se obtiene la producción de metano acumulado en g/L, es decir, se obtiene la molaridad acumulada de metano durante los días que dura el ensayo de laboratorio.

Como se puede apreciar en la Tabla 40, el programa no solo calcula los parámetros estimados en la fórmula introducida, sino que calcula distintos valores estadísticos para poder asegurar que los valores obtenidos tienen coherencia matemática. Estos valores son

el error estándar, el t y el p valor y los límites superiores e inferiores para los parámetros calculados.

Tabla 40. Resultados de la molaridad acumulada de metano para el modelo modificado de Gompertz

Tratamiento	Parámetro	Estimación	Error estándar	T valor	P valor	Límite inferior	Límite superior
T1	M_e	6,4715	0,1425	45,4104	0,0000	6,1708	6,7721
	$v_{Mmáx}$	1,0935	0,0322	33,9218	0,0000	1,0255	1,1615
	t_{lag}	0,5658	0,2017	2,8044	0,0122	0,1401	0,9914
T2	M_e	8,0408	0,2873	27,9914	0,0000	7,4347	8,6468
	$v_{Mmáx}$	1,1664	0,0391	29,8115	0,0000	1,0839	1,2490
	t_{lag}	0,5197	0,2529	2,0551	0,0556	-0,0138	1,0531
T3	M_e	4,9132	0,2260	21,7427	0,0000	4,4365	5,3900
	$v_{Mmáx}$	0,7370	0,0369	19,9911	0,0000	0,6592	0,8147
	t_{lag}	0,1164	0,3730	0,3120	0,7588	-0,6706	0,9034
T4	M_e	6,7652	0,1544	43,8099	0,0000	6,4394	7,0910
	$v_{Mmáx}$	1,1284	0,0334	33,7881	0,0000	1,0579	1,1988
	t_{lag}	0,5854	0,2041	2,8686	0,0106	0,1548	1,0159

Tratamiento	Parámetro	Estimación	Error estándar	T valor	P valor	Límite inferior	Límite superior
	M_e	7,8482	0,2165	36,2474	0,0000	7,3914	8,3050
T5	$v_{Mmáx}$	1,2143	0,0369	32,8799	0,0000	1,1364	1,2922
	t_{lag}	0,5035	0,2202	2,2862	0,0353	0,0389	0,9682
	M_e	6,9777	0,2342	29,7927	0,0000	6,4835	7,4718
T6	$v_{Mmáx}$	1,0310	0,0338	30,5184	0,0000	0,9598	1,1023
	t_{lag}	0,5640	0,2439	2,3127	0,0335	0,0495	1,0786
	M_e	7,3929	0,2563	28,8442	0,0000	6,8521	7,9336
T7	$v_{Mmáx}$	1,0675	0,0336	31,7943	0,0000	0,9967	1,1384
	t_{lag}	0,6597	0,2371	2,7823	0,0128	0,1595	1,1600
	M_e	7,5054	0,2562	29,2993	0,0000	6,9649	8,0458
T8	$v_{Mmáx}$	1,1434	0,0421	27,1394	0,0000	1,0545	1,2323
	t_{lag}	0,4008	0,2701	1,4838	0,1562	-0,1691	0,9707
	M_e	7,7073	0,3616	21,3153	0,0000	6,9444	8,4701
T9	$v_{Mmáx}$	1,0750	0,0454	23,6660	0,0000	0,9791	1,1708
	t_{lag}	0,1606	0,3293	0,4877	0,6320	-0,5341	0,8553

Fuente: trabajo experimental 2021

El primer hecho que cabe destacar de los resultados arrojados por el modelo modificado de Gompertz, es en relación a la $v_{Mmáx}$ o velocidad máxima de producción de metano, donde si bien podemos ver que los resultados obtenidos para los nueve tratamientos son significativamente similares, los tres tratamientos que fueron elegidos para extrapolar en campo se encuentran por encima del resto. Esto quiere decir que el T2, T5 y T8 producen metano a una velocidad mayor que el resto de tratamientos, lo que refuerza la elección de los mismos.

Por otro lado, cabe destacar la existencia de unos t_{lag} , o tiempos de latencia, muy pequeños. Esto es debido a la planificación del ensayo de laboratorio, en el que se escogieron las condiciones de funcionamiento del ensayo más óptimas posibles, lo que

junto a la elección de introducir el inóculo (lodo activo) en una proporción dos a uno con respecto al sustrato, hizo que en menos de un día todos los tratamientos comenzasen a producir metano. De hecho, el tratamiento que ha tenido un tiempo de latencia mayor, ha resultado T7, pero este ha sido de tan solo 0,66 días.

Por último, tal y como aparece en la Tabla 41, se comparó los datos obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz con los que se obtuvieron en el ensayo llevado a cabo en el laboratorio.

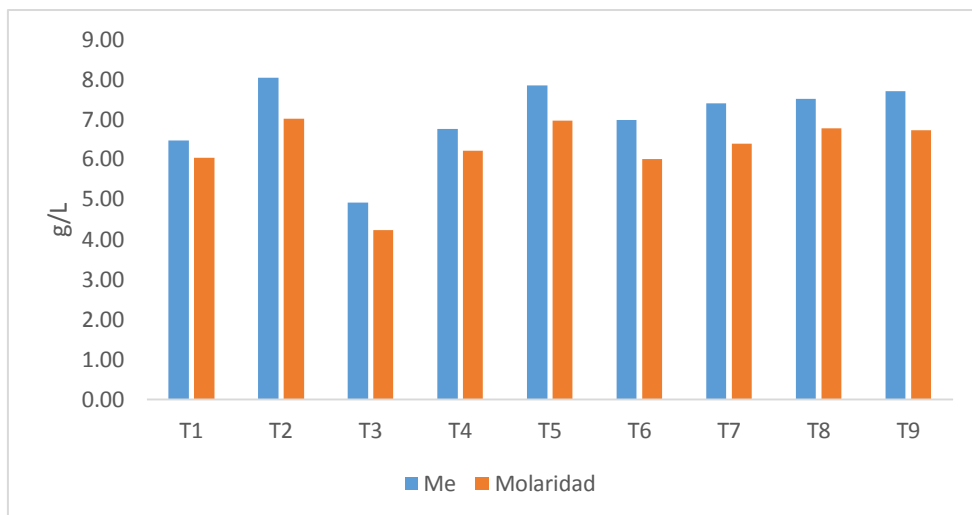
Tabla 41. Comparación datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
M_e (g/L CH ₄)	6,47	8,04	4,91	6,77	7,85	6,98	7,39	7,51	7,71
Molaridad (g/L CH ₄)	6,05	7,02	4,23	6,21	6,96	6,01	6,39	6,78	6,73
Diferencia	0,43	1,02	0,69	0,56	0,89	0,97	1,00	0,72	0,98
Diferencia (%)	6,57	12,67	13,95	8,22	11,30	13,93	13,54	9,64	12,67

Fuente: trabajo experimental 2021

De esta forma como se puede apreciar, los resultados obtenidos para el metano acumulado han estado por debajo del M_e , o potencial de metano producible. Esto resulta lógico, principalmente debido a la enorme complejidad que existe tras un proceso de co-digestión anaerobia, lo que hace difícil que los resultados sigan al cien por cien a lo estimado por el modelo matemático.

Figura 36. Diferencias de los datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz



Fuente: trabajo experimental 2021

Aun así, tal y como se desprende de la Figura 36, así como de los datos ya presentados en la Tabla 41, las diferencias no han sido muy grandes, siendo en el mayor de los casos, el del T3, con casi un 14% de diferencia respecto al potencial esperable. Este porcentaje de diferencia entre los datos potenciales según el modelo matemático y los datos obtenidos en laboratorio se encuentra a un nivel similar al de estudios realizados comparando con el mismo modelo (Gu et al., 2020; Guo et al., 2020; Varsha et al., 2020).

De esta forma, se puede concluir que los resultados obtenidos en el ensayo de campo, analizados en función de la molaridad acumulada del metano producido, se comportan de acuerdo al modelo matemático estudiado, estando sus valores acumulados obtenidos levemente por debajo de los valores potenciales que el modelo arroja.

5.5 Producción de biogás y metano a nivel de campo

En cuanto a la parte de campo o implementación del proyecto, la única propiedad que pudo ser medida para evaluar el proceso de co-digestión anaerobia fue la caracterización del biogás producido, de nuevo utilizando el gasómetro “Biogás 5000 Gas Analyser”. Dentro de la caracterización del biogás producido se concretará sobre el contenido de metano y dióxido de carbono, ya que, conociendo los porcentajes de metano y dióxido de carbono diarios se puede estimar en qué punto o fase del proceso de co-digestión anaerobia se encuentra cada digestor.

5.5.1 Rendimiento diario de biogás

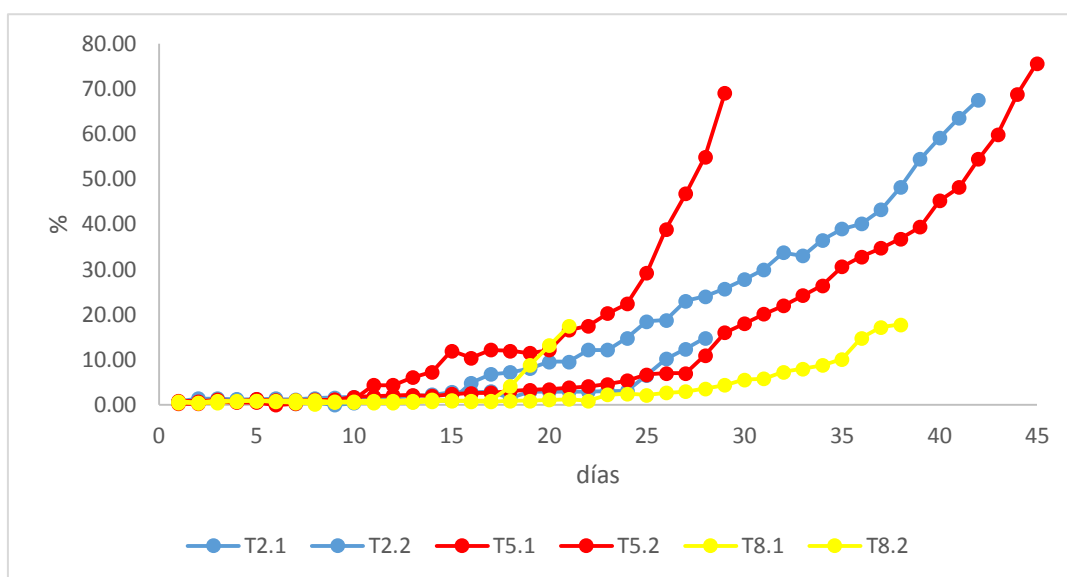
Tal y como se puede apreciar en la Figura 37 la producción de biogás se demoró considerablemente, llegando en la primera repetición del tratamiento 8 (T8.1) a

demorarse casi un mes en empezar a producir un porcentaje mínimamente significativo de metano. Esta diferencia en la entrada a producción de biogás, con unos niveles de metano significativos, se achaca principalmente a las diferentes ubicaciones de los digestores, lo que hace que cada proceso de co-digestión anaerobia ocurrido en cada digestor esté sujeto a condiciones distintas. En el caso del T8.1, el digestor se encuentra ubicado en el fondo de un valle, por lo que las horas de sol directo que recibe son mucho menores que las del resto de digestores.

Otro factor tremendamente determinante para poder entender las diferencias en cuanto a la entrada en producción en los seis digestores es el hecho de que el proceso de co-digestión anaerobia no comenzase al mismo tiempo. Esto se debió a que, al tener que negociar con seis familias distintas, unido al hecho de que los propios tesistas tuvieron que encargarse de la supervisión y/o construcción de la mayoría de casetas, así como de la instalación y carga de los propios digestores. Esto supuso que el proceso de co-digestión anaeróbica comenzase antes en unas repeticiones que, en otras, lo que tuvo unas repercusiones evidentes en cuanto al clima, sufriendo las repeticiones que fueron cargadas antes unas condiciones climáticas peores para este proceso. Esto se evidencia en la pendiente de las repeticiones que tienen menos datos, siendo considerablemente mayor que las repeticiones que tienen más datos. En el tratamiento 5 es en el que se evidencia más este hecho, ya que en la segunda repetición (T5.2) el día 29 se alcanzan porcentajes de metano que en la primera repetición (T5.1) no son alcanzados hasta el día 44 de muestreo.

Por último, para resumir los datos obtenidos en función de cada tratamiento, se parecía que el tratamiento 8 tiene rendimientos de metano considerablemente menores a los de los tratamientos 2 y 5. Entre los tratamientos 2 y 5 es más complicado discernir cuál ha tenido mayor éxito, ya que la primera repetición del tratamiento 2 (T2.1) ha tenido una mayor proporción de metano en el biogás producido que el T5.1. Sin embargo, T5.2 presenta una concentración de metano en el biogás producido mucho mayor que cualquiera de las repeticiones del tratamiento. Por todo ello, aún con lo explicado anteriormente sobre las diferentes condiciones que han existido y en las repeticiones, y, por tanto, lo complicado de compararlas entre sí, se puede concluir que el tratamiento 5 es el que ha tenido mejores resultados en cuanto a la producción de metano.

Figura 37. *Porcentaje de metano producido diariamente en los seis digestores*



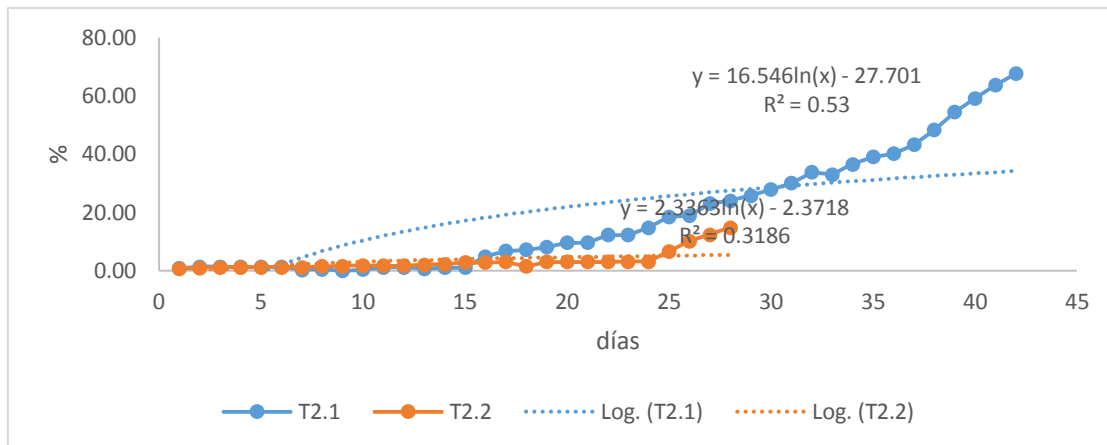
Fuente: trabajo experimental 2021

A continuación, se detallará con un nivel mayor de detalle el porcentaje de metano producido diariamente en cada tratamiento.

5.5.2 Porcentaje diario de producción de metano (CH₄)

En el tratamiento 2, tal y se puede apreciar en la Figura 38, la primera repetición ha tenido un mayor rendimiento en cuanto a esta propiedad. La diferencia existente entre las dos repeticiones se debe principalmente a que T2.1 está ubicado en el digester que absorbe mayor cantidad de radiación, por lo que los microorganismos involucrados en la co-digestión anaerobia ocurrida en este digester estuvieron sometidos a unas temperaturas mayores, lo que propició que trabajasen a mayor ritmo, permitiendo a T2.1 entrar antes que a T2.2 en la fase metanogénica. Esto se refleja en que la pendiente de T2.1 es mayor que la de T2.2, pero sobre todo en que T2.1 empezó a tener una producción de metano significativa ocho días antes que T2.2.

Figura 38. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 2.

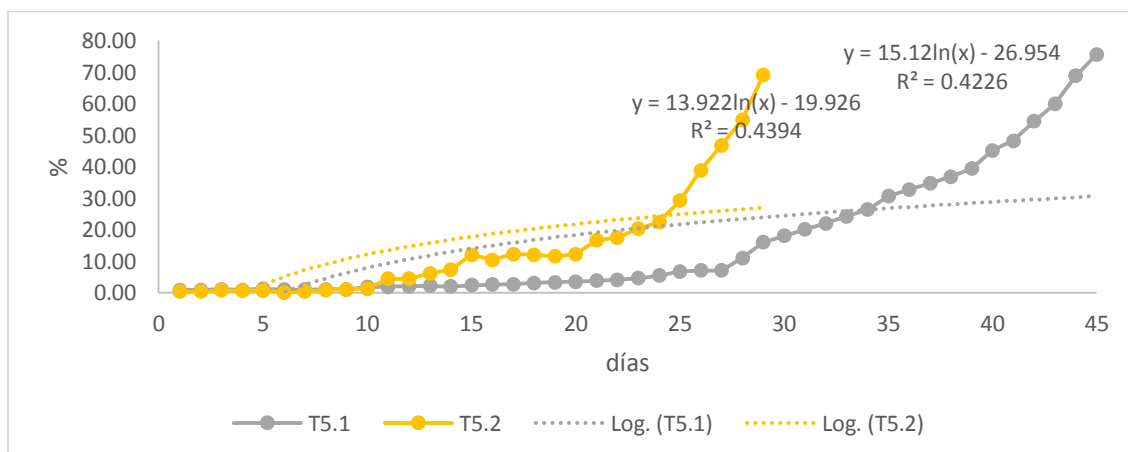


Fuente: trabajo experimental 2021

En cuanto al tratamiento 5, las diferencias son mucho más significativas que en el caso del tratamiento anterior. Como muestra

Figura 39, el T5.1 ha tenido una producción de metano más temprana, así como una pendiente en su curva de porcentaje de metano producido diariamente mucho más acentuada que la del T5.2. En este tratamiento es en el que más se evidencian las diferencias en cuanto a las condiciones que han existido en los procesos de co-digestión anaerobia en las dos repeticiones. Esto se debe a que el T5.1 fue el primero en ser cargado en los digestores, y, por tanto, fue el que sufrió condiciones climáticas más adversas al estar empezando el proceso de co-digestión anaerobia mucho más alejado del verano que el resto de repeticiones.

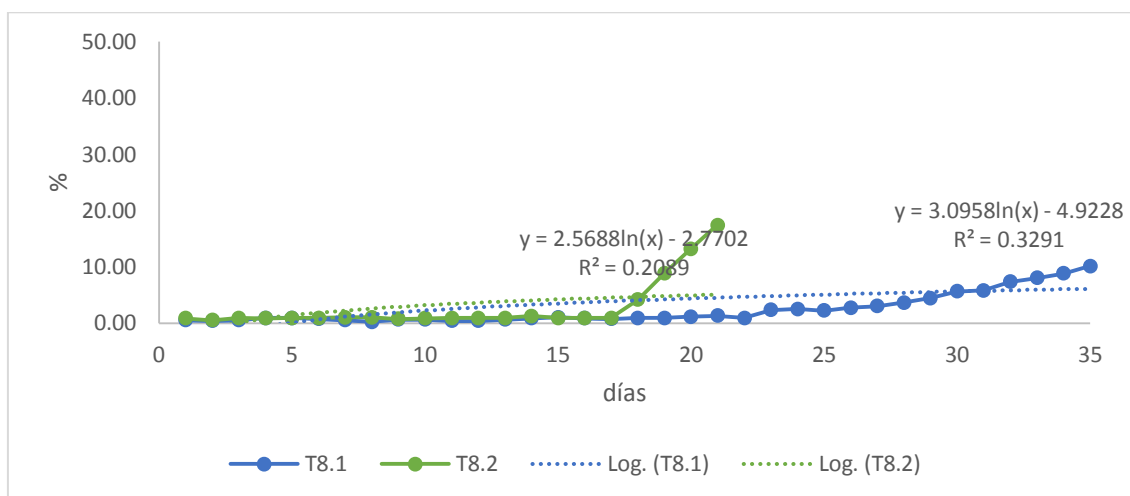
Figura 39. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 5.



Fuente: trabajo experimental 2021

En la Figura 40 se puede ver cómo ha sido el porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 8. Como resultó evidente con la Figura 37, este tratamiento es el que ha tenido unos resultados peores. Aun así, vemos como la segunda repetición (T2.8), al haber comenzado el proceso de co-digestión anaerobia 14 días más tarde, ha estado bajo unas condiciones mejores para el desarrollo de los microorganismos responsables de la producción de metano durante la co-digestión anaerobia. Esta se supone la principal causa, tanto de la mayor pendiente como de empezar a producir porcentajes de metano mayores, de T8.2 frente a T8.1.

Figura 40. Porcentaje de metano producido diariamente para el tratamiento 8.



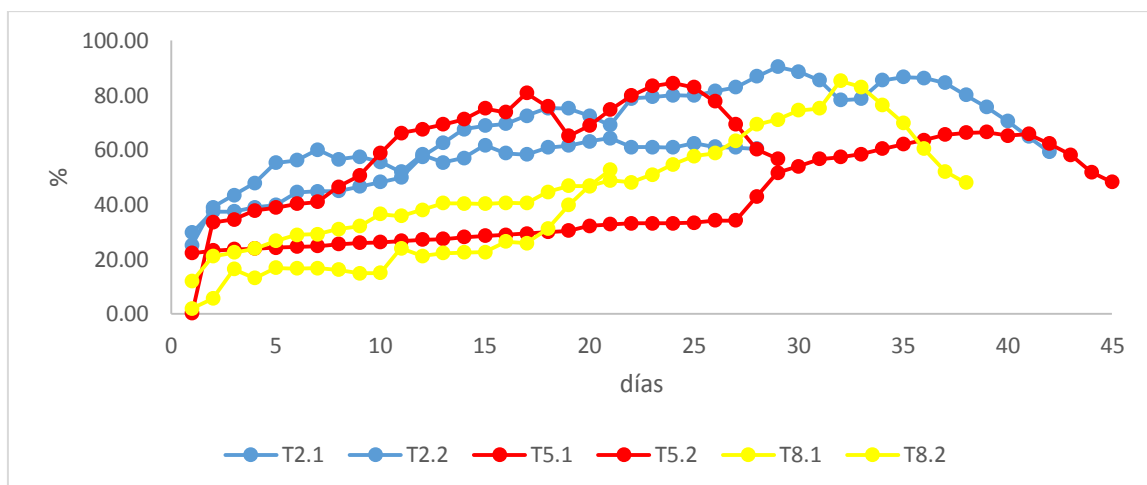
Fuente: trabajo experimental 2021

5.5.3 Porcentaje diario producido de dióxido de carbono (CO₂)

Tal y como puede apreciarse en la Figura 41, al tercer día todos los tratamientos tuvieron una producción de alrededor del 30%, del tercer día en adelante los tratamientos T2.1, T2.2 y T5.2 fueron los que mayor producción de dióxido de carbono mostraron, llegando a alcanzar una producción de alrededor de un 80% entre los días 3 y 45. Por otro lado los tratamientos T8.1, T8.2 y T5.1 mostraron una producción de dióxido de carbono menor pero constante. En los primeros 30 días la producción del metano está en la fase metanogénica hidrogenotrófica, en cambio cuando la producción del dióxido de carbono llega a su pico y comienza a descender quiere decir que el proceso de la co-digestión anaerobia alcanzó la fase metanogénica acetoclásticas, en la cual la producción de metano es entorno al 70% del total.

Cabe mencionar que los tratamientos T2.2 y T8.2 fueron los últimos en ser construidos motivo por lo cual sus números de mediciones son menores a la de los demás, con las consecuencias sobre el proceso de co-digestión anaerobia descritos con anterioridad.

Figura 41. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente en los seis digestores.

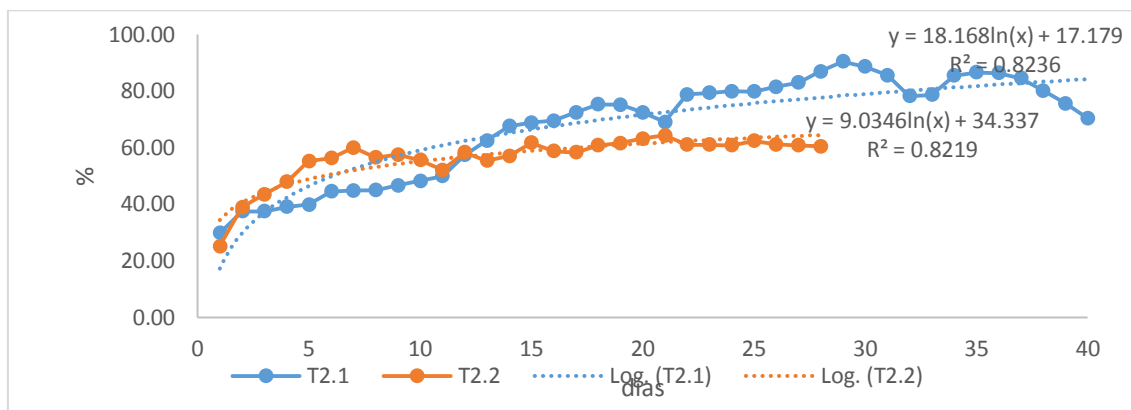


Fuente: trabajo experimental 2021

Como se puede observar en la Figura 42 la producción de dióxido de carbono en el T2.1 los primeros días fue reducida, ya que las condiciones climáticas no fueron muy favorables, lo que supuso que la producción de dióxido de carbono fuese aumentando lentamente, hasta llegar a su máximo en el día 29 (90,40%), tras lo que la producción de dióxido de carbono comenzó a descender, dando paso a la producción del metano. En cambio, en el T2,2 la producción en los primeros días fue mayor que en el T2.1 ya que

las condiciones climáticas fueron más favorables, sin embargo, el dióxido de carbono no siguió un incremento tan significativo como en el de la primera repetición, por lo que tampoco se ha llegado al punto de descenso en la producción de este elemento, por lo que en esta repetición aún no se ha alcanzado la fase de la co-digestión anaerobia de mayor producción de metano. Esta diferencia, tal y como se comentó anteriormente se achaca a la ubicación del digestor en que fue implementada la segunda repetición de este tratamiento.

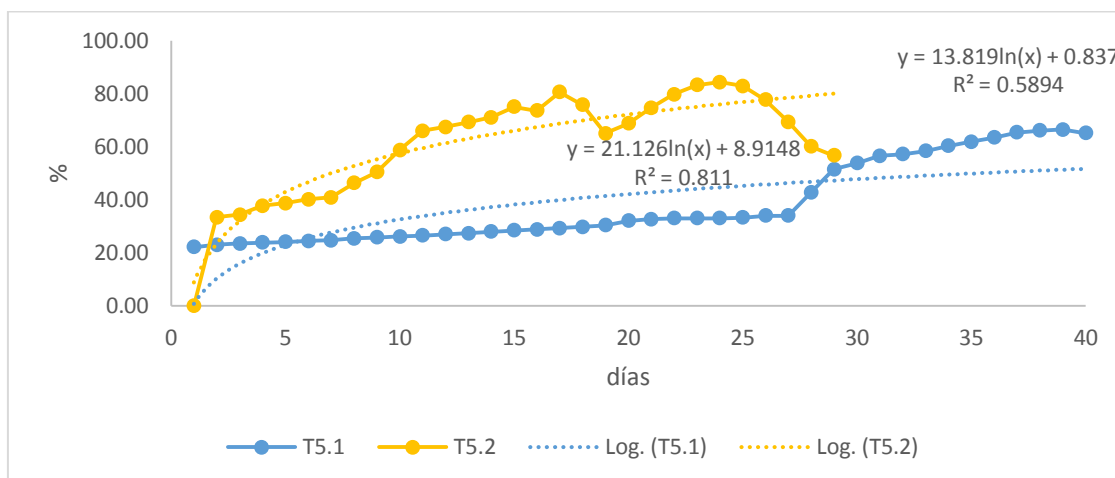
Figura 42. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 2.



Fuente: trabajo experimental 2021

Como se muestra en la Figura 43 el tratamiento T5.2 tuvo una mayor y más rápida producción de dióxido de carbono, llegando a su pico en el día 25 aproximadamente, mientras que el tratamiento T5.1 desarrolló la producción de este elemento a un ritmo más lento. El tratamiento T5.2 fue construido con al menos 15 días de diferencia del primero, por lo que las condiciones para este fueron mucho mejores que para el tratamiento T5.1. Cabe mencionar que la temperatura es un factor muy influyente en el proceso de co-digestión anaerobia, por este motivo, y recibiendo muchas más horas de sol al día, el proceso de la co-digestión anaerobia se desarrolló más rápidamente en el tratamiento T.5.2.

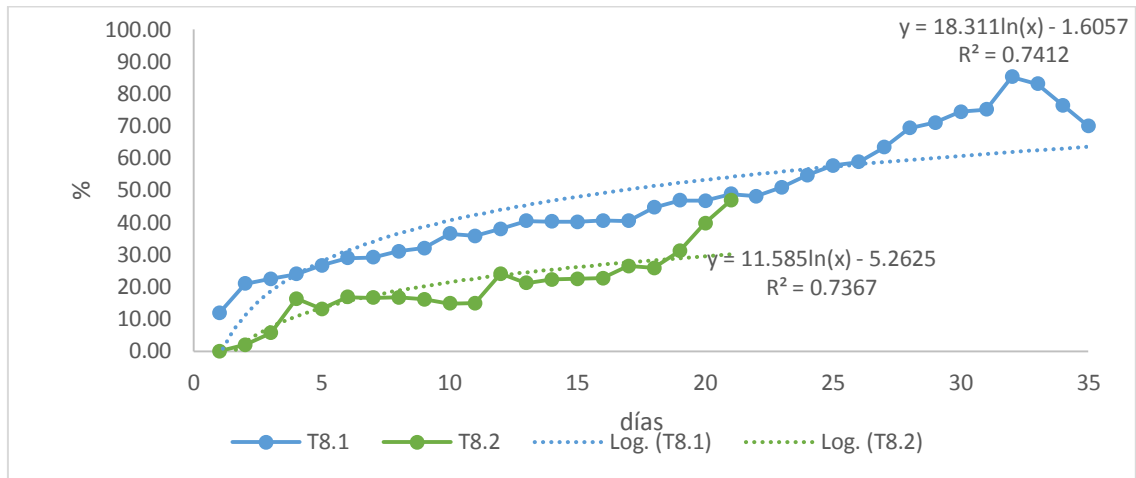
Figura 43. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 5.



Fuente: trabajo experimental 2021

Como se muestra en la Figura 44, se puede evidenciar que para el T8.1 durante sus primeros días no hubo una buena producción de dióxido de carbono, sin embargo tuvo un aumento lento y progresivo hasta llegar al día 34, donde alcanzó su pico más alto de producción. Sin embargo, al no tener unos porcentajes de metano significativos en esta repetición aún no puede concluirse que este descenso en la proporción de dióxido de carbono existente en el biogás producido sea por una entrada en fases más avanzadas de la co-digestión anaerobio o sea debido a unas condiciones adversas para el proceso. En el caso de T8.2 ha seguido una evolución similar a la de la primera repetición, apreciándose en los últimos días de toma de datos un aumento significativo en la cantidad de dióxido de carbono producido, lo que augura que el proceso de co-digestión anaerobia ha entrado en fases más avanzadas.

Figura 44. Porcentaje de dióxido de carbono producido diariamente para el tratamiento 8.



Fuente: trabajo experimental 2021

CAPITULO VI

6. Comprobación de la hipótesis

6.1 Hipótesis a comprobarse

6.1.1 Hipótesis nula

El biogás obtenido en el laboratorio y campo presenta porcentajes de metano insuficientes para su uso como biocombustible.

6.1.2 Hipótesis alterna

El biogás obtenido en el laboratorio y campo presenta porcentajes de metano suficientes para su uso como biocombustible.

De acuerdo a los valores reportados, se acepta la hipótesis alterna.

CAPITULO VII

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Se caracterizó exitosamente todas las materias primas (cebada, maíz, lactosuero y estiércol), en los laboratorios de Universidad Estatal de Bolívar. Obteniendo resultados positivos en las características que les hacen susceptibles de ser potenciales biocombustibles, por ello, estas materias primas fueron utilizadas para realizar la carga en el proceso de co-digestión anaerobia a nivel de campo.
- Se definieron las condiciones óptimas de la co-digestión anaerobia, siendo para un tiempo de retención hidráulico de 20 días y una temperatura constante de 35 grados centígrados, el máximo de biogás acumulado obtenido fue en el tratamiento T5 con 589,82 ml, seguido por el tratamiento T2 obteniendo un 522,79 ml y, por último, el T5 que obtuvo 546,77 ml.
- A nivel de laboratorio se obtuvieron niveles muy similares en cuanto a la producción de metano y el dióxido de carbono, esto demuestra que el proceso de la co-digestión anaerobia se produjo satisfactoriamente. En el caso del primero se estabilizo entorno al 50 % y el segundo entorno al 60 %.
- Una de las conclusiones más importantes que se extrae de este estudio es que cuando se modifican los parámetros óptimos de funcionamiento se ralentiza el proceso de la co-digestión anaerobia en los biodigestores, alcanzándose valores similares de producción de metano y dióxido de carbono en un tiempo más de 10 veces mayor, lo que evidencia una actividad mucho más lenta de las bacterias involucradas en las distintas etapas de la co-digestión anaerobia.
- Aunque ocurre más despacio, la co-digestión anaerobia a más de 3200msnm queda probada como una forma eficiente de obtención de energía a partir de residuos agropecuarios.
- Mediante esta investigación se determinó que el lactosuero es un buen iniciador durante el proceso de la co-digestión anaerobia gracias a su gran contenido de nutrientes.
- Por último, si bien gracias a la bibliografía ya era conocido que tanto el estiércol de vaca, como la paja de cebada y los restos de maíz son buenos

materiales para la producción de biogás, gracias a este proyecto de investigación queda probado que el lactosuero también es un buen producto para la producción de biogás mediante el proceso de co-digestión anaerobia.

7.2 Recomendaciones

- Para este tipo de investigaciones la materia prima a utilizarse es preferible que esté completamente seca, por dos razones: la primera por la optimización de tiempo al ahorrar el pretratamiento de secado, así como, en el momento de los análisis (humedad, cenizas y volátiles); y la segunda porque estando la materia prima completamente seca tiene una relación C/N mucho más alta.
- Para esta investigación los recursos fueron limitados, en el caso de la instalación de los digestores de laboratorios se realizó con materiales reutilizados, lo que incrementó significativamente el riesgo de fugas. Por tanto, se recomienda utilizar materiales completamente nuevos.
- También en la parte de investigación de laboratorio, al momento de realizar las mediciones de algunos parámetros hubo ciertos problemas con las lecturas. En el caso de la presión el problema que hubo fue que las sondas disponibles solo median con precisión de tres decimales hasta un límite de 1,2 bares, pasado este valor había que utilizar una sonda de 100 bares que media los valores con un solo decimal, esto dificultó enormemente poder evaluar los tratamientos en función de este parámetro, teniéndose que utilizar métodos de estimación de decimales. Por otra parte, el medidor utilizado para la caracterización del gas marcó constantemente presencia de oxígeno en los digestores, sabiendo que el proceso que ocurre dentro de los biodigestores es anaerobio. Por último, cuando los volúmenes de biogás producidos son muy pequeños (en torno a 15 ml) supone un caudal de entrada muy pequeño para que el GEA 500 pueda dar lecturas que se ajustasen a lo esperado. Por tanto, se recomienda utilizar aparatos diseñados netamente para este tipo de análisis que se ajusten a las necesidades de la investigación.
- Se recomienda realizar las mediciones de gas dentro del extractor de gases para evitar malos olores.
- Para la parte de campo de esta investigación se utilizaron biodigestores en forma de cojín lo que complicó la manipulación y carga. Además, el material utilizado era muy rígido y se rompía con facilidad, ocasionando fugas durante

la producción de biogás. Por tal motivo se recomienda utilizar biodigestores de forma cilíndrica y de materiales flexibles y manipulables.

- En este proyecto la construcción de las casetas se las realizó con adobe, es recomendable realizar los adobes en temporada seca.
- Se recomienda construir las casetas para los biodigestores en lugares que tengan como mínimo 8 horas de sol.
- Uno de los puntos más importantes a la hora del montaje de los biodigestores, a nivel de campo, es el sellado entre el digestor y las tuberías de carga. Por este motivo se recomienda utilizar material duro y flexible como el caucho de neumático de automóvil.
- Se recomienda instalar los biodigestores cerca de la cocina para evitar la pérdida de presión del gas.

BIBLIOGRAFÍA

- 18122, U.-E. I. (2016). *Biocombustibles solidos, determinacion de contenido de ceniza*.
- Alvares Macias, Y., & García Lino, M. (2020). Biodigestor anaeróbico para la producción de biogás en el cantón santa ana sitio monte oscuro.
- Artigue, M. (1998). Enseñanza y aprendizaje del análisis elemental: ¿qué se puede aprender de las investigaciones didácticas y los cambios curriculares? *RELIME. Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa*, 1(1), 40-55.
- Babae, A., & Shayegan, J. (2011). Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, 57, 411-417. <https://doi.org/10.3384/ecp11057411>
- Benítez, P. (2017). *Universidad Técnica De Ambato Facultad De Ciencias Agropecuarias Carrera De Ingeniería Agropecuaria*. 1-79.
- BERNAL-MARTINEZ, A. (2020). Co-digestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos*, 115-141. <https://doi.org/10.35429/h.2020.8.115.141>
- BESEL. (2007). Digestores anaerobios. En *Energía De La Biomasa* (Vol. 94, Número 2).
- Brito, H., Antonio, S., Arteaga, M., Evelyn, R., Villalón, P., & Adriana, R. (2015). Aprovechamiento del suero de leche como bebida energizante para minimizar el impacto ambiental. *European Scientific Journal*, 11(26), 257-268.
- Burgos, F.; Michilena, J. (2015). Universidad de guayaquil. En *La Evasión Tributaria E Incidencia En La Recaudación Del Impuesto a La Renta De Personas Naturales En La Provincia Del Guayas, Periodo 2009-2012* (Número proyecto de factibilidad técnica, económica y financiera del cultivo de ostra del pacífico en la parroquia manglaralto, cantón santa elena, provincia de santa elena).
- Caballero García, M. A., Córdova Téllez, L., & López Herrera, A. de J. (2019). Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(4), 357-366. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.357-366>

- Cargua Alcocer J. (2017). *Diseño de un proceso industrial para la obtención de bioetanol a partir de lactosuero destinado a la elaboración de perfumes*. File:///c:/users/usuario/downloads/t-9045_cabrera.
- Castro, A. J., Castro, M., & Germán, S. (2017). Cambios en la oferta varietal de cebada: desafíos para la producción. *Agrociencia*, 38(2), 6-12. http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/cangue_38/Cangue38.pdf
- Castro Granado, A. J. (2018). Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos. *Universidad de Cádiz*, 34. [https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/20924/TFG-Antonio Jesús Castro Granado.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/20924/TFG-Antonio%20Jes%C3%BA%20Castro%20Granado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cecilio, E., & Yanes, C. (2020). *Universidad de Ciencias Pedagógicas Elaboración de un biodigestor a escala de laboratorio Autora: June*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33561.03681>
- Chacón, L., Chávez, A., Rentería, A., & Rodríguez, J. (2017). Probioticos: Relación Con La Salud Y Bioactividades. *Interciencia*, 42(November), 712-718. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33953499002>
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2010). Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*, 101(9), 3013-3019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.025>
- Coral, J. (2017). *Universidad Central del Ecuador caracterización morfológica y agronómica de dos genotipos de maíz (zea mays l.) en la zona media de la*. 93.
- Córdoba, V. E. (2016). *Estudio de la cinética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y agroindustriales*. Universidad Nacional de San Martín.
- Córdoba, V., Fernández, M., & Santalla, E. (2018). The effect of substrate/inoculum ratio on the kinetics of methane production in swine wastewater anaerobic digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21308-21317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0039-6>
- Delgado Hernández, J. (2018). *Evaluación agronómica, morfológica y aptitud harinera de variedades tradicionales de maíz (Zea mays L.)*. 202.

- Deras Floras, H. (2020). Guía técnica. El cultivo del maíz. En *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura* (Vol. 1).
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. En *Colección De Documentos* *Técnicos*.
http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Fassio A., I. W. (2019). El cultivo de maíz para la producción de forraje y grano y la influencia del agua. En *INIA Serie técnica*. <https://doi.org/10.35676/inia/st.239>
- File:///C:/Users/Alejandro/Downloads/ISO181222015Determinaciondelcontenidoencenizas.pdf;file:///C:/Users/Alejandro/Downloads/ISO181222015Determinaciondelcontenidoencenizas.pdf;18123, U.-E. I. (2016). *Bio combustibles, detrmnacio de materia volatil*.
- Gabbai, F. P., Chirik, P. J., Fogg, D. E., Meyer, K., Mindiola, D. J., Schafer, L. L., & You, S. L. (2016). An Editorial about Elemental Analysis. *Organometallics*, *35*(19), 3255-3256. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.6b00720>
- Gallegos, C., González, V., Aguilar, C. ;, & Rodríguez, R. (2014). Biofertilizantes microbianos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *August*, 363.
- Gu, J., Liu, R., Cheng, Y., Stanisavljevic, N., Li, L., Djatkov, D., Peng, X., & Wang, X. (2020). Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. *Bioresource Technology*, *301*(November 2019), 122765. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122765>
- Guo, H. G., Chen, Q. L., Hu, H. W., & He, J. Z. (2020). High-solid anaerobic co-digestion of pig manure with lignite promotes methane production. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120695>
- Gutierrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Analisis y diseño de experimentos. En *Turkish Journal of Medical Sciences* (Vol. 46, Número 5). <https://doi.org/10.3906/sag-1507-147>

- Haile, E., Gicheha, M., Njonge, F. K., & Asgedom, G. (2017). Determining Nutritive Value of Cereal Crop Residues and Lentil (*Lens esculanta*) Straw for Ruminants. *Open Journal of Animal Sciences*, 07(01), 19-29. <https://doi.org/10.4236/ojas.2017.71003>
- Jeong, T. Y., Cha, G. C., Choi, S. S., & Jeon, C. (2007). Evaluation of methane production by the thermal pretreatment of waste activated sludge in an anaerobic digester. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 856-863.
- Lappa, I. K., Papadaki, A., & Kachrimanidou, V. (2019). Cheese Whey Processing : Integrated Biorefinery. *Foods*, 8, 1-37. www.mdpi.com/journal/foods
- Lucano Moreno, E. (2021). *Caracterización fisicoquímica del queso mantecoso que se expende en el mercado central de la ciudad de cajamarca.*
- Marco, P. (2019). *Digestión anaerobia de azúcares reductores para obtención de biocombustibles: revisión bibliográfica.* 56. <https://core.ac.uk/download/pdf/290002341.pdf>
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestorefile:///C:/Users/Alejandro/Desktop/libro _Martí-HerreroBiodigestoresTubularesguiadediseoymanualdeinstalacion.pdfs Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación.*
- Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La Biomasa De Los Cultivos En El Agroecosistema. Sus Beneficios Agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11-20.
- Mirales Pascual. (2018). *Trabajo De Fin De Master. 19.08.2015.*
- Molina, L., Noroña, P., Campaña, D., Garófalo, J., Coronel, J., Jiménez, C., & Cruz, E. (INIAP). (2020). Generalidades y variedades mejoradas para la Sierra ecuatoriana. En *Ministerio de Agricultura y ganaderia* (Número 116). [https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5587/2/Manual 116 La cebada.pdf](https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5587/2/Manual%20116%20La%20cebada.pdf)
- Monod, J. (1949). a Certain Number. *Annual Reviews in M*, 3(XI), 371-394.
- Moreno, B. A. C. (2019). *Cultivo de hongos comestibles Pleurotus djamor y Pleurotus ostreatus utilizando residuos de agave tequilana* (p. 100).
- Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F. M., & Toda, T. (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet

- anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 118, 210-218.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.045>
- Navarro, N. O. (2017). Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. *Facultad de ciencias forestales y de la conservación de la naturaleza*, 72.
- Rea Galeas, H. M. (2014). *Diseño e implementación de un biodigestor para la producción de bioabono a partir de estiércol de ganado vacuno en el relleno sanitario del GAD municipal del canton La Joya de los Sachas*.
- Rodríguez, M. (2018). *Ensayo Biochemical Methane Potencial de Digestión Anaerobia con Fangos Mixtos de EDAR y Residuos Orgánicos de Vertedero*. 1-59.
- Rodríguez, W. P. (2018). *Elbia Tumiri Tumiri*.
- Rojas Gracia, P. (2020). *Definición de las condiciones de operación que maximizan la producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), a partir del proceso de digestión anaeróbica, empleando aguas residuales mediante pruebas a escala de laboratorio*.
- Sanabria, C. (2018). Biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. *Tesis*, 25.
- Sánchez Almagro, J. S. (2016). Universidad San Francisco de Quito Universidad San Francisco de Quito. *Director*, 1-50.
- Sanz Herrero, J. (2018). *Estudio para la optimización del proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás a través de la co-digestión con cenizas y pretratamientos termo-químicos*.
- Savira, F., Suharsono, Y., Tamrat, W., Pasimeni, F., Pasimeni, P., Kecerdasan, I., Ikep, P., Shahan, A., Jahan, F., Samuels, R., Group, W. B., Charles, L. E., 中島, Smoke, P., Simplicio, A., Libâneo, J. C., Lindblom, C. E., Bilney, C., Pillay, S., ... LEMES, S. de S. (2017). "Análisis gastronómico de la harina de cebada (*Hordeum vulgare*), en el cantón Riobamba". *Journal of Chemical Information and Modeling*, 21(2), 1689-1699.
[https://www.oecd.org/dac/accountable-effective-institutions/Governance Notebook 2.6 Smoke.pdf](https://www.oecd.org/dac/accountable-effective-institutions/Governance%20Notebook%202.6%20Smoke.pdf)
- UNE -EN ISO 18134-3. (2016). *Bio combustibles sólidos determinación de humedad*.

- Utrera Velázquez, A. I., & Jiménez Jerez, K. M. (2021). Revalorización de la chicha de maíz en la cocina étnica del pueblo Salasaka. Tungurahua, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 13(3), 418-425.
- Valero, D., Montes, J. A., Rico, J. L., & Rico, C. (2016). Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Waste Management*, 48, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.012>
- Varsha, S. S. V., Soomro, A. F., Baig, Z. T., Vuppaladadiyam, A. K., Murugavelh, S., & Antunes, E. (2020). Methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste and sewage sludge: synergy study on cumulative methane production and biodegradability. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00884-x>
- Vázquez Sánchez Yolanda. (2012). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. *Tesis*, 101.
- Velázquez Martí, B., Meneses Quelal, O., Gaibor Chávez, J., & Niño Ruiz, Z. (2016). Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process. *IntechOpen*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>
- Velazquez Marti, B., Meneses Quelal, O., Gaigor Chaavez, J., & Niño Ruiz, Z. (2016). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. *Intech, tourism*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>
- Vera, P. (2019). Facultad de ciencias químicas y de la salud carrera de ciencias médicas. *Repositorio Universidad Técnica de Machala*, 1-31. [http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14733%0Ahttp://186.3.32.121/bitstream/48000/13770/1/belduma belduma viviana elizabeth.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14733%0Ahttp://186.3.32.121/bitstream/48000/13770/1/belduma%20belduma%20viviana%20elizabeth.pdf)
- Willekens, F. (2001). Gompertz in Context: The Gompertz and Related Distributions. *Forecasting Mortality in Developed Countries*, 105-126. https://doi.org/10.1007/0-306-47562-6_5
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., rombouts, F. M., & rient, k. V. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and environmental microbiology*, 56.no 6, 1875-1881. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.01.007>

- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875-1881. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.01.007>
- 18122, U.-E. I. (2016). *Biocombustibles solidos, determinacion de contenido de ceniza*.
- Alvares Macias, Y., & García Lino, M. (2020). *Biodigestor anaeróbico para la producción de biogás en el cantón santa ana sitio monte oscuro*.
- Artigue, M. (1998). Enseñanza y aprendizaje del análisis elemental: ¿qué se puede aprender de las investigaciones didácticas y los cambios curriculares? *RELIME. Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa*, 1(1), 40-55.
- Babae, A., & Shayegan, J. (2011). Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, 57, 411-417. <https://doi.org/10.3384/ecp11057411>
- Benítez, P. (2017). *Universidad Técnica De Ambato Facultad De Ciencias Agropecuarias Carrera De Ingeniería Agropecuaria*. 1-79.
- Bernal-Martinez, A. (2020). Co-digestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos*, 115-141. <https://doi.org/10.35429/h.2020.8.115.141>
- Besel. (2007). Digestores anaerobios. En *Energía De La Biomasa* (Vol. 94, Número 2).
- Brito, H., Antonio, S., Arteaga, M., Evelyn, R., Villalón, P., & Adriana, R. (2015). Aprovechamiento del suero de leche como bebida energizante para minimizar el impacto ambiental. *European Scientific Journal*, 11(26), 257-268.
- Burgos, F.; Michilena, J. (2015). Universidad de guayaquil. En *La Evasión Tributaria E Incidencia En La Recaudación Del Impuesto a La Renta De Personas Naturales En La Provincia Del Guayas, Periodo 2009-2012* (Número proyecto de factibilidad técnica, económica y financiera del cultivo de ostra del pacífico en la parroquia manglaralto, cantón santa elena, provincia de santa elena).
- Caballero García, M. A., Córdova Téllez, L., & López Herrera, A. de J. (2019).

- Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(4), 357-366.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.357-366>
- Cargua Alcocer J. (2017). *Diseño de un proceso industrial para la obtención de bioetanol a partir de lactosuero destinado a la elaboración de perfumes*.
 file:///C:/Users/Usuario/Downloads/T-9045_Cabrera.
- Castro, A. J., Castro, M., & Germán, S. (2017). Cambios en la oferta varietal de cebada: desafíos para la producción. *Agrociencia*, 38(2), 6-12.
http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/cangue_38/Cangue38.pdf
- Castro Granado, A. J. (2018). Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos. *Universidad de Cádiz*, 34.
[https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/20924/TFG-Antonio Jesús Castro Granado.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/20924/TFG-Antonio%20Jes%C3%BA%20Castro%20Granado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cecilio, E., & Yanes, C. (2020). *Universidad de Ciencias Pedagógicas Elaboración de un biodigestor a escala de laboratorio Autora: June*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33561.03681>
- Chacón, L., Chávez, A., Rentería, A., & Rodríguez, J. (2017). Probióticos: Relación Con La Salud Y Bioactividades. *Interciencia*, 42(November), 712-718.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33953499002>
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2010). Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*, 101(9), 3013-3019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.025>
- Coral, J. (2017). *Universidad central del ecuador caracterización morfológica y agronómica de dos genotipos de maíz (zea mays l.) en la zona media de la*. 93.
- Córdoba, V. E. (2016). *Estudio de la cinética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y agroindustriales*. Universidad Nacional de San Martín.
- Córdoba, V., Fernández, M., & Santalla, E. (2018). The effect of substrate/inoculum ratio on the kinetics of methane production in swine wastewater anaerobic digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21308-21317.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0039-6>

Delgado Hernández, J. (2018). *Evaluación agronómica, morfológica y aptitud harinera de variedades tradicionales de maíz (Zea mays L.)*. 202.

Deras Floras, H. (2020). Guía técnica. El cultivo del maíz. En *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura* (Vol. 1).

FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. En *Colección De Documentos* *Técnicos*.

http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf

FAO, Minenergía, Pnud, & GEF. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>

Fassio A., I. W. (2019). El cultivo de maíz para la producción de forraje y grano y la influencia del agua. En *INIA Serie técnica*. <https://doi.org/10.35676/inia/st.239>

File:///C:/Users/Alejandro/Downloads/ISO181222015Determinaciondelcontenidoencenizas.pdf
file:///C:/Users/Alejandro/Downloads/ISO181222015Determinaciondelcontenidoencenizas.pdf
18123, U.-E. I. (2016). *Bio combustibles, detrmnacio de materia volatil*.

Gabbai, F. P., Chirik, P. J., Fogg, D. E., Meyer, K., Mindiola, D. J., Schafer, L. L., & You, S. L. (2016). An Editorial about Elemental Analysis. *Organometallics*, 35(19), 3255-3256. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.6b00720>

Gallegos, C., González, V., Aguilar, C. ;, & Rodríguez, R. (2014). Biofertilizantes microbianos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, August, 363.

Gu, J., Liu, R., Cheng, Y., Stanisavljevic, N., Li, L., Djatkov, D., Peng, X., & Wang, X. (2020). Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. *Bioresource Technology*, 301(November 2019), 122765. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122765>

Guo, H. G., Chen, Q. L., Hu, H. W., & He, J. Z. (2020). High-solid anaerobic co-digestion of pig manure with lignite promotes methane production. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120695>

- Gutierrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Analisis y diseño de experimentos. En *Turkish Journal of Medical Sciences* (Vol. 46, Número 5). <https://doi.org/10.3906/sag-1507-147>
- Haile, E., Gicheha, M., Njonge, F. K., & Asgedom, G. (2017). Determining Nutritive Value of Cereal Crop Residues and Lentil (*Lens esculanta*) Straw for Ruminants. *Open Journal of Animal Sciences*, 07(01), 19-29. <https://doi.org/10.4236/ojas.2017.71003>
- Jeong, T. Y., Cha, G. C., Choi, S. S., & Jeon, C. (2007). Evaluation of methane production by the thermal pretreatment of waste activated sludge in an anaerobic digester. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 856-863.
- Lappa, I. K., Papadaki, A., & Kachrimanidou, V. (2019). Cheese Whey Processing : Integrated Biorefinery. *Foods*, 8, 1-37. www.mdpi.com/journal/foods
- Lucano Moreno, E. (2021). *Caracterización fisicoquímica del queso mantecoso que se expende en el mercado central de la ciudad de cajamarca.*
- Marco, P. (2019). *Digestión anaerobia de azúcares reductores para obtención de biocombustibles: revisión bibliográfica.* 56. <https://core.ac.uk/download/pdf/290002341.pdf>
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestorefile:///C:/Users/Alejandro/Desktop/libro _Martí HerreroBiodigestoresTubularesguiadediseoymanualdeinstalacion.pdfs Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación.*
- Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La Biomasa De Los Cultivos En El Agroecosistema. Sus Beneficios Agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11-20.
- Mirales Pascual. (2018). *Trabajo De Fin De Master. 19.08.2015.*
- Molina, L., Noroña, P., Campaña, D., Garófalo, J., Coronel, J., Jiménez, C., & Cruz, E. (INIAP). (2020). Generalidades y variedades mejoradas para la Sierra ecuatoriana. En *Ministerio de Agricultura y ganaderia* (Número 116). [https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5587/2/Manual 116 La cebada.pdf](https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5587/2/Manual%20116%20La%20cebada.pdf)
- Monod, J. (1949). a Certain Number. *Annual Reviews in M*, 3(XI), 371-394.
- Moreno, B. A. C. (2019). *Cultivo de hongos comestibles Pleurotus djamor y Pleurotus*

ostreatus utilizando residuos de agave tequilana (p. 100).

- Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F. M., & Toda, T. (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, *118*, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.045>
- Navarro, N. O. (2017). Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. *Facultad de ciencias forestales y de la conservación de la naturaleza*, *72*.
- Rea Galeas, H. M. (2014). *Diseño e implementación de un biodigestor para la producción de bioabono a partir de estiércol de ganado vacuno en el relleno sanitario del GAD municipal del canton La Joya de los Sachas*.
- Rodriguez, M. (2018). *Ensayo Biochemical Methane Potencial de Digestión Anaerobia con Fangos Mixtos de EDAR y Residuos Orgánicos de Vertedero*. 1-59.
- Rodríguez, W. P. (2018). *Elbia Tumiri Tumiri*.
- Rojas Gracia, P. (2020). *Definición de las condiciones de operación que maximizan la producción de Ácidos Grasos Volátiles (AGV`s), a partir del proceso de digestión anaeróbica, empleando aguas residuales mediante pruebas a escala de laboratorio*.
- Sanabria, C. (2018). Biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. *Tesis*, *25*.
- Sánchez Almagro, J. S. (2016). Universidad San Francisco de Quito. *Director*, 1-50.
- Sanz Herrero, J. (2018). *Estudio para la optimización del proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás a través de la co-digestión con cenizas y pretratamientos termo-químicos*.
- Savira, F., Suharsono, Y., Tamrat, W., Pasimeni, F., Pasimeni, P., Kecerdasan, I., Ikep, P., Shahan, A., Jahan, F., Samuels, R., Group, W. B., Charles, L. E., 中島, Smoke, P., Simplicio, A., Libâneo, J. C., Lindblom, C. E., Bilney, C., Pillay, S., ... LEMES, S. de S. (2017). "Análisis gastronómico de la harina de cebada (*Hordeum vulgare*), en el cantón Riobamba". *Journal of Chemical Information and Modeling*, *21*(2), 1689-1699. <https://www.oecd.org/dac/accountable-effective->

institutions/Governance Notebook 2.6 Smoke.pdf

- UNE -EN ISO 18134-3. (2016). *Bio combustibles solidos determinacion de humedad*.
- Utrera Velázquez, A. I., & Jiménez Jerez, K. M. (2021). Revalorización de la chicha de maíz en la cocina étnica del pueblo Salasaka. Tungurahua, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 13(3), 418-425.
- Valero, D., Montes, J. A., Rico, J. L., & Rico, C. (2016). Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Waste Management*, 48, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.012>
- Varsha, S. S. V., Soomro, A. F., Baig, Z. T., Vuppaladadiyam, A. K., Murugavelh, S., & Antunes, E. (2020). Methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste and sewage sludge: synergy study on cumulative methane production and biodegradability. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00884-x>
- Vázquez Sánchez Yolanda. (2012). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. *Tesis*, 101.
- Velázquez Martí, B., Meneses Quelal, O., Gaibor Chávez, J., & Niño Ruiz, Z. (2016). Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process. *IntechOpen*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>
- Velazquez Marti, B., Meneses Quelal, O., Gaigor Chaavez, J., & Niño Ruiz, Z. (2016). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. *Intech, tourism*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>
- Vera, P. (2019). Facultad de ciencias químicas y de la salud carrera de ciencias médicas. *Repositorio Universidad Técnica de Machala*, 1-31. [http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14733%0Ahttp://186.3.32.121/bitstream/48000/13770/1/Belduma Belduma Viviana Elizabeth.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14733%0Ahttp://186.3.32.121/bitstream/48000/13770/1/Belduma%20Belduma%20Viviana%20Elizabeth.pdf)
- Willekens, F. (2001). Gompertz in Context: The Gompertz and Related Distributions. *Forecasting Mortality in Developed Countries*, 105-126. https://doi.org/10.1007/0-306-47562-6_5

- Zwietering, m. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Rient, k. V. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and environmental microbiology*, 56.No 6, 1875-1881. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.01.007>
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875-1881. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2004.01.007>
- Abuabdou, S. M. (2020). Una revisión de los biorreactores de membrana anaeróbica (AnMBR) para el tratamiento de lixiviados de vertederos altamente contaminados y producción de biogás: efectividad, limitaciones y perspectivas futuras. *Elsevier*.
- Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *FAREM-Esteli*.
- Alavi, S. A. (2020). Estrategias de control de la sobreacidificación para mejorar la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica: una revisión. *Elsevier*.
- Aziz, M. M. (2019). Avances recientes en pretratamiento de efluentes de molinos de aceite de palma (POME) y reactor anaeróbico para la producción sostenible de biogás.
- Bragança, I. (2020). Impurezas en biogás: estrategias analíticas, ocurrencia, efectos y tecnologías de remoción. *Elsevier*.
- Choe, U. (2021). Efectos del pretratamiento hidrotermal y la adición de hidrocarburo de bambú sobre la digestión anaeróbica de residuos de tofu para la producción de biogás. *Elsevier*.
- Choong, Y. Y. (2018). Estrategias para mejorar la producción de biogás de la digestión anaeróbica de efluentes de molinos de aceite de palma (POME): una revisión crítica. *Elsevier*.
- Cruz, I. A. (2021). Valorización de residuos de yuca para la producción de biogás en Brasil basada en la economía circular: una revisión actualizada y completa. *ScienceDirect*.

- 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*.
- Giwa, A. S. (2020). Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones. *Elsevier*.
- Gustafsson, M. (2021). Dimensiones y características de las políticas de biogás: modelado del panorama político europeo. *Elsiever*.
- Kasinath, A. (2021). Biomasa en la producción de biogás: pretratamiento y co-digestión. *Elsevier*.
- Kumar, M. (2021). Una revisión crítica sobre el biocarbón para mejorar la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos de alimentos y lodos. *ScienceDirect*.
- Liu, M. (2021). Mejora de la producción de biogás utilizando aditivos en la digestión anaeróbica: una revisión. *Elsevier*.
- Mishra, A. (2021). Enfoques multidimensionales de producción y mejora de biogás: oportunidades y desafíos. *Sciencedirect*.
- Nhut, H. H. (2020). Eliminación de H₂S en biogás mediante biofiltro percolador: desarrollo reciente. *Elsevier*.
- Paolini, V. (2018). Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones. *Elsiever*.
- Parsaee, M. (2019). Una revisión de la producción de biogás a partir de la vinaza de caña de azúcar. *Elsevier*.
- Pirelli, T. (2021). Sostenibilidad ambiental de la vía del biogás en Italia a través de la metodología de Global Bioenergy Partnership. *Elsevier*.
- Quaschnig. (2019). Perspectivas del biogás de China: fundamentos, desafíos y consideraciones. *Elsevier*.
- Quiroz, M. (2021). Nopal (*Opuntia ficus-indica*) en áreas con lluvias limitadas para la producción de biogás y biofertilizantes. *Sciencedirect*.

- Suárez, V. D. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Scielo*.
- Tong Zhu, J. C. (2019). Promoción de la producción agrícola de biogás y biometano: lecciones de estudios comparativos entre países. *Elsevier*.
- Tonrangklang, P. (2019). Descripción general del potencial de producción de biogás del sector industrial para producir gas biometano comprimido en Tailandia. *Elsevier*.
- Xue, S. (2020). Una comparación sistemática del desarrollo del biogás y las políticas relacionadas entre China y Europa y los conocimientos correspondientes. *Elsevier*.
- Yu, Q. (2019). Una revisión de los métodos de pretratamiento de la paja de los cultivos para la producción de biogás por digestión anaeróbica en China. *Elsevier*.
- Zhao, X. (2020). Reforma del biogás a gas de síntesis: una revisión. *Sciencedirect*.
- Zhu, T. (2019). Promoción de la producción agrícola de biogás y biometano: lecciones de estudios comparativos entre países. *Elsevier*.
- Grisales Rangel, S., & Arellano Ramírez, G. (2017). Análisis comparativo sobre las tecnologías de la digestión anaerobia húmeda y seca. *Comparative analysis of the technology of wet and dry anaerobic digestion*, file:///D:/Usuario/Downloads/An%C3%A1lisis%20comparativo%20sobre%20las%20tecnolog%C3%ADa_Stephanie%20Grisales%20R_2017.pdf.
- Muñoz-Menéndez , M. B., Contreras-Moya, A. M., Santos-Herrero, R. F., Rosa-Domínguez, E. R., & Cárdenas-Ferrer , T. M. (2020). El proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos. *Métodos . Polo del conocimiento*, ISSN: 2550 - 682X DOI: 10.23857/pc.v5i1.1955.
- Pramanik, S. (2019). *he anaerobic digestion rocess of biogas production from food waste: Prospects and constraints*. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>.
- Sanabria Vindell, O. J., Sánchez Melgara, A. E., & Rodas Espinoza., Y. r. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de

- aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el AÑO 2017. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a . *FAREM-Estelí*, N° 24 .
- Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *e FAREM-Estelí.*, N° 24.
- Angeriz, R. (2018). España: Universidad de Cádiz. España. 2018. .
- Arantes, M. K. (2017). Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. *USSC*, Universidad de Piura.
- Bentsen, N. (2019). Biomass for Biorefineries: Availability and Costs. *Biorefinery.*, pp 37-47. .
- Calderon, J. (2017). *Evaluación de un desempeño de un Sistema de tratamiento Primario Anaerobio*. ACADEMIA.
- Castellanos, S. (2017). *Análisis de Ciclo de Vida para los biorresiduos sólidos urbanos*. Colombia: Universidad Nacional de Bogotá.
- Chatterjee, B. R. (2018). New Approach for Determination of Volatile Fatty Acid in Anaerobic Digester . *Engineering Science*, 35(4), 333-351.
- Cheah, Y. K.-A.-Á. (2019). Volatile fatty acid production from mesophilic acidogenic fermentation of organic fraction of municipal solid waste and food waste under acidic and alkaline pH. *Environmental Science and* .
- ChenDeng. (2019). Improving biohydrogen and biomethane co-production via two-stage dark fermentation and anaerobic digestion of the pretreated seaweed *Laminaria digitata*. *Journal of Cleaner Production*, 119666.
- Chumacero, M. E. (2019). *Diseño e implementación de reactor anaerobio*. Piura: Universidad Piura.
- Coronel, A. D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de “valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de* . Cuenca - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

- Durazno, A. D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Granado., D. A. (2018). *Estudio bibliográfico del estado del arte de a digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos*. . Puerto Real: Universidad de CADIZ.
- Hernani, A. H. (2018). Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. *Revista Estudiantil AGRO – VET.* , ISSN: 2523-2037. .
- Jiaming. (2020). A pilot study of biohythane production from cornstalk via two-stage anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, Pages 31719-31731.
- LingkanDing. (2020). Improving biohydrogen and biomethane co-production via two-stage dark fermentation and anaerobic digestion of the pretreated seaweed *Laminaria digitata*. *Journal of Cleaner Production*, 119666.
- Maria CelesteCanales Garcia, L. A. (2018). *Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de el Salvador*. Universidad el Salvador.
- Martinez, P. (2021). *EFEECTO DE BIOSURFACTANTES EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE GRASA*. ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA.
- Melany, L. P. (2020). *Producción de ácidos grasos volátiles por fermentación anaerobia de Vinaza de la industria*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Muñoz-Menéndez. (2020). Resultados del procedimiento de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en Ecuador. *“ingeniar”*:, Núm. 6 (jul-dic) ISSN: 2737-6249.
- Reyes Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Esteli.*, Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano, 60-81. .

- Rodriguez. (2021). *Tecnología de Mono-digestión Anaerobia Usando Residuos Orgánicos para la Producción de Biogás. Revisión Sistemática.*, Facultad de ingeniería y arquitectura escuela profesional de ingeniería ambiental.
- Romero, A. J. (2020). *Obtención de biogás por digestión anaerobia a partir de la fermentación de tres mezclas de sustratos orgánicos en la comunidad de la Huaquilla.* Universidad Católica sedes sapientiae Ucss.
- Sabala Martinez, K. M. (2020). *Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica renovable a partir de residuos sólidos urbanos.* Uts.
- Shu-LinWu. (2020). Medium-Chain fatty acids and long-chain alcohols production from waste activated sludge via two-stage anaerobic fermentation. *Water Research* , 116381.
- Tamayo, L. (2017). *Lo básico para entender el biogás: sus usos y beneficios.* from <http://www.redagricola.com/cl/lo-basico-entender-biogas/>.
- Thanh, D. (2020). Biohythane production via single-stage anaerobic fermentation using entrapped hydrogenic and methanogenic bacteria. *Bioresource Technology*, 122702.
- Vazquez, M. (2021). *Diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos para obtener fertilizantes de uso agrícola.* Universidad de Calladolid.
- Vitaliy Danilo Suárez-Chernov, I. L.-D.-G. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, versión impresa ISSN 0253-5777versión On-line ISSN 2223-4861.
- A. Wellinger, J. M. (2018). *The Biogas Handbook.*
- Adekunle, F. &. (2016). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6, 205-212. .
- Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano. Año 6 | N° 24.* doi:file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Temp/admin,+5552-19219-1-CE.pdf

- Aldo Hernández, M. R. (2019). Medición en línea de pH, Temperatura y Agitación de medio de cultivo en fermentación utilizando *Saccharomyces cerevisiae*. Obtenido de <https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Ingenieria%20y%20Tecnologia%20T-VI/ARTICULO%2017.pdf>
- Álvaro Andrés Cajigas Cerón, A. P. (2017). *Importancia del ph y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Obtenido de file:///C:/Users/USER/Downloads/Dialnet-Importanciadelphylaalcalinidadeneltratamientoanaer-4838510.pdf
- Arciniega, L. A. (2017). Producción de biogás a través de la co-digestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía. Obtenido de
- Barbazán, M. d. (2018). Digestión anaerobia. Obtenido de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Digesti%C3%B3n+anaer%C3%B3bica.pdf/9654dcfc-ae4c-1bb9-e38e-43648e8f29ce>
- Batstone D. J., K. J. (2020). Modelling anaerobic degradation of complex wastewaters. I: model development. *Bioresource Technology*, 75:67-74. .
- Batstone, D. J. (2019). “Mathematical modelling of anaerobic reactors treating domestic wastewater :. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 5, pp. 57–71.
- C., S. I. (2017). “The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors”. *Process Biochemistry*. 40:3412-3418. .
- Contreras. (2018). *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos . El caso de Perú*. Barcelona, España: Escuela Técnica de ingeniería Industrial.
- Corrales, L. C. (2020). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. *Nova*, 13(24), 55-81. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- Corrales, L., Romero, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. M. (2017). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, 55-81.

- Criollo, M. (2019). *Estudio del Comportamiento del Tratamiento Anaerobio de Fangos ante Modificaciones del pH*.
- Díaz, A. H. (2018). *Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol*. Obtenido de <file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Temp/303-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1063-1-10-20181229.pdf>
- Dieter Deublein, A. S. (2018). *Biogas from waste and renewable resource. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*.
- Elias, X. (2018). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ed. Diaz de .
- Fe, S. (2019). *Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala*. Obtenido de <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-2-Biodigesti%C3%B3n-anaer%C3%B3bica.pdf>
- Herrera, M. d. (2018). Optimización del tratamiento de residuos provenientes de rastro mediante digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás.
- Huertas, R. A. (2019). *Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria**. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014
- IDAE. (2020). *“Biomasa: Digestores anaerobios”*. Obtenido de [file:///C:/Users/USER/Downloads/1_Biomasa%20digestores%2007%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USER/Downloads/1_Biomasa%20digestores%2007%20(1).pdf)
- Jarabo, F. (2020). *Digestión anaerobia*. Obtenido de https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm
- Jimenez, J. (2018). “Instrumentation and control of anaerobic digestion processes: a review and some”. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 615–648.
- L. Núñez. (2017). “Diseño e implementación de prototipos de digestión anaerobia para residuos agrícolas,”.
- Lorenzo Acosta, Y. &. (2018). *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XXXIX(1),35-48.[fecha de*

Consulta 6 de Agosto de 2021]. ISSN: 0138-6204. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

Lorenzo, N. (2017). *“Diseño e implementación de prototipos de digestión anaerobia para residuos agrícolas,”*.

M. Schon. (2018). “Numerical Modelling of Anaerobic Digestion Processes in Agricultural Biogas Plants.

Mao, C., Feng, Y., & Wang, X. &. (2019). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45,540-555.

Maribet Rincón Ramírez, N. R. (2018). *Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos activados provenientes de la industria cervecera*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a01.pdf>

Marisa Celeste Canales García, L. A. (2017). *Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogas y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la universidad DE EL SALVADOR*. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/138/1/10136039.pdf>

Menéndez Gutiérrez, C. L. (2018). Proceso para el tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales industriales. (Monografía). p.p306-338.

Moraes, B., & Zaiat, M. &. (2017). *Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888-903. .

Morales, P., & Hurtado, M. (2018). *Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del compostaje*. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/815/

N. E. Korres, P. O. (2018). *West, Bioenergy Production by Anaerobic Digestion: Using agricultural biomass and organic wastes*, First Edit. Abingdon: Routledge.

Núñez-Pintado, L. (2017). *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales*. Obtenido de

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2986/MAS_IME_AUT_016.pdf

Olga Rivas Solano, M. F. (2019). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Obtenido de [file:///C:/Users/USER/Downloads/Dialnet-Biodigestores-4835857%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USER/Downloads/Dialnet-Biodigestores-4835857%20(1).pdf)

Palau Estevan, C. V. (2017). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundament os..pdf?sequence=1>

Palau Estevan, Carmen Virginia. (2020). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundament os..pdf?sequence=1>

Parra Huertas, R. A. (2019). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159. Retrieved August 08, 2021, from. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014

Redondo, M. L. (2019). *Estudio del efecto del rango de temperatura sobre la producción de biohidrógeno por digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos*. Obtenido de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/17868/TFGBiotecnolog%C3%ADa-MercedesLlamas.pdf>

Reynoso, M. A. (2017). Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos. *FCA – UNCUYO*, 31-42.

- S., M. J. (2019). Evaluating process imbalance of anaerobic digestion of olive mill wastewater". *Process Biochemistry*. 40:139-145.
- Suarez, M. (2018). Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. Obtenido de <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-2-Biodigesti%C3%B3n-anaer%C3%B3bica.pdf>
- Suarez, R. (2018). *Estudio del Comportamiento del Tratamiento Anaerobio de Fangos ante Modificaciones del pH*.
- Valladares, F. (2017). Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol vacuno y cáscara de cacao . *Repositorio institucional PIRHUA*, (5).
- W., B. (2018). Fifth ORBIT Conference Probes Anaerobic Digestion. *BioCycle Journal of Composting and Organics Recycling*. 47(9), 42-49.
- Yanny Carolina Díaz. (2016). Influencia de la temperatura en la producción del biogás.
- Yenigun, O. &. (2017). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. Process Biochemistry*, 48, 901-911. .
- Acosta , Y., & Obaya , C. (2010). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA*. , 35-48.
- Acosta , L., & Obaya, C. (2018). Sobre los Derivados de la Caña de Azúca. *ICIDCA*, 35-48.
- Apolo, A. (2017). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo. Quito.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, B., & Hamdi, M. (2005). Rendimiento del biorreactor en la digestión anaeróbica de desechos de frutas y verduras. *Elsevier*, 40, 989-995.
- Cazier, E., Trably, E., Steyer, J., & Escudie, R. (2015). Inhibición de la hidrólisis de biomasa a alta presión parcial de hidrógeno en digestión anaeróbica en estado sólido. *Elsevier*, 190, 106-113.

- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Vargas, M. (2017). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, 55-81.
- Ferrer, Y., & Pérez, H. (1 de 4 de 2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *ICIDCA.*, 43(1), 9-20.
- Ghaly, A., Ramkumar, D., Sadaka, S., & Rochon, J. (2008). Efecto de la resiembra y el control del pH sobre el digestor que opera sobre suero ácido de queso. *Revista Canadian Ingeniería Agrícola*, 173-183.
- Gutiérrez, L. M. (2017). Influencia de las variables del sistema de calentamiento solar y deagitación en un digestor anaerobio termofílico para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Mexico: Tesis doctoral.
- Gonzalez, C., Molinuevo, B., & Bruno, S. (2015). Digestión anaeróbica de biomasa de microalgas: desafíos, oportunidades y necesidades de investigación. Elsevier, 896-906.
- Hernández, H. (2005). Tratamiento de lactosuero hidrolizado por medio de un reactor UASB. Pregrado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tulancingo.
- Hernández, M., Vázquez, G., & Dávila, J. (2016). Fermentación anaerobia para la producción de biohidrógeno en un reactor uasb mediante la ruta del etanol. *Revista Cubana de Química*, 207-211.
- Kayode, F., & Okolie, J. (2015). Una revisión del proceso bioquímico de la digestión anaeróbica. *Scientific Research*, 6(3), 10-4236.
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. (2014). Pretratamiento y digestión anaeróbica de residuos de alimentos para una producción de metano de alta velocidad: una revisión. Elsevier, 2(3), 1821-1830.
- Lazmero, M., & Tuarez, A. (2020). Producción de metano en reactores monofásico y bifásico a partir de agua modelada de la industria de café soluble. Manabi.
- Manobanda, E. L., & Valdez, J. A. (2020). Obtención de Biogas a partir de Mezclas de agua Residual de la "Ganadería San Luis" en el Sector del Chaupi y Residuos

Organicos Biodegradables del Mercado Mayorista del DMQ en un Reactor Anaerobio con Sistema de Calentamiento. Quito.

- Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., & Braccio, G. (2013). Producción de biometano por digestión anaeróbica de residuos orgánicos. Elsevier, 103, 1003-1009.
- Moraes, S., Zaiat, M., & Bronomi, A. (2015). Digestión anaeróbica de la vinaza de la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil: desafíos y perspectivas. Elsevier, 44, 888-903.
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Scielo, 10(2), 142-159.
- Proaño, G. (2017). Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y caracterización de productos y materia prima. Quito.
- Reyes, E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. FAREM-Estelí.(24), 60-81.
- Reynoso , M. (2017). Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos. Argentina.
- Tapia, V. (2017). Manual de instalación y uso de biogas en el altiplano peruano – puno. Lima - Perú: Primera edición.
- Tirado, D., García, L., Correa, D., & Bello, J. (2016). Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea. Revista biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 24-31.
- Torrez, A. (2019). Mecanismos fermentación aeróbica. Obtenido de https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/mecanismos_fermentacion_aerobia.asp
- Yenigun , O., & Demirel, B. (2013). Inhibición del amoníaco en la digestión anaeróbica: una revisión. Elsevier, 48, 901-911.

ANEXOS

Anexo 1 Fotografías del experimento a nivel laboratorio

❖ Recolección de la materia prima



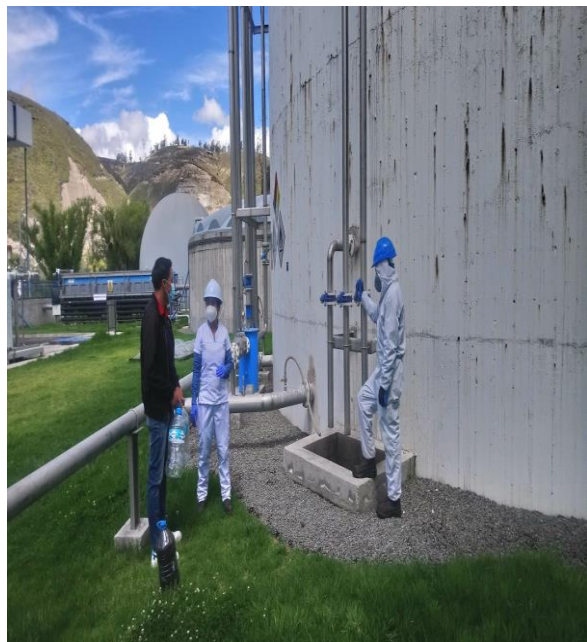
Fotografía 1.- Recolección de Maiz



Fotografía 2.- Recolección de la paja de Cebada



Fotografía 3.-Recolección del Estiércol



Fotografía 4.-Recolección de lodo

❖ **Preparación de las muestras**

Fotografía 5.-Triturado del maiz



Fotografía 6.-Triturado de la paja de cebada



Fotografía 7.-Pesado inóculo



Fotografía 8.-Pesado de las materias primas



❖ **Análisis físico-químico de las materias primas**

Fotografía 9.- Determinación de Humedad



Fotografía 10.- Determinación de cenizas



Fotografía 11.- Determinación de SV



Fotografía 12.- Análisis elemental

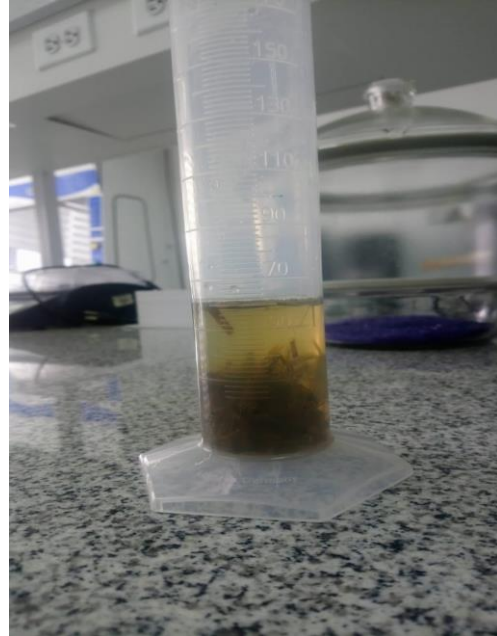


❖ **Preparación de los digestores a nivel de laboratorio**

Fotografía 13.- Etiquetado de frascos



Fotografía 14.- Mezclado de las materias primas más el inóculo



Fotografía 15.- Llenado de los digestores



Fotografía 16.- Sellado de los digestores



❖ **Caracterización del biogás**

Fotografía 17.- Introducción de los digestores a una temperatura constante de 35 °c



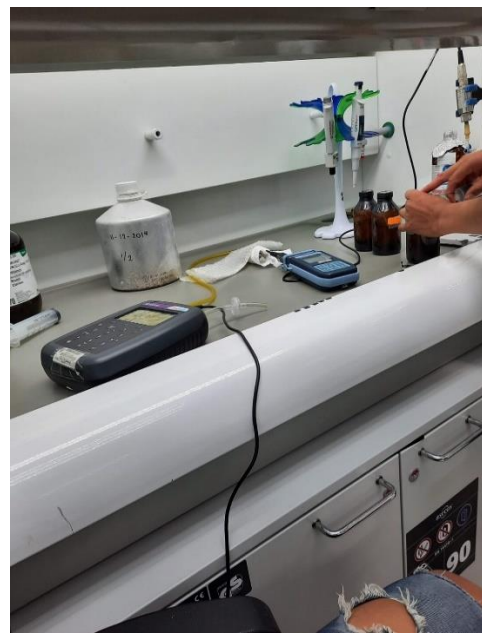
Fotografía 18.- Medición de presión



Fotografía 19.- Medición de volumen del biogás obtenido



Fotografía 20.- Caracterización del biogás



Anexo 2 Fotografías del experimento a nivel laboratorio

- ❖ Charla acerca de los biodigestores en la organización Inti Churi

Fotografía 21.- Comunidad de Chinipamba



Fotografía 22.- Comunidad de San Antonio



Fotografía 23.- Comunidad de Llamacorral



❖ **Ubicación del terreno para la construcción de las casetas para los biodigestores**

Fotografía 24.- Trazamiento de medidas para la caseta del biodigestor



Fotografía 25.- Trazamiento de medidas para la caseta del biodigestor



Fotografía 26.- Trazamiento de medidas para la caseta del biodigestor



Fotografía 27.- Trazamiento de medidas para la caseta del biodigestor



❖ **Elaboración de adobes para la construcción de biodigestores**

Fotografía 28.- Preparacion del terreno



Fotografía 29.- Mezclado de tierra con paja



Fotografía 30.- Moldeado de adobes



Fotografía 31.- Secado de adobes



❖ **Construcción de las casetas para los biodigestores**

Fotografía 32.- Construcción de las paredes



Fotografía 33.- Colocación de la madera



Fotografía 34.- Clavado del plástico



Fotografía 35.- Caseta lista para la instalación de biodigestor



❖ **Instalación de los biodigestores**

Fotografía 36.- Preparación de la cama para el biodigestor



Fotografía 37.- Prueba de fugas



Fotografía 38.- Amarrado de tuvos



Fotografía 39.- Conexión de manguera de salía de gas



❖ **Carga de los biodigestores**

Fotografía 40.- Picado de la cebada



Fotografía 41.- Picado del maíz



Fotografía 42.- Mezclado de las materias primas



Fotografía 43.- Carga de los biodigestores



❖ **Instalación de las mangueras y trampa para el gas**

Fotografía 40.- Salida de gas



Fotografía 41.- Trampa de gas



Fotografía 42.- Medidor de presión



Fotografía 43.- Línea de gas



❖ **Caracterización del biogás y primera quema**

Fotografía 44.- Medición de biogás

Fotografía 45.- Medición de presión



Fotografía 46.- Primera quema



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Biogás: El biogás es un gas combustible producto de la descomposición de la materia orgánica (MO), en condiciones de ausencia de oxígeno.

Digestato: El digestato puede tener uso en la agricultura como fertilizante orgánico (biofertilizante) o en la recuperación de suelos degradado.

Biodigestor: Las tecnologías más empleadas para la digestión anaerobia de residuos agroindustriales, generalmente se clasifican en función del tipo de digestor (mezcla completa o flujo pistón).

Materia prima: La materia orgánica que forma parte de la generación de residuos orgánicos de origen vegetal, animal.

Relación carbono nitrógeno C/N: El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénica.

Tiempo de retención hidráulico (TRH): Es el período (en días) durante el cual la carga alimentada permanece en el digestor y es el tiempo necesario para la digestión del material orgánico a la temperatura de operación del digestor.

Hidrólisis: La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular.

Acidogénesis: Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénica

Metanogénesis: En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores