



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN-MANAGUA

## Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM–Estelí

Generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia,  
a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona  
rural de Estelí, en el período 2016–2018

### **Tesis para optar**

al grado de

### **Doctor en Gestión y Calidad de la Investigación Científica**

#### **Autor**

Edwin Antonio Reyes Aguilera

#### **Tutor**

Dr. Emilio Pérez Castellón

Estelí, 30 de julio de 2019



**CARTA AVAL DEL TUTOR DEL DOGCINV  
DE LA TESIS DOCTORAL DEL DOCTORANTE**

**Edwin Antonio Reyes Aguilera**

Por este medio, hago constar que el documento de Tesis de Doctorado titulado **“Generación de Biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018”**, elaborado por **Edwin Antonio Reyes Aguilera**, tiene la coherencia metodológica consistente, así como los criterios estadísticos suficiente, cumpliendo de esta manera con los parámetros de calidad necesarios para su defensa final, como requisito parcial para **optar al grado de Doctor en “Gestión y Calidad de la Investigación Científica”**, que otorga la Facultad Multidisciplinaria de Estelí, FAREM Estelí, de la UNAN-Managua.

Se extiende la presente constancia en tres tantos de un mismo tenor, en la ciudad de **Estelí**, a los veinte y cinco días del mes de **junio**, del año dos mil diecinueve.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'E. Pérez Castellón', written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

**Dr. Emilio Pérez Castellón**

Consultor-Investigador

Especialista en Manejo de Recursos Naturales

**Cédula** 0012110570044r

## **Aportes científicos**

De acuerdo a los resultados de la caracterización de los sustratos se encontró que el sustrato de ganado posee las mejores propiedades para la generación de biogás, por lo tanto y siendo el estiércol de los más comunes y contaminantes de la zona rural se recomienda su uso en las tecnologías de biogás.

Los resultados obtenidos servirán para elaborar una metodología de caracterización de sustratos orgánicos de cualquier tipo y de cualquier zona del país.

De acuerdo a los resultados obtenidos se crea una teoría de uso en biodigestores, utilizando mezcla de estiércol de ganado más estiércol de caballo debido a que individualmente estos produjeron más biogás y al estar mezclados, se obtuvo el mejor rendimiento de las unidades experimentales en estudio.

Denominar los biodigestores como tecnología con enfoque de género, debido a que son las mujeres las encargadas de la cocción de alimentos y en muchos casos las responsables de la recolección de leña.

Los resultados de producción de biogás servirán para predecir las cantidades de biogás a generar en biodigestores de mayor volumen.

## **Semblanza del autor**

Edwin Antonio Reyes Aguilera, se graduó de Licenciado en Administración de Empresas, en 2007, en la Universidad Popular de Nicaragua, UPONIC Estelí. En 2009, obtuvo el grado de Master en Energías para el Desarrollo Sostenible, en la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. En el año 2019 obtuvo el grado de Doctor en Gestión y Calidad de la Investigación Científica (DOGCINV), en la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN Managua.



El Dr. Reyes ejerce la docencia universitaria desde el año 2008, fue becario en el Proyecto: “Programa de Cooperación Interuniversitaria e Investigación Científica. Colaboración docente e investigadora en torno a la titulación en Ingeniería de Energías Renovables” UNAN -Managua, en Cooperación Bilateral con la Universidad Carlos III de Madrid, financiado por la AECID.

El Dr. Reyes es docente/investigador de la UNAN-Managua en líneas de investigación enfocadas a las energías renovables. Actualmente es Coordinador de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables y del Centro en Investigación en Energías Renovables (CIER) de Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM Estelí.

## **Publicaciones Científicas del autor en el Programa de Doctorado DOGCINV**

Betanco Maradiaga, J., Reyes Aguilera, E., & Rodríguez Pérez, M. (2017). Experiencias vinculantes de la Universidad-Empresa-Estado como estrategia clave para el crecimiento de la Facultad Regional Multidisciplinaria Estelí de UNAN Managua. *Revista Multi-Ensayos*, 3(5), 81-90. ISSN: 2413285. Recuperado a partir de <https://multiensayos.unan.edu.ni/index.php/multiensayos/article/view/22>

Reyes Aguilera, E. (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*. (24), 60-81. ISSN: 2305-5790. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>

Reyes Aguilera, E., & Pérez Castellón, E. (2019). Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás. *Revista Científica De FAREM-Estelí*, (31), 97-108. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8474>

## Resumen

La presente investigación tuvo como propósito evaluar la generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. Se realizó un estudio de tipo experimental, descriptivo, correlacional y analítico de causa-efecto. Los tratamientos seleccionados fueron: sustratos orgánicos el estiércol de ganado, caballo, cerdo y gallinaza. La caracterización de las propiedades básicas de la materia orgánica se basó en la norma APHA/SM 2540-B. Se aplicaron entrevistas a los dueños de biodigestores cuya representatividad y participación está directamente vinculada al quehacer de esta temática. Los resultados obtenidos demuestran *efecto significativo del sustrato de ganado*, que presentó un vector de medias mayor que el resto de sustratos (Lamba de Wilks = 0.02; p = 0.0001). Se comprobó que, la codigestión anaerobia produce más biogás que los sustratos que no se mezclaron con otro tipo. Se demostró correlación significativa entre la temperatura y la producción de biogás generada en los biodigestores (r = 0.73; p = 0.0463). El uso de los sustratos trae consigo beneficios económicos, en salud, ambientales y sociales. Se concluyó que *el sustrato de ganado presenta las mejores características fisicoquímicas que el resto de sustratos* (masa húmeda=81, masa seca=19, porcentaje de cenizas=41.63, porcentaje de sólidos volátiles=58.37, carbono=32.40, nitrógeno=0.55). Los biodigestores operaron bajo temperaturas en condiciones mesofílicas. El biodigestor cargado con el sustrato de la mezcla de estiércol de caballo + ganado, fue el que obtuvo mayor rendimiento en cuanto a la producción de biogás con 11.8 litros. La aceptación que puede tener el uso de biodigestores en el medio rural, estuvo relacionada directamente con el rol de la mujer, debido a que el biogás contribuye directamente a los quehaceres domésticos. Se evidenció durante las entrevistas una total aceptación de la implementación de la tecnología para la obtención del biogás como combustible.

**Palabras clave:** digestión anaerobia, biodigestores, sustratos orgánicos y biogás.

## **ABSTRACT**

In this research project was the purpose to evaluate the generation of Biogas, through of anaerobic digestion process, from the uses of organic substrates. An experimental design was implemented, to develop a descriptive, correlational and analytic of cause-effect study. It were chosen the treatments organic substrates such as cattle, horse, pig and chicken excrements. The characterization of the basic properties organic material was based on APHA/SM 2540-B. Interviews were applied the owner of biodigesters because their participations are directly link together to the work for this study. The results indication significate effect by the cattle substrate that show a vector of means greater than the rest of substrates (Wilks' Lambda = 0.02; p = 0.0001). It was determined that anaerobic codigestion produce more biogas than the other substrates that don't mix with other type. Exist significative correlation between the temperature and biogas production fabricate by biodigesters (r = 0.73; p = 0.0463).The substrates use have a lot of economic, health, environment and social benefits. According to the results cattle substrates have the best physicochemical characteristics compared to the other substrates (wet dough=81, dry dough=19, ash percentage=41.63, percentage volatile solids=58.37, carbon=32.40, nitrogen=0.55). Biodigesters worked under temperatures in mesophilic conditions. The biodigester with the mix horse + cattle excrements had the highest efficiency about biogas production in 11.8 liters. The acceptance that the use of biodigesters may have in rural areas is directly related to the role of women because the biogas help to homework. During the interviews evidenced a general acceptance about the implementation to technology for biogas production like combustible.

**Keywords:** anaerobic digestion, biodigesters, organic substrates and biogas.

## **Dedicatoria**

*Algo he aprendido en una larga vida: que toda nuestra ciencia, medida contra la realidad, es primitiva e infantil, y sin embargo es lo más precioso que tenemos.*

Albert Einstein

A Dios, porque gracias a él tengo la vida, la protección, sabiduría y la fortaleza de salir adelante, todo es por su misericordia, su bondad que bendice mi vida y la de toda mi familia. A su lado, puedo lograr todo lo que me proponga, gracias papito Dios por estar siempre conmigo y ser la voz de aliento ante cualquier dificultad y desafío.

Querida madre, María Haydee Aguilera sin tu esfuerzo, apoyo y amor, nunca hubiera llegado tan lejos, has batallado toda tu vida con valor y sacrificio, para mantenerme junto a usted, de pie frente a la vida, me has orientado a ser mejor cada día y a corregir mis errores de la mejor manera.

A mis hijos amados Kelly Vanessa y Eduardo André, el regalo más lindo que me ha dado Dios, mi motivación y fortaleza; todo es para ustedes y quiero brindarles un ejemplo de lucha hacia el éxito, a mi hijo adoptivo Jefferson Adrián quien a pesar de no llevar mi sangre me ha enseñado que "El amor y el cariño son más fuertes que la sangre". Y por último y no menos importante a mi amada esposa Meylin Denisse quien es mi apoyo incondicional, por tu amor y comprensión en todo momento, alcanzaremos todos los objetivos por los que luchamos juntos, gracias por estar siempre conmigo.

A la memoria de mi sobrino Eduant, el ángel que cuida de mí....



## **Agradecimiento**

A Dios el único Rey de reyes y Señor de señores, por permitirme llegar a este punto de mi vida, y en los momentos de soledad manifestarse de la manera más increíble y sobrenatural; iluminándome y dándome esperanzas para continuar, por hacerme creer que todo en la vida tiene un propósito, porque todo vale la pena.

Durante todo el trayecto que tuve que cumplir para la realización y culminación de mi tesis, me perdí maravillosos y valiosos momentos de familia, pero siempre conté con la comprensión, el amor y el respaldo de todos ellos para poder conquistar una meta más en mi carrera profesional, los amo y por ellos siempre valdrá la pena cualquier sacrificio y lucha.

Mi agradecimiento especial a mi profesor del doctorado al Dr. Manuel Enrique Pedroza Pacheco, Coordinador del Programa de Doctorado Gestión y Calidad de la Investigación Científica Primera Cohorte, quien, con sus bases sólidas, dedicación y entrega profesional amplió y enriqueció mis conocimientos.

Mi agradecimiento especial a mi Tutor de doctorado al Dr. Emilio Pérez Castellón, por su sabia conducción que me llevó al desarrollo exitoso de este trabajo de investigación doctoral.

A mis compañeros de doctorado con quien emprendimos este viaje juntos en todo el camino, especialmente al maestro Juan Alberto Betanco por sus consejos oportunos, por sus palabras de ánimo y motivación en los momentos más difíciles, sobre todo cuando quise tirar la toalla.

Al Dr. Máximo Rodríguez por la oportunidad brindada para formar parte de este programa de doctorado. A mi amigo, mentor y hermano mayor de toda la vida, Luis Lorenzo por escucharme y apoyarme cuando lo necesité, pero sobre todo por ser incondicional conmigo. A mi amigo José Antonio por el apoyo en la recolección de las muestras y desarrollo del trabajo experimental.

A todos ellos, infinitamente gracias.

## **Lista de Siglas y Acrónimos**

**AGV:** Ácidos Grasos Volátiles

**ANOVA:** Análisis de Varianza

**DA:** Digestión Anaerobia

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno

**DCA:** Diseño Completamente al Azar

**DOGCINV:** Doctorado en Gestión y Calidad de la Investigación Científica

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**FAREM:** Facultad Regional Multidisciplinaria

**GPL:** Gas Licuado de Petróleo

**LAS:** Sulfonato Linear del Alquilbenceno

**LSD:** Diferencia Mínima Significativa

**MS:** Masa Seca

**NOx:** Óxido de Nitrógeno

**ODM:** Objetivo de Desarrollo del Milenio

**OHPA:** Obligate Hydrogen Producing Acetogens

**pH:** potencial Hidrógeno

**RO:** Residuos Orgánicos

**ST:** Sólidos Totales

**SV:** Sólidos Volátiles

**TRH:** Tiempo de Retención Hidráulica

## Índice general

1.	Introducción .....	1
2.	Antecedentes .....	3
3.	Justificación .....	8
4.	Planteamiento del problema.....	9
4.1	Caracterización del problema .....	9
4.2	Delimitación del problema .....	10
4.3	Formulación del Problema.....	10
4.4	Sistematización del problema.....	11
5.	Objetivos .....	12
5.1	Objetivo general .....	12
5.2	Objetivos específicos .....	12
6.	Marco Teórico.....	13
6.1	Recursos de la biomasa.....	13
6.2	Clasificación de la biomasa .....	13
6.2.1	Biomasa natural.....	13
6.2.2	Biomasa residual .....	14
6.2.3	Biomasa de los cultivos energéticos.....	14
6.2.4	Biocarburante .....	15
6.3	Residuos orgánicos biodegradables.....	15
6.3.1	Residuos ganaderos .....	15
6.3.2	Gallinaza.....	18
6.3.3	Restos forestales (aserrín) .....	19
6.3.4	Residuos de plantas acuáticas .....	20
6.4	Digestión anaerobia .....	20

6.4.1	Fases del proceso de biodegradabilidad .....	22
6.4.2	Factores que influyen en el proceso metanogénico.....	28
6.5	Ventajas de la digestión anaerobia .....	42
6.5.1	Proceso .....	42
6.5.2	Producto final .....	42
6.5.3	Energía .....	43
6.6	Tecnología de biodigestores .....	43
6.6.1	Concepto.....	43
6.6.2	Tipos de biodigestores por su forma.....	44
6.7	Biogás .....	47
6.7.1	Concepto.....	47
6.7.2	Composición del biogás .....	48
6.7.3	Purificación del biogás .....	49
6.7.4	Inhibidores de la producción de biogás.....	50
6.7.5	Usos del biogás.....	50
6.8	Biofertilizante .....	51
6.8.1	Biofertilizante líquido .....	51
6.8.2	Biofertilizante sólido.....	52
6.9	Contribución de los biodigestores en la zona rural.....	53
6.9.1	Beneficios sociales .....	54
6.9.2	Beneficios económicos.....	55
6.9.3	Beneficios ambientales.....	56
6.9.4	Beneficios a la salud.....	57
6.10	Limitaciones del consumo del biogás en la zona rural.....	58
7	Hipótesis de Investigación .....	60
8	Diseño Metodológico.....	61

8.1	Tipo de estudio .....	61
8.2	Área de estudio .....	62
8.2.1	Ubicación geográfica.....	62
8.2.2	Área de conocimiento.....	63
8.3	Universo y Muestra .....	63
8.4	Matriz de Operacionalización de Variables (MOVI) .....	65
8.5	Métodos, Técnicas e instrumentos para la recolección de datos e información.....	68
8.6	Procedimientos para la recolección de datos e información.....	70
8.7	Plan de Tabulación y Análisis estadístico .....	81
9	Resultados .....	83
9.1	Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los sustratos orgánicos que permiten la generación de biogás .....	83
9.2	Correlación de parámetros ambientales y operacionales del proceso de biodegradabilidad .....	100
9.3	Relación causa-efecto de la generación de biogás a partir de la mezcla de sustratos orgánicos sometidas al proceso de biodegradabilidad anaeróbica .....	104
9.4	Beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud del uso de biodigestores implementados en la zona rural .....	110
9.4.1	Motivo a implementar el proyecto de biodigestores .....	110
9.4.2	Capacitación en el uso y mantenimiento de los biodigestores .....	112
9.4.3	Percepción de las mujeres sobre el sistema.....	114
9.4.4	Beneficios económicos.....	115
9.4.5	Beneficios en salud.....	117
9.4.6	Beneficios ambientales.....	118
9.4.7	Beneficios sociales .....	120
9.4.8	Satisfacción con los biodigestores.....	121
10	Discusión de Resultados .....	123

10.1	Resumen de Hallazgos relevantes a partir de los resultados obtenidos.....	123
10.2	Limitaciones del estudio.....	124
10.3	Relación de los Resultados obtenidos, con las Conclusiones de otras Investigaciones	124
10.4	Aplicaciones e implicaciones de los Hallazgos relevantes.....	132
11	Conclusiones .....	133
12	Recomendaciones .....	135
13	Bibliografía .....	136

## Índice de tablas

Tabla 1. Producción de residuos frescos en explotaciones ganaderas .....	16
Tabla 2. Composición nutritiva de estiércoles en materia fresca.....	17
Tabla 3. Características de una gallinaza (Ramírez, 1983).....	19
Tabla 4. Rango de composición en porcentaje de peso seco de algas.....	20
Tabla 5. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos .....	39
Tabla 6. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos .....	41
Tabla 7. Composición del Biogás .....	48
Tabla 8. Análisis de la Varianza para la variable %Masa Seca .....	83
Tabla 9. Test: LSD Fisher Alfa=005 DMS=7.65353.....	84
Tabla 10. Análisis de la Varianza para la variable % de cenizas .....	85
Tabla 11. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.28362.....	86
Tabla 12. Análisis de la Varianza para la variable % Sólidos Volátiles .....	87
Tabla 13. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.28088.....	88
Tabla 14. Análisis de la Varianza para la variable % masa de húmeda.....	89
Tabla 15. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=7.66716.....	90
Tabla 16. Análisis de la Varianza para la variable % carbono.....	91
Tabla 17. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.92894.....	92
Tabla 18. Análisis de la Varianza para la variable % de nitrógeno.....	93
Tabla 19. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.23875 .....	94
Tabla 20. Análisis de la Varianza para la variable relación carbono/ nitrógeno.....	95
Tabla 21. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.38818 .....	96
Tabla 22. Análisis de la Varianza (Wilks) .....	97
Tabla 23. Prueba Hotelling Alfa=0.05 .....	97
Tabla 24. Correlación de Pearson, producción de biogás y pH .....	100
Tabla 25. Correlación de Pearson producción de biogás y temperatura .....	102
Tabla 26. Correlación de Pearson producción de biogás y relación C/N.....	103
Tabla 27. Análisis de la Varianza relación C/N .....	104
Tabla 28. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.29753 .....	104

Tabla 29. Análisis de Varianza pH.....	105
Tabla 30. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.23595 .....	106
Tabla 31. Análisis de la Varianza de la temperatura.....	107
Tabla 32. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.68354 .....	107
Tabla 33. Análisis de la Varianza de la producción de biogás.....	108
Tabla 34. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=612.69308 .....	108



## Índice de figuras

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos. ....	22
Figura 2. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilico, mesofílicos y termofílicos.....	33
Figura 3. Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas. ....	35
Figura 4. Cámara de digestión con cúpula fija.....	44
Figura 5. Cámara de digestión con cúpula móvil.....	46
Figura 6. Sistema tipo Batch. ....	47
Figura 7. Vista aérea de FAREM Estelí.....	62
Figura 8. Muestras a 105 grados Celsius.....	71
Figura 9. Muestras a 550 grados Celsius.....	72
Figura 10. Unidades experimentales. ....	75
Figura 11. Medición de producción de biogás. ....	77
Figura 12. Llama de biogás. ....	77
Figura 13. Masa seca de los sustratos. ....	85
Figura 14. Cenizas de los sustratos. ....	87
Figura 15. Sólidos Volátiles de los sustratos orgánicos.....	89
Figura 16. Masa húmeda de los sustratos orgánicos. ....	91
Figura 17. Carbono de los sustratos orgánicos.....	93
Figura 18. Nitrógeno de los sustratos orgánicos. ....	95
Figura 19. Relación C/N de los sustratos orgánicos.....	97
Figura 20. Resultados del análisis de componente principal.....	98
Figura 21. pH de los biodigestores.....	101
Figura 22. Temperatura de los biodigestores. ....	102
Figura 23. Producción de biogás. ....	103

## Índice de anexos

Anexo A 1 Formato de Registro de datos de caracterización de los sustratos.....	149
Anexo A 2 Formato de registro de producción de biogás.....	150
Anexo A 3 Guía de entrevista .....	151
Anexo A 4 Guía de observación .....	152
Anexo B 1 Matriz para la construcción de la entrevista.....	153
Anexo B 2 Matriz de análisis de datos de la entrevista aplicada .....	155
Anexo C 1 Normalidad de los residuos ANOVA 1 .....	157
Anexo C 2 Normalidad de los residuos ANOVA 2 .....	158
Anexo C 3 Normalidad de los residuos ANOVA 3 .....	159
Anexo C 4 Normalidad de los residuos ANOVA 4 .....	160
Anexo C 5 Normalidad de los residuos ANOVA 5 .....	161
Anexo C 6 Normalidad de los residuos ANOVA 6 .....	162
Anexo C 7 Normalidad de los residuos ANOVA 7 .....	163
Anexo C 8 Normalidad de los residuos ANOVA 8 .....	164
Anexo C 9 Normalidad de los residuos ANOVA 9 .....	165
Anexo C 10 Normalidad de los residuos ANOVA 10 .....	166
Anexo C 11 Normalidad de los residuos ANOVA 11 .....	167

## **1. Introducción**

La problemática medioambiental a escala mundial se centra, actualmente, en dos importantes aspectos: el incremento de la emisión de gases que potencian el efecto invernadero provocando el denominado cambio climático y la generación exponencial de residuos.

En zonas rurales es común observar la existencia de agricultura y ganadería a pequeña escala, ligada a la producción de desechos orgánicos que, al no ser tratados con responsabilidad, se convierten en un foco contaminante e infeccioso para el medio ambiente y la sociedad rural. En las poblaciones rurales culturalmente se han manejado los desechos como abonos directos y hasta la actualidad son colocados en la tierra de cultivo.

En Nicaragua el manejo de los residuos orgánicos ha sido históricamente deficiente, debido a estar cerca de los poblados lo cual afecta a la población causando graves enfermedades respiratorias, problemas ambientales por la descomposición química de estos al no dársele el tratamiento adecuado.

Con esta investigación se evaluó el potencial energético generado en diferentes sustratos orgánicos, lo que permitirá la implementación de tecnologías como los biodigestores, que conlleva a sustituir el alto consumo de leña por una energía más limpia. Así mismo, permitirá reducir enfermedades causadas por los desechos y por ende contribuirá a la calidad de vida de las personas. Por otra parte, este estudio puede servir de base para futuras investigaciones en el campo de las energías renovables.

La promoción y difusión de las tecnologías son necesarias para que la sociedad se involucre en el beneficio que tiene el aprovechamiento de los desechos en la producción de energía y en la contribución a la disminución de la contaminación ambiental.

La digestión anaerobia posibilita la degradación de la fracción orgánica biodegradable presente en los residuos sólidos urbanos, transformándola en biogás, con alto contenido en metano y susceptible, 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. Por ello, la digestión anaerobia presenta un balance energético positivo posibilitando tanto la prevención de la contaminación como la recuperación sostenible de la energía (De Baere, 2000).

De acuerdo al método de investigación el presente estudio es experimental (Pedroza 1993), pertenece al área 6: fuentes alternas de energía y responde a la línea de investigación 3: eficiencia energética en viviendas, edificios públicos y PYMES, dentro del programa de doctorado en Gestión y Calidad de la Investigación Científica (DOGCINV). El estudio de este proceso investigativo se llevó a cabo en el laboratorio de Energías Renovables de la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM–Estelí), donde se evaluaron los diferentes sustratos orgánicos e instalaron las unidades de análisis experimental.

## 2. Antecedentes

Los déficits y costos crecientes del abastecimiento de petróleo han impulsado a muchos países a encarar estudios sobre práctica de fuentes de energía que reemplacen los habituales combustibles derivados de sistemas convencionales no renovables cuya extinción está prevista para este siglo. Entre los recursos energéticos renovables, se cuenta con una fuente de energía explotada durante las penurias económicas y energéticas producidas durante y después de la última guerra mundial. Se trata del gas del estiércol, gas de los pantanos o gas de granja, producido por fermentación del estiércol de animales, de la paja y de residuos agrícolas en general. Por su origen biológico se le conoce mundialmente como biogás, que es una mezcla de gases conteniendo metano (50 a 70%), anhídrido carbónico (30 a 45%), hidrógeno (1 a 3%), oxígeno (0,5 a 1%), gases diversos (1 a 5%) y vestigios de anhídrido sulfuroso (Lockett, 1997).

La producción de biogás por fermentación anaerobia es una práctica muy antigua, (Rodríguez, 2007), en el contexto histórico de la producción de biogás relata que desde el 3000 A.C. los sumerios practicaban la limpieza anaerobia de residuos por lo que el uso de desechos es un tema antiguo de miles de años. Otro dato importante es que la primera anotación científica sobre el biogás se atribuye a Jam Baptista Van Helmont en la primera mitad del siglo XIX, quién determinó que de la descomposición de la materia orgánica se obtenían gases inflamables que sustentó el estudio de Chirley<sup>1</sup> sobre los incendios de los pantanos de la India donde se concentraba grandes cantidades de biogás.

El proceso de fermentación anaeróbica que produce el biogás, produce también una mezcla residual que es un rico fertilizante orgánico de mayor calidad y contenido de nitrógeno que el estiércol fresco y que puede ser utilizado para formar un compost con residuos vegetales o ser distribuido sobre los campos como fertilizante de considerable valor. El biogás y el abono residual de la operación, se han convertido en una fuente ideal de energía para las naciones con poblaciones rurales numerosas sin medios económicos y prácticos para disponer de energía convencional. Es así como ha tomado un gran impulso sobre todo en Asia, en países como China

---

<sup>1</sup> **Chirley:** Científico de la India que en 1667 realizó diversos estudios del biogás.

y la India, donde ya hay cerca de 500.000 plantas del tipo familiar instaladas y funcionando a pleno (Nitsch & Rettich, 1993).

A nivel mundial, el uso del biogás es variante, va desde emplearse como combustible para la cocina, calefacción, electricidad, combustible para los vehículos, hasta utilizarlo como el gas “principal” para ser procesado e introducido en gasoductos de gas natural (Dutta & Rehman, 1997); (EREC, 2009). Otros usos están relacionados con el empleo de éste para hacer metanol y ayudar a prolongar la conservación de frutas y granos por la inhibición del metabolismo de ciertos insectos, hongos y bacterias (Mae-wan, 2008).

Las mayores aplicaciones del biogás se han dado en China, India y Europa. China es de los países pioneros en el uso del biogás. Este país perteneciente al continente asiático desarrolló un programa que inició en los años setenta con un resultado de más de 7 millones de digestores, aunque sufrió de varias fallas (Boyle, 2004).

El desarrollo de la tecnología para el aprovechamiento del biogás en el mundo está ligado parcialmente con los países que más contribución tienen en cuanto a emisiones de metano. Dicha tecnología tiene el potencial de contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Han, 2008).

Sin embargo, la producción de biogás a nivel mundial no tiene relación con los países que más emisiones de metano tienen. Los países europeos que tienen mayor producción de biogás son Gran Bretaña, Alemania, Francia, Italia, España y Dinamarca. Aunque se espera que para el 2015, la capacidad instalada de las plantas de biogás en Europa, llegue a 1,700 MWel (Ecoprogram/Fraunhofer UMSICHT, 2010).

Alemania es actualmente, el líder en el despliegue de la tecnología en biogás. En la última década, el número de plantas incrementó de 370 en 1996 a 3891 en el 2008 (Poeschl, Ward, & Owende, 2010). Lo anterior se dio principalmente debido a la implementación del programa “Renewable Energy Sources Act”.

La producción de biogás en pequeña escala puede ayudar a resolver la escasez de energía en algunos países en desarrollo y del tercer mundo proveyendo una alternativa al uso de la madera y otros combustibles de biomasa. Este es un punto importante en áreas donde la deforestación es un problema. La producción de 10 m<sup>3</sup> de biogás en un biodigestor, puede ahorrar 2000 kg de madera como combustible, la cual es equivalente a reforestar 0.26-4 ha (Mae-wan, 2008).

Un país que vive esta situación es Ghana, en donde la mayor fuente de combustible proviene de la madera alrededor del 72%, junto con el aceite crudo y las hidroeléctricas. Este país tiene un potencial técnico para la construcción de 278,000 plantas de biogás, desafortunadamente sólo se han establecido un poco más de 100 plantas (Arthur et al., 2011). Otro uso potencial del biogás en países en desarrollo como Ecuador está dirigido al reemplazo del consumo de Gas Licuado de Petróleo (GPL) (Camilo, Ann, & Wilkie, 2010).

Se podría creer que el biogás solo tiene gran importancia en países en desarrollo, como China, Nepal, India, donde se han construido millones de biodigestores en los últimos 20 años. A nivel latinoamericano, se han construido biodigestores en, Colombia, Perú, Bolivia, México, Nicaragua, Costa Rica. No obstante, también en Europa se ha incrementado su producción anual en niveles importantes, Alemania produjo en el 2009, más de 1,144 millones m<sup>3</sup> al año, Inglaterra 463 millones m<sup>3</sup>, Dinamarca 387 millones m<sup>3</sup>, siguen Italia, Francia, Grecia, Austria, Bélgica, principalmente con fines de producción de electricidad y calor (Miranda, 2007).

En algunos países como Alemania y Francia, el biogás se emplea como combustible para automotores, sin embargo, en Costa Rica y en otros países en vías de desarrollo, el uso del biogás se ha visto limitado al sitio donde se produce, en el cual se puede emplear de forma directa para combustión con fines de cocción e iluminación, o bien se puede utilizar indirectamente, para alimentar motores de combustión interna que generan fuerza motriz o eléctrica (Kapdi, Vijay, Rajesh, & Prasad, 2004).

Arce (2011), en su tesis “Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral”, concluye que

utilizando estiércol de vaca es efectiva la producción de biogás, por los resultados obtenidos durante todas las pruebas realizadas en el digestor, afirma que es rentable y aplicable en cualquier hacienda ganadera, especialmente productora de leche ya que el costo de materia prima en este caso sería \$0, más una pequeña inversión, esto produciría un aumento de la productividad y reduciendo costos para la misma hacienda que pudiera beneficiarse con este proyecto.

En el contexto Nacional del país se han ejecutado diversos proyectos de producción de biogás en las zonas rurales de Nicaragua, un ejemplo de ello es ASOFÉNIX<sup>2</sup>, que en conjunto con productores de comunidades rurales de Teustepe y San José de los Remates instalaron en conjunto más de 500 biodigestores para aprovechar el estiércol de ganado y mejorar las condiciones de vida de las personas y de esta manera reducir un poco la presión ejercida sobre los bosques de la zona (Asofénix, 2008).

(Toruño L. A., Lira, Casco, & Reyes, 2016), en la tesis Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos en la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM – ESTELÍ), II Semestre de 2016. Tuvo como propósito desarrollar un estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir del aprovechamiento y caracterización de diversos sustratos orgánicos. Estos autores concluyen que el biogás generado en la fermentación de los sustratos estudiados puede utilizarse en estufas convencionales, como una forma de energía sustentable que funcionan a base de dicho combustible, son una más de las alternativas energéticas sustentables en comunidades rurales. La caracterización de las propiedades básicas de la materia orgánica utilizada en el estudio fue realizada mediante modelos lineales generales y mixtos permitió demostrar que, el sustrato orgánico de caballo y cerdo son mejores en cuanto a sus sólidos volátiles.

Martínez & Romero (2017), en su tesis Diseño de biodigestor para la cooperativa "El Polo" R.L, ubicada en el municipio de San Sebastián de Yalí, Jinotega, determinaron que la pulpa de café es

---

<sup>2</sup> **ASOFENIX:** Es una ONG nicaragüense que trabaja con organismos nacionales e internacionales para desarrollar y mejorar la vida en las comunidades rurales con energía renovable.



capaz de producir biogás en combinación con otros residuos, en este caso se utilizaron estiércol de cerdo, para una mayor obtención de biogás. También, teóricamente, demostraron que favorece a la cooperativa ya que obtendrían beneficios económicos, ya que sustituiría gran parte del consumo de diésel en el generador eléctrico mezclando biogás y diésel.

### **3. Justificación**

La generación de biogás a partir de diversos sustratos orgánicos, tiene como propósito coadyuvar la reducción de gases que provocan el efecto invernadero del planeta, pero también es una alternativa que permite obtener energía para cubrir las necesidades de combustible en los hogares sobre todo de la zona rural de nuestro país. En el presente estudio se brinda alternativas para el manejo de los residuos sólidos orgánicos, principalmente de aquellos que se generan por la ejecución de actividades ganaderas, con el fin de aprovecharlas como fuentes de energía renovable que ayuden a minimizar los impactos ambientales.

La digestión anaerobia favorece al mejoramiento de ambientes higiénicos a través del control de la contaminación; genera energías renovables para actividades domésticas de cocción de alimentos; proporciona biofertilizantes para los cultivos. Por lo tanto, la tecnología anaeróbica es importante para la obtención de recursos.

De igual manera, es relevante esta forma de obtención de energía, ya que permite ir progresando en el desarrollo de fuentes nuevas de energía a partir de residuos orgánicos. También, es una contribución en la mejora del desarrollo y manejo de residuos orgánicos del entorno. En este sentido, se podrá contar con una fuente de energía inagotable de bajo costo, más segura y, sobre todo, menos contaminante.

Con esta investigación se pretende evaluar el potencial energético generado en diferentes sustratos orgánicos y de esta forma puedan implementarse tecnologías para reducir los despales indiscriminados generados por el alto consumo de leña, así mismo permitirá reducir enfermedades y por ende contribuir a la calidad de vida de las personas. Así como también la presente metodología de caracterización y evaluación servirá de base para futuros investigadores en esta línea de investigación que es esencial en el campo de las energías renovables.

## **4. Planteamiento del problema**

### **4.1 Caracterización del problema**

La sociedad actual genera una gran cantidad de residuos que afectan a los distintos vectores ambientales: aire, agua y suelo. Esta contaminación afecta también la salud de las personas, que contraen enfermedades por acumulación de bacterias, insectos o pequeños roedores. La correcta gestión de los residuos y las aguas servidas, asegurando su posterior tratamiento, es una de las claves para conseguir un ambiente sano y salubre, así como resolver problemas como la disposición final de desechos, malos olores, fauna nociva, transmisión de enfermedades y contaminación de mantos freáticos.

En los hogares nicaragüenses un factor muy importante en la sostenibilidad es el costo de la energía requerida para los diferentes procesos que se llevan a cabo, un costo alto por consumo de energía y la quema de gas propano derivado de combustible fósil, así como de árboles para la cocción de alimentos, en muchas familias principalmente en la zona rural. De modo que, en vista que la leña es el principal combustible de la mayoría de la población por los bajos ingresos que le impiden hacer uso de los combustibles fósiles sin talar los bosques.

En algunas poblaciones rurales es difícil conseguir combustible a bajo costo, pues los accesos y carreteras a las poblaciones son de muy mala calidad. Lo que ha conllevado a que las comunidades opten por seguir utilizando la biomasa sólida (leña o estiércol seco).

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua (2017), el consumo de energía final por fuente para el año 2016, fue de 2,580.9 miles de tep de los cuales el 40.8% corresponde a leña, destaca el importante peso que tiene la leña en el consumo de energía final, la cual es utilizada principalmente para cocción de alimentos en los hogares, en especial en las zonas rurales del país. De acuerdo a estimaciones obtenidas se calcula que alrededor de 1,067.9 miles de hogares nicaragüenses utilizan este energético para la preparación de sus alimentos.

## **4.2 Delimitación del problema**

La práctica de las actividades ganaderas es responsable de una buena parte del deterioro del ambiente, es así que las múltiples acciones que se efectúan en el sector agropecuario en el país, se resalta el incremento de la contaminación de los recursos suelo y agua. Esto debido a la gran cantidad de desechos orgánicos que se producen en este sector, el cual constituye un factor de riesgo para los recursos naturales.

En Nicaragua el manejo de los residuos orgánicos ha sido históricamente deficiente, ya que hay situaciones donde estos están cerca de los poblados causando graves enfermedades respiratorias. Esto, porque no se da el tratamiento adecuado a los residuos de origen animal, causando graves problemas ambientales por la descomposición química de estos. La problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se debe, básicamente, a la separación progresiva de la explotación ganadera y la agrícola. De forma que, la mayoría de las explotaciones no poseen una base territorial suficiente para reutilizar los residuos ganaderos.

En zonas rurales es común observar la existencia de agricultura y ganadería a pequeña escala, ligada a la producción de desechos orgánicos que, al no ser tratados con responsabilidad, se convierten en un foco contaminante e infeccioso para el medio ambiente y la sociedad rural. En las poblaciones rurales culturalmente se han manejado los desechos como abonos directos y hasta la actualidad son colocados en la tierra de cultivo.

## **4.3 Formulación del Problema**

A partir de la caracterización y delimitación del problema antes expuesta, se plantea la siguiente pregunta rectora del presente estudio: ¿Cuáles son los procedimientos para la evaluación de la generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018?

#### 4.4 Sistematización del problema

Las preguntas de sistematización correspondientes se presentan a continuación:

1. ¿Cuáles son las características físico-químicas de los sustratos orgánicos, que permiten la generación de biogás que se obtiene en el proceso de conversión?
2. ¿Cómo se podría establecer la relación entre los parámetros ambientales y operacionales del proceso metanogénico de la generación de biogás generado en un biodigestor tipo Batch?
3. ¿Cuál es la relación causa-efecto que determina la generación de biogás a partir de sustratos orgánicos en función del rendimiento de las muestras sometidas al proceso de digestión anaerobia?
4. ¿Cuáles han sido los beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud del uso de biodigestores implementados en la zona rural?

## **5. Objetivos**

### **5.1 Objetivo general**

Evaluar la generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018.

### **5.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los sustratos orgánicos que permiten la generación de biogás que se obtiene en el proceso de conversión.
2. Correlacionar los parámetros ambientales y operacionales del proceso de biodegradabilidad anaeróbica en un biodigestor tipo Batch.
3. Determinar la relación causa-efecto de la generación de biogás a partir de la mezcla de sustratos orgánicos, sometidas al proceso de biodegradabilidad anaeróbica.
4. Identificar los beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud con el uso de biodigestores implementados en la zona rural.

## **6. Marco Teórico**

### **6.1 Recursos de la biomasa**

Se entiende por biomasa cualquier tipo de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. Estos materiales tienen como nexo común su origen directo o indirecto del proceso de fotosíntesis. Por eso se presentan de forma periódica y no limitada en el tiempo, es decir, de forma renovable. Quedan, por tanto, fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de éste, aunque también tuvieran un origen biológico (Garrido, Flotats, Fernández, & Palatsi, 2009).

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego (Bunca, 2002).

### **6.2 Clasificación de la biomasa**

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, una de las clasificaciones más aceptadas es la siguiente:

#### **6.2.1 Biomasa natural**

La naturaleza ofrece una gran variedad de biomasa, y es todo el recurso disponible que ha crecido a través de los años sin la intervención humana. Lamentablemente, la apropiación legal e ilegal de tierras ha degradado el sistema ecológico, reduciendo considerablemente la selva virgen (De Juana, Santos, Crespo, & Fernández, 2007).

La biomasa natural es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. La utilización de estos recursos necesita una buena gestión de su adquisición y transporte hasta la empresa, esto puede provocar que su uso sea económicamente inviable (Garrido et al., 2009).

### 6.2.2 Biomasa residual

Ésta se puede dividir en,

- **Biomasa residual seca:** se incluyen en este grupo los subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, forestales y en los procesos de industrias agroalimentarias y de transformación de madera, y que, por tanto, son considerados residuos. Éste es el grupo que, actualmente, presenta un interés mayor desde un punto de vista de aprovechamiento industrial (Garrido et al., 2009).
- **Biomasa residual húmeda:** son los vertidos biodegradables: aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (purines, entre otros...)

### 6.2.3 Biomasa de los cultivos energéticos

- Los cultivos en energéticos son los realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustibles (Garrido et al., 2009). Algunos países de Latinoamérica gozan de grandes extensiones de tierra, clima adecuado y un fácil acceso al agua, a diferencia de otros países en el mundo. Características que han llamado la atención de empresas multinacionales, las cuales han comprado gran cantidad de tierras y en otros casos han obligado o forzado a la venta de las tierras aledañas a la propiedad, todo con el fin de usar las tierras para los cultivos energéticos. Ejemplos de cultivos energéticos son las plantaciones de caña de azúcar (Brasil, Colombia, Ecuador), palma africana (Colombia, Ecuador), el piñón (España, Ecuador) (Madrid, 2009).



#### **6.2.4 Biocarburante**

Aunque su origen se encuentra en la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (por ejemplo, reciclando aceites) como en la biomasa residual seca rica en azúcares (maíz) o en los cultivos energéticos (girasol, pataca, entre otros.) por sus características y usos finales exigen una clasificación diferente a las anteriores (Garrido et al., 2009).

### **6.3 Residuos orgánicos biodegradables**

Los desechos agroindustriales comprenden un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos generales: residuos de frutas o plantas y residuos provenientes de animales (estiércoles y purines). Los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, orientados a la concentración poblacional en núcleos urbanos establecidos, el desarrollo sectorizado de la industria agroalimentaria así como la intensificación de las actividades de índole agrícola y ganadera, entre otros, han propiciado la gran producción periódica de residuos orgánicos biodegradables, los cuales requieren de un manejo específico para evitar la generación de problemas ambientales que a la postre se reflejan en la salud pública y el deterioro de los ecosistemas naturales.

Los desechos generados por el sector primario comprenden los residuos agrícolas, ganaderos y forestales; los desechos generados por el sector secundario incluyen los residuos industriales (agroalimentarios, textiles, curtiembres, residuos del papel, etc.) y finalmente se encuentran los residuos producidos por el sector terciario de servicios dentro de los que se tienen dos grandes afluentes como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales domésticas (Klinger, Alexander, & Marchaim, 1991).

#### **6.3.1 Residuos ganaderos**

Están formados por la acumulación de deyecciones sólidas y líquidas producidas en las explotaciones ganaderas. El uso eficiente de estos residuos sin que se produzcan daños en el

medio, especialmente de los líquidos, es objetivo prioritario de muchos investigadores (Bernal & Roig, 1993).

Sierra & Rojas (2010), definen estiércol como las deyecciones sólidas de los animales, mientras que los purines son una mezcla de orina, estiércol y agua de lavado. García (2000), menciona que la composición química del estiércol, cualquiera sea la especie, depende de las proporciones de los distintos ingredientes de la dieta y su contenido respectivo de nutrimentos; de algunos aditivos como las enzimas, del procesamiento del alimento y la cantidad de alimento consumido; así como de la biodisponibilidad de aminoácidos y de minerales.

Las características de estos materiales están en función de: especie, raza, alimentación del ganado y época del año. Las cantidades que se producen dependen del tipo de explotación, puesto que no serán las mismas las originadas en un establo de vacas que en una granja de aves. En la tabla 1, se mencionan algunos valores medios de producción de materia fresca según el animal explotado.

Tabla 1. Producción de residuos frescos en explotaciones ganaderas

<b>Tipo de Ganado</b>	<b>Kg heces/día</b>
Vacuno	30-50
Equino	20-50
Porcino	4-8
Ovino	4-8
Aves	0.1-0.5

En la tabla 2, figuran algunas características agronómicas de estos materiales, prestando atención a la materia seca y contenido en los nutrientes mayoritarios (Alcántara, 1993).

Tabla 2. Composición nutritiva de estiércoles en materia fresca

<b>Origen del estiércol</b>	<b>M.S %</b>	<b>N kg/t</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kg/t</b>	<b>K<sub>2</sub>O kg/t</b>	<b>MgO kg/t</b>	<b>S kg/t</b>
Vacuno	32	7	6	8	4	-
Oveja	35	14	5	12	3	0.9
Cerdo	25	5	3	5	1.3	1.4
Gallinaza	28	15	16	9	4.5	-
Purines	8	2	0.5	3	0.4	-

En el sector ganadero, la problemática asociada con el manejo efectivo de los residuos generados, implica el desarrollo de un tratamiento bioquímico eficiente para permitir el aprovechamiento de los nutrientes que se encuentran presentes en estos residuos (Fan, Chen, Mehta, & Chen, 1985).

No obstante, la dificultad de la gestión de los residuos ganaderos subyace de la separación progresiva de la explotación ganadera y agrícola, de forma tal que, la mayoría de las instalaciones ganaderas no poseen una infraestructura territorial suficiente para la reutilización de sus propios residuos (Marchaim, 1992).

El aumento de la ganadería estabilizada y la disminución de la superficie agrícola útil, hace equiparable el sector ganadero con la industria de transformación de materias primas agroindustriales, en cuanto a la intensa problemática de gestión de los residuos (Hashimoto & Chen, 1982).

El estiércol bovino es un sustrato complejo, que presenta considerables contenidos de materiales orgánicos disueltos y articulados, dentro de los que se incluyen polisacáridos, lípidos, proteínas y

Ácidos Grasos Volátiles (AGV), además de un conjunto de compuestos inorgánicos. Este sustrato es reconocido como una excelente base para el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica, debido que presenta una alta capacidad tamponadora y un gran contenido de nutrientes necesarios para el desarrollo de las poblaciones anaeróbicas (Eastman & Ferguson, 1981).

### **6.3.2 Gallinaza**

De todos estos residuos, los avícolas merecen una cierta atención por sus especiales características. Están compuestos por deyecciones de aves de corral junto con el material usado en las camas y cal en pequeña proporción (si esta es utilizada sobre el piso para mantener unas condiciones sanitarias permisibles en los corrales). Cada ave, proporciona heces diarias aproximadamente correspondientes al 5 % de su peso corporal (Ramírez, 1983).

Además, debemos indicar que este material posee un elevado potencial de generación de energía si se fermenta en condiciones anaerobias con producción de biogás como así lo indican (Echaendia & Menoyo, 1990). Las gallinazas suelen ser relativamente ricas en nitrógeno y tener una buena relación C/N y C/P. En el caso de no usar cal sobre el suelo de los corrales, o explotaciones avícolas, su pH suele ser ácido. En la tabla 3 se señalan las características generales de una gallinaza.

Un nulo o mal manejo del residuo impacta en el ambiente negativamente. El elevado nivel de nitrógeno en la gallinaza se debe a la fracción de la excreta compuesta por ácidos úricos y elementos nitrogenados no proteicos (Bujockzek, Oleszkiewicz, Sparling, & Cenkowski, 2000). Para el manejo de la gallinaza existen diferentes tratamientos, siendo la digestión anaerobia y el compostaje los más aceptados (Riera, Della, Rizo, Bressan, & Zarate, 2014). Las ventajas de la digestión anaerobia ante el compostaje es la reducción de la carga orgánica del residuo, producción de energía y la obtención de un subproducto que puede ser utilizado como fertilizante (Williams, 2013).

Tabla 3. Características de una gallinaza

Materia seca	79.5
Peso específico g/cm <sup>3</sup>	0.5
pH (H <sub>2</sub> O)	5.0-8.0
Materia orgánica %	80.0
N orgánico %	3.00
C/N	15.5
P total %	1.82
C/P	25.5

*Fuente: Ramírez, 1983.*

Las diferentes características físicas y químicas de las excretas aviares, le atribuyen cualidades para ser utilizada, ya sea como abono, alimento para animales o producción de biogás siempre y cuando sea transformada o procesada y así garantizar no solo su calidad como subproducto, sino su aporte al bienestar del medio ambiente (Estrada, 2005).

### **6.3.3 Restos forestales (aserrín)**

Como consecuencia de la manufactura e industrialización quedan en los aserraderos, carpinterías y obrajes montañas de virutas y aserrines cuya acumulación entraña peligros e inconvenientes, como ser riesgo de incendio, contaminación del aire y proliferación de alimañas. Actualmente estos desechos se queman, entierran o se dejan de lado. Todos estos residuos se podrán colocar en un biorreactor y generar una cantidad de biogás que se puede usar para calefacción, cocción o fuerza motriz, y todo con una materia prima que de otra manera se tiraría.

El rendimiento de la producción de biogás es muy bajo ya que, de toda la materia orgánica, la madera es la que menos produce biogás, pero se compensa debido a que la existencia de los desechos es altísima y gratuita (Hilbert, 2007).

### 6.3.4 Residuos de plantas acuáticas

Los residuos de plantas acuáticas, contienen importantes cantidades de nutrientes que pudieran ser aprovechables si se incluyen como enmendantes en el sistema suelo-planta.

Son susceptibles de ser empleadas como abonos orgánicos de los suelos si se procede a un proceso de secado apropiado; además suelen descomponerse con relativa rapidez. Su composición en agua es elevada, así como el contenido en sales. Si nos referimos a la concentración media de N, P y K, podemos apreciar de los datos recogidos en la tabla 4 que su contenido en nitrógeno no es nada desdeñable (Parr & Colacicco, 1987).

Tabla 4. Rango de composición en porcentaje de peso seco de algas

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
<b>Algas</b>	1.34-3.60	0.08-0.17	0.06-0.69

*Fuente: Parr & Colacicco, 1987.*

Según (Gao & Mckinley, 1993), las macroalgas tienen una mayor productividad que las plantas terrestres, y no compiten con ellas por el terreno, además, debe considerarse que las algas se pueden cultivar en zonas marinas o en tierra, obteniéndose varias cosechas al año. Por otra parte, grandes cantidades recalcan a las costas y en el caso de las playas arenosas de uso turístico tienen que ser recogidas ya que atentan contra la estética de estos entornos y la gran mayoría se depositan en lugares inadecuados con deficiente o sin ningún criterio ambiental, además, en su recogida se pierden grandes cantidades de arena afectando de esta manera, el ecosistema en cuestión.

### 6.4 Digestión anaerobia

Es un proceso biológico en el que la materia biológica del residuo, en ausencia de oxígeno, se degrada o descompone por la actividad de unos microorganismos específicos transformándose en un gas de un elevado contenido energético o “biogás” y en otros productos que contienen la

mayor parte de los componentes minerales y compuestos de difícil degradación que se denomina “lodo” (Garrido et al, 2009).

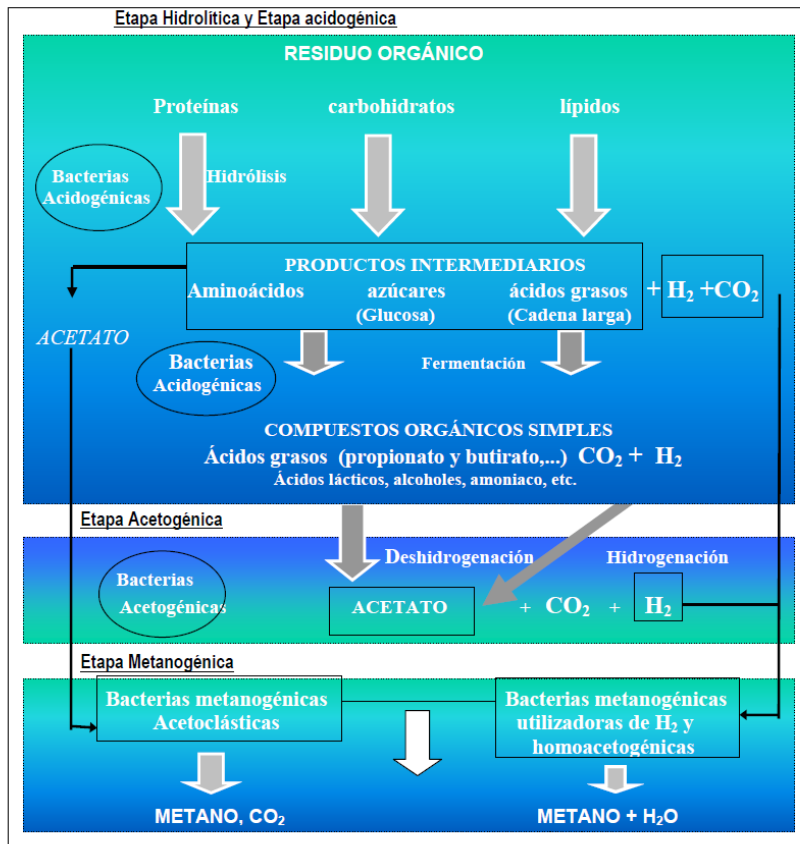
La naturaleza y la composición química del sustrato condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana de cada etapa, de manera que se establece un equilibrio fácilmente alterable cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones. Mientras que en las fases de hidrólisis-acidogénesis los microorganismos involucrados suelen ser facultativos, para la tercera fase los microorganismos son estrictos, y con tasas máximas de crecimiento del orden de 5 veces menores a las bacterias acidogénicas. Esto significa que, si las bacterias metanogénicas tienen algún problema para reproducirse y consumir los ácidos, estos se acumularán, empeorando las condiciones para las bacterias metanogénicas, responsables de la producción de metano.

Realmente hay una producción en cadena de diferentes tipos de bacterias. Unas inicialmente producen una hidrólisis del estiércol generando ácidos orgánicos. Otro tipo de bacterias digieren estos ácidos orgánicos a través de una deshidrogenación y acetogénesis dando como resultado ácido acético e hidrógeno. Y finalmente otras bacterias, llamadas metanogénicas, digieren el hidrógeno y el ácido acético para transformarlo en metano, que es el gas más importante del biogás y el que permite la combustión.

El proceso de la digestión anaeróbica es muy complejo, debido tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases: Hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica (Guevara, 1996).

### 6.4.1 Fases del proceso de biodegradabilidad

El conocimiento y aprovechamiento de los procesos naturales de producción de biogás, a través del desarrollo de tecnologías prácticas, han permitido desarrollar un método probado para la conversión de materia orgánica compleja mediante digestión anaerobia con fines de obtener un gas con un alto poder calorífico. Esto se aprecia en la siguiente figura:



Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez (1991).

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos.



## **Hidrólisis**

Según este modelo, la primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas que son hidrolizadas, mediante reacciones de oxidación-reducción, por enzimas extracelulares producidos por los organismos fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles, que serán metabolizados por las bacterias anaerobias en el interior de las células.

Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, son fermentados por los microorganismos acidogénicos que producen principalmente, ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno. Los ácidos de cadena corta son transformados en acético, hidrógeno y dióxido de carbono mediante la acción de los microorganismos acetogénicos (Campo, 2001). La formación de metabolitos ácidos en esta fase produciría un pequeño descenso del pH del medio (hasta valores de 5,5 aproximadamente) si no existiesen, en la etapa siguiente, otros microorganismos capaces de consumir estos ácidos.

En esta primera fase, las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen, en una transformación controlada por enzimas extracelulares, en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos, alcoholes, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>) (Figura 1).

La hidrólisis depende fundamentalmente de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partícula, del pH, de la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y de la concentración de los productos del hidrólisis. (Peece, 1983). Esta etapa puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido en sólidos (Pavlostathis & Giraldo, 1991).

## Acidogénesis y acetogénesis

Es la segunda etapa dentro de la degradación, en esta el material orgánico es fermentado por varios organismos, formando así compuestos que pueden ser utilizados primeramente por los microorganismos metanógenos (acético, fórmico,  $H_2$ ), y compuestos orgánicos más reducidos (láctico, etanol, propiónico, butírico) que propiamente deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas a pequeños sustratos, que le sean factibles de utilizar a las bacterias metanógenas (Gerardi, 2003). Solo el ácido acético formado da lugar al 70% del metano formado (Figura 1).

Algunos autores consideran difícil establecer una separación entre las bacterias hidrolíticas y las acidogénicas, ya que son muchos los microorganismos capaces de realizar ambos procesos. Así, además del hidrólisis, en esta etapa también tiene lugar la fermentación de diversos monómeros. Las bacterias formadoras de ácidos o acidogénicas son bacterias de crecimiento rápido, en comparación con los otros grupos implicados en la digestión anaerobia. Las bacterias implicadas en esta etapa son anaerobias obligadas o facultativas, muy abundantes en la naturaleza y bacterias proteolíticas. Se pueden citar bacterias acidogénicas de los géneros *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Micrococcus* (Madigan, Martinko, & Parker, 1998).

Posterior a la fermentación de  $H_2$  y acetato, que son productos que pueden ser metabolizados directamente por organismos metanógenos, llegan otros como valerato, butirato, propionato y algunos aminoácidos que necesitan ser transformados en productos más simples y sencillos, acetato e hidrógeno, por medio de las bacterias acetógenas (Stams, 1994).

Las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de  $H_2$  por parte de las bacterias que utilizan hidrógeno. Este proceso contempla la fermentación de carbohidratos solubles y aminoácidos, cuya finalidad es la producción de ácido acético.

En esta etapa los monómeros liberados anteriormente son degradados mediante reacciones fermentativas, en donde los compuestos orgánicos funcionan como aceptores y donadores de electrones. Los principales productos de esta etapa son Ácidos Grasos Volátiles (AGV), que

funcionan como intermediarios degradativos, como son: alcoholes, ácido propiónico, *n*-butírico, *n*-valérico, capríónico y láctico. Así como los precursores directos para la formación de metano (CH<sub>4</sub>), que son el ácido fórmico, metilaminas, ácido acético, metanol, hidrógeno (H<sub>2</sub>) y CO<sub>2</sub>. Los monómeros son degradados por *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptococcus* (Mara & Horan, 2003).

El ácido acético es el mayor intermediario en la cadena alimenticia anaerobia. Diversos sustratos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, carbohidratos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, compuestos aromáticos y algunos sustratos halogenados pueden ser oxidados y producir reductores utilizables para la reducción de CO<sub>2</sub> a acetato, por medio de la ruta del acetyl-CoA mejor conocida como ruta heterofermentadora.

Cuando las hexosas (azúcares de seis carbonos) son convertidas exclusivamente a acetato, la reacción fermentativa es llamada homoacetogénesis (Muller, 2003). Son bacterias estrictamente anaerobias, los géneros más representativos en digestores anaerobios son *Clostridium*, *Acetoanaerobium*, *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Butyribacterium*, *Paleobacter*, *Treponema* y *Halophaga*. Existe otro tipo de bacterias acetógenas que se caracterizan por la producción obligada de H<sub>2</sub> y por su participación en la degradación de compuestos aromáticos, se denominan OHPA (*Obligate Hydrogen Producing Acetogens*): *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Syntrophospora* y *Syntrophus* (Drake, Kusel, & Matthies, 2002).

Las reacciones de deshidrogenación acetogénica dependen de la concentración de hidrógeno existente (Boone & Xun, 1987), por lo tanto, para que la acetogénesis tenga lugar en los digestores anaerobios, es necesario que el hidrógeno generado en la misma sea utilizado y consumido con igual velocidad a la que se produce (bacterias metanógenas utilizadoras de hidrógeno y/o bacterias homoacetogénicas) (Schink, 1997)

Algunos autores admiten la existencia de otras bacterias, denominadas homoacetogénicas, que pueden crecer autotróficamente con dióxido de carbono e hidrógeno para producir acetato (reacciones de hidrogenación acetogénica) cuando las metanogénicas utilizadoras de H<sub>2</sub>, están

inhibidas debido a un pH bajo. Así, se considera que el intercambio de hidrógeno es tan rápido en el digestor, que origina diferentes microambientes con diferentes presiones de hidrógeno, donde ambas reacciones (acetogénicas y homoacetogénicas) se da conjuntamente (Chynoweth & Isaacson, 1987).

## **Metanogénesis**

La metanogénesis es el último paso del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica. En esta etapa, los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, formiato, metanol, y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea*, y, morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, tanto Gram positivos como Gram negativos (Madigan, Martinko, & Parker, 1998).

La clasificación de las *archaeas metanogénicas* utilizadoras de hidrógeno realizada por (Stafford, 1982), se compone de seis géneros principales: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanobacillus*, *Methanotrix*, *Methanospirillum*. Las reacciones identificadas para estos microorganismos son:

*1. Conversión de acetato en metano por las archaeas metanogénicas acetoclásticas:* la reacción acetoclástica, cuyos productos finales son metano y dióxido de carbono, es llevada a cabo específicamente por los géneros *Methanosarcina* y *Methanotrix*. La molécula de acetato se rompe por descarboxilación y el grupo metilo es reducido a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> sin modificar su estructura y sin afectar a la concentración de H<sub>2</sub> en el gas. Normalmente estos microorganismos controlan el pH del medio por la eliminación del acético y producción de CO<sub>2</sub> que se disuelve formando bicarbonato.

La mayoría de los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H<sub>2</sub> como aceptor de electrones, mientras que dos géneros son capaces de utilizar el acetato. A pesar de ello, en ciertos

ambientes anaerobios, éste es el principal precursor del metano, considerándose que alrededor del 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato (Chynoweth & Isaacson, 1987), mientras que el restante 30% proviene del CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.

2. *Formación de metano a partir del CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> por las archaeas homoacetogénicas*: la reacción de formación de metano a partir del dióxido de carbono e hidrógeno, actúa en el control del potencial redox de la fermentación en el digestor, evitando la pérdida de hidrógeno y CO<sub>2</sub> durante el crecimiento sobre compuestos multicarbonados, lo que implica en una mayor eficiencia termodinámica (Zeikus, 1979).

El papel que desempeñan estos microorganismos en la naturaleza no es bien conocido, aunque la ventaja selectiva de los homoacetogénicos en sistemas anaeróbicos implica una ganancia adicional de ATP sobre especies hidrolíticas que no son capaces de catalizar compuestos de un solo átomo de carbono. Sin embargo, se ha comprobado la existencia de una compleja relación entre las *archaeas* metanogénicas y no metanogénicas a través de delicados equilibrios con los niveles de ácidos e hidrógeno. En la oxidación del hidrógeno, las *arqueas metanogénicas* eliminan el hidrógeno manteniendo sus concentraciones en niveles lo suficientemente bajos para permitir crecer y metabolizar a las bacterias no metanogénicas. Así, los microorganismos *metanogénicos* consiguen la energía necesaria a la vez que actúan como sumidero de electrones para las especies sensitivas al hidrógeno.

Del metano que se produce el 50% proviene de ácido acético. Este se origina en un 3% a 5,3% de la reducción del CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> a unos 60 °C. Otra parte de acetato que proporciona metano, corresponde a la deshidrogenación del propionato y butirato en un porcentaje de 23% a 60°C (Bunca, 2002).

### **Bacterias sulfato reductoras**

Además de las bacterias señaladas en la etapa metanogénica, también existen en los digestores anaerobios las bacterias denominadas sulfatos reductores. Estas bacterias, especialmente en

presencia de sulfatos, tienen capacidad de reducir sulfatos a sulfuros, o sea utilizan el sulfato como aceptor final de electrones en la cadena respiratoria, actuando la materia orgánica como donador de electrones. Estas bacterias, además de utilizar los ácidos pirúvicos y lácticos para su desarrollo, pueden utilizar el ácido acético e impedir la formación de metano. Por otro lado, el exceso de sulfatos puede provocar una baja producción de metano que, puede estar relacionada con la falta de  $H_2$ , más que con la toxicidad del sulfato (Chynoweth, 1996).

#### **6.4.2 Factores que influyen en el proceso metanogénico**

Como se mencionó anteriormente las bacterias son las principales protagonistas en este proceso degradativo, pero existen determinados parámetros o factores ambientales que hacen más factible el desarrollo de la digestión.

Hilbert (2007), considera importante examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales.

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias intervinientes en las distintas etapas del proceso, responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Por lo tanto, nos limitaremos a dar una valoración cualitativa y en algunos casos se darán cifras y cuadros que deben tomarse como orientativos, ya que los valores pueden sufrir importantes variaciones.

Para mantener un sistema anaerobio que establezca eficientemente un residuo y obtener la máxima producción de energía a partir de la conversión biológica, las bacterias metanogénicas y no metanogénicas, deben estar en un estado de equilibrio dinámico, punto y seguido para establecer y mantener tal estado, los contenidos del reactor deben estar libres de oxígeno disuelto y de concentraciones inhibidoras de amoníaco libre y de constituyentes como metales pesados y sulfitos.

Los parámetros bioquímicos que pueden desestabilizar el proceso anaeróbico afectando directamente a los microorganismos son la relación C/N, temperatura y pH. La relación C/N en el proceso anaeróbico afecta los tiempos de retención y la producción de biogás, siendo la relación óptima de 30:1 (Soria , Ferrera, Etchevers, Alcántar, & Trinidad, 2001).

Una baja relación C/N puede producir un efecto inhibitor de la digestión anaeróbica, debido a la producción de amonio (Chen & Creamer, 2008). Una alta proporción de nitrógeno incrementa el pH, debido a la generación de altos niveles de amonio que desestabilizan el proceso y afectan directamente a los microorganismos metanogénicos (Wang, Yang, Feng, Ren, & Han, 2012).

Hilbert (2007), establece que la actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por los siguientes factores (p.7).

#### **6.4.2.1 Tipo de materia prima**

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos de animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, y alimentos en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también debe estar presente en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente, las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales, presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables, y por lo tanto, deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas. En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se emplazará el digestor.

#### **6.4.2.2 Temperatura**

En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico, la temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes ya que mejora o inhibe a grupos microbianos específicos, esto debido a que las actividades implican reacciones enzimáticas, donde las enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura. Otra razón son los diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos durante el curso de la digestión, ya que cada uno de estos grupos, tiene una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia (Mae-wan, 2008).

Por ello, es importante que la temperatura se mantenga constante, ya que cada grupo bacteriano posee un grado de temperatura óptimo de crecimiento. Si la temperatura fluctúa, no se podrá mantener ninguna población metanógena en forma estable y una disminución en la población de



un determinado grupo puede afectar al proceso de digestión anaerobia, reduciendo el grado de estabilización del lodo y con ello la formación de CH<sub>4</sub>.

La biodigestión anaerobia puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas que van desde los 5°C hasta los 60°C. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlingmaier, 2006), (Osorio, Ciro, & González, 2007).

La temperatura, de igual forma afecta de manera directa los procesos que controlan la dimensión del crecimiento microbial, así la velocidad con la que crecen los microorganismos responsables del proceso anaerobio aumenta con la temperatura (Van Lier, Hulsbeek, Stams, & Lettinga, 1993) definiéndose tres rangos de temperaturas para clasificar los sistemas: psicrófilico, por debajo de 20°C, o a temperatura ambiente; mesófilico, entre 20-40°C, y termófilico entre 40 y 65°C.

El rango mesófilico es el más utilizado, pese a que el termófilico presenta ciertas ventajas, como la mayor rapidez, la higienización del residuo, eliminación de larvas, semillas de malas hierbas, organismos patógenos, mayor hidrólisis de partículas (Gallert, Bauer, & Winter, 1998).

Sin embargo, el rango termófilico puede ser más inestable, sobre todo por la mayor toxicidad de determinados compuestos a altas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal (Hashimoto A. G., 1986), (Gallert et al; 1998), o los ácidos grasos de cadena larga (Hwu & lettinga, 1997); algunas de las ventajas que presenta el rango termófilico son:

- Una fermentación más rápida.
- Eliminación de casi un 100% de virus y bacterias patógenas.

- Separación solido-liquido más rápidamente.
- Disminución de la viscosidad de la solución.

El rango psicrófilico es poco viable debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos y, por tanto, al gran tamaño de reactor necesario. Sin embargo, simplifica mucho el diseño y hay menos problemas de estabilidad ya que cuanto mayor es el tiempo de retención menor es la diferencia entre las velocidades de degradación a diferentes temperaturas (Fannin, 1987). La temperatura óptima para el crecimiento bacteriano dependerá de cada especie, tal y como se muestra en la tabla anterior. Las variaciones producidas en la temperatura de unos pocos grados durante la digestión conducen a perturbaciones del proceso, que se manifiestan muy rápidamente en un rendimiento de degradación más bajo y un descenso en el porcentaje de metano en el biogás.

Debido a la fuerte dependencia que presenta el proceso de digestión anaeróbica respecto a la temperatura, es este uno de los parámetros críticos que es necesario mantener en un rango controlado.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura de operación del digestor, según lo destaca Speece, (1983), es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica como puede observarse en la figura 2.

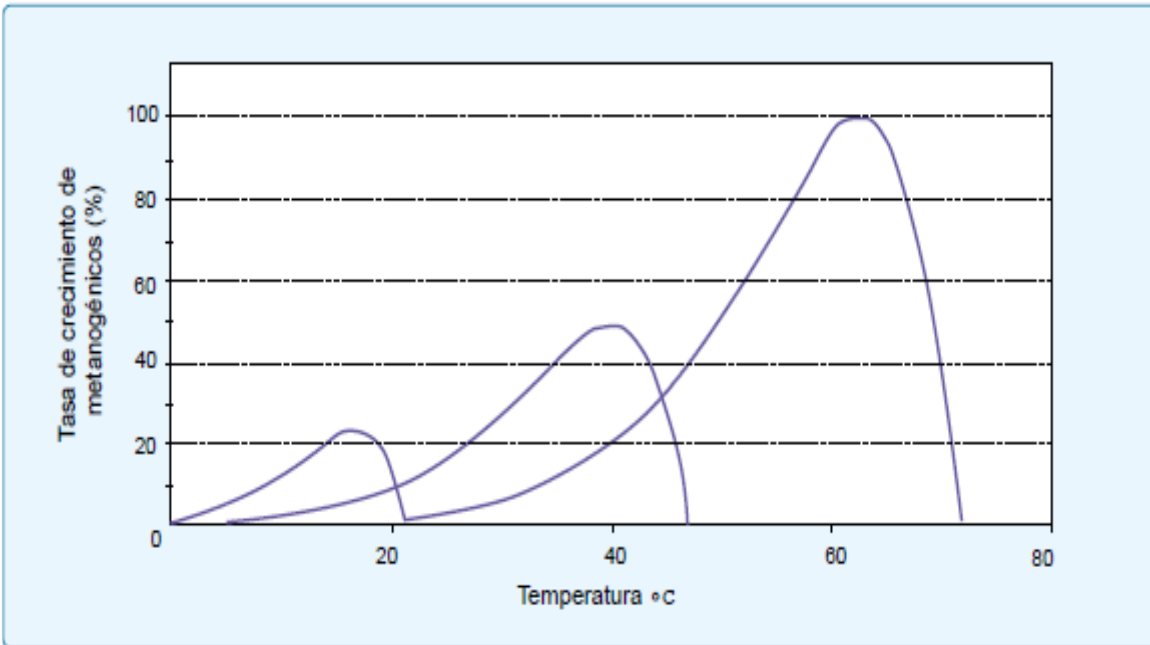


Figura 2. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilo, mesófilos y termófilos.

Fuente: Speece, 1983.

El régimen termófilo se ha relacionado estrechamente con mayores problemas de estabilidad (Hobson, 1995). Sin embargo, otros autores consideran que las plantas termofílicas son tan estables y tan operables como las mesofílicas, presentando, además de las ventajas antes mencionadas, una mayor producción de gas por unidad de sólidos volátiles y una mejora en el postratamiento, ya que el efluente de la digestión termofílica es más fácilmente deshidratable, junto con una menor producción de malos olores (Ahring, Sandberg, & Angelidaki, 1995), (Krugel, Nemeth, & Peddie, 1998).

#### 6.4.2.3 Valor de la acidez (pH)

Los microorganismos anaerobios necesitan de manera estricta un pH en torno a la neutralidad para su desarrollo correcto, aunque permiten cierta oscilación (Clark & Speece, 1989), aunque pueden presentarse problemas si baja de 6 o sube de 8,3 (Lay, Li, & Noike, 1997). El pH afecta directamente la actividad enzimática de los microorganismos mediante cambios de estado de los

iones de las enzimas como el carboxilo y amino; alteración que se presenta en los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas (Clark & Speece, 1989).

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 6 y 8, valores de pH por debajo de 5 y por encima de 8 se corre el riesgo de inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ -  $\text{HCO}_3$ ) y Amonio -Amoníaco ( $\text{NH}_4$ - $\text{NH}_3$ ) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

Los valores de pH pueden ser corregidos para mantenerlos dentro del rango adecuado para el proceso de fermentación. Así, cuando el pH es alto se puede sacar frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregar materia orgánica fresca en la misma cantidad; o bien, cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas o agua amoniacal diluida. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (figura 3). Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH.

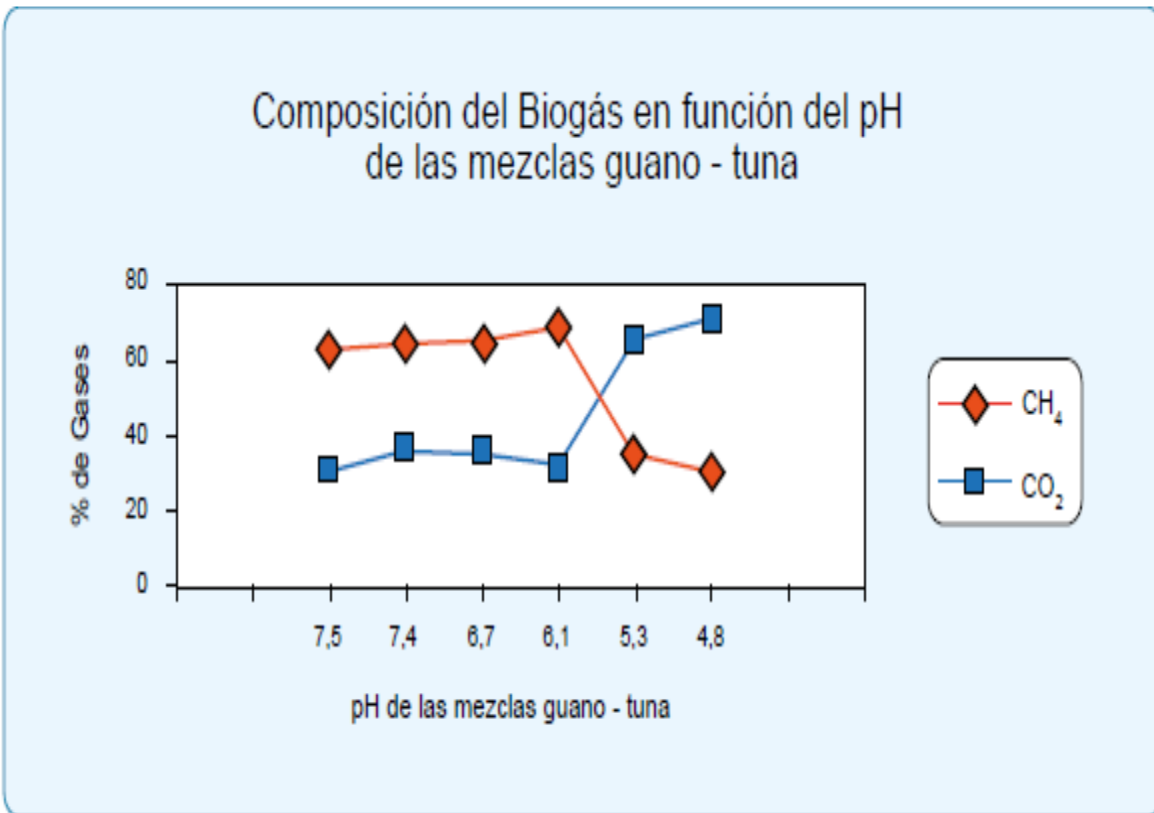


Figura 3. Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas.

Fuente: *Varnero & Arellano, 1990.*

#### 6.4.2.4 Relación DBO Y DQO

Habitualmente se utiliza la relación DBO/DQO para estimar la biodegradabilidad de un agua residual. La determinación de la DBO y la DQO permite establecer la relación existente de contaminantes y según el resultado, conocer la posibilidad o no de efectuar algún tratamiento para las aguas residuales (Mihelcic & Zimmerman, 2011). La diferencia más notable es que la DBO representa la cantidad de materia orgánica biodegradable, mientras que la DQO representa ambas, tanto la materia biodegradable como la no biodegradable.

#### **6.4.2.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno, DBO, se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C, para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente. Se ha demostrado que gran parte de los microorganismos metabolizan aeróbicamente los sustratos orgánicos, tales como lípidos, azúcares, alcoholes o proteínas, tal que alcanzan un máximo rendimiento de producción celular de 0.4 g de células en peso seco por gramo de DQO eliminada (Sikes, 1975).

Este valor es de gran importancia ya que se relaciona con la cantidad de energía oxidable en el sustrato el cual es microbiológicamente usable por las células para sus requerimientos de energía y su posterior síntesis.

La razón técnica de hacer las lecturas de DBO a los cinco días de incubación es porque después de este periodo frecuentemente ocurre la nitrificación. La nitrificación o conversión del nitrógeno orgánico y amoniacal a nitritos y nitratos requiere de oxígeno, por lo que la disminución de oxígeno disuelto o incremento de DBO, ya no se debe a la oxidación del carbono orgánico que es lo que se desea medir en este tipo de prueba.

La razón de hacer la lectura a los cinco días de efectuada la prueba y a una temperatura de 20°C, se debe a que como esta técnica tiene su origen en Inglaterra, la British Royal Commission of Sewage Disposal, determinó que la temperatura promedio de los ríos de este país es de 18.3°C y que el tiempo máximo que duran estas aguas en su trayecto de los ríos hacia el mar, es de cinco días. Como ésta prueba de DBO pretende reproducir estos hechos, se seleccionaron los parámetros de tiempo y temperatura ya mencionados, y que por causas circunstanciales coinciden más o menos con las razones técnicas de efectuar las lecturas en esas condiciones. Aproximadamente entre el 90 y 95% de la DBO presente en el agua residual es originada por pérdidas de leche o productos lácteos (Valencia & Ramírez, 2009).

#### **6.4.2.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno, DQO, se refiere a la cantidad de oxígeno que se quiere para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . En la práctica, la materia orgánica en agua es oxidada por  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  bajo condiciones estrictas (en medio de ácido sulfúrico concentrado, y a una temperatura de  $160^\circ\text{C}$ ). La cantidad de oxígeno del dicromato usado, es determinada y expresada como DQO. En aquellos casos que la fórmula de los compuestos es conocida, la DQO puede ser derivada de la estequiometría. Una importante ventaja de este método es que cuantifica tanto la materia orgánica disuelta como la que se presenta en forma de partículas. Considerando el hecho que el tratamiento de aguas residuales tiene que ver con la separación de ambos tipos de materia orgánica, la DQO medida es ampliamente usada como un parámetro cuantitativo.

En las pruebas de DQO se acelera artificialmente el proceso de biodegradación que hacen los microorganismos, mediante un proceso de biodegradación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos debidamente estandarizados, que tienen por objeto la reproducción de las mediciones, esta prueba es una indicación de la cantidad de nutrientes fácilmente degradables presentes en una muestra, es ideal para aplicarla a residuos que contengan entre otros nutrientes con carbón, como las de industrias o métodos de producción biológicos (Metcalf & Eddy, 1994).

A continuación, se presentan algunos valores de DQO en relación a la concentración de sustrato: 1g/l de glucosa posee una DQO de 1,4 g/l (Henze, 1995), 1g/l de grasa de cerdo corresponde 2,1 g/l de DQO y 1g/l de aceite girasol a 2 g/l de DQO.

#### **6.4.2.7 Tiempo de retención**

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo que se mantiene la materia orgánica dentro del digester, varía con los parámetros de proceso, tales como, temperatura y composición de los residuos. Bajo condiciones mesofílicas el rango es de 15 a 30 días y en condiciones termofílicas es de 12 a 14 días (Monnet, 2003). En los sistemas de mezcla completa, el TRH coincide con el

celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada, así como la producción de metano, aunque este último valor comenzara a disminuir una vez alcanzado el óptimo.

#### **6.4.2.8 Composición de la materia orgánica**

(Valdivia, 2000), propone para la fermentación los microorganismos metanogénicos requiriendo de suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa, el porcentaje más adecuado de contenido en sólidos es del 5% al 10% lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad.

Durante la digestión se encuentra que no toda materia prima se digiere, si no que parte se convierte en metano, otra en sedimento y habrá también una porción que no se digiere, esta y otras propiedades básicas de la materia se expresan casi siempre como sigue:

#### **6.4.2.9 Humedad**

Cantidad de agua existente en la materia a utilizar. Se obtiene al secarse el material a 104°C, hasta que no pierda peso; la diferencia entre el peso inicial y el peso final es equivalente a la humedad que contenía la materia.

Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña. Cuando la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada.

#### **6.4.2.10 Sólidos totales o masa seca**

Materia orgánica sin humedad, es decir, el peso de la materia seca que queda después del secado como se indicó antes. El sólido total suele ser equivalente al peso en seco (sin embargo, si se secan los materiales al sol, es de suponer que aun contendrán, cerca del 30% de humedad). El



sólido total incluye componentes digeribles o “sólidos volátiles” y residuos no digeribles o “sólidos fijos”. Podemos apreciar de los datos recogidos en la tabla 5 del contenido de sólidos totales de algunos sustratos orgánicos.

Tabla 5. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos

<b>Materias primas</b>	<b>% de Sólidos totales</b>
<b>Residuos animales</b>	
Bovinos	13.4-56.2
Porcinos	15-49
Aves	26-92
Caprinos	83-92
Ovejas	32-45
Conejos	34.7-90.8
Equinos	19-42.9
Excretas humanas	17
<b>Residuos vegetales</b>	
Hojas secas	50
Rastrojo de maíz	77
Paja trigo	88-90
Paja arroz	88.8-92.6
Leguminosas (paja)	60-80
Tubérculos (hojas)	10-20
Hortalizas (hojas)	10-15
Aserrín	74-80

*Fuente: Varnero & Arellano, 1990.*

#### **6.4.2.11 Sólidos Volátiles (SV)**

Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (Varnero et al., 1990).

#### **6.4.2.12 Sólidos Fijos (SF)**

Material que no será transformado durante el proceso y es el peso que queda después del encendido (cenizas), se trata de material biológicamente inerte. Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C.

#### **6.4.2.13 Relación carbono/nitrógeno (C/N)**

La relación C/N permite conocer la capacidad mineralizadora del residuo sólido en procesos de recuperación y aprovechamiento de la materia orgánica. La variación de esta relación C/N dependerá del aporte de la fracción cartón-papel. Los valores de C/N más elevados son característicos de los países más desarrollados (valores medio superiores a 34) debido a la mayor cantidad de papel-cartón.

El intervalo óptimo de la relación C/N para procesos de transformación biológica está comprendido entre 20 y 35. Conocida esta relación se puede determinar la aptitud del residuo sólido para la digestión anaerobia o el compostaje, teniendo en cuenta que la posibilidad que se generen altos niveles de amoníaco hace que el residuo no sea adecuado para los procesos anaerobios (Gallert, Bauer, & Winter, 1998).

Tabla 6. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos

<b>Materiales</b>	<b>%C</b>	<b>%N</b>	<b>C/N</b>
<b>Residuos de animales</b>			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
<b>Residuos vegetales</b>			
Paja trigo	46	0.53	87:1
Paja cebada	58	6.64	90:1
Paja arroz	42	0.63	67:1
Paja avena	29	0.53	55:1
Rastrojo maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

*Fuente: Varnero & Arellano, 1990.*

## **6.5 Ventajas de la digestión anaerobia**

### **6.5.1 Proceso**

- Permite el tratamiento de fracciones orgánicas de residuos urbanos de diferentes procedencias (Tchobanoglous, Hilary, & Vigil, 1997).
- Elevados porcentajes de eliminación de materia volátil (40-60%) (Vogt, Liu, Kennedy, Vogt, & Holbein, 2002), (Mata, Macé, & Llabrés, 2000), (De Baere, 2000).
- Elevada destrucción de organismos patógenos y organismos parásitos: también produce la inactivación de algunos virus patógenos (enterovirus y parvovirus), según el tipo de virus, del proceso de depuración y de la temperatura (Turner & Burton, Technology).
- Baja producción y estabilización de lodos (Carreras & Dorronsoro, 1999);
- Alto grado de estabilización del vertido trabajando con altas velocidades de carga (Lissens, Vandervivere, De Baere, Bley, & Verstraete, 2001).
- Disminución muy significativa de la relación de alcalinidad, así el proceso aporta alcalinidad para favorecer un proceso posterior de nitrificación, total o parcial (Flotats, Bonmatí, Campos, & Teira, 2000).

### **6.5.2 Producto final**

- Baja generación total de sólidos biológicos: el producto final posee características similares al compost producido aeróbicamente (Tchobanoglous, Hilary, & Vigil, 1997). Además, el producto final es inerte y rico en ciertos nutrientes y puede emplearse en agricultura como mejorador de suelo (Nopharatana, Pullammanappallil, & Clarke, 2003), (Chugh, Chynoweth, Clarke, Pullammanappallil, & Rudolph, 1999).

- Eliminación de ácidos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente biodegradables, contribuyen para disminuir la fitotoxicidad del residuo final (Flotats, Bonmatí, Campos, & Teira, 2000).

### **6.5.3 Energía**

- Alta producción de biogás compuesto fundamentalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>
- Obtención de biogás susceptible de aprovechamiento energético y económico (Dorronsoro & Carreras, 1999).
- Bajo consumo energético: la alta producción de biogás con elevado valor energético reduce significativamente los costes del tratamiento (Milan, y otros, 2001).
- Reducción de la emisión de gases responsables por del efecto invernadero (Massoud & El-Fadel, 2001).

## **6.6 Tecnología de biodigestores**

### **6.6.1 Concepto**

Es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor) dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada dilución de agua para que se descomponga por microorganismos, produciendo por un lado gas metano y por otros fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fosforo y potasio (Valdivia, 2000).

Contreras (2006), define un biodigestor como un contenido hermético, donde se realiza un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales, residuos humanos, etc.; es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre sucede una digestión de la

materia prima, luego de la cual se obtiene biogás, biol y bioabono aproximadamente en un periodo. Definiendo las siguientes características:

### 6.6.2 Tipos de biodigestores por su forma

Contreras (2006), establece cuatro tipos de biodigestores: de cúpula fija, de cúpula móvil y tipo Batch. Estos biodigestores tienen la característica principal que son de flujo continuo lo que permite la entrada y salida constante de fluido a excepción del tipo Batch que es de flujo discontinuo. A continuación, se describen cada uno de ellos:

#### 6.6.2.1 De cúpula fija

Son aquellos armados en una sola estructura que por regla general es hecha en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio el uso de mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción.

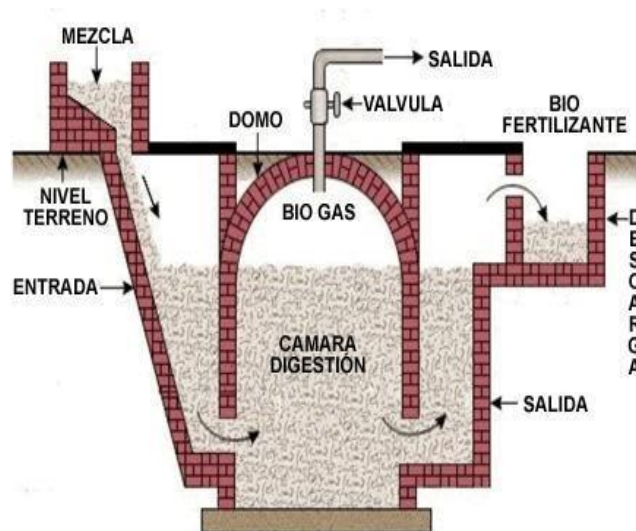


Figura 4. Cámara de digestión con cúpula fija.

Fuente: Contreras, 2006.

### **6.6.2.2 Biodigestor de cúpula fija o tipo chino**

El modelo de cúpula fija tiene como principal característica que trabaja con presión variable; sus principales desventajas, son que la presión de gas no es constante y que la cúpula debe ser completamente hermética, ello implica cierta complejidad en la construcción y costos adicionales en impermeabilizantes. Sin embargo, este modelo presenta la ventaja de que los materiales de construcción son fáciles de adquirir a nivel local, así como la inexistencia de partes metálicas que pueden oxidarse y una larga vida útil si se le da mantenimiento, además de ser una construcción subterránea (Jarauta, 2005).

Los biodigestores de cúpula fija, son aquellos armados en una sola estructura que por regla general es hecha en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio el uso de mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción (Botero & Preston, 1987).

### **6.6.2.3 De cúpula móvil**

Los biodigestores de este grupo tienen dos estructuras: la primera al igual que en los de estructura sólida fija, va enterrada y hecha en concreto, bloque o ladrillo; la segunda en la mayoría de los casos es una campana metálica que “flota” sobre la primera estructura (Valdivia, 2000).

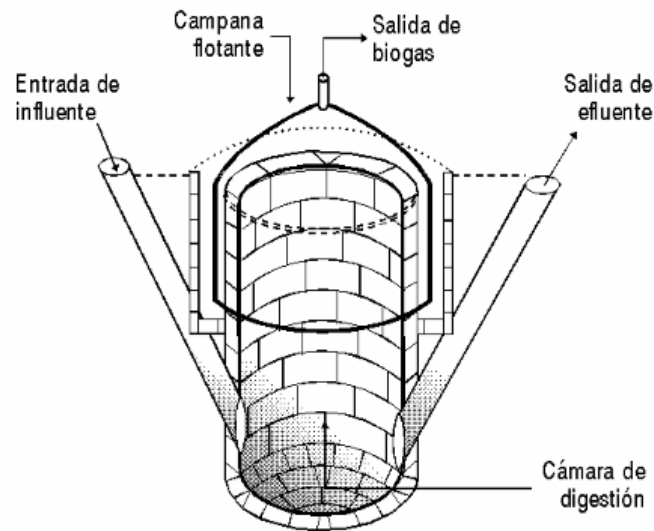


Figura 5. Cámara de digestión con cúpula móvil.

*Fuente: Valdivia, 2000.*

Los de régimen semicontinuo se construyen enterrados, se cargan por gravedad una vez al día, en la parte superior flota una campana donde se almacena el gas (Viñas, 1994). Se caracteriza por tener un depósito de gas móvil a manera de campana flotante, esta campana puede flotar en la masa de fermentación o en un anillo de agua. Las ventajas de este tipo de planta son que trabajan a presión constante y se puede determinar la cantidad de gas almacenado por el nivel de la campana; pero tiene como desventaja que está expuesto a la corrosión ya que las campanas son generalmente metálicas (Contreras, 2006).

#### **6.6.2.4 Sistemas Batch o discontinuo**

Son biodigestores que se cargan completamente una sola vez y son vaciadas por completo después de un tiempo de retención fijado. Dentro de esta categoría la más conocida es la planta Olade Guatemala. El modelo tipo Batch es apropiado para cargar todo tipo de materiales de fermentación, debido a que el tiempo de retención con el que se trabaja es largo.



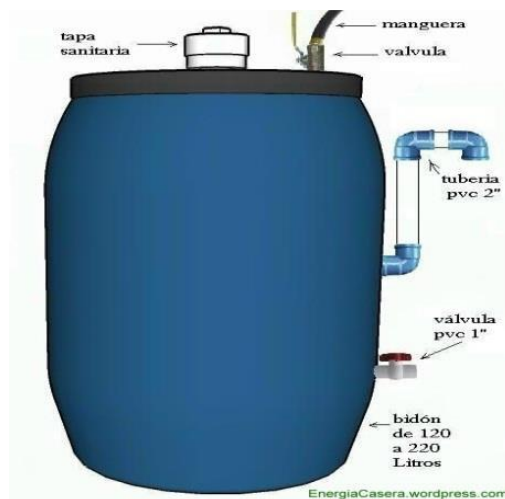


Figura 6. Sistema tipo Batch.

Fuente: Contreras, 2006.

## 6.7 Biogás

### 6.7.1 Concepto

Según (Sandoval, 2006), el biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia del aire, por la acción de un grupo de microorganismos. Si las condiciones ambientales y operaciones son óptimas aproximadamente en un período de 15 días se produce biogás.

El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico) (Rodríguez, 2013). Para producir biogás es posible utilizar cualquier tipo de estiércol ya sea de vaca, cerdo, cabra, aves e incluso es posible emplear los desechos humanos (Rodríguez, 2007).

La FAO (2013), aporta otro concepto en el que afirma que es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias y está

constituido principalmente por gas metano y bióxido de carbono. La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente.

El biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible con poder calorífico, está en directa relación con el porcentaje de metano contenido en la mezcla, pero usualmente varía entre 16500 KJ/Kg y 21000 KJ/Kg (Valdivia, 2000).

### 6.7.2 Composición del biogás

Para analizar el biogás se retoma lo expuesto por (Lugones, 2001), resaltando que este es más liviano que el aire y está compuesto de diversos gases, los cuales se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Composición del Biogás

Gas		Contenido %
Metano	CH <sub>4</sub>	54 – 70
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	27 – 45
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.5 – 3.0
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1 – 10
Monóxido de carbono	CO	0.10
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.10
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0.15 – 0.5

*Fuente: Lugones, 2001.*

El sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico es un gas incoloro sumamente tóxico. Es combustible y forma con el aire mezclas explosivas. Este gas posee un olor característico a huevos podridos. Este olor se percibe a baja concentración (0,05 hasta 500 ppm).

El problema que plantea el uso de este combustible es que contiene ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), un gas con un alto poder corrosivo que deteriora las instalaciones, por lo que es necesario eliminarlo antes de utilizar el biogás (Pohland, 1992). Actualmente existen tecnologías que permiten eliminar este ácido, mediante la combinación de procesos químicos y biológicos, en los que interviene la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, o el uso de reactivos con  $FeCl_3$  (Cabrera, Gómez, & Cantero, 2005).

### **6.7.3 Purificación del biogás**

En la práctica, la purificación del biogás no es más que la remoción del dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno o ambos. El dióxido de carbono es eliminado para aumentar el poder calorífico del biogás como combustible. El sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás. Existen varios procesos de eliminación del  $H_2S$ , pero los que más se ajustan a una planta artesanal por sus costos, son procedimientos “secos”. La desulfuración del biogás se basa en la reacción química de  $H_2S$  con una sustancia apropiada (Contreras, 2006).

#### **6.7.3.1 Procedimiento con cal**

(Valdivia, 2000), asegura que, el procedimiento de desulfuración de gases con cal viva o apagada, ya sea en forma sólida (trozos) o como solución acuosa, produce gran cantidad de residuos malolientes. Las soluciones acuosas o suspensiones de cal apagada requieren gran cantidad o despliegue de aparatos para su operación.

En presencia de grandes cantidades de  $C_2O$  en el gas, como se da el caso en el biogás, es difícil lograr una eliminación satisfactoria del  $H_2S$ . El  $C_2O$  también reacciona con cal viva o apagada y la consume demasiado rápido. Materiales ferrosos en forma de virutas son utilizados frecuentemente para eliminar el  $H_2S$ .

También, el autor antes citado, define que el principio de estos equipos de desulfuración consiste en un cajón o tonel. En su parte interior se encuentra la masa purificadora ya preparada. Esta es depositada sobre varias planchas perforadas, de manera que las capas purificadoras no sobrepasen un espesor de 20 a 30 cm de lo contrario la masa se comprimiría con suma facilidad, aumentando su resistencia al paso de biogás que entra en el cajón (purificador) por la parte superior, fluye a través de la masa, abandona el purificador por la parte superior ya liberada de H<sub>2</sub>S.

Una vez que la masa está saturada, esta se puede mezclar con el bioabono para que los sulfuros se transformen en sulfatos y sean absorbidos por la tierra y podamos cerrar el ciclo.

#### **6.7.4 Inhibidores de la producción de biogás**

Además del amonio libre, según García, Campos, Dalmau, Illá, & Sanchez (2006), el sulfonato lineal del alquilbenceno (LAS) es el surfactante amónico más importante en agentes limpiadores de hogares e industrias. En la mayoría de los digestores, la adición de surfactantes causa una disminución de la tasa de producción de biogás. Esto debe ser tomado en cuenta a la hora de adicionar residuos domésticos e industriales a un biodigestor en funcionamiento, ya que la productividad, lejos de aumentar se podría ver afectada. Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos residuos también pueden llegar a afectar el proceso según su concentración.

#### **6.7.5 Usos del biogás**

A pequeña y mediana escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa, sin embargo, también puede ser utilizado para iluminación, calefacción, como reemplazo de la gasolina o el diésel en motores de combustión interna, operar maquinaria agrícola o bombear agua. Este tiene un poder calorífico por lo general entre 50 y 70% del gas natural. Se debe tener especial cuidado con el ácido sulfhídrico del biogás, ya que ocasiona corrosión prematura en los equipos, por esta razón es necesario colocar una trampa de limadura de hierro en la línea de transporte del biogás (Valdivia, 2000).

## **6.8 Biofertilizante**

Los biofertilizantes o biopreparados se originan a partir de la fermentación de materiales orgánicos, como estiércoles de animales, plantas verdes y frutos. La fermentación puede ocurrir con la presencia de oxígeno, caso en el cual se le llama aeróbica, o sin su presencia, caso en el cual se le denomina anaeróbica (Marisa , Luis, & Sorto, 2010).

### **6.8.1 Biofertilizante líquido**

Según (Aparcana & Jansen, 2008), el biofertilizante líquido es la fracción líquida resultante del fango proveniente del fermentador o biodigestor. Este “fango” es decantado o sedimentado obteniéndose una parte líquida a la cual se le llama biofertilizante líquido. Aproximadamente el 90% del material que ingresa al biodigestor se transforma a biofertilizante líquido. Esto depende naturalmente del tipo de material a fermentar y de las condiciones de fermentación.

#### **6.8.1.1 Ventajas del uso del biofertilizante líquido como fertilizante**

Entre las ventajas por el uso como fertilizante pueden mencionarse (Aparcana & Jansen, 2008):

- El uso permite un mejor intercambio catiónico en el suelo. Con ello se amplía la disponibilidad de nutrientes del suelo. También ayuda a mantener la humedad del suelo y a la creación de un microclima adecuado para las plantas.
- Se puede emplear como fertilizante líquido, es decir para aplicación por rociado.
- También se puede aplicar junto con el agua de riego en sistemas automáticos de irrigación.
- Siendo una fuente orgánica de fitoreguladores en pequeñas cantidades es capaz de promover actividades fisiológicas y estimular el desarrollo de las plantas, sirviendo para: enraizamiento (aumenta y fortalece la base radicular), acción sobre el follaje (amplía la

base foliar), mejora la floración y activa el vigor y poder germinativo de las semillas, traduciéndose todo esto en un aumento significativo de las cosechas.

- Pruebas realizadas con diferentes cultivos muestran que su uso solo sería suficiente para lograr la misma o mayor productividad del cultivo que empleando fertilizantes químicos.

### **6.8.2 Biofertilizante sólido**

Según (Aparcana & Jansen, 2008), es el resultado de separar la parte sólida del “fango” resultante de la fermentación anaeróbica dentro del fermentador. Dependiendo de la tecnología a emplear, este biofertilizante tratado puede alcanzar entre 25% a solo 10% de humedad (de hecho, esa humedad es principalmente Biol residual). Su composición depende mucho de los residuos que se emplearon para su fabricación (en el fermentador) Se puede emplear solo o en conjunto con compost o con fertilizantes químicos.

#### **6.8.2.1 Ventajas en el uso del biofertilizante sólido**

Entre las ventajas por el uso del Biosol como fertilizante pueden mencionarse (Aparcana & Jansen, 2008):

- El uso de este abono hace posible regular la alimentación de la planta. Los cultivos son fortalecidos y ocurre una mejora del rendimiento. Su uso permite el uso intensivo del suelo mejorando a la vez la calidad del mismo.
- Confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión mejorando con ello la retención de los nutrientes en el suelo.

- Mejora la estructura del suelo y la capacidad de retención de la humedad del mismo, esto favorece la actividad biológica en el suelo. Mejora la porosidad, y por consiguiente la permeabilidad y ventilación.
- También puede ser combinado con la materia que va a ser compostada, con el fin de acelerar el proceso de compostaje.
- Una de las ventajas de usarlo como fertilizante es que se reduce la necesidad del abono, es decir solo se necesita de 2 - 4 Ton/Ha. Si se empleara solo estiércol se necesitaría 15 - 30 Ton/Ha y si se empleara compost se necesitaría 10 - 20 Ton /Ha. No se debe olvidar que estas cantidades son relativas y dependen mucho del tipo de suelo y del cultivo.
- Inhibe el crecimiento de hongos y bacterias que afectan a las plantas.
- Reduce la erosión del suelo.
- Cuenta con una mayor disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y azufre) a comparación con el estiércol, entonces esto mejora la disponibilidad del nutriente para la planta.

## **6.9 Contribución de los biodigestores en la zona rural**

La contribución que realizan los biodigestores en la zona rural está directamente relacionada con la energía que suministran para el consumo familiar de una manera ambientalmente sostenible, económicamente rentable y de fácil acceso.

El ser humano demanda condiciones de bienestar que están sujetas a la energía que puedan utilizar para cumplir con sus necesidades, pero que también vienen acompañadas por problemas

de consumo de energía lo que causa serios daños ambientales y problemas económicos dentro de una población demandante (Li, Niu, Ma, & Zhang, 2009).

Hoy en día, con el uso de los biodigestores familiares e instalados en las zonas rurales, se observa que el abastecimiento de energía limpia tiene beneficios locales. A continuación, se aborda la contribución de los biodigestores en la zona rural, desde los puntos de vista social, económica y ambiental.

### **6.9.1 Beneficios sociales**

En países donde el nivel de desarrollo no ha alcanzado los estándares impuestos por los denominados países desarrollados y que aún siguen dependiendo de la leña o del estiércol seco como portadores energéticos que permitan cocinar los alimentos, es muy común observar que las mujeres y los niños sean los responsables de abastecer al hogar de leña y estiércol seco, dedicando gran parte de su tiempo a la recolección de los mismos y desplazando cualquier otra actividad. Según estudios realizados las mujeres y niños deben recolectar estos materiales hasta dos veces por semana y caminar grandes distancias para poder conseguirlos, sometiéndose a problemas de salud y riesgos como la violencia (Garfi, Ferrero, Velo, & Ferrer, 2011).

El impacto que los biodigestores familiares han tenido dentro de la población rural y de bajos recursos económicos es la disminución a la exposición de riesgos que venían siendo objeto las mujeres y niños durante el tiempo de recolección de la leña y la continua exposición al humo generado por la combustión de la leña en el hogar.

Otro impacto observado es la disponibilidad de tiempo que tienen las mujeres y niños para realizar otras tareas que benefician económicamente a la familia y los niños pueden asistir regularmente a la escuela. Con el uso de los biodigestores las tareas de las mujeres y niños como responsables del suministro de leña y estiércol se redujo notablemente en un 80 y 90% del tiempo utilizado en estas tareas.



Por la utilidad que los biodigestores tienen dentro del ámbito familiar se le ha denominado como una tecnología de género, pues las más beneficiadas son las mujeres que culturalmente son las encargadas de la alimentación de la familia y del cuidado de los niños y de los animales. Es por ésta razón que, con el uso del biogás y la notable disminución del consumo de la leña, ahora las mujeres pueden desenvolverse socialmente y ser parte activa de la comunidad, aportando económicamente y asistiendo a centros de aprendizaje para su desarrollo personal (Garfi et al., 2011).

### **6.9.2 Beneficios económicos**

Uno de los propósitos de la instalación de los biodigestores familiares es proporcionar una alternativa energética local que dependa tan sólo del trabajo diario dentro de un ambiente familiar, y que como producto resultante se obtenga el biogás y el biol. En donde el biogás producido es el combustible que reemplazará el uso de la leña y disminuirá el uso del gas licuado de petróleo. Mientras que el biol reemplazará el uso del abono químico en la agricultura que es dañino para la salud de los seres humanos (Garfi et al., 2011).

El beneficio económico del uso del biogás en la población rural es el ahorro que representa la disminución del uso del gas licuado de petróleo, el cual tiene un precio elevado en éstas zonas y estar ubicados en lugares donde las carreteras por lo regular están en mal estado o simplemente no existen.

Otro beneficio del uso del biogás es que las mujeres pueden aportar económicamente al hogar, pues pueden utilizar el tiempo que invertían en la recolección de la leña en tareas pagadas o desde sus propios negocios.

En la agricultura el beneficio de usar el biofertilizante líquido o el lodo residual como abono orgánico en las cosechas, es el incremento de las cosechas o el crecimiento rápido de los productos, por ejemplo, del césped que es alimento del ganado orientado para la producción de leche o para el consumo humano.

Utilizar el biofertilizante líquido y el efluente proveniente de los biodigestores familiares en los sembríos, incrementaría notablemente las cosechas, abastece la necesidad de la familia y queda un excedente listo para la venta. De esta manera se incrementarían notablemente los ingresos familiares creando nuevas fuentes de empleo pues se necesitaría mayor mano de obra para la cosecha. Según (Garfi et al., 2011), por ser biodigestores instalados en zonas de familias de bajo recursos económicos aún los biodigestores tubulares más económicos resultan ser costosos para estas familias pues carecen de algún tipo de subsidio.

El biogás que producen los biodigestores caseros es principalmente usado para la cocción de los alimentos, aproximadamente se consume entre 30 y 45 m<sup>3</sup> de biogás al mes, lo que representa un ahorro en el consumo del gas licuado de petróleo (GLP) de 11 a 15 kg que equivale a un cilindro de gas por mes. El biodigestor puede producir 0,5m<sup>3</sup>/día de biogás para cuatro horas de uso continuo (Rajendran, Aslanzadeh, & Taherzadeh, 2012).

### **6.9.3 Beneficios ambientales**

El biogás, como combustible usado en la población rural, es una fuente de energía alternativa que juega un papel muy importante en la reducción de gases de efecto invernadero. Dos de los gases componentes del biogás son el metano y el dióxido de carbono, causantes directos del efecto invernadero que afecta al planeta Tierra, pero en donde el gas metano contribuye 21 veces más al efecto invernadero que el dióxido de carbono (Rajendran, Aslanzadeh, & Taherzadeh, 2012).

El principal productor de las emisiones de metano y de dióxido de carbono es la combustión de los combustibles fósiles y sus derivados, así como también la quema de grandes extensiones de bosques y los residuos que de ellos provienen.

Según estudios realizados, el biogás que produce un biodigestor familiar de construcción regular sustituye "316 litros de Kerosene, 5535 kilogramos de leña y 4400 kilogramos de estiércol de ganado utilizados como combustibles, reduciendo las emisiones de: óxido de nitrógeno (NOx) en 16,4 kg/año (kilogramos al año), de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en 11,3 kg/año, de monóxido de carbono (CO) en 987,0 kg/año y de otros gases volátiles en 69,7 kg/año" (Rajendran, et al, 2012).

Otros estudios revelan que el destacado desarrollo que tienen los biodigestores en China ha permitido reducir los gases de efecto invernadero, mediante el uso del biogás como combustible en los hogares de la población rural; y que si se llegara a sustituir el uso de los productos combustible como la leña, paja, carbón y demás combustibles fósiles por el biogás, se reducirían los gases de efecto invernadero en 73157 megatoneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que equivale al consumo realizado entre los años 1991 y 2005 (Yu, Yaoqiu, Ningshen , Zhifeng, & Anzhong, 2008).

Estudios realizados en Perú en donde se escogieron a 12 familias de la zona rural que utilizan biogás y que han sustituido el uso de la leña para cocinar, arrojaron como resultados un decremento notorio en el consumo de la leña de entre el 50 y 60% y una hora (1 h) menos en el tiempo de cocción de los alimentos. Estas externalidades positivas evitan la deforestación de los bosques, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, mejora la calidad de vida de las familias tanto en la salud como en la parte económica mientras reduce los impactos ambientales (Garfi, et al, 2011).

El tratamiento anaeróbico de los Residuos Orgánicos (RO), contribuye a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos. Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como, por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar (Varnero et al., 1990).

Puntualmente para el caso de las excretas de equino, la acumulación en exceso e incontrolado puede provocar emisiones de gases de efecto invernadero. Esta acumulación espontáneamente puede generar metano, como un biodigestor, con la diferencia que este gas es liberado a la atmosfera, provocando un efecto invernadero mayor que el CO<sub>2</sub>.

#### **6.9.4 Beneficios a la salud**

El beneficio de usar biogás con desechos orgánicos provenientes de los animales es que, frente a la leña, no causa afectación al sistema respiratorio en especial de los niños y las mujeres del hogar (García, 2001).

## **6.10 Limitaciones del consumo del biogás en la zona rural**

A pesar de lo beneficioso que resultare ser el uso del biogás en las zonas rurales, tanto en los temas de salud, economía familiar, nuevas oportunidades de empleo, mayor desarrollo agrícola, entre otros; los biodigestores deben aún sortear problemas significativos como los altos costos de mantenimiento y de instalación que no puede ser cubiertos por las familias de la zona rural, debido a sus bajos ingresos económicos.

Además, el modelo económico de varios países de la región y de la gran mayoría de países del mundo, se sustenta en el uso de los recursos no renovables como los combustibles fósiles, en desmedro del uso de las energías renovables que, a su vez, tienen que superar brechas económicas. Por ejemplo, en el caso de China el costo de generación de electricidad a partir del uso de la bioenergía o el metano resulta ser 1,5 veces mayor que el uso del carbón (Surendra, Takara, Hashimoto, & Kumar, 2014).

A pesar que en los objetivos de desarrollo sustentable uno de los pilares para modificar los estados de pobreza de varios países en el mundo todavía sigue siendo la energía, justamente los países llamados desarrollados no prestan atención a la necesidad de energía en la zona rural y por tal motivo no varían mucho las políticas a favor de las energías renovables. Pues el interés aún generalizado de los países es favorecer la energía que provea mayor rentabilidad económica con tecnología conocida y sobre todo que sea de interés nacional.

El acceso al agua es una de las limitaciones más importantes del uso de biodigestores, tanto en la zona rural como a nivel industrial, el agua es el componente irremplazable para la mezcla con el material orgánico que permite los procesos de fermentación dentro del biodigestor y la generación de biogás. En el caso de África sólo un porcentaje reducido de la población tiene acceso al agua, por tal motivo los biodigestores no son una opción que pueda funcionar en ese continente y en otros más (Surendra et al. 2014).

Romper la actual estructura energética es una tarea ardua que requiere de tiempo, disponibilidad del recurso fósil, la apertura a energías renovables (diferentes a la energía hidráulica). Con la actual estructura energética, los biodigestores carecen de apoyo económico y político, pues el nivel de aplicación es para un sector minoritario de la sociedad que no llama la atención del gobierno y por ende carece del apoyo para el crecimiento de éste tipo de tecnología de energías renovables (Li et al. 2009).

Los motivos anteriormente expuestos fueron tomados a consideración por grupos interesados en el manejo adecuado de los recursos naturales con la tecnología apropiada, que luego de estudios y experiencias en el campo tomaron el reto de organizarse. Un grupo sobresaliente es la Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (RedBioLAC), cuya misión es:

Ser una red que aglutina a las instituciones relacionadas con la investigación aplicada y en la difusión de la biodigestión anaeróbica para estimular el tratamiento integral y el manejo de los residuos orgánicos, como estrategias para mejorar el bienestar de la población de Latinoamérica y el Caribe (RedBioLAC, s.f.).

El grupo RedBioLAC tuvo sus inicios en el 2009 y desde ese entonces ha venido organizando, investigando, desarrollando e implementando los biodigestores con la visión de mejorar la parte socioeconómica de los pueblos de Latinoamérica y el Caribe. Debido a la experiencia del grupo en la implementación de biodigestores en varios países, se ha tomado los estudios de factibilidad que se han hecho para implementar un programa nacional en los países de: Bolivia, Honduras y Perú.

En síntesis, en este capítulo se abordaron los ejes temáticos sobre los cuales se rige el presente estudio que son necesarios para el entendimiento del tema y que sustentan la solución que le busca desde la ciencia, al problema científico investigado.

## **7 Hipótesis de Investigación**

En el proceso de digestión anaeróbica, la generación de biogás podría mejorar a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí en el período 2016-2018, contribuyendo con beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud en la zona rural, siempre y cuando los parámetros físicos (temperatura) y químicos (pH, C, N) se encuentren en sus rangos óptimos.

Al menos un par de los sustratos orgánicos en estudio, probablemente tendrá una la relación de causalidad significativa en cuanto a la producción de biogás, así como una la relación de asociatividad entre la temperatura y la producción de biogás generada en los biodigestores, contribuyendo a presentar mejores características fisicoquímicas que el resto de sustratos en el estudio.

## **8 Diseño Metodológico**

### **8.1 Tipo de estudio**

De acuerdo al método de investigación el presente estudio es experimental debido a que el investigador provoca artificialmente un fenómeno, con el fin de estudiar su esencia, causa, origen e interrelación con otros procesos o fenómenos (Pedroza, 1993). Según el nivel inicial de profundidad del conocimiento es descriptivo (Piura López, 2012).

Dado que estos estudios son la base y punto inicial de los otros tipos; se caracterizan por realizar una determinación sistemática y precisa de las distintas formas de presentarse las características individuales en diferentes tiempos y lugares. Están dirigidos a determinar “como es” o “como esta” la situación de las variables que deberán estudiarse en una población; la presencia o ausencia de algo, la frecuencia con que ocurre un fenómeno, y en quienes, donde y cuando se está presentando determinado fenómeno. Su propósito es presentar las propiedades, características y perfiles de importancia de personas, grupos, comunidades u otro fenómeno. Busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014),

De acuerdo a la clasificación de (Hernández et al., 2014), el tipo de estudio es correlacional debido a que este estudio tiene la finalidad de conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto específico.

De acuerdo, al tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información, el estudio es prospectivo. En los estudios prospectivos se registra la información según van ocurriendo los fenómenos (Pineda, De Alvarado, & De Canales, 1994).

Por el período y secuencia del estudio es transversal debido a que, se estudian las variables simultáneamente en determinado momento, haciendo un corte en el tiempo. En este caso, el tiempo no es importante en relación con la forma en que se dan los fenómenos (Pineda et al., 1994).

De acuerdo al análisis y alcance de los resultados el estudio es analítico de causa-efecto dado que se busca contestar por qué sucede determinado fenómeno, cuál es la causa o factor de riesgo asociado, o cuál es el efecto de esa causa o factor de riesgo. En general, estos diseños buscan la asociación o correlación entre variables. Usualmente un cambio en la magnitud de una de ellas está relacionado con un cambio en la otra variable, que puede ser un aumento o una disminución, este es el efecto de causalidad que se trata de demostrar (Pineda et al., 1994).

## 8.2 Área de estudio

### 8.2.1 Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en la ciudad de Estelí, específicamente en la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM–Estelí), con las siguientes coordenadas geográficas:  $13^{\circ}05'59.01''\text{N}$  y  $86^{\circ}22'07.75''\text{O}$  a una altura de 846 msnm, aquí se caracterizó y evaluaron los diferentes tipos de estiércol de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, también aquí se instalaron las unidades de análisis experimental.

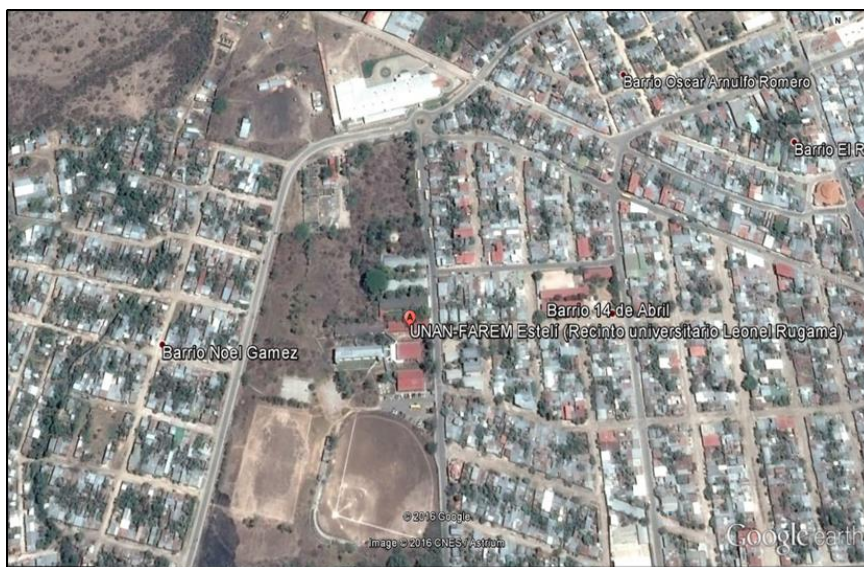


Figura 7. Vista aérea de FAREM Estelí.

*Fuente: Google Earth, 2019*



### 8.2.2 Área de conocimiento

El área de estudio a la que pertenece el tema de la presente investigación es a la número 6: Fuentes alternas de energía y responde a la línea de investigación número 3: eficiencia energética en viviendas, edificios públicos y PYMES, dentro del Programa de Doctorado en Gestión y Calidad de la Investigación Científica (DOGCINV).

### 8.3 Universo y Muestra

Para el desarrollo de la presente investigación, por sus características particulares de implementar un método experimental, basado en el Diseño Completamente al Azar (**DCA**), el universo está constituido por todos los productores que poseen los sustratos orgánicos estudiados.

Dado que esta investigación se realiza por método experimental, su espacio inferencial representativo se constituye de la siguiente manera: el número de repeticiones por cada tratamiento, se multiplica por el número de tratamientos y eso equivale al tamaño de muestra de un estudio observacional. Este principio está basado en la función de distribución de probabilidad de la Prueba de Fisher, que se define en el escenario de las muestras pequeñas donde “n” debe ser igual o menor de 30.

En este experimento la muestra representativa se circunscribe al espacio inferencial representativo que le corresponde definido por el número de repeticiones y el número de tratamientos, de los cuales contó con *diez repeticiones* para la caracterización de los sustratos y *cuatro tratamientos* en comparación: **estiércol de cerdo, ganado, caballo y gallinaza**, por tanto, se constituyeron 40 unidades experimentales. *Las unidades experimentales* (material receptor, al cual se aplican los tratamientos en un solo ensayo) fueron cuatro biodigestores tipo Batch, los cuales se cargaron en invierno y verano.

El Diseño Completamente al Azar (**DCA**) que fue implementado, permitió separar las variaciones sistemáticas de las del al azar. Esto mediante observaciones repetidas, que brindó una medición

más precisa del efecto de los tratamientos (conjunto de condiciones experimentales que el investigador impone a las unidades experimentales). El conjunto de factores de efectos fijos (efecto del i-ésimo tratamiento a estimar a partir de los datos del experimento), y aleatorios (efecto aleatorio de variación), (Pedroza, 1993).

El diseño experimental se estableció en un **DCA**. Las características técnicas-experimentales, para el diseño, análisis e interpretación de los datos obtenidos, se realizaron de acuerdo al método de Fischer. Para ello, se siguieron los procedimientos estadísticos planteados por Pedroza (1993).

Para aplicar instrumentos de investigación cualitativa, de acuerdo con Ruíz (2003), la selección de las personas entrevistadas se hizo tomando en cuenta el criterio de buen informante, es decir, las personas que reúnen conocimientos y experiencias necesarias del objeto de estudio.

### 8.4 Matriz de Operacionalización de Variables (MOVI)

**Objetivo General:** Evaluar la generación de biogás, mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, en la zona rural de Estelí, en el período 2016-2018.

Objetivos Específicos	Variable Conceptual	Subvariables o Dimensiones	Variable Operativa Indicador	Técnicas de recolección de datos e información		
				Entrevista	Experimento de campo	Experimento de laboratorio
Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los sustratos orgánicos que permiten la generación de biogás que se obtiene en el proceso de conversión.	Propiedades físico químicas de los sustratos orgánicos.	1. Masa húmeda  2. Masa seca  3. Masa de cenizas  4. Sólidos volátiles  5. Relación C/N	1.1. Cantidad de agua existente en la materia a utilizar.  2.1. Peso de la materia seca que queda después del secado.  3.3. Material biológicamente inerte.  4.4. Peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende.  5.1. Permite conocer la capacidad mineralizadora del residuo			✓  ✓  ✓  ✓  ✓

			sólido en procesos de recuperación y aprovechamiento de la materia orgánica.			
Correlacionar los parámetros ambientales y operacionales del proceso de biodegradabilidad anaeróbica en un biodigestor tipo Bach.	Parámetros ambientales.  Parámetros operacionales	1.Temperatura  2. pH  3.Tiempo de retención	1.1. Grados Celsius en el interior del biodigestor. 2.1. Grado de acidez, basicidad o neutralidad de la solución contenida en el biodigestor.  3.1. Tiempo que inicia a degradarse la materia orgánica.		✓  ✓  ✓	
Determinar la relación causa-efecto de la generación de biogás a partir de la mezcla de sustratos	Generación de biogás	1. Cantidad de biogás generado	1.1. Litros de biogás generados y su relación causa – efecto con Factores químicos del sustrato. 1.2. Litros de		✓  ✓	

orgánicos sometidas al proceso de biodegradabilidad anaeróbica.			biogás generados y su relación causa-efecto con factores físicos.			
Identificar los beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud implementados en la zona rural.	Beneficios económicos, sociales, ambientales por el uso de biodigestores	<p>1. Beneficio económico</p> <p>2. Beneficio social</p> <p>3. Beneficio ambiental</p> <p>4. Beneficio en salud</p>	<p>1.1. Dinero ahorrado por no comprar leña o gas butano.</p> <p>1.2. Dinero ahorrado en consultas médicas y medicamentos</p> <p>2.2 Grado de satisfacción por el uso de biodigestores.</p> <p>3.1.Reducción de tala de arboles</p> <p>4.1.Reducción de enfermedades respiratorias y de visión causados por el humo.</p>	<p>✓</p> <p>✓</p> <p>✓</p> <p>✓</p>		

## **8.5 Métodos, técnicas e instrumentos para la recolección de datos e información**

En cuanto al enfoque filosófico, por el uso de los instrumentos de recolección de la información, análisis y vinculación de datos, el presente estudio se fundamenta en la integración sistémica de los métodos y técnicas cualitativas y cuantitativas de investigación, por tanto, se realiza mediante un enfoque mixto de investigación (Hernández et al., 2014, págs. 532-540).

El enfoque de la investigación antes descrito, se sustenta en el paradigma socio-crítico. Esta perspectiva surge como respuesta a las tradiciones positivistas e interpretativas y pretenden superar el reduccionismo de la primera y el conservadurismo de la segunda, admitiendo la posibilidad de una ciencia social que no sea ni puramente empírica ni solo interpretativa. El paradigma socio-crítico tiene como sus principios: 1) Conocer y comprender la realidad como praxis; 2) Unir teoría y práctica (conocimiento, acción y valores); 3) Orientar el conocimiento a emancipar y liberar al hombre; 4) Implicar al docente a partir de su autorreflexión (Popkewitz, 1988).

### **Implementación de métodos cuantitativos**

Se utilizaron dos formatos de registro elaborados previamente en el programa informático Excel, que sirvieron para el registro de las variables cuantitativas discretas y continuas que surgieron en la experimentación (tabla 35, 36). Luego se diseñó una base de datos en Infostat en la que se realizó un Diseño Completamente al Azar (DCA), de acuerdo al método de Fischer, siguiendo los procedimientos estadísticos establecidos en (Pedroza 1993).

### **Implementación de métodos cualitativos**

Según Pineda et al., (1994), la entrevista es la comunicación interpersonal establecida entre el investigador y el sujeto de estudio a fin de obtener respuestas verbales a las interrogantes planteadas sobre el problema propuesto. Se estima que este método es más eficaz que el cuestionario, ya que permite obtener una información más completa. A través de ella el investigador puede explicar el propósito del estudio y especificar claramente la información

que necesita; si hay una interpretación errónea de la pregunta permite aclararla, asegurando una mejor respuesta.

Es así que la técnica que se utilizó para la recolección de la información fue la entrevista individual semi-estructurada. Esta estuvo dirigida a los dueños de los biodigestores y técnicos que han dirigido la implementación de estos biodigestores, esto con la finalidad de indagar sobre los beneficios de esta tecnología.

## **8.6 Procedimientos para la recolección de datos e información**

El procedimiento que se siguió para la recolección de los datos e información se presentan de acuerdo con cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

### **Propiedades de los sustratos orgánicos**

Primeramente, se realizó la selección del sustrato. Este se escogió tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. La materia se debe encontrar en abundantes cantidades.
2. Debe tener bajo costo de adquisición (o nulo).
3. Debe representar un factor de contaminación ambiental.
4. Debe producir una cantidad de biogás razonable.

Se eligió como sustrato para la producción de biogás los residuos orgánicos de estiércol de ganado, caballo, cerdo y gallinaza que se generan en la zona rural de Nicaragua, en base a los criterios antes mencionados. Estas materias se obtuvieron de los desechos de fincas, porquerizas y avícolas cercanas a la ciudad de Estelí, utilizando bolsas etiquetadas para su recolecta. Es importante mencionar que se pidió permiso a los dueños de los lugares mencionados anteriormente.

Mata et al. (2000), plantea que, uno de los principales factores que afectan el metabolismo de las bacterias es la presencia y relación de nutrientes en el sustrato, por lo cual, es importante tener conocimiento de la cantidad y relación de nutrientes de los sustratos. Para ello fue necesario realizar una caracterización fisicoquímica de los mismos, ya que la misma determina el potencial con el que cuentan los sustratos para ser sometidos a un proceso biológico como la digestión anaerobia.

Para la caracterización de las propiedades básicas de la materia orgánica se basó en la norma APHA/SM 2540-B. Esta permite establecer la relación causa y efecto de los



sustratos sometidos a evaluación mediante la periodicidad de la realización de los experimentos. El contar con una normativa de evaluación es fundamental en el estudio de un fenómeno por lo que se llega a percibir mayor objetividad y fiabilidad en el proceso de investigación.

Esta etapa se realizó mediante una técnica gravimétrica utilizando una balanza analítica KERN con una precisión de 0,001 g, para el pesaje de los sustratos orgánicos. Posteriormente se introducen en un horno en capsulas de porcelana, a una temperatura de 105°C durante un tiempo determinado, calculándose así los sólidos totales o masa seca.



Figura 8. Muestras a 105 grados Celsius.

El método de determinación de los sólidos totales o masa seca, consistió en la evaporación total del agua contenida en la muestra en un crisol pesado y secado, hasta peso constante, en una estufa de la marca Hot Air Sterilizer a 105°C durante 24 horas.

Posteriormente, las muestras son enfriadas en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. Luego se enfriaron a temperatura ambiente y seguidamente se aplicó el proceso de pesado en la balanza analítica para conocer el porcentaje de humedad y masa seca respectivamente, el aumento de peso sobre el peso del crisol vacío representa la cantidad de sólidos totales o masa seca del sustrato.

El porcentaje de humedad: se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$M_b = M_h + M_s \quad \text{ec. 1}$$

Donde:  $M_b$  es la masa bruta o total,  $M_h$  masa húmeda,  $M_s$  masa seca. A partir de la ec.1 se determinan los porcentajes contenidos de masa húmeda, que se pierde por evaporación tras el secado, y de masa seca, por medio de:

$$M_{rh} \% = \frac{M_h}{M_b} * 100\% \quad \text{y} \quad M_{rs} \% = \frac{M_s}{M_b} * 100\% \quad \text{ec. 2}$$

Para llevar a cabo la determinación de los Sólidos Volátiles (SV), se calcinó el residuo seco procedente de la determinación de ST hasta peso constante en un horno de mufla de la marca HUMBOLDT a una temperatura de 550°C durante 4 horas. Concluido este proceso se procedió a la extracción de las muestras, pesándolas para conocer el porcentaje de cenizas y el contenido de sólidos volátiles presente en las muestras. La disminución de peso del crisol tras la incineración del residuo seco (ST), representa el contenido en SV.



Figura 9. Muestras a 550 grados Celsius.

La diferencia a la masa seca menos la de cenizas es la masa de sólidos volátiles:

$$M_{sv} = M_s - M_c \quad ec. 3$$

Después de encontrar los porcentajes de contenido de la masa se calcularon los pesos para los sólidos volátiles y las cenizas en base seca por medio de la siguiente ecuación:

$$M_{rsv} \% = \frac{M_{sv}}{M_s} * 100\% \quad y \quad M_{rc} \% = \frac{M_c}{M_s} * 100\% \quad ec. 4$$

También, se calculó el porcentaje de Carbono Orgánico (CO) a partir de los porcentajes de materia orgánica (Sólidos Volátiles). El porcentaje de CO se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$CO(\%) = \frac{MO}{1,8} \quad ec. 5$$

Donde:

1.8= factor de conversión

Se estimó el contenido de nitrógeno considerando que el contenido de este elemento forma 5 % de la materia orgánica (Plaster, 2000).

## **Correlación de los parámetros ambientales y operacionales del proceso de biodegradabilidad anaeróbica en un biodigestor tipo Batch**

Después de haber cargado los biodigestores con su respectiva mezcla y relaciones se midió y evaluó el potencial de hidrogeno. El pH es un parámetro muy importante para el control y optimización del proceso de digestión, así como para el control del metabolismo microbiano. El tratamiento biológico funciona de forma más efectiva en un pH en el rango 6-8,5. Sus variaciones pueden tener un gran impacto en la eficacia del tratamiento y llegar a inhibir totalmente la actividad microbiana.

**Método e instrumental.** Primeramente, se agitó el biodigestor suavemente para garantizar la homogeneidad. Luego se recolectó líquido de la mezcla a través de la válvula que se sitúa en la parte inferior del biodigestor portátil con la finalidad de facilitar el equilibrio entre electrodo y muestra. Seguidamente se introdujo el pH-metro portátil Milwaukee (rangos 0.0-14.0), se presionó el botón de medida, se esperó que se estabilizara el valor y finalmente se hizo la lectura de pH, este proceso se realizó 31 días consecutivos.

### **Rango de temperatura**

Para la obtención de los datos de este parámetro físico se dispuso de un termómetro digital. Este se insertó directamente en la parte superior del biodigestor para conocer el régimen de temperatura de operación de los biodigestores. El resultado se obtuvo directamente en la pantalla del equipo; se utilizó termómetro portátil Testo, con rangos 0.0-150.0 grados Celsius. Este proceso se realizó 31 días consecutivos.

Con los datos obtenidos se determinó:

1. El efecto de la temperatura sobre la producción de biogás.
2. El efecto del pH sobre la producción de biogás.
3. El efecto de la relación C/N sobre la producción de biogás.

## **Relación causa-efecto de la generación de biogás, partiendo de la mezcla de sustratos orgánicos sometidas al proceso de biodegradabilidad anaeróbica**

Esta etapa consistió en la construcción de la unidad experimental que consta de 5 biodigestores, con capacidad de 20 litros. En cada uno de ellos se perfora la parte frontal y se conecta una válvula de seguridad, además cuenta con una línea de entrada, con llaves de abre y cierre para la carga y descarga de los biodigestores. Se toma en cuenta el efecto de la luz debido que, aunque no es letal para los organismos metanogénicos, inhibe la metanogénesis, por lo tanto, se requiere completa oscuridad. Además, el ingreso de luz solar puede favorecer el crecimiento de algas al interior del reactor dando como resultado interferencia, por lo que se colocaron bajo techo.



Figura 10. Unidades experimentales.

**Método e Instrumental.** Para el almacenamiento del metano se colocó a la salida del biodigestor un sistema de manguera que va conectado a un neumático. Cabe destacar que, cada una de las líneas disponía de un filtro de purificación de gas que contenía hidróxido de sodio para eliminar el CO<sub>2</sub> y así obtener gas de buena calidad.

Una vez contruidos los biodigestores, se procedió a la recolección de los sustratos orgánicos en fincas cercanas a la ciudad de Estelí procedente de las actividades ganaderas, crianza de cerdo y de gallinas.

Para cargar los reactores de materia orgánica tipo Batch se procedió a aplicar las relaciones de (sustrato agua) con valores específicos que se determinaron una vez iniciada la fase experimental. Se aplicó la relación 2:1, es decir por cada 2 kilogramos de sustrato, un litro de agua potable, se mezclaron y agitaron en un recipiente para lograr homogeneidad. Los reactores tienen capacidad de 20 litros, se utilizó el 75% para la cámara líquida y el 25% para cámara gaseosa.

La cantidad de biogás se cuantificó aplicando una técnica volumétrica que se basa en el desplazamiento de líquido. Esta se realizó a los 15 días, una vez que los reactores empezaron a producir biogás y los neumáticos se cargaron de gas. Para la realización de esta prueba se usaron instrumentos de laboratorio tales como: base soporte, nuez doble, y una probeta graduada de 500 mL. Este método consiste en introducir la probeta en un recipiente con agua y dentro de ésta se coloca la manguera de salida del gas hasta la parte superior.

Una vez abiertas las válvulas, el gas hace que el nivel del agua en la probeta se desplace hacia abajo, por lo tanto, se mide la cantidad de biogás obtenida en cada uno de los sustratos. Recordando que los biodigestores tuvieron un tiempo de retención de 15 días y luego las respectivas mediciones que se reflejan en el formato de producción de biogás.



Figura 11. Medición de producción de biogás.



Figura 12. Llama de biogás.

## **Identificar los beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud del uso de biodigestores implementados en la zona rural**

En este proceso investigativo se utilizó la entrevista para recoger la diversidad de perspectivas, visiones y opiniones de los dueños de sistemas de biodigestores sobre el tema en cuestión, información sobre la realidad del uso de biodigestores y sus beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud.

Al diseñar las entrevistas se buscaba profundizar en la información y acceder a la subjetividad del entrevistado, pero teniendo claro que se realiza un estudio y una reflexión rigurosa sobre los objetivos que enmarcan esta investigación. En este caso, se realizó de la siguiente manera:

### *a) Preparación y elaboración de las entrevistas*

- Se dieron las instrucciones y aclaraciones para situar al entrevistado en el tema que se abordó.
- Las preguntas y el orden en que se hicieron se adecuaron a los participantes.
- La transparencia en las preguntas y la utilización de un lenguaje comprensible.
- Se aseguró la confidencialidad de la información.

Así mismo, la elaboración y aplicación de las entrevistas se realizó de la siguiente manera:

1. Preparación de la entrevista. Teniendo en cuenta el amplio conocimiento previo sobre el tema, se decidieron los objetivos y el proceso a seguir, así como la forma de recoger y de analizar la información.



2. Comienzo de la entrevista. Se explicó al entrevistado el objetivo de la entrevista, del proceso a seguir y del tiempo estimado.
3. Cuerpo de la entrevista. Fase inicial, fase media de especificación de los tópicos a tratar y fase final de síntesis.
4. Culminación de la entrevista. Se hicieron aclaraciones y agradecimientos.

*b) Condiciones de aplicación de las entrevistas*

Las entrevistas se concertaron en función de la disponibilidad de los informantes, se pidió un espacio para la aplicación de entrevistas y se concertaron citas en los momentos pertinentes, para no interrumpir sus actividades.

Las sesiones duraron aproximadamente entre 25 a 35 minutos. Estas fueron grabadas con celular como grabador de voz. Esto permitió obtener la información más importante, precisa y textual de los participantes. Cabe hacer la aclaración que, las entrevistas fueron en se hicieron a los dueños de los sistemas de biodigestores y a los técnicos de las empresas que instalaron los mismos.

Todas las entrevistas se realizaron individualmente respetando la hora marcada por el entrevistado. Se les comentaba que no hubiera interrupciones y, en todas las sesiones, se les solicitó permiso para grabar la conversación, asegurándoles la confidencialidad de la información registrada.

Al finalizar, el bloque de preguntas se le sugirió a los entrevistados, que aportaran las observaciones o comentarios que consideren oportunos, y que no se han abordado anteriormente.

## **Diseño de la guía de observación**

### *a) Elaboración de la guía de observación*

Otra técnica más de recogida de datos empleada para esta investigación es la observación. Se ha considerado importante porque ayuda a avanzar en el conocimiento de la realidad. Se aclara que este estudio no estuvo limitado a la observación de situaciones contextuales, por lo cual se realizó una observación profunda y sistemática.

Se elaboró una guía de observación no participante, con la intención de obtener datos visibles de los biodigestores que aportaron información específica sobre la condición actual de los sistemas y que complementaron la información recogida mediante los otros instrumentos.

Para la elaboración de esta guía se organizó un eje para la recolecta de datos específicos que registren las condiciones físicas de los sistemas de biodigestores. El estado de la estructura del biodigestor, la cerca perimetral, el estado del efluente y afluente. Así mismo si existían fugas en la tubería.

## 8.7 Plan de tabulación y análisis estadístico

A partir de los datos que fueron recolectados, se diseñó la base de datos correspondientes, utilizando el software estadístico InfoStat, versión 2018 para Windows. Una vez que se realizó el control de calidad de los datos registrados, se realizaron los análisis estadísticos pertinentes.

Así mismo, se realizaron los análisis inferenciales específicos o prueba de hipótesis, de acuerdo al compromiso establecido en los objetivos específicos, relacionado con el Análisis de Varianza Univariado (ANOVA de Fisher) y el test de Fisher (prueba de LSD). De igual manera, se realizó para las variables pertinentes, las técnicas de Análisis Multivariados tales como: el Análisis de Componente Principal (ACP), el Análisis de Varianza Multivariado (MANOVA, Lambda de Wilk). Los procedimientos estadísticos fueron realizados de acuerdo a Pedroza & Dicoyskiy (2006). Los análisis inferenciales antes descritos, se realizaron utilizando el software estadístico Infostat v 2018 para Windows.

### El análisis de las entrevistas

El proceso para el análisis de las entrevistas fue el siguiente: Una vez recogida la información a través de esta técnica, se realizó un análisis de discurso y de contenido con el objeto de identificar unidades de sentido. Ello, detallando los argumentos que respondían al objetivo de la investigación, así como aquéllos que confirmaban, avalaba y enriquecían los resultados de la misma. El tratamiento de la información se llevó a cabo una vez grabadas las entrevistas. Se escuchó la grabación retomando las respuestas más cercanas a las variables del estudio.

El análisis de las entrevistas en profundidad ha perseguido un fin específico y concreto: la comprensión del mundo tal y como el propio entrevistado lo construye. Esta tarea de estudio sitúa a los investigadores en una posición de EMIC<sup>3</sup>, es decir, el recorrido del

---

<sup>3</sup> **Emic:** es el que adoptan los propios participantes, es la visión que ellos consideran real, significativa o apropiada.

análisis del discurso respeta la subjetividad del entrevistado y evita cualquier tipo de criterio personal y/o postura ideológica por parte del investigador.

Cohen & Morrison (2011), afirman que, normalmente en la investigación cualitativa y en particular en las entrevistas se aporta una gran cantidad de información. Para ello, es necesario seleccionar los datos relevantes para el estudio que se pretende llevar a cabo. Es lo que en esta tesis se denomina reducción de datos y lo que otros autores como Parlett & Hamilton (1976), denominan progressive focussing o enfoque progresivo. Es decir, el investigador empieza analizando datos desde un ángulo amplio y progresivamente va seleccionando los conceptos que va encontrando más relevantes con el fin de obtener conclusiones pertinentes a sus objetivos.

Las tareas de análisis iniciaron con la escucha activa de la entrevista grabada y la lectura detenida del contenido transcrito. A continuación, el proceso de reconstrucción del corpus lingüístico para dar alcance a los objetivos establecidos. En el análisis del discurso se han contemplado dos dimensiones, el texto y el contexto. Por ello, la contextualización de los argumentos expresados por el entrevistado ha sido de orden transversal. El objetivo fundamental era la búsqueda y sistematización de las categorías utilizadas por el entrevistado. El recurso a las categorías ha permitido codificar toda la conversación a través de conceptos.

### **Aplicación de la guía de observación**

Para la observación se aprovechó el tiempo de las visitas concertadas con los dueños de los sistemas, reservando un espacio extra de 20 minutos para este fin. Se realizó un recorrido por las áreas donde está instalado el sistema, dando tiempo para que la información fuese registrada en ese mismo momento. La guía de observación representó una parte indispensable para el desarrollo de la investigación, ya que complementa la fase de evaluación a través de la entrevista.

## 9 Resultados

### 9.1 Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los sustratos orgánicos que permiten la generación de biogás

Con los datos obtenidos en el proceso de recolección de la información se realizaron los Análisis de la Varianza (ANOVA), mediante el cual se probaron las hipótesis referidas a los parámetros de posición (esperanza) de dos o más distribuciones. La hipótesis que se someten a prueba, generalmente se establecen con respecto a las medias de las poblaciones en estudio o de cada uno de los tratamientos evaluados en un experimento.

Antes de realizar el ANOVA, se hizo el diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos. Para tal efecto, se obtuvieron previamente las variables RDUO de las variables y PRED. A partir de los residuos y sus transformaciones se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes sustratos), sobre la variable % Masa Seca.

Tabla 8. Análisis de la Varianza para la variable %Masa Seca

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	14787.40	3	4929.13	33.38	<0.0001
Tratamientos	14787.40	3	4929.13	33.38	< <b>0.0001</b>
Error	11222.80	76	147.67		
<u>Total</u>	<u>26010.20</u>	<u>79</u>			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes sustratos sobre el % de Masa Seca, demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo y gallinaza), sobre la variable respuesta % de Masa Seca, lo cual se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de **H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$** . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes sustratos de ganado, cerdo, gallinaza y caballo), sobre la variable respuesta % de Masa Seca.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un Alfa = 0.05. Esta prueba permitió demostrar que, los sustratos de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de Masa Seca, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **56.90** para el estiércol de gallinaza y un valor mínimo de **19.00** para el sustrato de ganado. Por ello, se recomienda el estiércol de ganado en primer lugar y luego los de caballo y cerdo.

Tabla 9. Test: LSD Fisher Alfa=005 DMS=7.65353

Tratamientos	Medias	n	E.E.
ganado	19.00	20	2.72 A
caballo	33.30	20	2.72 B
cerdo	39.40	20	2.72 B
gallinaza	56.90	20	2.72 C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

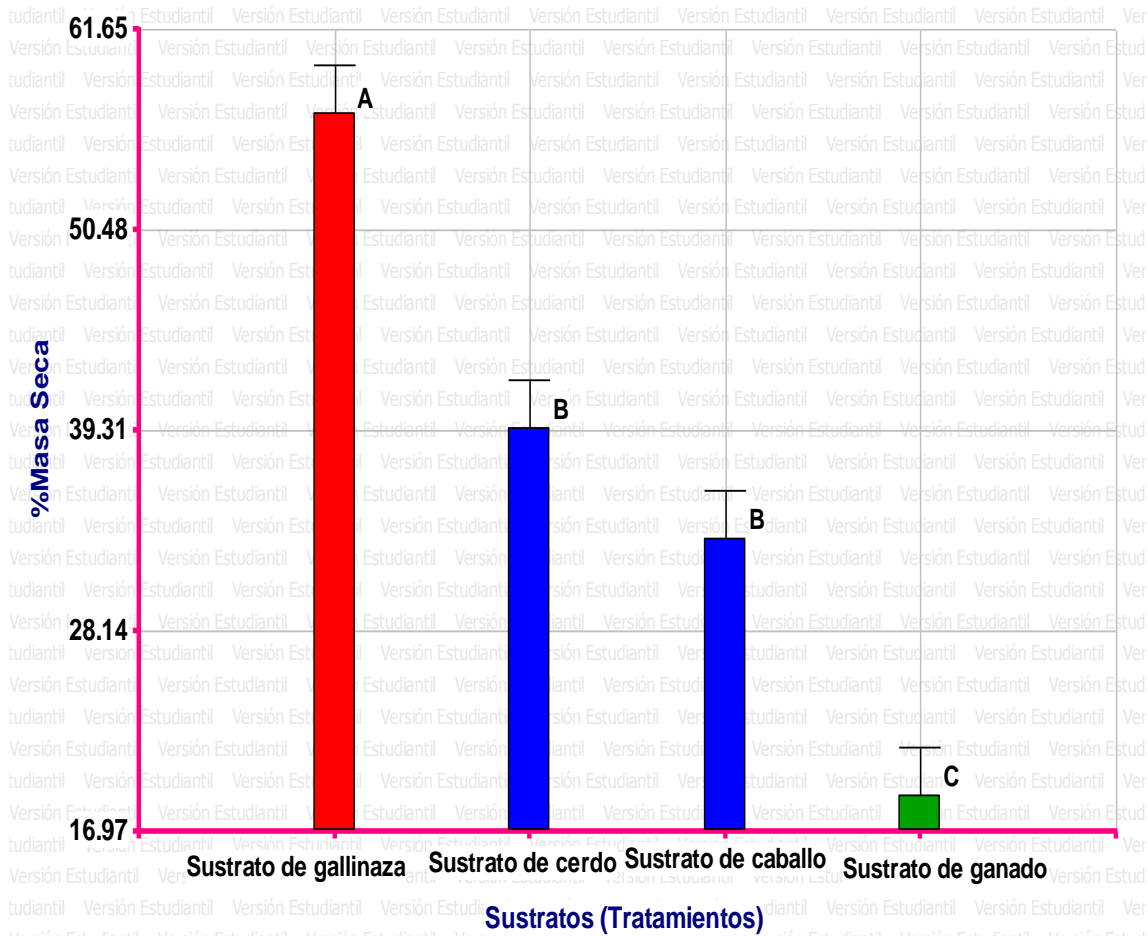


Figura 13. Masa seca de los sustratos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes sustratos), en relación a la variable % de cenizas. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 10. Análisis de la Varianza para la variable % de cenizas

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	13205.91	3	4401.97	62.55	<0.0001
Tratamientos	13205.91	3	4401.97	62.55	< <b>0.0001</b>
Error	5348.61	76	70.38		
Total	18554.52	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes estiércoles en relación al % de cenizas, demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable % de cenizas, lo que se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable % de cenizas.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un  $\text{Alfa} = 0.05$ , permitió demostrar que, los sustratos de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la **variable** dependiente % de cenizas, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **59.85** para el estiércol de gallinaza y un valor mínimo de **24.78** para el estiércol de ganado.

Tabla 11. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.28362

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
caballo	24.78	20	1.88	A
cerdo	34.31	20	1.88	B
ganado	41.63	20	1.88	C
<u>gallinaza</u>	<u>59.85</u>	<u>20</u>	<u>1.88</u>	<u>D</u>

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*



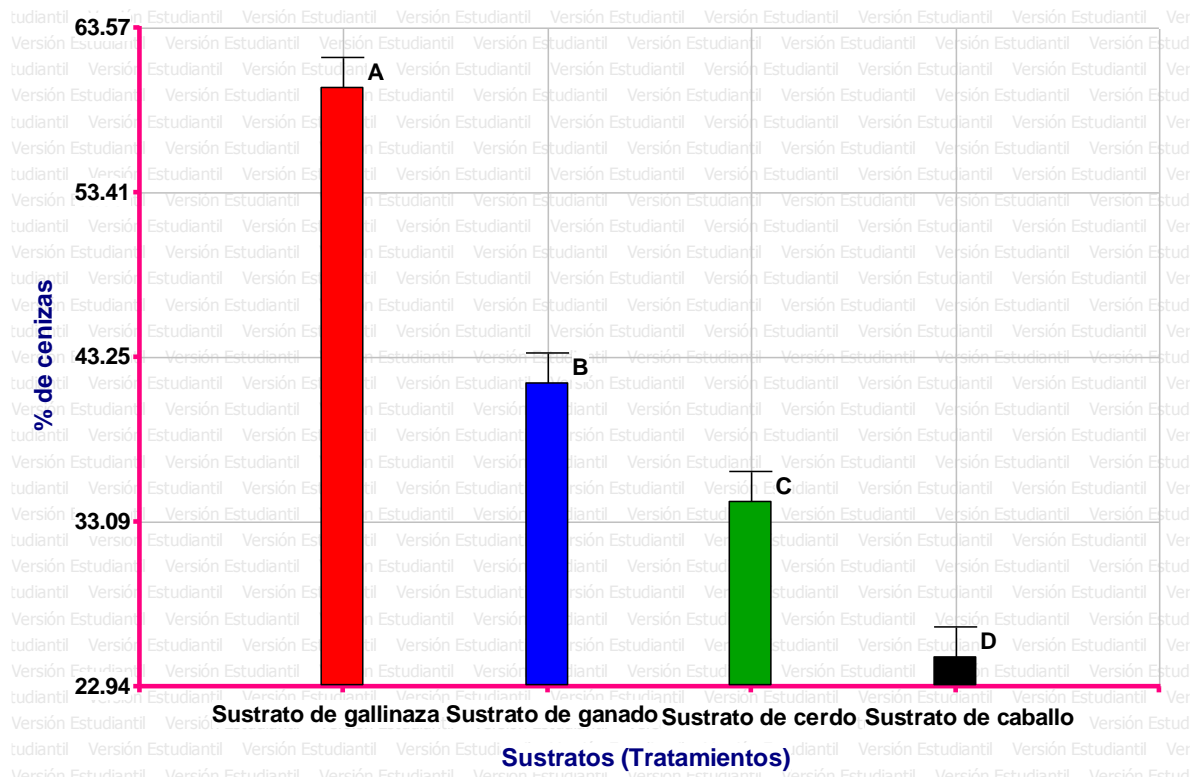


Figura 14. Cenizas de los sustratos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes sustratos), en relación a la variable % de Sólidos Volátiles. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 12. Análisis de la Varianza para la variable % Sólidos Volátiles

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	13169.10	3	4389.70	62.44	<0.0001
Tratamientos	13169.10	3	4389.70	62.44	< <b>0.0001</b>
Error	5343.05	76	70.30		
Total	18512.16	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes estiércoles en relación al % de Sólidos Volátiles, demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable respuesta % de Sólidos Volátiles, lo que se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), en relación a la variable % de Sólidos volátiles.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un *Alfa* = 0.05, permitió demostrar que, los sustratos de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la **variable** dependiente % de Sólidos Volátiles, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **75.16** para el estiércol de caballo y un valor mínimo de **40.16** para el sustrato de gallinaza.

Tabla 13. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.28088

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
gallinaza	40.16	20	1.87	A
ganado	58.37	20	1.87	B
cerdo	65.69	20	1.87	C
caballo	75.16	20	1.87	D

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

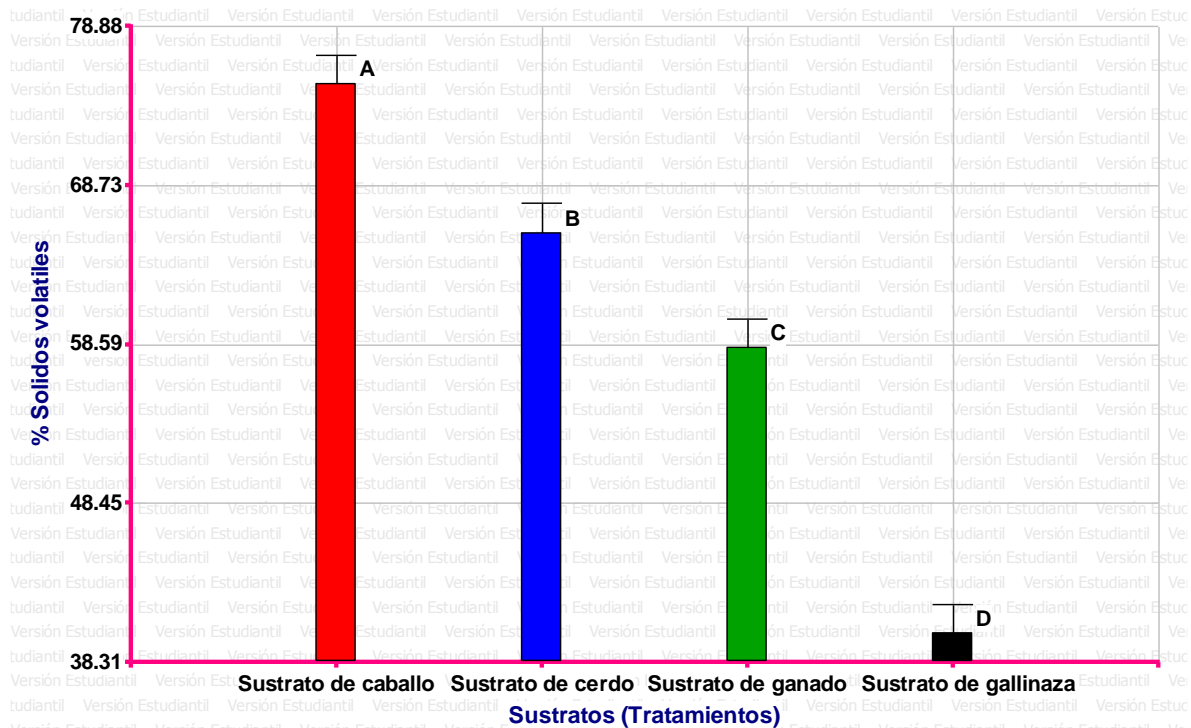


Figura 15. Sólidos Volátiles de los sustratos orgánicos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes estiércoles), sobre la variable % de masa húmeda. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 14. Análisis de la Varianza para la variable % masa de húmeda

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	14787.40	3	4929.13	33.26	<0.0001
Tratamientos	14787.40	3	4929.13	33.26	< <b>0.0001</b>
Error	11262.80	76	148.19		
Total	26050.20	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes estiércoles sobre el % de masa húmeda, demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable % masa húmeda, lo que se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), referente a la variable % de masa húmeda.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un Alfa = 0.05, esta permitió demostrar que, los sustratos de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la variable dependiente % de masa húmeda, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **81.00** para el sustrato de estiércol de ganado y un valor mínimo de 43.10 para el sustrato de gallinaza. Por lo tanto, se recomienda usar el estiércol de ganado por contener mayor humedad, también se recomienda el sustrato de cerdo y caballo, estos no tienen diferencias estadísticas significativas.

Tabla 15. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=7.66716

Tratamientos	Medias	n	E.E.
gallinaza	43.10	20	2.72 A
cerdo	60.60	20	2.72 B
caballo	66.70	20	2.72 B
ganado	81.00	20	2.72 C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

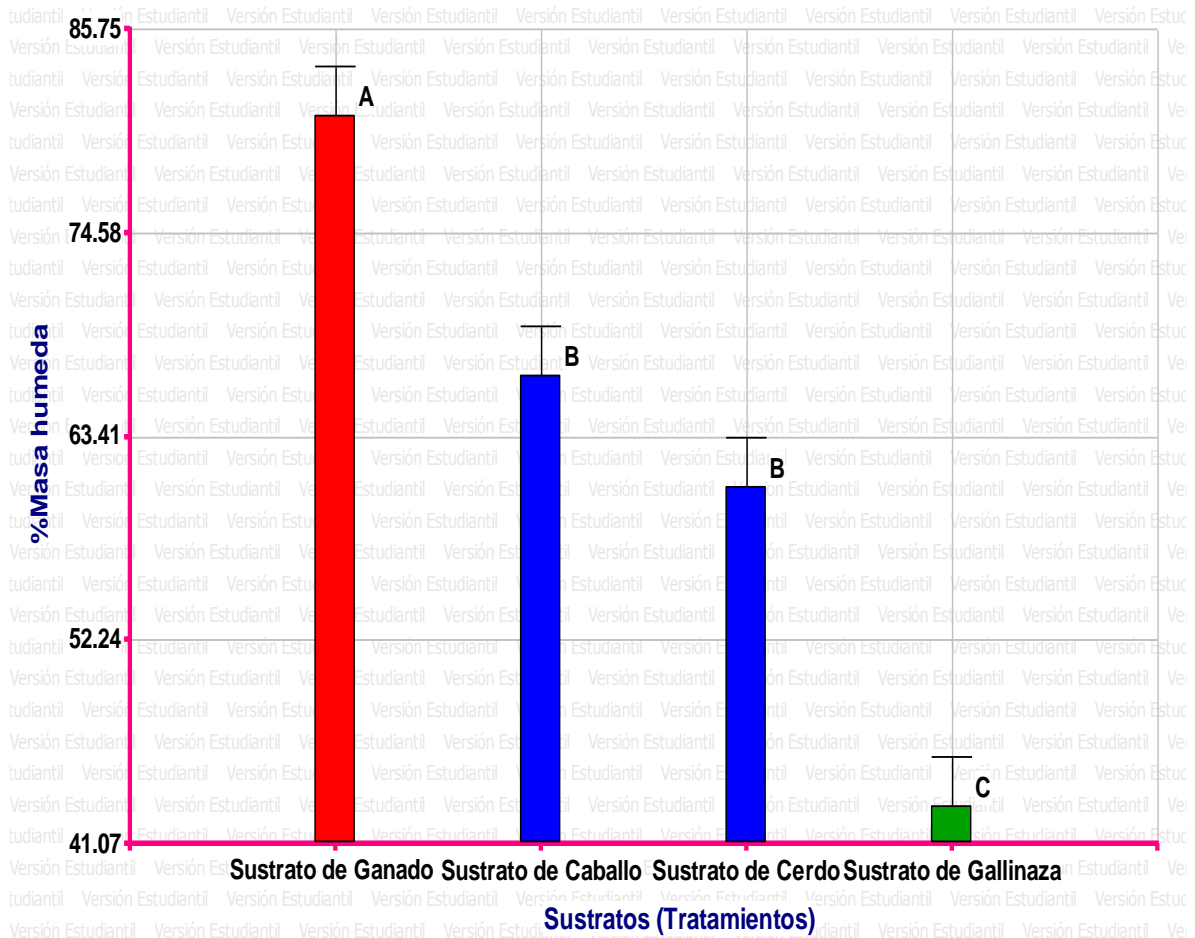


Figura 16. Masa húmeda de los sustratos orgánicos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes estiércoles), sobre la variable % de carbono. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 16. Análisis de la Varianza para la variable % carbono

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4001.43	3	1333.81	61.67	<0.0001
Tratamientos	4001.43	3	1333.81	61.67	< <b>0.0001</b>
Error	1643.61	76	21.63		
Total	5645.05	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes estiércoles sobre el % de carbono demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable respuesta **% carbono**, lo cual se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable respuesta % carbono.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un  $\text{Alfa} = 0.05$ , estiércoles de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, en relación a la variable dependiente % de carbono, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **41.80** para el sustrato estiércol de caballo y un valor mínimo de **22.46** para el sustrato de gallinaza.

Tabla 17. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.92894

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
Gallinaza	22.46	20	1.04	A
Ganado	32.40	20	1.04	B
Cerdo	36.40	20	1.04	C
Caballo	41.80	20	1.04	D

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).*

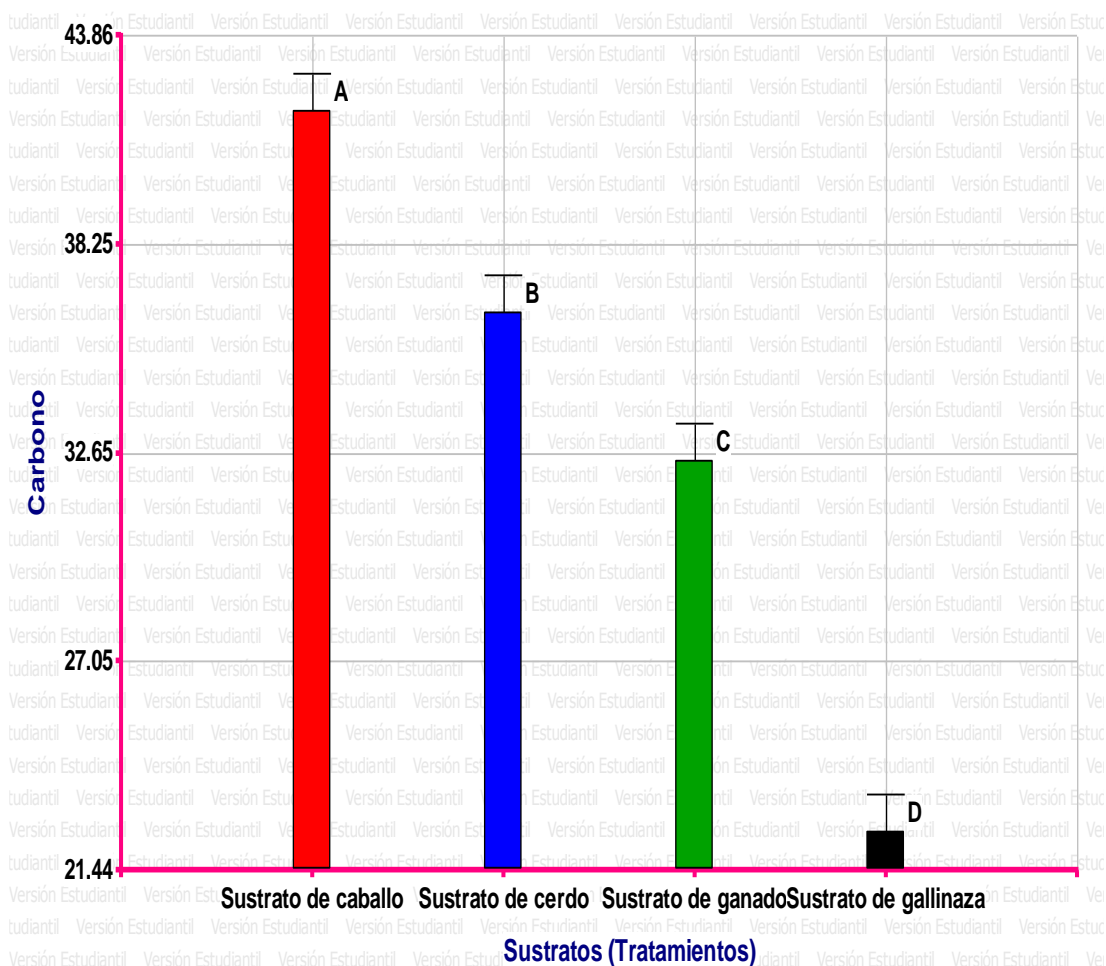


Figura 17. Carbono de los sustratos orgánicos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación causa-efecto de los tratamientos (efecto de diferentes estiércoles), en relación a la variable % de **nitrógeno**. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 18. Análisis de la Varianza para la variable % de nitrógeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7.02	3	2.34	16.28	<0.0001
Tratamientos	7.02	3	2.34	16.28	< <b>0.0001</b>
Error	10.92	76	70.14		
Total	17.94	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes sustratos sobre el % de nitrógeno demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable respuesta % de **nitrógeno**, lo cual se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de **H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$** . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, demostrándose que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, gallinaza y caballo), sobre la variable respuesta % de **nitrógeno**.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un *Alfa = 0.05*, esta permitió demostrar que, los sustratos estiércol de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la **variable** dependiente % de nitrógeno, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **1.27** para el sustrato estiércol de cerdo y un valor mínimo de **0.55** para el estiércol de ganado.

Tabla 19. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.23875

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
ganado	0.55	20	0.08	A
caballo	1.20	20	0.08	B
gallinaza	1.22	20	0.08	B
cerdo	1.27	20	0.08	B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).*



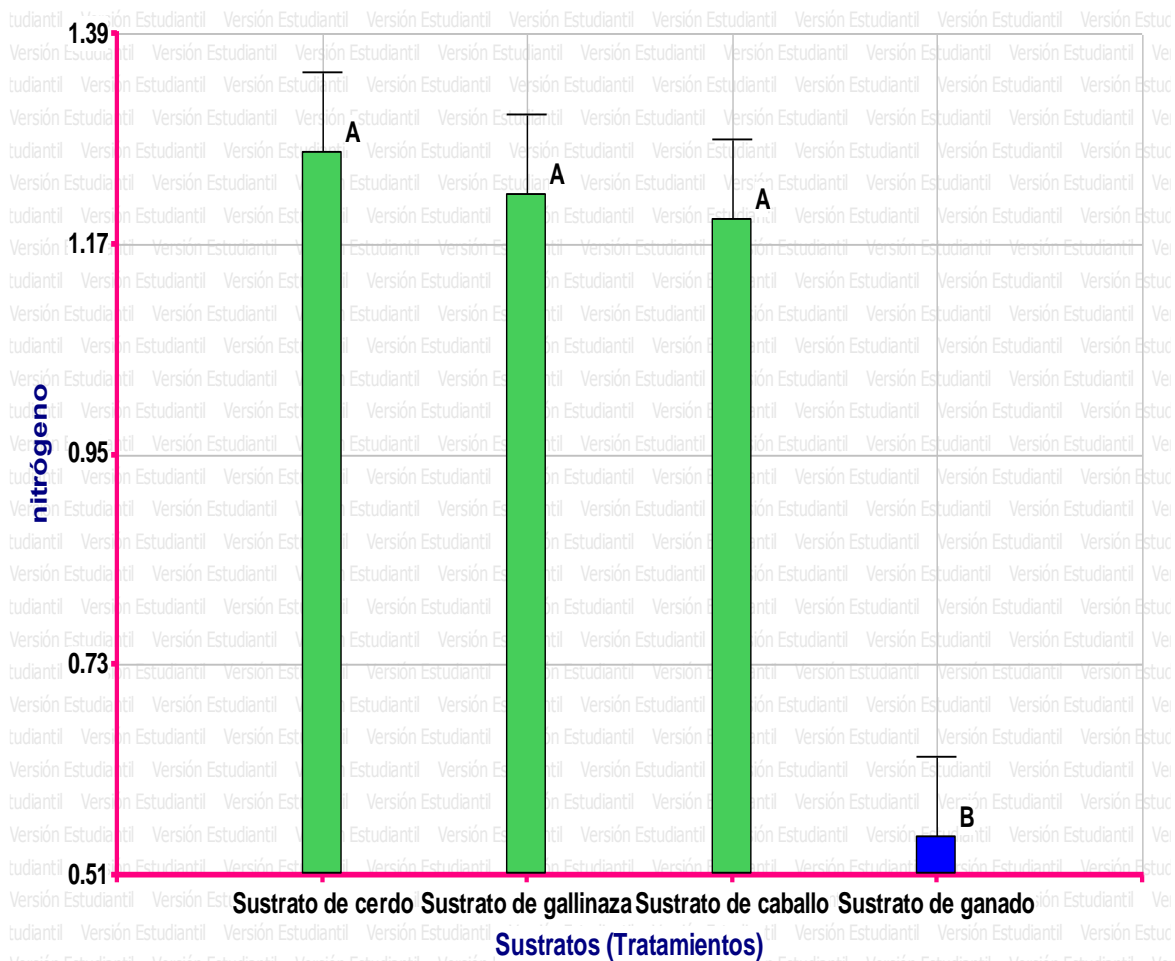


Figura 18. Nitrógeno de los sustratos orgánicos.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes estiércoles), en relación a la variable **relación carbono/nitrógeno**. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 20. Análisis de la Varianza para la variable relación carbono/ nitrógeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	18814.40	3	6271.47	85.69	<0.0001
Tratamientos	18814.40	3	6271.47	85.69	< <b>0.0001</b>
Error	5562.40	76	73.19		
Total	24376.80	79			

El ANOVA realizado, para evaluar el efecto de los diferentes sustratos referente a la relación **carbono/ nitrógeno** demostró lo siguiente:

Existe un *efecto significativo* del tratamiento (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, caballo y gallinaza), sobre la variable respuesta **relación carbono/ nitrógeno**, lo que se evidencia con un  $p = 0,0001$ , que resultó ser **menor** que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de **H<sub>0</sub>:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$** . Esto quiere decir que la respuesta estadística es significativa, lo cual demostró que existe una relación de causa-efecto de los tratamientos (diferentes estiércoles de ganado, cerdo, gallinaza y caballo), respecto a la variable **relación carbono/nitrógeno**.

Posterior al ANOVA, se realizó la prueba de rangos múltiples o prueba LSD Fisher (*Diferencia Mínima Significativa*), con un *Alfa = 0.05*, esta prueba permitió demostrar que, los sustratos de ganado, caballo, cerdo y gallinaza, tienen diferencias estadísticas entre sí, con respecto a la **variable** dependiente **relación carbono/nitrógeno**, para la cual se obtuvo un valor promedio máximo de **62.30** para el estiércol de ganado y un valor mínimo de **22.70** para el sustrato de gallinaza.

Tabla 21. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=5.38818

Tratamientos	Medias	n	E.E.	
gallinaza	22.70	20	1.91	A
cerdo	28.90	20	1.91	B
caballo	31.30	20	1.91	B
ganado	62.30	20	1.91	C

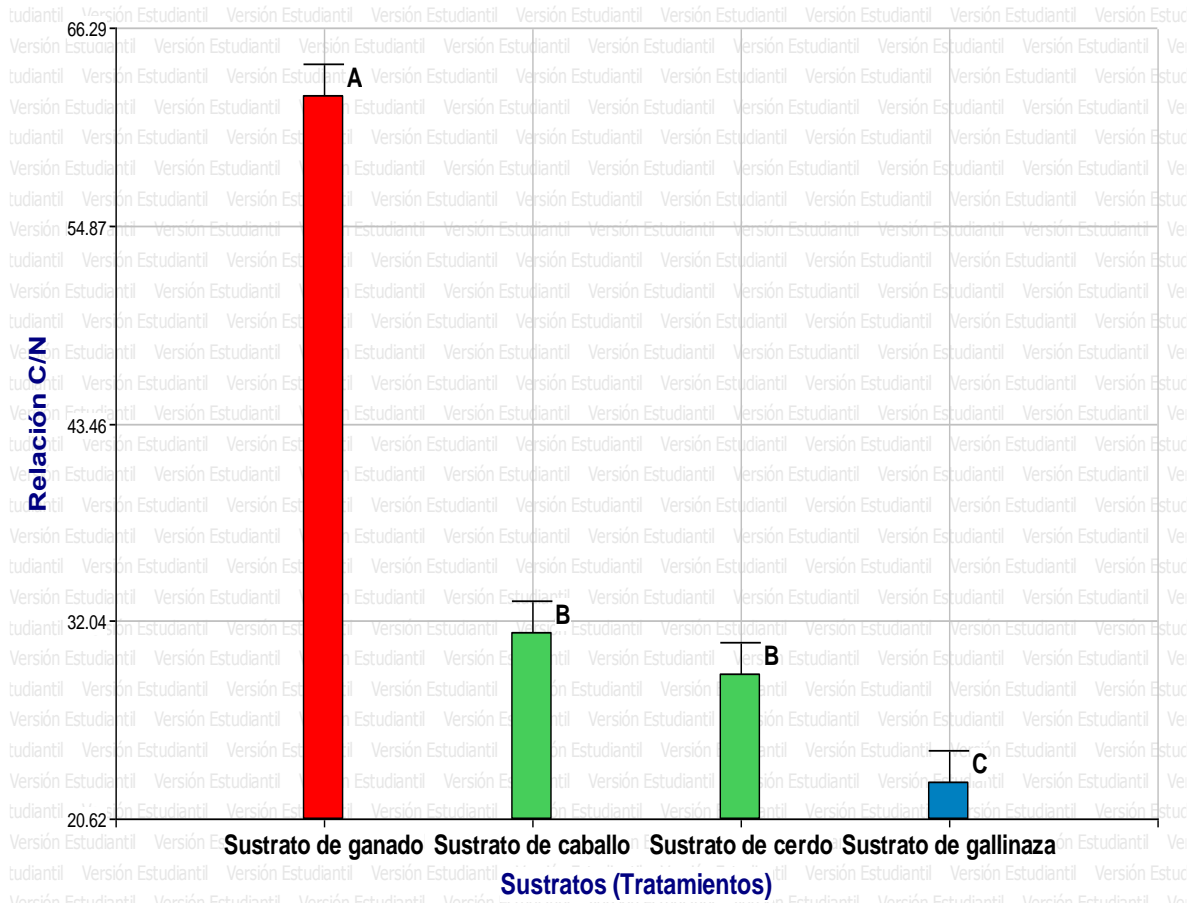


Figura 19. Relación C/N de los sustratos orgánicos.

Tabla 22. Análisis de la Varianza (Wilks)

F.V.	Estadístico F	gl(num)	gl(den)	p
Sustratos (Tratamientos)	0.02 25.57	21	202	<0.0001

Tabla 23. Prueba Hotelling Alfa=0.05

Sustratos (Trat)	Masa Húmeda	Masa Seca	%Cenizas	% Sol volátiles	C N	Relación C/N	n	
Sustrato Ganado	81.00	19.00	41.63	58.37	32.40	0.55	62.30	20 A
Sustrato Gallinaza	43.10	56.90	59.85	40.16	22.46	1.22	22.70	20 B
Sustrato Cerdo	60.60	39.40	34.31	65.69	36.40	1.27	28.90	20 C
Sustrato Caballo	66.70	33.30	24.78	75.16	41.80	1.20	31.30	20 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

El análisis de varianza multivariado fue realizado con el fin de estimar las diferencias entre las medias de los tratamientos, mediante la comparación conjunta de las variables dependientes observadas, masa húmeda, Masa Seca, % de cenizas, % Sólidos volátiles, carbono, nitrógeno y la relación C/N. Según la prueba realizada de Hotelling con Alfa=0.05, existen diferencias significativas entre los sustratos y las variables dependientes evaluadas. En general, se observó que el estiércol de ganado presentó un vector de medias mayor que el resto de sustratos, diferenciándose significativamente de estos y por lo tanto el sustrato de ganado presenta las mejores propiedades fisicoquímicas de los estiércoles en estudio.

### Combinación lineal o componente principal

$$CP1 = -0.45 \text{ MH} + 0.45 \text{ MS} + 0.36 \text{ Ceniza} - 0.36 \text{ Sólidos Volátiles} - 0.36 \text{ carbono} + 0.27 \text{ nitrógeno} - 0.34 \text{ relación C/N}$$

$$CP2 = -0.16 \text{ MH} + 0.16 \text{ MS} - 0.40 \text{ ceniza} + 0.40 \text{ Sólidos Volátiles} + 0.41 \text{ carbono} + 0.52 \text{ nitrógeno} - 0.43 \text{ relación C/N}$$

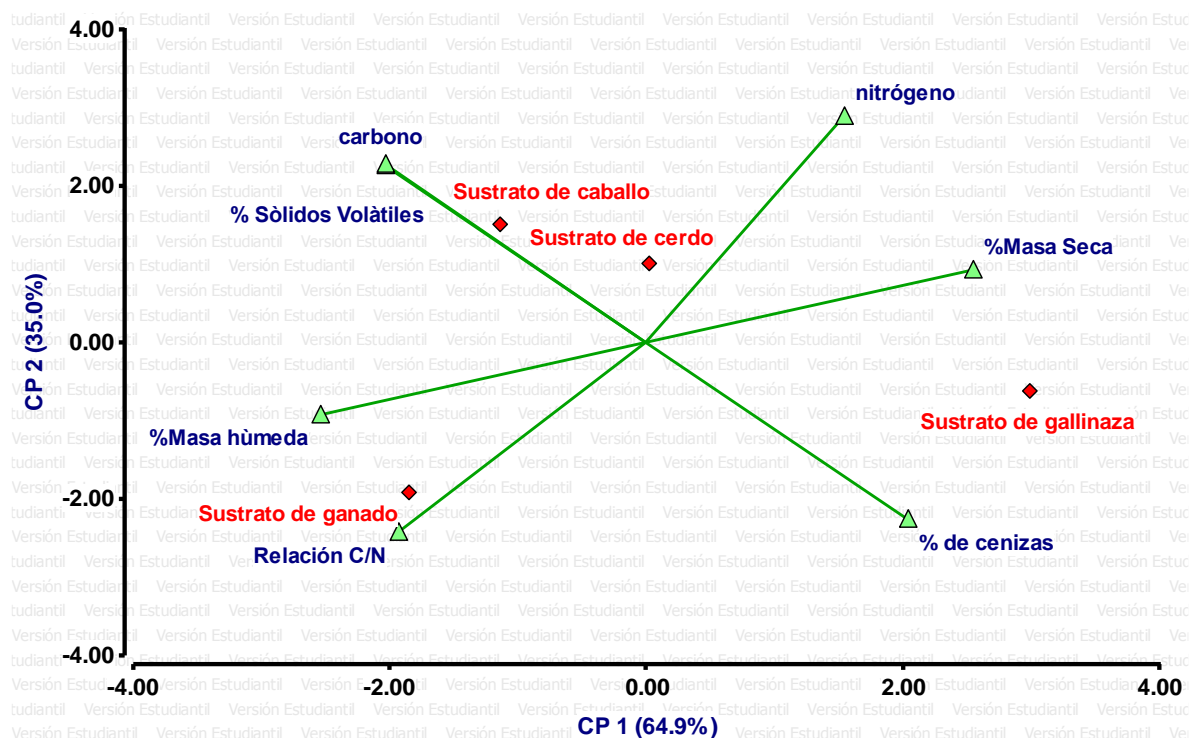


Figura 20. Resultados del análisis de componente principal.

En la figura 20 se presentan los resultados del ACP, a través del gráfico bi-plot, los sustratos (tratamientos) y las variables dependientes son representados en este gráfico, masa húmeda, Masa Seca, % de cenizas, % Sólidos volátiles, carbono, nitrógeno y la relación C/N. En la figura 34, puede verse la dispersión de las observaciones en un plano compuesto por un eje denominado, componente principal 1 (CP1) y la componente principal 2 (CP2). Los componentes principales 1 y 2, explican el 99.9% de la variabilidad total de los datos, por lo tanto, existe alto grado de representatividad de estos datos en relación a la asociatividad de las variables dependientes.

Tal como se observa en la figura 34, según la proximidad el estiércol de caballo está más asociado al carbono y % de sólidos volátiles. Entre nitrógeno y % de masa seca hay un ángulo menor a 90 grados, lo que significa una fuerte correlación entre ellos. Existe una leve correlación entre % de masa seca y % de cenizas, leve correlación entre % de masa húmeda y relación C/N, leve correlación entre % de masa seca y % sólidos volátiles. Así mismo, se observa una correlación inversa entre % de masa seca y % de masa húmeda, es decir, cuando una de estas variables aumenta la otra disminuye y viceversa.

## 9.2 Correlación de parámetros ambientales y operacionales del proceso de biodegradabilidad

El ANACORR, consiste en determinar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas continuas, o calificar tal relación, lo cual se mide por el coeficiente de correlación “r” de Pearson y se realiza bajo la hipótesis nula de  $H_0: \rho = 0$  (Casanoves, 2007).

De acuerdo con Rodríguez (2012), para la interpretación del coeficiente de correlación “r” de Pearson, éste toma valores entre -1 y +1. Valores próximos a -1, indican una fuerte a perfecta asociación negativa, valores cercanos a -0.5, indican una asociación moderada negativa y valores próximos a 0 indican una débil asociación entre las variables. Por otra parte, valores próximos a 1, muestran una fuerte a perfecta asociación positiva, valores cercanos a 0.5 revelan una asociación moderada positiva.

A continuación, se presenta el procedimiento del ANACORR realizado con IS para determinar la correlación entre las variables, pH y producción de biogás; temperatura y producción de biogás para saber si estas variables están correlacionadas o no, lo cual aportará pistas para estudiar las causas de la producción de biogás de los diferentes estiércoles del estudio.

Tabla 24. Correlación de Pearson, producción de biogás y pH

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Producción de biogás	Ph	40	0.56	0.0002
Ph	Producción de biogás	40	0.56	0.0002
Ph	Ph	40	1.00	<0.0001

El análisis de correlación de Pearson realizado para las variables pH y producción de biogás, dio como resultado un coeficiente de correlación “r” igual a 0,56, indicando que se tiene una asociación moderada positiva entre las variables. Este moderado valor del “r” fue obtenido con un  $p = 0,0002$ , el cual resulta ser menor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \rho = 0$ , esto quiere decir que la respuesta estadística obtenida es una correlación significativa, por lo que se demostró que existe correlación entre las variables pH y producción de biogás. De ahí que, se confirma la hipótesis de que el pH cuando se encuentra en los niveles óptimos está asociado con la producción de biogás.

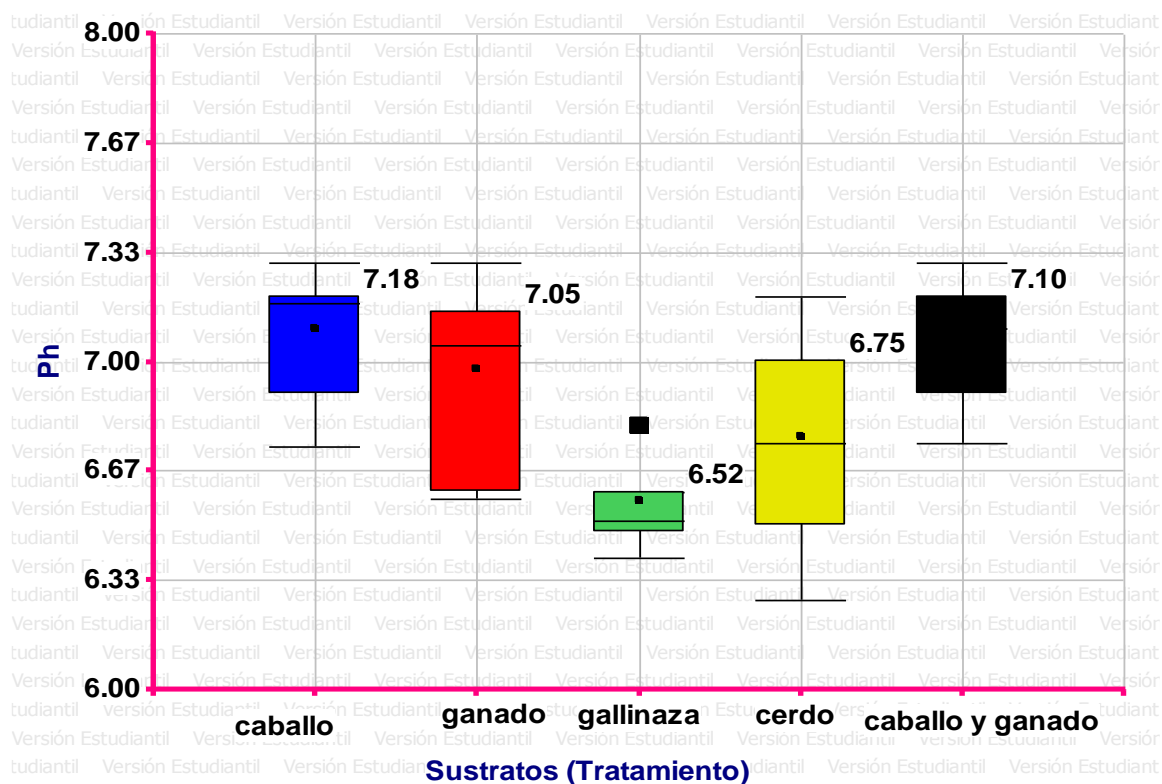


Figura 21. pH de los biodigestores.

Referente a la segunda correlación realizada entre las variables, temperatura y producción de biogás para saber si estas están correlacionadas se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 25. Correlación de Pearson producción de biogás y temperatura

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Producción de biogás	Temperatura	40	0.73	0.0463
Temperatura	Producción de biogás	40	0.73	0.0463
Temperatura	Temperatura	40	1.00	0.0001

El análisis de correlación de Pearson realizado para las variables temperatura y producción de biogás, dio como resultado un coeficiente de correlación “r” igual a 0,73, el cual es un valor próximo a 1, indicando que se tiene una fuerte asociación entre las variables. Este fuerte valor del “r” fue obtenido con un  $p = 0,0463$ , el cual resulta ser menor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \rho = 0$ , esto quiere decir que la respuesta estadística obtenida es una correlación significativa, por lo que se demostró que existe correlación entre las variables temperatura y producción de biogás. De ahí que, se confirma la hipótesis de que la producción de biogás, está asociado con la temperatura alcanzada en los biodigestores.

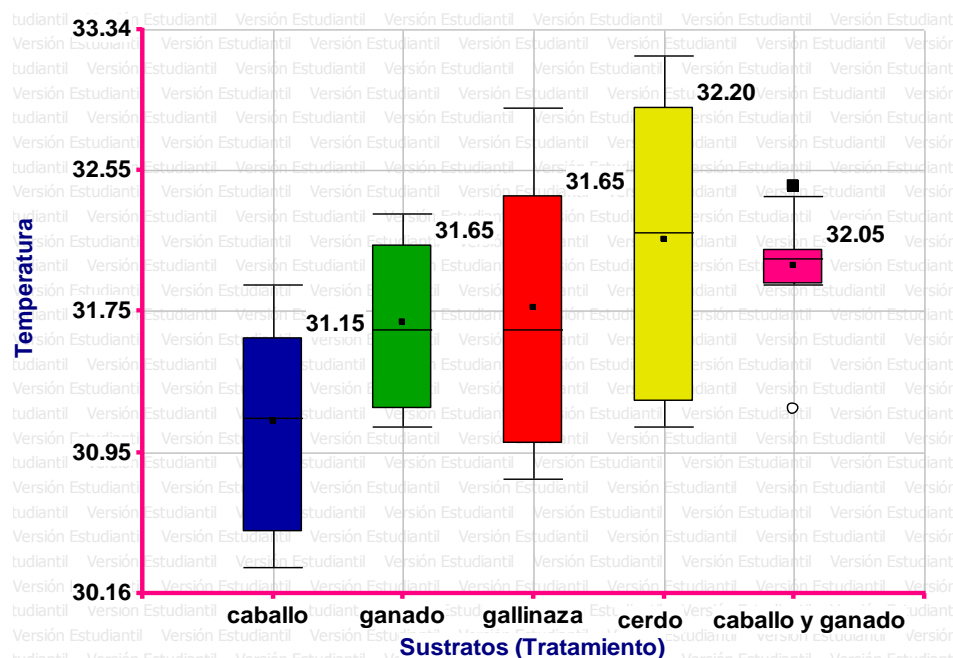


Figura 22. Temperatura de los biodigestores.



Tabla 26. Correlación de Pearson producción de biogás y relación C/N

Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Producción de biogás	Relación C/N	40	0.03	0.8563
Relación C/N	Producción de biogás	40	0.03	0.8563
Relación C/N	Relación C/N	40	1.00	0.0001

El análisis de correlación de Pearson realizado para las variables relación C/N (Carbono/Nitrógeno) y producción de biogás, dio como resultado un coeficiente de correlación “r” igual a 0,03, el cual es un valor próximo a 0, indicando que se tiene una débil asociación entre las variables. Este débil valor del “r” fue obtenido con un  $p = 0,8563$ , el cual resulta ser mayor que el nivel crítico de comparación  $\alpha = 0.05$ . Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \rho = 0$ . Esto quiere decir que la respuesta estadística obtenida es una correlación no significativa, por lo que no se demostró que exista correlación entre las variables relación C/N (Carbono/Nitrógeno) y producción de biogás. De ahí que, no se confirma la hipótesis de que la producción de biogás, está asociado con la relación C/N (Carbono/Nitrógeno) de cada sustrato estudiado.

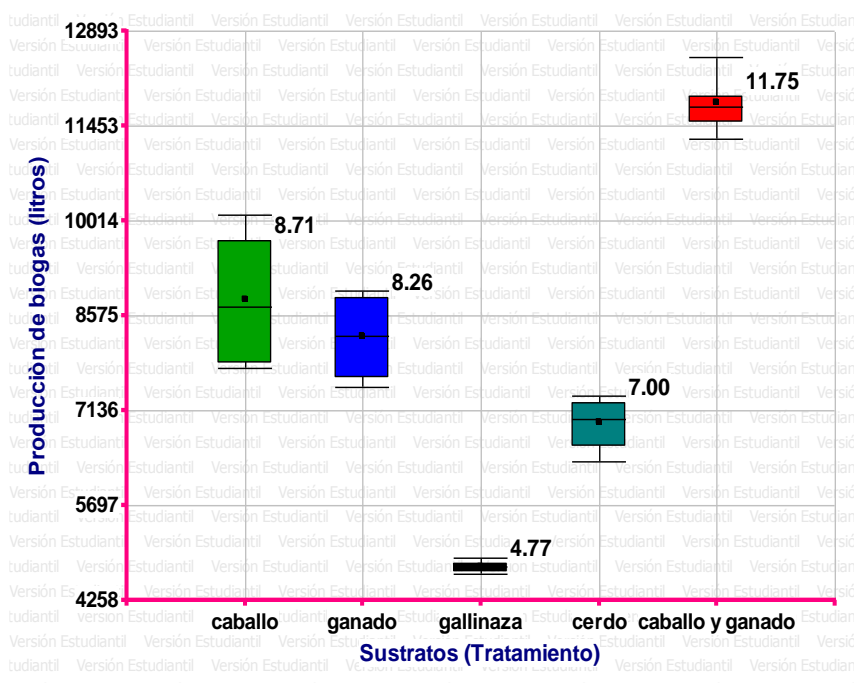


Figura 23. Producción de biogás.

### 9.3 Relación causa-efecto de la generación de biogás a partir de la mezcla de sustratos orgánicos sometidas al proceso de biodegradabilidad anaeróbica

Antes de realizar el ANOVA, se efectuó el diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos. Para tal efecto, se obtuvieron previamente las variables RDUO y PRED. A partir de los residuos y sus transformaciones se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación causa-efecto de la generación de biogás (efecto de diferentes biodigestores), en relación a la variable Relación C/N. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 27. Análisis de la Varianza relación C/N

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4087.00	4	1021.75	96.82	<0.0001
Sustratos	4087.00	4	1021.75	96.82	<0.0001
Error	369.38	35	10.55		
Total	4456.38	39			

Tabla 28. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.29753

Sustratos (Tratamiento)	Medias	n	E.E.	
Sustrato de ganado	53.25	8	1.15	A
Sustrato de gallinaza	29.25	8	1.15	B
Sustrato de caballo y ganado	28.88	8	1.15	B
Sustrato de caballo	27.75	8	1.15	B
Sustrato de cerdo	26.50	8	1.15	B

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )*

La lectura de la salida muestra que la variable dependiente es: relación C/N (carbono/nitrógeno), que hay 40 observaciones en total y que el 92% ( $R^2$ ) de la variabilidad total de la variable de respuesta se puede explicar conociendo las condiciones experimentales a las que han sido expuestos los sustratos. El coeficiente de variación tiene una magnitud que es equivalente al 9.81% (CV) del valor medio de la variable de respuesta.

El análisis del cuadro de ANOVA indica que existe un efecto significativo ( $p=0.0001$ ) de los estiércoles de caballo, cerdo, ganado, gallinaza y caballo + ganado, sobre la relación C/N (carbono/nitrógeno), Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ .

La aplicación de la prueba de Fisher, que produce una DMS=3.29753, indica que la diferencia entre tratamientos, es sólo debida al tipo de sustrato en este caso de ganado. Bajo esta condición el porcentaje promedio de la relación C/N (carbono/nitrógeno) fue de 53.25%., mientras que en los restantes sustratos este porcentaje estuvo alrededor del 29% no pudiéndose distinguir estadísticamente entre el efecto que tienen los diferentes estiércoles de caballo, gallinaza, cerdo, caballo + ganado.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación causa-efecto de la generación de biogás (efecto de diferentes biodigestores), en relación a la variable Ph. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 29. Análisis de Varianza pH

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.56	4	0.39	7.24	0.0002
Sustratos (tratamiento)	1.56	4	0.39	7.24	0.0002
Error	1.89	35	0.05		
Total	3.46	39			

Tabla 30. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.23595

Sustratos (tratamiento)	Medias	n	E.E.	
Sustrato de caballo	7.10	8	0.08	A
Sustrato de caballo y ganado	7.07	8	0.08	A
Sustrato de ganado	6.98	8	0.08	A B
Sustrato de cerdo	6.77	8	0.08	B C
Sustrato de gallinaza	6.58	8	0.08	C

La lectura de la salida muestra que la variable dependiente es: pH, que hay 40 observaciones en total y que el 45% ( $R^2$ ) de la variabilidad total de la variable de respuesta se puede explicar conociendo las condiciones experimentales a las que han sido expuestos los sustratos. El coeficiente de variación tiene una magnitud que es equivalente al 3.37% (CV) del valor medio de la variable de respuesta.

El análisis del cuadro de ANOVA indica que existe un efecto significativo ( $p=0.0002$ ) de los estiércoles de caballo, gallinaza, cerdo, ganado, caballo + ganado sobre el pH, Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ .

La aplicación de la prueba de Fisher, que produce una DMS= 0.23595, indica que existen diferencias estadísticas entre los tratamientos de ganado, caballo, caballo + ganado el porcentaje promedio de pH fue de 7, mientras que en los restantes sustratos este porcentaje estuvo alrededor de 6.8 pudiéndose distinguir diferencias estadísticamente entre sustratos de gallinaza y cerdo.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación de causa-efecto de los tratamientos, (efecto de diferentes estiércoles), en relación a la variable Temperatura. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 31. Análisis de la Varianza de la temperatura

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4.94	4	1.23	2.72	0.0450
Sustratos (tratamiento)	4.94	4	1.23	2.72	0.0450
Error	15.87	35	0.45		
Total	20.81	39			

Tabla 32. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.68354

Sustratos (tratamiento)	Medias	n	E.E.	
Sustrato de cerdo	32.16	8	0.24	A
Sustrato de caballo y ganado	32.01	8	0.24	A
Sustrato de gallinaza	31.77	8	0.24	A B
Sustrato de ganado	31.69	8	0.24	A B
Sustrato de caballo	31.13	8	0.24	B

La lectura de la salida muestra que la variable dependiente es: temperatura, que hay 40 observaciones en total y que el 24% ( $R^2$ ) de la variabilidad total de la variable de respuesta se puede explicar conociendo las condiciones experimentales a las que han sido expuestos los sustratos. El coeficiente de variación tiene una magnitud que es equivalente al 2.12% (CV) del valor medio de la variable de respuesta.

El análisis del cuadro de ANOVA indica que existe un efecto significativo ( $p=0.0450$ ) de los estiércoles de caballo, gallinaza, cerdo, ganado, caballo + ganado sobre la temperatura, Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ .

La aplicación de la prueba de Fisher, que produce una DMS= 0.68354, indica que la diferencia entre tratamientos es sólo debida al tipo de sustratos en este caso de cerdo, ganado, caballo + ganado, gallinaza y ganado. Bajo esta condición el porcentaje promedio de Temperatura fue de alrededor de 32 grados Celsius, mientras que en el sustrato de

caballo estuvo alrededor de 31 grados Celsius, no pudiéndose distinguir estadísticamente entre el efecto que tiene con los demás sustratos.

Antes de realizar el ANOVA, se efectuó el diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos. Para tal efecto, se obtuvieron previamente las variables RDUO y PRED. A partir de los residuos y sus transformaciones se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

El ANOVA en DCA, permite determinar si existe o no, la relación causa-efecto de la generación de biogás (efecto de diferentes biodigestores), en relación a la variable Producción de biogás. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad, diagnóstico de la normalidad, homogeneidad e independencia de residuos y homogeneidad de varianzas.

Tabla 33. Análisis de la Varianza de la producción de biogás

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	213769408.75	4	53442352.19	146.68	<0.0001
Sustratos	213769408.75	4	53442352.19	146.68	<0.0001
Error	12751931.25	35	364340.89		
Total	226521340.00	39			

Tabla 34. Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=612.69308

Sustratos (tratamiento)	Medias	n	E.E.	
Sustrato de caballo y ganado	11805.00	8	213.41	A
Sustrato de caballo	8827.50	8	213.41	B
Sustrato de ganado	8263.13	8	213.41	B
Sustrato de cerdo	6948.13	8	213.41	C
Sustrato de gallinaza	4766.25	8	213.41	D

La lectura de la salida muestra que la variable dependiente es: producción de biogás, que hay 40 observaciones en total y que el 94% ( $R^2$ ) de la variabilidad total de la variable de respuesta se puede explicar conociendo las condiciones experimentales a las que han sido expuestos los sustratos. El coeficiente de variación tiene una magnitud que es equivalente al 7.43% (CV) del valor medio de la variable de respuesta.

El análisis del cuadro de ANOVA indica que existe un efecto significativo ( $p=0.0001$ ) de los estiércoles de caballo, gallinaza, cerdo, ganado, caballo + ganado) sobre la producción de biogás, Por lo tanto, no se acepta la hipótesis nula de  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_n$ .

La aplicación de la prueba de Fisher, que produce una DMS= 612.69308, indica que la diferencia entre tratamientos es sólo debida al tipo de sustrato en este caso de caballo + ganado dado que es una mezcla de dos sustratos. Bajo esta condición el porcentaje promedio de producción de biogás fue de 11805.00, mientras que en los biodigestores cargados con estiércol de caballo y otro de ganado no se encuentran diferencias estadísticas significativas. Los sustratos estiércol de cerdo y gallinaza obtuvieron diferencias en relación al resto de sustratos, siendo los biodigestores que se cargaron con excretas de cerdo y gallinaza los que menos producción obtuvieron.

A la salida de cada unidad experimental se colocó un filtro que contenía Hidróxido de Sodio (NaOH), como método de adsorción para purificar el biogás y de esta forma se eliminó el  $HS_2$  y el  $CO_2$ , por lo tanto, se obtuvo un gas incoloro y lo suficientemente inflamable para encenderse.

#### **9.4 Beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud del uso de biodigestores implementados en la zona rural**

El análisis e interpretación de resultados se presenta de manera integrada considerando los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de entrevista y la observación in situ. El análisis que se desprende se presenta ordenadamente, según el objetivo que guio la presente investigación.

Las categorías abordadas en las conversaciones fueron: la motivación a implementar el proyecto de biodigestores, capacitación en el uso y mantenimiento de los mismos, percepción de las mujeres sobre el sistema, beneficios económicos, en salud, ambientales, sociales, y satisfacción con los biodigestores.

##### **9.4.1 Motivo a implementar el proyecto de biodigestores**

Los motivos para implementar los biodigestores, según la mayor frecuencia de los discursos de los participantes, fue debido a que estos representan una alternativa ante el uso de leña que generalmente se daba en grandes cantidades. Además, porque la emanación de gases como el monóxido de carbono (CO) y material particulado del humo afecta a sus familiares y se evita el olor en los utensilios de la cocina y la ropa que usan. Así mismo, porque se protege el ambiente al reducir la tala de árboles, esperanza de ahorrar dinero por la compra de leña como combustible para la cocción de alimentos, los malestares del estado de salud que sufrían, ya que consecutivamente presentaban cuadros de alergia, infección en las vías respiratorias y mareos. También, debido a la disminución de egresos por la compra de medicamentos y por la utilización de gas butano.

Al respecto, se puede apreciar en palabras de los entrevistados:

“A mí me gustó, porque el humo es malo y estaba perjudicándonos la salud de la familia, a mi mujer que es la que prepara la comida de todos”.



“Se usaba mucha leña y era una barbaridad y a veces la quemábamos de puro gusto, solo porque el fogón estuviera encendido”.

“En grandes cantidades que además causa afectación a sus familiares por la emanación del humo, se evita el humo y su olor en los trastos, ropa”.

“Yo me alegré y decidí instalarlo, porque aquí el humo no estaba matando solo enfermo vivían los chavalos y la mujer con inflamación de las vías respiratorias, ronchas en la piel, y esa gastadera en medicamento es arreocho”.

“Estábamos gastando mucho en los chimbos de gas y cada vez están más caros, aquí no es como en la ciudad que te los llevan hasta la casa”.

“Me dijeron que podía iluminarme y que ya no me iba a quemar las pestañas con el candil”.

“Esta chochada ya la había visto funcionar y me gusto porque se hace la comida rápido”.

“Un día que andaba en la ciudad vi a unos jodidos hablar de los biodigestores y que se utilizaba la mierda de las vacas y como yo tengo unas cuantas, pues dije voy a entrarle y ahí está funcionando como puede ver”.

“Hace algún tiempo vi en Costa Rica en una finca de café que tenían estos chunches y yo no sentí ninguna diferencia en la comida, le conté a la mujer y ella me animó a que lo tuviéramos aquí en la finca”.

“Ya estábamos hartos de andar jalando leña y con este biodigestor no perdemos tiempo, solo es encender y ya, ni tufo se le siente a la comida”.

“A las personas se les habló de los beneficios que tiene usar estos biodigestores, de los ahorros económicos que tendrían, la importancia de cuidar el medio ambiente y sobre todo que no tenían que gastar en materia prima porque el estiércol lo tienen ellos en sus fincas. Además, que mejorarían su salud sobre todo las mujeres y los niños que son los más expuestos, están en las cocinas. La verdad se les expuso todo de manera sencilla para que pudieran entender de qué se trataba” Técnico 1.

“Hablar con la gente de estos lugares es un poco complicado sobre todo porque el único recuerdo que ellos tienen es cocinar con leña y hacerlos adoptar esta tecnología no es tarea fácil, sobre todo a las personas que no tienen mucho nivel académico. Hay otros que tienen más recorrido y te entienden bien, a todos se les planteo los beneficios y las facilidades de pago, algunos no dudaron en aceptar” Técnico 1.

“Al inicio la gente no quería nada, algunos por no tener dinero, otros porque pensaban que el olor del estiércol quedaba en los alimentos. Les presentamos videos, experiencias de otras personas, entonces, se dieron cuenta que tenían una buena oportunidad en sus manos. Algunos decían que era increíble, que hasta la mierda servía para algo bueno” Técnico 3.

#### **9.4.2 Capacitación en el uso y mantenimiento de los biodigestores**

Según los entrevistados manifiestan que fueron capacitados en el mantenimiento preventivo y correctivo de los biodigestores en cuanto a: mezcla requerida de agua y estiércol para cargar el biodigestor, revisión de fugas de gas, el uso del biofertilizante, como cambiar el filtro de adsorción.

Se pudo constatar según la observación que los sistemas están funcionando muy bien, algunos hasta techo han construido encima de los biodigestores, las partes de los biodigestores están en buen estado.

Al respecto, se puede apreciar en palabras de uno de los entrevistados:

“Los técnicos que construyeron el biodigestor nos capacitaron sobre cómo hacer el mantenimiento, como cambiar el filtro”.

“La verdad que el manejo es fácil no se necesita de gran conocimiento, pero si hay que tener cuidado porque el gas es chiva y a lo mejor si no tenemos precaución nos puede joder a todos”.

“Yo me fije desde que se construyó para no tener problemas después y al mismo tiempo me decían como mantenerlo nítido, por eso usted ve que lo tengo cheque, hasta la mujer le dijeron como limpiar la cocina y ella está contenta”.

“Fíjese que cuando ya estaba listo nos enseñaron como usarlo, estar pendiente del manómetro, de cada cuanto cambiar el filtro, qué hacer con las fugas, al principio la encabamos porque no le echamos nada y entonces dejo de funcionar, pero esa fue culpa de nosotros, ya ahora estamos bien”.

“Nos capacitaron en como cargar el biodigestor, las mezclas con respecto al agua y estiércol, el cambio filtro debía hacerse cuando miráramos que la llama estaba saliendo amarilla y no azul”.

“Las personas fueron capacitadas en el uso, y mantenimiento preventivo y correctivo del sistema completo, es decir desde cómo realizar la mezcla de estiércol y agua, revisión de fugas en el biodigestor, en la tubería de descarga de gas y el encendido de las cocinas” Técnico 1.

“Después de terminada la instalación se les aviso a los dueños que era necesario estar capacitados y ellos accedieron, ahí se les indico cuanto de estiércol y agua usar, que debían batirlo bien, donde retirar el biol para ser usado en los cultivos, huertos o siembras porque es un buen abono orgánico, se les enseñó como estar

pendiente de la presión, qué hacer con el exceso de biogás y ellos quedaron contentos” Técnico 2.

“La capacitación fue todo un éxito, los señores comprendieron bien cómo usarlo, como cargarlo, como reparar las fugas cuando hayan, les dije que cualquier consulta que tuvieran me llamaran” Técnico 3.

### **9.4.3 Percepción de las mujeres sobre el sistema**

La participación de las mujeres fue únicamente en el uso de las cocinas, debido a que son ellas las que se encargan de la elaboración y entrega de los alimentos de los trabajadores de las fincas o de sus viviendas. El beneficio es satisfactorio, puesto que ya no estarán expuestas al humo por la quema de la leña, dispondrán de mayor tiempo para dedicarse a otras actividades y se podrán ir reduciendo las enfermedades respiratorias.

Al respecto, se puede apreciar en palabras de algunas mujeres consultadas:

“Me gusta mucho, porque ese humo jodido era terrible y la levantada de madrugada, ya no hay que sacar astillas, ni perder tiempo encendiendo el fogón que eso era lo arreocho”.

“Es muy rápido para cocinar, este gas tiene una llama azul bien bonita y ya uno no está con esa humazón espantosa. Al principio me costó probar la comida porque pensé que tenía gusto feo, pero no, fíjese que no se le siente nada, eso si los frijoles esos los pongo en el fogón porque quedan más ricos”.

“La cocina se prende solo cuando se ocupa y no hay que estar pendiente de los tizones, con la leña debe estar todo el día prendida, lo bueno que como la comidita se hace rápido me queda más tiempo para avanzar en otras cosas”.

“Ahora es más fácil cocinar, no hay que estar picando leña, la ropa no se nos llena de humo, no me enfermo de gripe por el humo, con la leña era más jodida la cosa”.

“Las mujeres estaban encantadas con el biodigestor, es una emoción bonita. Ellas sabían que ya se acababa el humo, era como tener juguete nuevo, la verdad fue una sensación bonita” Técnico 1.

“Los rostros de satisfacción en ellas se notaba, estaban alegres porque ya no seguirían soportando el humo que por años las estaba matando y con el biogás eso acababa” Técnico 2.

“Al inicio pensaban que el olor del estiércol quedaría en los alimentos y ya después de las primeras pruebas se convencieron que el gusto de la comida quedaba bien, y pues estaban contentas” Técnico 3.

#### **9.4.4 Beneficios económicos**

Otro aspecto que emerge respecto al uso de esta tecnología, es lo referido al factor económico, según la mayoría de los entrevistados, corresponden principalmente:

- Ahorro por la compra de leña que se usa para la cocción de alimentos, esto debido a que el principal combustible que utilizan para la cocción de alimentos es la leña. A veces tienen que comprarla o pagar a personas para que la corten en la finca, lo cual incurre en costos; por lo tanto, con el biodigestor se ahorran en mano de obra involucrada en recoger, rajar la leña y su posterior apilado.
- Ahorro en la compra de gas butano, lo que representa la disminución del uso del gas licuado de petróleo, el cual tiene un precio elevado en la zona rural. Así mismo, al estar ubicados en lugares donde las carreteras, por lo regular están en mal estado o simplemente no existen, el costo de adquisición se incrementa.

Al respecto, se puede apreciar en palabras de algunos de los entrevistados:

“Aquí en esta finca usábamos solo leña, alguna la cortábamos aquí y otra se compraba. Ahora ya no compramos ni cortamos, entonces nos ahorramos ese dinero y se ocupa para comprar comida u otras cosas aquí que necesitemos”.

“Mire amigo aquí se gastaba en ese chimbo de gas y nos salía caro porque el precio es elevado en estas zonas y como ya no compramos tenemos ese ahorrito. Y si es en leña no compraba, pero tenía que pagarle a una persona para que la cortara y acarrearla, así que este biodigestor es lo mejor que tenemos”.

“El no consumo de la leña como combustible principal en la cocina bajó la contaminación por humo dentro de la casa y esto nos ayudó a que bajaran los gastos de medicinas y transporte para los enfermos de la familia, quienes debían ser llevados a la ciudad más cercana para ser atendidos, pues aquí no tenemos un centro de salud”.

“A parte del ahorro en la compra de medicinas por las enfermedades de la vista y de los pulmones que causa el humo. También, aquí se ahorra en mano de obra involucrada en recoger la leña, rajado de la leña”.

“Después que iniciamos usando este gas azulito deje de comprar gasolina para la planta que utilizábamos, ahora con este gas ya no compro y lo bueno que lo uso para otras cosas más”.

“El tiempo utilizado para recolectar, cortar y picar la leña ahora lo dejamos para otras actividades y el money invertido en la compra de leña ya nos sirve para gastarlo en otras necesidades”.

“Antes la familia utilizábamos chimbos de gas, ahora nos ahorramos ese gasto”.

“Ahora la gente se ahorra buen dinero porque no tienen que comprar gas butano que esta caro, tampoco gastan en la compra de leña, ese dinero ahorrado ya dispone para cubrir otras necesidades” Técnico 1.

“Es muy importante reconocer que con el uso de biodigestores las familias que utilizaban gas licuado de petróleo podrán ahorrarse este gasto, pues el biogás producido por el biodigestor funciona de la misma manera que el propano” Técnico 2.

“El ahorro que se genera por familia cada mes es significativo, ya que quienes cocinaban con leña ahorraran de distintas maneras” Técnico 3.

#### **9.4.5 Beneficios en salud**

El impacto que los biodigestores han tenido en los usuarios de la población rural, es la disminución a la exposición continua al humo generado por la combustión de la leña en el hogar. Para varios de los entrevistados el uso del biogás, es beneficioso para la salud de todos, coincidiendo en que las más beneficiadas son las mujeres por ser ellas las que preparan la comida y están siempre expuestas al humo. Es así que, con el uso del biogás se obtienen los siguientes beneficios: no se genera humo, no se irritan los ojos, no les provoca tos, gripe, mareos y han disminuido los problemas respiratorios.

En palabras de los entrevistados:

“Antes ese poco de humo me tenía jodida a la doña y los chavalos con la leña que se quemaba, ahora con esa llama que es pequeña, pero se cocina bien ya la doña no se enferma, no la veo con los ojos rojos ni tosiendo, yo creo que es una buena inversión, acuérdesse que la salud es primero, si hay salud estamos pijudos”.

“Es beneficioso para la salud, ya que el biogás es limpio y no quema produciendo humo como la leña; así no nos enfermamos que lo peligroso del humo y el tile”.

“Eliminamos el exceso de humo producido por el uso de la leña, que es a la mujer principalmente que le hace daño, claro porque ella prepara los alimentos”.

“Desde que tenemos el biodigestor aquí estamos felices, imagínate que la misma naturaleza nos da la energía y eso es una bendición de Dios”.

“Lo más importante es que no se está enfermando a cada rato uno, ese humo lo caminábamos en la nariz todo el día y aquí iba a escuchar la tosedera de uno o del otro siempre”.

“Como ya no estamos quemando la leñita ya respiramos otro aire, antes era como andar arena en los ojos y ya no tenemos que llevar a la sanidad a los chavalos”.

“Los biodigestores traen un buen beneficio a la salud de las personas, porque ya no gastan en el médico, no están respirando el humo que es muy perjudicial para ellos”  
Técnico 1.

“Estos sistemas de biodigestores al final traen muchos beneficios y en especial a la salud de las personas. El humo que causa la quema de la leña es perjudicial sobre todo a los niños y las mujeres que siempre están en las viviendas” Técnico 2.

“Además de otros beneficios, considero que el principal es en la salud de la gente, si la gente está sana puede realizar bien sus actividades y esto realmente mejora su calidad de vida” Técnico 3.

#### **9.4.6 Beneficios ambientales**

Este aspecto, hace referencia al impacto que tiene esta tecnología en los bosques, pues no sólo contribuye a la reducción de la deforestación, sino que, además, favorece el desarrollo de una conciencia ambiental en las personas. De otro modo el consumo excesivo de leña



conlleva al corte de muchos árboles. En este mismo orden, el excremento de los animales que se usa, generalmente de ganado ya no contamina los mantos acuíferos.

En palabras de algunos de los participantes:

“En esta finca disminuyó el uso de leña en una barbaridad, ya no la usamos para cocinar; así que, la montaña está tranquilita”.

“Ahora que el estiércol lo mantenemos controlado ya no contamina el agua, porque cuando llueve se lo jala la corriente y eso contamina según nos dijeron”.

“Como ya no usamos leña, no la cortamos y por lo tanto no hay humo que contamine el ambiente”.

“Hombre muchacho te voy a decir que al principio tenía mis dudas sobre eso que me preguntas del ambiental, pero ya viendo funcionar esta cosa, la leña se fue al diablo, no se usa y ya no jodemos el bosque”.

“Este tipo de tecnología beneficia en gran manera el medio ambiente que tan deteriorado lo tenemos, la gente ya no tiene que estar cortando los árboles y esto hace que el bosque se mire bonito” Técnico 1.

“Un biodigestor es uno de los grandes inventos para salvar nuestros recursos, es una lástima que no todos quieran tener uno, pero he podido ver que realmente evita que se corten más árboles y eso es un gran beneficio para todos” Técnico 2.

“Esta es una tecnología que aprovecha los desechos que de algún modo son perjudiciales y contaminantes; con su uso en el biodigestor también se deja de cortar y quemar la leña” Técnico 3.

#### 9.4.7 Beneficios sociales

Este aspecto, hace referencia al impacto que tiene esta tecnología en el ámbito social. En mayor frecuencia los entrevistados manifiestan que los biodigestores son importantes, porque les brinda la oportunidad de usar recursos disponibles en la alimentación animal. Además, se puede contar con una tecnología para cocinar, se mejoran los suelos mediante abono orgánico, no tienen que acarrear leña y disponen de más tiempo para hacer otras actividades.

En palabras de algunos de los participantes:

“El hollín de los trastes, techo y toda la casa de habitación, cuando se cocina con leña es espantoso, contar con esta tecnología elimina ese hollín”.

“Con los biodigestores y usar este gas, se aporta a la reducción del consumo de leña”.

“Las mujeres pueden dedicarse a otras actividades que les genere ingresos y pueden ser parte de las organizaciones de su comunidad”.

“El trabajo de andar buscando leña era peligroso, porque seamos claro no sabíamos con quién nos podíamos encontrar ahí en el monte”.

“La recolección de la leña casi siempre lo realizaban las mujeres, con el uso del biogás tienen mayores oportunidades para estudiar, pudiendo de esta manera aportar económicamente al hogar” Técnico 1.

“Ahora se dispone de mayor tiempo para realizar otras cosas que antes estaba impedida, el tiempo que le tomaba en trasladarse y cortar la leña ahora lo aprovecha en su beneficio y también evitan la tala de los bosques” Técnico 2.

“El contar con esta tecnología, les ha facilitado trasladar estos ahorros a otras necesidades del hogar” Técnico 3.

#### **9.4.8 Satisfacción con los biodigestores**

Los entrevistados relataron, en general, que se sienten satisfechos con la inversión realizada, pues la misma se recupera a corto plazo y, que la expectativa fue superada al poder ver los beneficios que se obtienen con el uso del biodigestor. Así mismo, reconocieron que el biogás llegó a ser un sustituto del gas licuado de petróleo y la leña.

En palabras de algunos de los participantes:

“Estamos muy alegres y contentos porque el biodigestor nos dio la oportunidad de eliminar la leña y de no comprar el chimbo de gas o de la leña para poder cocinar los alimentos”.

“Claro que me siento satisfecho, si ahora no usamos leña y el abono orgánico lo uso en los cultivos”.

“Súper satisfecho con el uso del biogás y el abono que produce el biodigestor me acuerdo la emoción de ver la llama azulita”.

“En esta finca todos estamos satisfechos, pero yo creo que más la mujer que es la que ya no se entila ni se ahúma cocinando”.

“Ellos se sienten satisfechos con esta tecnología, no crea profe estar jalando leña a largas distancias y saber que ahora solo utilizan el estiércol, es un gran avance y por eso es que lo cuidan y están pendientes que funcione bien” Técnico 1.

“Al inicio se ven como que no creen que vaya a resultar, pero ya después que ven que no tienen que levantarse temprano a encender el fogón, no tienen que jalar la

leña, ni andar cortando, entonces, si ves su cara de satisfacción; porque da satisfacción” Técnico 2.

“Cuando les entregamos su biodigestor construido y regresamos a los días a realizar las pruebas los ves tan emocionados viendo aquella llama azul y los que son trabajadores diciendo que desearían uno para sus casas, esto da gusto escucharlo” Técnico 3.

## 10 Discusión de Resultados

### 10.1 Resumen de Hallazgos relevantes a partir de los resultados obtenidos

1. En cuanto a la caracterización de los sustratos se encontró que, el sustrato de estiércol de ganado posee los mejores vectores de medias fisicoquímicas que el resto de sustrato que formaron parte del estudio.
2. Se comprueba que, la codigestión anaerobia produce más biogás que los sustratos que no se mezclaron con otro tipo.
3. Existe correlación entre la temperatura y la producción de biogás generada en los biodigestores.
4. Existe correlación entre el pH y la producción de biogás generada en los biodigestores.
5. El uso de los biodigestores trae consigo beneficios positivos tales como:
  - Beneficios económicos derivados del ahorro de no comprar leña, gas butano y medicinas.
  - Beneficios en salud al reducirse las enfermedades causadas por la exposición al humo.
  - Beneficios ambientales por disminuir o erradicar el corte de árboles y no emitir gases de efecto invernadero.
  - Beneficios sociales por la mejora en la calidad de vida de las personas.

## **10.2 Limitaciones del estudio**

Se enfrentaron limitaciones relacionadas con la disponibilidad de la tecnología, debido a que no se contó con analizador de cromatografía de gases y bomba calorimétrica, por lo que no se realizaron pruebas de cromatografía gaseosa al biogás generado para conocer la cantidad de metano del biogás.

En la zona rural de la ciudad de Estelí no se encontraron biodigestores instalados, por lo que las entrevistas se realizaron en otra zona rural del país.

## **10.3 Relación de los Resultados obtenidos, con las Conclusiones de otras Investigaciones**

La digestión anaerobia es un proceso biológico de fermentación complejo, el cual se caracteriza por una transformación de los residuos orgánicos mediante la degradación por bacterias que no requieren del uso de oxígeno y finalmente con su reacción producen gases, de los cuales predomina el metano (Osorio et al; 2007). El análisis elemental del estiércol sirve para tener una noción sobre las características generales de los sustratos a tratar durante la digestión anaerobia (Jarauta, 2005).

Los sólidos totales se refieren a los residuos del material que permanecen en el recipiente después de la evaporación de la muestra secada en el horno a una temperatura definida: 103-105°C. Es un proceso muy empleado para tratar la fracción orgánica de los residuos urbanos, residuos animales y residuos agrícolas. En el análisis químico proximal realizado a los residuos estudiados, se obtuvo que éstos estuvieron compuestos en su mayor parte de humedad y una pequeña parte correspondió a los sólidos totales. El porcentaje de materia seca o sólidos totales para el sustrato de caballo con 20 observaciones fue de 33.3%, 19% para el sustrato ganado, 56.9 para el sustrato de gallinaza y 39.4 para el sustrato de cerdo, coincidiendo con los rangos reportados por (Varnero et al., 1990).

Las cenizas, son compuestos minerales residuales que no son volatilizados. Los resultados en esta investigación para 20 observaciones, demostraron que en el sustrato de gallinaza se obtuvo el mayor vector de medias de los sustratos analizados, resultados que difieren de lo reportado por otros autores, en este caso, todos estos valores están por encima de lo reportado por (Varnero et al., 1990).

Los sólidos volátiles, es la fracción de la materia orgánica capaz de volatilizarse (transformarse en biogás). Los valores de estos, encontrados en la presente investigación según perfil de medias, presentaron diferencias estadísticas significativas. El sustrato de estiércol de caballo presentó el valor más alto con 75.16%, seguido del de cerdo con 65.69, el de ganado con 58.37% y el que menos sólidos volátiles presentó fue el sustrato de gallinaza con 40.16%, estos valores coinciden con lo reportado por (Toruño et al., 2016).

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Los resultados de nitrógeno derivados de los sustratos orgánicos en esta investigación fueron: gallinaza 1.22, estiércol de ganado 0.55, cerdo 1.27, caballo 1.20, todos estos valores están dentro de los rangos establecidos por (Varnero et al., 1990). De igual forma se identificaron los valores de carbono de los sustratos orgánicos en estudio obteniendo los resultados: gallinaza 22.46%, estiércol de ganado 32.40%, cerdo 36.40%, caballo 41,80%, igualmente estos valores están dentro de los rangos establecidos por (Varnero et al., 1990).

La relación C/N permite conocer la capacidad mineralizadora del residuo sólido en procesos de recuperación y aprovechamiento de la materia orgánica. Los valores encontrados en esta investigación, con 20 observaciones para el sustrato estiércol de caballo fueron de 31:1, 62:1 para el de ganado, 22:1 para el de gallinaza y 29:1 para el de cerdo. Todos estos valores están dentro del rango reportado por los autores (Gallert, Bauer, & Winter, 1998).

Definiendo el intervalo óptimo de la relación C/N para procesos de transformación biológica comprendido entre 20 y 35; solamente se encuentra fuera de rango el valor de la relación C/N del sustrato estiércol de ganado, debido probablemente a su composición según las especies de las que procedan, la edad del animal, su eficiencia digestiva, la forma en que se conserven y la alimentación que se les proporciona (Salazar, Salazar, Trejo, Lòpez, & Serrano, 2010).

La temperatura es un factor que influye en la generación de biogás: cuanto más caliente el ambiente, mayor es la velocidad y el grado de fermentación de la materia orgánica (Asankulova, 2008). La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica.

La temperatura máxima obtenida en los biodigestores fue de 31.10 ° C y la temperatura mínima de 32.10° C encontrándose dentro del rango mesofílico determinado por (Lagrange, 1979). Los biodigestores estaban ubicados al aire libre por lo cual la temperatura de operación no fue controlada. El análisis estadístico realizado a través de la correlación de Pearson demostró que existe relación entre la temperatura y la producción de biogás, esto se debe principalmente a que la temperatura influye para producir más o menos biogás.

La temperatura de operación de los biodigestores en cualquiera de los rangos (psicrofílico, mesofílico o termofílicos) siempre producirá biogás, por lo tanto, la temperatura es un indicador de producir mayor o menor cantidad de biogás tal y como lo señala (Varnero et al., 1990).



De acuerdo con Clark et al., (1989), los microorganismos anaerobios necesitan de manera estricta un pH en torno a la neutralidad para su desarrollo correcto, aunque permiten cierta oscilación, pueden presentarse problemas si baja de 6 o sube de 8,3 (Lay, Li, & Noike, 1997).

En los biodigestores que formaron parte de la unidad de análisis experimental de la presente investigación, una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantuvo en valores que oscilaron entre 6.58 y 7.10. Esto permitió no correr el riesgo de que el proceso de fermentación se inhibiera y pudiera detenerse, similar a lo reportado por (Bedoya & Chaparro, 2016), quienes lograron obtener las mayores cantidades de biogás a pH entre 6.3 y 7.3, además, indicaron que el pH influye en la producción de biogás. Lo anterior coincide con otros estudios como el de (Toruño, Lira, Casco, & Reyes, 2016), quienes encontraron las mejores producciones de metano con pH, entre 6,5 y 6,8 unidades.

El análisis de correlación de Pearson realizado para las variables pH y producción de biogás, dio como resultado un coeficiente de correlación moderada positiva. Este moderado valor del “r” fue obtenido con un  $p = 0,0002$ , quiere decir que la respuesta estadística obtenida es una correlación significativa, por lo que se demostró que existe correlación entre las variables pH y producción de biogás. De ahí que, se confirma la hipótesis de que el pH cuando se encuentra en los niveles óptimos está asociado con la producción de biogás.

Así lo afirman Angelidaki, Ellegaard, & Ahring (2003), que este parámetro tiene gran influencia sobre la actividad de los microorganismos más sensibles como las arqueas metanogénicas que intervienen en cada una de las fases, principalmente, en la producción de metano. Esta respuesta significativa indica que la producción de biogás depende del pH, es decir, si los valores están dentro de los rangos óptimos se obtendrá mayor o menor producción. Fuera de los rangos mínimos o máximos la producción de biogás se inhibe es decir no se produce biogás.

Mediante las pruebas ANOVA se puede determinar la relación causa efecto entre los factores en estudio. El análisis realizado indicó que existe un efecto significativo de los sustratos de estiércol de caballo, gallinaza, cerdo, ganado, caballo + ganado) sobre la relación C/N (carbono/nitrógeno). La aplicación de la prueba de Fisher o prueba de rangos múltiples, indicó que existe diferencia entre tratamientos y esta es sólo debida al tipo de sustrato en este caso de ganado.

Probablemente su elevado valor se debe al tipo de raza o tipo de alimentación, mientras que en los restantes sustratos este porcentaje estuvo alrededor de los niveles recomendados por Varnero & Arellano (1990), no pudiéndose distinguir estadísticamente entre el efecto que tienen los diferentes sustratos de caballo, gallinaza, cerdo, caballo + ganado.

El análisis de ANOVA realizado para determinar la relación causa-efecto de la variable pH y los sustratos orgánicos de cada biodigestor, indica que existe un efecto significativo ( $p=0.0002$ ) de los sustratos de estiércol del estudio en cuestión sobre el pH. La aplicación de la prueba de Fisher, indicó que la diferencia entre tratamientos es sólo debido a que se mantuvo controlado el pH de cada biodigestor, dentro de los rangos de operación sugeridos por los autores mencionados en este estudio.

El análisis de ANOVA realizado para conocer la relación causa-efecto de la temperatura sobre la producción de biogás reflejó que existe un efecto significativo ( $p=0.0460$ ) de los sustratos objeto de estudio sobre la temperatura. La aplicación de la prueba de Fisher, indicó que existen diferencias entre tratamientos, sin embargo, se puede afirmar que este factor determina la mayor o menor producción de biogás, En esta investigación se obtuvieron buenos rendimientos debido a que la temperatura se encontraba en el rango óptimo.

El análisis de ANOVA para la variable producción de biogás y los diferentes sustratos contenido en los biodigestores muestra que existe un efecto significativo ( $p=0.0001$ ) de estos sobre la producción de biogás. La aplicación de la prueba de Fisher, indica que el biodigestor con mayor producción de biogás fue el cargado de estiércol de caballo +

ganado, debido a que es una mezcla de dos sustratos. Igualmente se evidencia obtención de mejores rendimientos individuales los cargados con estiércol de caballo y ganado. De modo que, podemos afirmar categóricamente que conviene utilizar la codigestión o mezcla de los sustratos si hay disponibilidad de encontrarlos.

La contribución que realizan los biodigestores en la zona rural está directamente relacionada con la energía que suministran para el consumo familiar de una manera ambientalmente sostenible, económicamente rentable y de fácil acceso. El ser humano demanda condiciones de bienestar que están sujetas a la energía que puedan utilizar para cumplir con sus necesidades, pero también vienen acompañadas por problemas de consumo de energía, causando serios daños ambientales y problemas económicos dentro de una población demandante (Li, Niu, Ma, & Zhang, 2009).

Los beneficios económicos totales constituyen un concepto que incluye beneficios directos y valores funcionales derivados de la adopción de una nueva tecnología. Los bienes directos incluyen, por ejemplo, gastos no incurridos en la compra de otros combustibles convencionales, gracias al uso de biogás y del efluente del biodigestor. Valores funcionales incluyen el potencial de la tecnología para disminuir impactos ambientales causados por otras fuentes convencionales de energía (Botero & Aguilar, 2006).

Los beneficios económicos generados por la implementación de esta tecnología en las comunidades donde se encuentran instalados los sistemas de biodigestores corresponden, de acuerdo a los entrevistados, a la obtención de ahorro monetario por no comprar leña como combustible para cocinar los alimentos. Además, porque no tendrán que gastar dinero en mano de obra para que corten y rajen la leña en sus fincas, así mismo obtienen un ahorro al no comprar cilindros de gas butano, cuyo precio es elevado en éstas zonas. Estos resultados coinciden con estudios de caso realizados en Nicaragua por (Buitrago, 2016).

Otro beneficio del uso del biogás es que las mujeres pueden aportar económicamente al hogar, pues pueden utilizar el tiempo que invertían en la recolección de la leña en tareas pagadas o desde sus propios negocios. Esto es importante, debido a que apoya directamente

al cumplimiento del objetivo del milenio 1 (ODM), Erradicación de la Extrema Pobreza y el Hambre. ODM3 Promover la igualdad de género y empoderar a la mujer.

El humo que genera la combustión de la leña y la falta de ventilación son los causantes del deterioro de la salud de hombres, mujeres y niños, siendo las más afectadas las mujeres de la familia ya que son las encargadas de cocinar y arriesgan la vida y la salud debido a que tienen que realizar largas caminatas en busca de la leña (Fernández, 2010). Otro beneficio generado por el uso de los biodigestores en la presente investigación es la salud que según los usuarios es la disminución a exposición continua al humo generado por la combustión de la leña en el hogar.

Los entrevistados manifestaron que el uso de estos biodigestores en cuanto a la salud es beneficioso para todos pero coinciden en que las más beneficiadas son las mujeres por su condición de hacedoras de la comida debido a que es su responsabilidad y están siempre expuestas al humo por lo que con el uso del biogás obtienen los siguientes beneficios: no se genera humo, no se produce irritación en los ojos, no les provoca espasmo, resfriados y han disminuido los problemas respiratorios graves; estos hallazgos coinciden con lo encontrado por (García, 2001), el beneficio de usar biogás con desechos orgánicos provenientes de los animales es que, frente a la leña, no causa afectación al sistema respiratorio en especial de los niños y las mujeres del hogar, esto es importante debido a que apoya directamente al cumplimiento del objetivo del milenio ODM4 Reducción de la mortalidad infantil y el ODM 5 Mejora en la salud materna.

Un indicador de impacto ambiental es el elemento o concepto asociado a un factor que proporciona la medida de la magnitud del impacto, al menos en su aspecto cualitativo, y también, si es posible el cuantitativo (Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, 1993).

Al respecto de este beneficio los entrevistados consideran que el impacto que tiene esta tecnología en los bosques no sólo favorece la deforestación de los bosques, sino que además permite el desarrollo de una conciencia ambiental en las personas. El consumo de

leña es excesivo y permite el corte de muchos árboles, el excremento de los animales que se usa, generalmente de ganado ya no contamina los mantos acuíferos, se produce mucho humo contaminante producto de la quema de leña y con el uso de biogás se obtiene el beneficio al medio ambiente de no contaminar el aire, el análisis de lo dicho por los entrevistados coincide con lo reportado por los autores Rajendran, et al., (2012) el biogás como combustible usado en la población rural es una fuente de energía alternativa que juega un papel muy importante en la reducción de gases de efecto invernadero, esto es importante debido a que apoya directamente al cumplimiento del objetivo del milenio ODM7 Asegurar la sostenibilidad ambiental.

A si mismo estos autores encontraron que el uso de biogás que produce un biodigestor familiar de construcción regular sustituye "316 litros de Kerosene, 5535 kilogramos de leña y 4400 kilogramos de estiércol de ganado utilizados como combustibles, reduciendo las emisiones de: óxido de nitrógeno (NOx) en 16,4 kg/año (kilogramos al año), de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en 11,3 kg/año, de monóxido de carbono (CO) en 987,0 kg/año y de otros gases volátiles en 69,7 kg/año".

Estudios realizados en Perú en donde se escogieron a 12 familias de la zona rural que utilizan biogás y que han sustituido el uso de la leña para cocinar, arrojaron como resultados un decremento notorio en el consumo de la leña de entre el 50 y 60% y una hora (1 h) menos en el tiempo de cocción de los alimentos. Estas externalidades positivas evitan la deforestación de los bosques, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, mejora la calidad de vida de las familias tanto en la salud como en la parte económica mientras reduce los impactos ambientales (Garfi, et al, 2011).

En lo referente a los beneficios sociales el impacto que tiene esta tecnología en el ámbito social, se encontró de acuerdo a los entrevistados que los biodigestores son importantes porque les brinda la oportunidad de usar recursos disponibles en la alimentación animal, se puede contar con una tecnología para cocinar, se mejoran los suelos mediante abono orgánico, no tienen que acarrear leña, disponen de más tiempo para hacer otras actividades, otro de los aspectos relevantes en esta implementación es el mejorar las condiciones de vida

y el fomentar el aprovechamiento de los recursos naturales a nivel general, lo encontrado en esta investigación es semejante a lo escrito por los autores Garfi, et al., (2011).

Con el uso del biogás y la notable disminución del consumo de la leña, ahora las mujeres pueden desenvolverse socialmente y ser parte activa de la comunidad, aportando económicamente y asistiendo a centros de aprendizaje para su desarrollo personal, por la utilidad que los biodigestores tienen dentro del ámbito familiar se le ha denominado como una tecnología de género, pues las más beneficiadas son las mujeres que culturalmente son las encargadas de la alimentación de la familia y del cuidado de los niños y de los animales.

#### **10.4 Aplicaciones e implicaciones de los hallazgos relevantes**

El presente trabajo permitirá concientizar y aportar información sobre una alternativa de solución a la disminución de los problemas ambientales tan alarmantes que están presentes en la actualidad, no solo en Nicaragua sino en el mundo entero.

Manifiestar que hay tecnología beneficiosa, tal es el caso del uso de los biodigestores que permiten evitar la contaminación, producto de los desechos orgánicos, empleándolos para dar como resultado un aporte de energías limpias y renovables, y a su vez mejora el nivel socio-económico de las poblaciones donde se implementan.

Esta tecnología además de ofrecer combustible a bajo costo, facilita un abono orgánico rico en nutrientes, tales como nitrógeno, potasio, fósforo, azufre, entre otros, el cual tiene efectos favorables en su aplicación en los suelos de cultivo, que incrementa la retención de agua, así como intercambio gaseoso e igualmente incrementa la producción.

## 11 Conclusiones

1. El análisis elemental de los sustratos de estiércol de caballo, cerdo, ganado, gallinaza; sirvió para tener una noción de las características físicoquímicos de las excretas, a tratar durante la digestión anaerobia. El sustrato de estiércol de ganado difiere del resto de sustratos y presentó el mejor vector de medias.
2. Los análisis de sólidos totales, sólidos volátiles, masa seca, cenizas, carbono, nitrógeno y la relación carbono/nitrógeno, muestran que estuvieron dentro de los rangos óptimos, que satisfacen las necesidades de crecimiento y producción de metano de las bacterias anaerobias, sin embargo, la relación C/N en el caso de la excreta de ganado resulto fuera de rango.
3. La producción de biogás depende del pH que se obtenga dentro de los biodigestores, siempre que estos no se desestabilicen y se mantengan dentro de los rangos de operación óptimo. De igual manera la temperatura está correlacionada significativamente con la producción de biogás.
4. El biodigestor cargado con la mezcla de los sustratos estiércol de caballo + ganado obtuvo el mayor rendimiento en cuanto a la producción de biogás. Se concluye que en el proceso de digestión anaerobia se obtienen mejores rendimientos si se cargan los biodigestores con dos o más sustratos. A la salida de cada unidad experimental, se colocó un filtro que contenía Hidróxido de Sodio (NaOH), como método de adsorción para purificar el biogás y de esta forma se eliminó el  $\text{HS}_2$  y el  $\text{CO}_2$ , por lo tanto, se obtuvo un gas incoloro y lo suficientemente inflamable para encenderse.
5. El uso de la tecnología de los biodigestores proporciona beneficios importantes a las personas de las zonas donde se implementan, mejorándose la calidad de vida de las personas en cuanto a su salud, economía y al medio ambiente.

6. La aceptación de esta tecnología que tienen en el medio rural, está relacionada directamente con los beneficios que fortalecen el rol de la mujer, ya que el biogás contribuye directamente a los quehaceres domésticos; de ahí que se afirme que es una tecnología con enfoque de género.



## 12 Recomendaciones

1. Para desarrollar una nueva tecnología del tipo de energía renovable, basada en la producción de biogás generado en biodigestores, se debe pasar los mejores sustratos ya evaluados en la etapa de experimentación, hacia la etapa de validación tecnológica, a fin de evaluar cuál es el mejor sustrato, pero en condiciones reales de campo, evaluando uno o dos tratamientos ( $T_1$ =sustrato de ganado,  $T_2$ =sustrato de caballo o cerdo), más el Testigo o control ( $T_0$ =sustrato de ganado + caballo), en diferentes ambientes, lo que implica realizar el proceso de validación en un mínimo en ocho fincas y en un período de al menos un año.
2. En base al mejor tratamiento que resulte del proceso de validación tecnológica, se debe elaborar un proyecto de *I+D+i*, incluyendo el análisis de su viabilidad técnica-económica y socio ambiental, a fin de promover e incentivar el uso de biogás generado en biodigestores, como una alternativa energética que soluciona el desabastecimiento de combustible para la cocción de alimentos en la zona rural y además como una posible alternativa de generación eléctrica.
3. Es imprescindible realizar difusión de la utilización de los desechos orgánicos, donde se evidencie y potencialice que el manejo correcto constituye un recurso que representa una alternativa para la generación de biogás mediante la digestión anaerobia para uso doméstico.

## 13 Bibliografía

- Ahring, B. K., Sandberg, M., & Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digester. *Applied microbiological biotechnology*(43), 559-165.
- Alcántara, A. F. (1993). *Residuos Agrícolas, forestales, ganaderos e industriales*. Málaga, España: Instituto de Investigaciones Ecológicas.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. (2003). Applications of the anaerobic digestion process. *Biochem*(82), 1-33.
- Aparcana, S., & Jansen, A. (2008). Estudio sobre el valor del fertilizante de los productos del proceso de fermentación anaeróbica para producción de biogas. Peru. Obtenido de [http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas\\_ntz.pdf](http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas_ntz.pdf)
- Arce , J. J. (2011). *Diseño de un biodigestor para generar biogas y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas del Litoral*. Tesis de grado, Guayaquil. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPS-GT000209.pdf>
- Arthur, R., Baído, F., & Antwi, E. (2011). Biogás as potential renewable energy source. *Renewable Energy*, 36, 1510-1516.
- Asofénix. (2008). *Instalación de Biodigestores en Comunidades de Teustepe y San Jose de los Remates*. Managua : Asofenix. Recuperado el Mayo de 2016
- Bedoya, E., & Chaparro, E. (2016). Uso del estiércol de animales para la producción de biogas en Moquegua. *Ciencia y Tecnología para el desarrollo*, 2(4), 39-44.
- Bernal, M. P., & Roig, A. (1993). Nitrogen transformations in calcareous soils amended with pig slurry under aerobic incubation. *Agric. Sci*(120), 89-97.
- Bidlingmaier, W. (2006). Probes anaerobic digestion. *Biocycle journal of composting and organics recyclin*(47), 42-49.

- Boone, D. R., & Xun, L. (1987). Effects of pH, temperature and nutrients on propionate degradation by methanogenic enrichment culture. *Applied and environmental microbiology*(53), 1589-1592.
- Borroto Nordelo, A. (2002). *Los sistemas energéticos y sus costos ambientales*. Cienfuegos: Universidad Cienfuegos.
- Botero, R., & Aguilar, F. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. *Tierra Tropical*, 15-25.
- Botero, R., & Preston, T. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas*. Calí, Colombia: CIPAV.
- Boyle, G. (2004). *Renewable Energy*. New York: Oxford University Press.
- Brambilla, M., Araldi, F., Marchesi, M., Bertazzoni, B., Zagni, M., & Navarotto, P. (2012). Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. *Biomass and Bioenergy*(36), 439-446.
- Buitrago, J. M. (2016). *Iluminación de corrales y cocina con biogás. Finca Santa Rosa del Tuma*. Estudio de Caso, Managua. Recuperado el 3 de Marzo de 2019, de <http://redbiolac.org/wp-content/uploads/Estudio-de-Caso-No.1-Gladys-Bolt-VF.pdf>
- Bujockzek, G., Oleszkiewicz, J., Sparling, R., & Cenkoski, S. (2000). High solid anaerobic digestion of chicken manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*(76), 51-60.
- Bunca. (2002). Fortalecimiento para la capacidad en energías Renovables. Manuales sobre energía renovable . Biomasa. San Jose, Costa Rica: Bunca CA. San Jose, Costa Rica.
- Cabrera, G., Gómez, J. M., & Cantero, D. (2005). Influence of heavy metals over growth and ferrous sulphate oxidation by acidithiobacillus ferrooxidans in pure and mixed cultures. *Process Biochemistry*(40), 683-2687.
- Camilo, C., Ann, C., & Wilkie, D. (2010). Greenhouse gas emission and biogas potential from livestock in Ecuador. *Energy for sustainable development*, 14, 256-266.
- Campos Pozuelo, A. E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestion con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Lleida,

- España. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/8229/Tecp1de1.pdf?sequence=1>
- Carreras, N., & Dorronsoro, J. L. (1999). Aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos (RSU) en España. *Residuos*(50), 66-68.
- Chen, Y., & Creamer, J. (2008). Inhibition of Anaero-bic Digestion Process: A Review. *Bioresource Technology*, 4044-4064.
- Chugh, S., Chynoweth, D. P., Clarke, W., Pullammanappallil, P., & Rudolph, V. (1999). Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach bed process. *Bioresource Technology*(69), 103-115.
- Chynoweth, D. P. (1996). Environmental impact of biomethanogenesis. *Envir Monitoring and Assessment*(42), 3-18.
- Chynoweth, D. P., & Isaacson, R. (1987). Digestión anaerobica de la biomasa. *Elsevier Applied Science*, 1-15.
- Clark, R. H., & Speece, R. E. (1989). The pH tolerance of anaerobic digestion. *Advanced water pollution research*, (págs. 14-27).
- Cohen, L., & Morrison, K. (2011). *Research Methods in Education*. New York: Routledge.
- Contreras. (2006). *Digestión anaerobia para el tratameinto de residuos orgánicos . El caso de Perú*. Barcelona, España: Escuela Técnica de ingeniería Industrial.
- Contreras, L. (2006). *Producción de biogás con fines energéticos . De lo histórico a lo estratégico*.
- De Baere, L. (2000). Anaerobic Digestion of Solid Waste: State of the art. *Aater Science Technology*(41), 283-290.
- De Juana, J., Santos, F., Crespo, A., & Fernàndez, J. (2007). *Energías Renovables para el Desarrollo*. Madrid: Thomson.
- Dorronsoro, J. L., & Carreras, N. (1999). Aprovechamiento energético del biogás generado a partir de residuos solidos urbanos. *Tecnoambiente*(71), 121-123.
- Drake, H. L., Kusel, K., & Matthies, C. (2002). *Ecological consequences of the phylogenetic and physiological diversities of acetogens*.
- Dutta, S., & Rehman, P. (1997). *Biogás: The indian NGO experience*. New Delhi.
- Eastman, J., & Ferguson, J. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase anaerobic digestion. *Wat Pollut Control Fed*(53), 352-366.

- Echaendia, A., & Menoyo, A. (1990). Compostaje de Gallinaza en un sistema dinamico abierto. *Congreso Internacional de Química* (págs. 431-438). Tenerife: ANQUE.
- EREC. (2009). *Renewable energy policy review*. Sweden.
- Estrada Pareja, M. M. (Enero-junio de 2005). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 43-48.
- Fan, L., Chen, L., Mehta, C., & Chen, Y. (1985). Energy and available energy contents of cattle manure and digester sludge. *Agricultural Wastes*(13), 239-249.
- Fannin, K. (1987). Start up, operation, stability, and control in aerobic digestion of biomass. *Elsevier Applied Science*, 171-196. Recuperado el 16 de Octubre de 2018, de <https://www.elsevier.com/search-results?query=Start%20up%2C%20operation%2C%20stability%2C%20and%20control%20in%20aerobic%20digestion%20of%20biomass&labels>
- FAO. (2013). Producción de biogas por metanogénesis. *Aprovechamiento de residuos sólidos*, 42-47. Recuperado el 5 de Mayo de 2016
- Fernández, M. (2010). *Rol e impacto socioeconómico de las energías renovables en el área rural de Bolivia*. La Paz: Centro de Estudios para el desarrollo laboral agrario.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Campos, E., & Teira, M. R. (2000). El proceso de secado de purines en el marco de gestión integral de residuos ganaderos. *Residuos*(53), 40-56.
- Gallert, C., Bauer, S., & Winter, J. (1998). Effect of ammonia on anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population. *Microbiology and Biotechnology*(50), 495-501.
- Gao, K., & McKinley, K. (1993). Use of macroalgae for marine biomass production and CO2 remediation. *a review J. of App Phycology*(6), 45-60.
- García Garrido, S. (2009). *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Madrid: RENOVETEC.
- García Gutiérrez, G. d., Mondaca Fernández, I., Meza Montenegro, M. M., Fuentes, A. F., Balledera Córtez, J. d., & Gortarez Moroyoqui, P. (Julio de 2012). *Ideas@ CONCYTEG*. Obtenido de [http://www.concyteg.gob.mx/ideasConcyteg/Archivos/85\\_1\\_GUTIERREZ\\_GARCIA\\_ET\\_AL.pdf](http://www.concyteg.gob.mx/ideasConcyteg/Archivos/85_1_GUTIERREZ_GARCIA_ET_AL.pdf)
- García, A. (2000). *Calidad alimentaria de la mezcla de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol para bovinos de engorde*. Mexico.

- García, M. T., Campos, E., Dalmau, M., Illá, P., & Sanchez, J. (2006). Inhibition of biogas production by alkyl benzene sulfonates in a screening test for anaerobic biodegradability. *Biodegradation*, 17, 39-46.
- García, P. (2001). *Tecnologías energéticas e impacto ambiental: La biomasa como recurso renovable para la producción de calor y electricidad*. Madrid: McGraw Hill.
- Garfi, M., Ferrero, M., Velo, E., & Ferrer, I. (2011). Evaluating benefits of low cost household digester for rural Andean Communities. *Renewable and sustainable*, 576-581. Recuperado el 20 de Octubre de 2018, de [http:// upcommons.upc.edu](http://upcommons.upc.edu)
- Garrido, J. M., Flotats, X., Fernández, B., & Palatsi, J. (2009). *Biomasa* (Tercera ed.). Barcelona, España: UPC.
- Gerardi, H. (2003). *Upsets and Unstable Digester in the Microbiology of Anaerobic Digester*. New Jersey, USA: Hoboken.
- Google Earth. (Julio de 2016). *La información geográfica del mundo en tus manos*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de <https://www.google.com/earth/>
- Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes*. Lima, Peru: CEPIS.
- Han, J. L. (2008). Small scale fuel wood project in rural china. *Energy Polici*, 36, 2154-2162.
- Hashimoto, A. G. (1986). Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes. *Agricultural Waste*(17), 241-261.
- Hashimoto, A., & Chen, Y. (1982). methane from cattle wastes: effects of temperature, hydraulic retention time and influent substrate concentration on kinetic parameter (K). *Biotech Bioeng*(24), 2039-2052.
- Henze, M. (1995). *Wastewater, volumes and composition: Biological and chemical process*. Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Mexico: McGraw Hill education.
- Hilbert., J. A. (2007). *Manual para la producción de biogás* . México DF: Castelar. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)

- Hobson, P. N. (1995). The treatment of agricultural wastes, en anaerobic digestion: a waste treatment technology. *Critical reports on applied chemistry*, 31, 121.
- Hwu, C. H., & Lettinga, G. (1997). Acute toxicity of oleate to acetate utilizing methanogens in mesophilic and temperature anaerobic sludge. *Enzyme microbiology Technology*(21), 297-301.
- IDAE. (Octubre de 2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid: BESEL, S.A. Obtenido de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Digestores\\_Anaerobios\\_A2007\\_0d62926d.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf)
- Jarauta Rovira, L. (2005). "Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú". *Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano*(5). Recuperado el 22 de Octubre de 2017, de URI <http://hdl.handle.net/2099/2008>
- Kapdi, S. S., Vijay, V. K., Rajesh, S. K., & Prasad, R. (2004). Biogás scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in indian context. *Renewable Energy*(20), 1-8.
- Kennedy, J. K., & Berg, D. V. (1982). Anaerobic digestion of piggery waste using a stationary fixed film reactor. *Agric Wastes*(4), 151-158.
- Klinger, I., Alexander, R., & Marchaim, U. (1991). A suggested solution for slaughterhouse wastes: Uses of the residual materials after anaerobic digestion. *Bioresource Technology*(37), 127-134.
- Krugel, S., Nemeth, L., & Peddie, C. (1998). Extending thermophilic anaerobic digestion for producing class A biosolids at the greater Vancouver regional districts Annacis Island wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*(38), 409-416.
- Lagrange, B. (1979). *Biomethane. Principles, Techniques, Utilisation* (Vol. II). Edisual.
- Lay, J. J., Li, Y. Y., & Noike, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high solids sludge digestion. *Water Research*(31), 1518-1524.
- Li, G., Niu, S., Ma, L., & Zhang, X. (2009). Assessment of environmental and economic costs of rural household energy consumption in Loess Hilly Region, Gansu

- Province, China. *Renewable Energy*, 1438-1444. Recuperado el 20 de Octubre de 2018, de <http://www.sciencedirect.com>
- Lissens, G., Vandervivere, P., De Baere, L., Bley, E. M., & Verstraete, W. (2001). Solid waste digester. *Water Science Technology*(44), 91-102.
- Lockett, W. (1997). Digestores de gas metano para obtener combustibles. *The New. Alchemy Institute West*(2), 45-59.
- Lugónes, B. (2001). Analisis de biodigestores en funcionamiento . *Cuba Solar*, 25-42. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm)
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (1998). *Brock Biology of microorganisms* (Octava ed.). New Jersey: Prentice May International.
- Madrid, A. (2009). *Energías Renovables: Fundamentos, tecnologías y aplicaciones* (Vol. I). Madrid, Madrid: AMV - MUNDIPRENSA.
- Mae-wan, H. (2008). Biogas bonanza for third world development. *Institute of science in society*(27), 29-30. Obtenido de <http://www.i-sis.org.uk/BiogasBonanza.php>
- Magaña, J. (2009). *Energía para el desarrollo sostenible* (Tercera ed.). Barcelona: UPC.
- Mara, D., & Horan, N. J. (2003). *The handbook of water and waster microbiology*. Academy Press.
- Marchaim, U. (1992). *Biogás processes for sustainable development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Shmona: FAO Agricultural Service Bulletin. Recuperado el 12 de Enero de 2019, de <http://www.fao.org/3/T0541E/T0541E0e.htm#Chapter%20ten:%20Integrated%20a%20approach%20to%20the%20anaerobic%20digestion%20process>
- Marisa , C., Luis, R., & Sorto, R. (2010). ESTUDIO DEL PROCESO BIOQUIMICO DE FERMENTACION EN BIODIGESTORES PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS Y BIOFERTILIZANTE A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS. 51. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/138/1/10136039.pdf>
- Martínez, F. V., & Romero, J. (2017). *Diseño de biodigestor para la cooperativa El Polo R.L, ubicada en el municipio se San Sebastian de Yalí, Jinotega*. Managua. Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de <http://ribuni.uni.edu.ni/1582/1/91222.pdf>



- Massoud, M., & El-Fadel, M. (2001). Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution*(114), 177-185.
- Mata Álvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*(74), 3-16.
- Mathieu, L. (2014). Biomasa Clasificación y uso. 5-12. Madrid, España: Grupo ITEA. Recuperado el 16 de Junio de 2018, de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-termica-y-de-fluidos/fuentes-de-energia-2013/material-de-clase-1/ocw-fe-cap13.pdf>
- Metcalf, & Eddy. (1994). *Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales* (Tercera ed., Vol. I). Colombia: McGraw Hill. Recuperado el 11 de Febrero de 2019, de <http://uploaded.net/file/40eeojy>
- Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2011). *Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño* (Primera ed.). México: Alfaomega. Obtenido de <http://readingport.club/book?k=Fundamentos+De+Ingenieria+Ambiental&isbn=9789681859169&lang=es&source=firebaseapp.com#pdf>
- Milan, Z., Sánchez, E., Weiland, P., Borja, R., Martín, A., & Ilangovan, K. (2001). Influence of diferent natural zeolite concentrations on the anaerobic digestion of piggery waste. *Bioresource Technology*(80), 37-43.
- Ministerio de Energía y Minas. (Septiembre de 2017). *Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado el 3 de Marzo de 2019, de <http://www.mem.gob.ni/>
- Miranda, H. (2007). Biogas: Substratos, desarrollo de la técnica y costos. 5-9. Bremen, Alemania: UTEC. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de <https://docplayer.es/64060480-Biogas-substratos-desarrollo-de-la-tecnica-costos.html>
- Monnet, F. (2003). *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes*. Remade Scotland. Recuperado el octubre de 2018, de <http://www.remade.org.uk/media/9102/an%20introduction%20to%20anaerobic%20digestion%20nov%202003.pdf>
- Muller, V. (2003). Energy conservation in acetogenic bacteria. *Applied and Environmental*, 11(69), 6345–6353. doi:10.1128/AEM.69.11.6345-6353.2003

- Nitsch, J., & Rettich, S. (1993). Biogás, Usos en Baden Wurttemberg. *Engebnishand der Fachtagung am*(14), 20-31. Recuperado el 3 de Octubre de 2017
- NOM-010-STPS. (1999). Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. *Normativa*. DF Mexico, Mexico. Recuperado el 22 de Febrero de 2018, de <http://asinom.stps.gob.mx:8145/upload/nom/10.pdf>
- Nopharatana, A., Pullammanappallil, P. C., & Clarke, W. (2003). A dynamic mathematical model for sequential leach bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Biochemical Engineering Journal*(13), 21-33.
- Ortiz, J., & Aguila, L. (1997). La depuración biológica de efluentes industriales. *Ingeniería Química*(29), 147-153.
- Osorio, J., Ciro, H., & Gonzalez, H. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Rev. Fac. Nal. Agr*(2), 60.
- Parlett, M., & Hamilton, L. (1976). Evaluation as illumination. (Macmillan, Ed.) *Evaluation studies: Review anual, I*, 84-101. Recuperado el 19 de Enero de 2019, de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5656-8\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5656-8_9)
- Parr, J. F., & Colacicco, D. (1987). Organic materials as alternative nutrient sources. En *Energy in plant nutrition and pest control* (págs. 81-89).
- Pavlostathis, S. G., & Giraldo Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobics treatment: a critical review. *Critical reviews in enviromental control*, 21(6), 411-490. doi:DOI: 10.1080/10643389109388424
- Pedroza Pacheco, M. E. (1993). *Fundamentos de Experimentación Agrícola* (Primera ed.). Managua, Nicaragua: Editora de Arte S.A. Recuperado el 11 de Noviembre de 2016, de <http://cenida.una.edu.ni/textos/c10p372.pdf>
- Pedroza Pacheco, M. E., & Dicovski, L. M. (2006). *Sistema de análisis estadísticos con SPSS* (Primera ed.). Managua, Nicaragua: INTA/ILCA. Recuperado el 11 de Noviembre de 2016, de <http://repiica.iica.int/docs/B3064e/B3064e.pdf>
- Peece, R. E. (1983). Biotechnology for anaerobic waste treatment. *Science and Technology*(17), 416A - 427A.

- Pineda, E. B., De Alvarado, E. L., & Hernández De Canales, F. (1994). *Metodología de la Investigación* (Segunda ed., Vol. II). (PALTEX, Ed.) Washignton: OPS. Obtenido de <http://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/3132>
- Piura López, J. (2006). *Metodología de la investigación científica*. Managua, Nicaragua: PAVSA.
- Plaster, E. J. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo*. Madrid, España: Paraninfo. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <http://ilyaybarra.tk/download/-0XyPQAACAAJ-la-ciencia-del-suelo-y-su-manejo>
- Poeschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Prospect for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 14, 1782-1797.
- Pohland, F. G. (1992). *Diseño de procesos anaerobicos para el tratamiento de residuos industriales y municipales* (Vol. 7). Landcaster, USA: Technomic Pub. Co.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. (2012). Household Biogas Digesters. *Energies*, 2911-2942. Recuperado el 18 de Diciembre de 2018, de <http://www.mdpi.com>
- Ramírez, G. (1983). *Compostaje y uso de residuos orgánicos en Costa Rica*. Roma, Italia: FAO.
- RedBioLAC. (s.f.). Recuperado el 10 de Enero de 2019, de <http://redbiolac.org>
- Riera, N., Della, V., Rizo, P., Bressan, M., & Zarate, N. (2014). Evaluación del proceso de compostaje de dos mezclas de residuos avícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 46(1), 195-203. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018, de <http://www.redalyc.org/pdf/3828/382837657014.pdf>
- Rodriguez, A. (2007). *Aprovechamiento del biogás para la generación eléctrica en el sector agropecuario*. Consultado 27 de julio de 2013.
- Rodriguez, M. (2013). historia del biogás , primeros pasos. *Ciencia y sociedad*, 72-77.
- Ruíz Olabuenaga, J. (2003). *metodología de la Investigación Cualitativa* (Quinta ed.). Bilbao, España: Deusto. Recuperado el 18 de Marzo de 2019, de <https://es.scribd.com/document/250867128/Metodologia-de-la-Investigacion-Cualitativa-JOSE-IGNACIO-RUIZ-OLABUENAGA-2012-pdf>

- Salazar, Salazar, E., Trejo, H., Lòpez, J., & Serrano, s. (2010). Efecto residual de estièrcol bovino sobre rendimiento de maiz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, XX(4).
- Sánchez, D. C., & Calero, F. (2013). *Obtención de Biogás a partir de la mezcla estièrcol bovino-agua mediante la construcción de un Biodigestor tipo Batch a escala de laboratorio, perteneciente al Departamento de Química de la Facultad de Ciencias e Ingenierías de la UNAN –Managua, febrero -*. Tesis de grado, Managua. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/9288/1/3804.pdf>
- Sandoval, A. (2006). *Manual de tecnologías limpias en Pymes del sector residuos sólidos*. Organización de Estados Americanos. Lima: OEA. Recuperado el 12 de Julio de 2018, de <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20090128192419.pdf>
- Schink, B. (1997). Energetic of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiol*(61), 262-280.
- Schink, B. (1997). Energetics of Syntrophic Cooperation in Methanogenic Degradation. *Microbiology and Molecular Biology*(2), 262-280. Recuperado el 10 de Mayo de 2017
- Schwartz, H., & Jacobs, J. (1984). *Sociología cualitativa. Método para la reconstrucción de la realidad* (Primera ed.). Mexico DF, Mexico: Trillas.
- Sierra, C., & Rojas, C. (2010). *La materia orgànica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos*. Santiago: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Recuperado el 13 de Diciembre de 2017, de <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR28122.pdf>
- Sikes, R. M. (1975). Theoretical heterotrophic yields. *Control Fed*(47), 591-600.
- Sinh, R. B. (1974). *The biogas plant. generating mehane from organic wastes*. Ajitmal, India: UP.
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. *Semantic Scholar*. Recuperado el 18 de Febrero de 2019, de <https://www.semanticscholar.org/author/Noem%C3%AD-Sogari/91847405>
- Soria , M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., & Trinidad, J. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta liquida de cerdo. *Terra*

- Latinoamericana*, 19(4), 353-362. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>
- Speece, R. (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environment science technology*, 17(9), 416-427. doi:10.1021/es00115a725
- Stafford, D. A. (1982). the effects of mixing and fatty acid concentration on anaerobic digester performance. *Biomass*(II), 43-55.
- Stams, M. (1994). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. (66), 271-294.
- Surendra, K., Takara, D., Hashimoto, A., & Kumar, S. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 846-859. Recuperado el 18 de Diciembre de 2018, de <http://www.sciencedirect.com>
- Tchobanoglous, G., Hilary, T., & Vigil, S. (1997). *Gestión integral de residuos sólidos* (Vol. II). España: McGraw Hill. Recuperado el 19 de Mayo de 2019, de <https://es.scribd.com/doc/125378511/tchobanoglous>
- Toruño, L. A., Lira, E., Casco, D., & Reyes, E. (2016). *Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada*. Estelí: Repositorio UNAN Managua. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/5540>
- Toruño, L., Lira, E., Casco, D., & Reyes, E. (2016). *Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos*. Investigación Académica. Recuperado el 22 de Abril de 2019, de <http://repositorio.unan.edu.ni/5547/1/17847.pdf>
- Turner, C., & Burton, C. H. (Technology). The inactivation of viruses in pig slurries: a review. *Bioresource*(61), 9-20.
- Valdivia, T. R. (2000). *Uso de Biogás para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado*. Tesis de Maestría en Energías Renovables, Universidad Nacional Jorge Basadre grohmann, Lima. Obtenido de <http://www.tesis.unjbg.edu.pe/bitstream>
- Valencia, D., & Ramírez, M. (2009). la industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos*(73), 27-31. Recuperado el 12 de Abril de 2019, de

<https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/La-industria-de-la-leche-y-la-contaminaci%C3%B3n-del-agua.pdf>

- Van Lier, J. B., Hulsbeek, J., Stams, A. J., & Lettinga, G. (1993). Temperature susceptibility of thermophilic methanogenic: implication for reactor start-up and operation. *Bioresource Technology*(43), 227-235.
- Varnero, M., & Arellano, J. (1990). *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. Santiago: FAO. Recuperado el 12 de Noviembre de 2018, de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Viñas, M. (1994). Criterios de diseño y escalado de reactores anaerobios. *Ciencia y Tecnología*(57), 111-123. Recuperado el 22 de Enero de 2019, de [https://www.worldcat.org/title/criterios-de-diseno-y-escalado-de-reactores-anaerobios/oclc/69846127&referer=brief\\_results](https://www.worldcat.org/title/criterios-de-diseno-y-escalado-de-reactores-anaerobios/oclc/69846127&referer=brief_results)
- Vogt, G. M., Liu, H. W., Kennedy, K. J., Vogt, H. S., & Holbein, B. E. (2002). Super blue box recycling (SUBBOR) enhanced two stage. Anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: Laboratory pilot studies. *Bioresource Technology*(85), 291-299.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78-83.
- Werner, E. (1983). *Bioconversión: producción de energía utilizando desperdicios agrícolas* (Primera ed.). La Paz, Bolivia: FAO.
- Williams, C. (2013). Gestión de los residuos de aves de corral en los países en desarrollo. *Revisión del Desarrollo Agrícola*, 48-60. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/016/al716s/al716s00.pdf>
- Yu, L., Yaoqiu, K., Ningshen, H., Zhifeng, W., & Anzhong, X. (2008). Popularizing household scale biogas digester for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation. *Renewable energy*, 2027-2035.
- Zeikus, J. L. (1979). Thermophilic bacteria: Ecology, physiology and technology. *Enzyme and Microbial Technology*(4), 243-252.

## Anexos

### Anexo A 1 Formato de Registro de datos de caracterización de los sustratos



UNIVERSIDAD NACIONAL FACULTAD REGIONAL  
REGIONAL MULTIDISCIPLINARIA DE ESTELÍ  
UNAN-MANAGUA FAREM- ESTELÍ

COD. 0003

Formato de registro de datos de producción de biogas

Evaluación de Diferentes Sustratos Orgánicos para la producción de Biogás  
por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada

Línea de investigación: Biomasa

Evaluar diferentes sustratos para la producción de biogás por medio del proceso de digestión no controlada.

Responsable: \_\_\_\_\_

Lugar : \_\_\_\_\_ Hora/Fecha : \_\_\_\_\_

#### Muestras de los sustratos (Afluentes)

Tipo de Sustrato	Temp. Inicial	105°C	Hora Inicio:	Masa Seca (g)	Hora Final:	%MH( Mrh% = Mh/Mb *(100%))	Temp. Final	550°C	Hora Inicial:	Hora Final:
	Muestras	Masa Bruta(Mb=Mh +Ms)	Masa Humeda (g)		%Ms( Mrs% = Ms/Mb *(100%))		Cenizas (g)	Msv=(Ms-Mc)	% Cenizas( Mrc% = Mc/Ms *(100%))	% Sólidos Volátiles ( Mrs% = Msv/Ms *(100%))
Caballo	Muestra 1									
Ganado	Muestra 2									
Gallinaza	Muestra 3									
Cerdo	Muestra 4									

Anexo A 2 Formato de registro de producción de biogás



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
 UNAN-MANAGUA  
 FACULTAD REGIONAL MULTIDISCIPLINARIA  
 FAREM- ESTELÍ  
 Formato de registro de datos de producción de biogás  
 Evaluación de Diferentes Sustratos Orgánicos para la producción de Biogás  
 por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada

Línea de investigación: Biomasa  
 Evaluar diferentes sustratos para la producción de biogás por medio del proceso de digestión no controlada.

Responsables: \_\_\_\_\_

Lugar : \_\_\_\_\_ Fecha de inicio: \_\_\_\_\_ Fecha de Finalización: \_\_\_\_\_

**Muestras de los sustratos (Efluentes) Relación de cada sustrato 2:1**

Muestra #1 Sustrato Caballo				Muestra #2 Sustrato Ganado				Muestra #3 Sustrato Gallinaza				Muestra #4 Sustrato Cerdo				Muestra #5 Co-digestión				
TR(Días)	Temperatura(°C)	pH	Producción(ml)	TR(Días)	Temperatura(°C)	pH	Producción(ml)	TR(Días)	Temperatura(°C)	pH	Producción(ml)	TR(Días)	Temperatura(°C)	pH	Producción(ml)	TR(Días)	Temperatura(°C)	pH	Producción(ml)	
1				1				1				1				1				
2				2				2				2				2				
3				3				3				3				3				
4				4				4				4				4				
5				5				5				5				5				
6				6				6				6				6				
7				7				7				7				7				
8				8				8				8				8				
9				9				9				9				9				
10				10				10				10				10				
11				11				11				11				11				
12				12				12				12				12				
13				13				13				13				13				
14				14				14				14				14				
15				15				15				15				15				
16				16				16				16				16				
17				17				17				17				17				
18				18				18				18				18				
19				19				19				19				19				
20				20				20				20				20				
21				21				21				21				21				
22				22				22				22				22				
23				23				23				23				23				



### **Guía de Entrevista**

**Lugar:** \_\_\_\_\_

**Fecha:** \_\_\_\_\_ **Hora:** \_\_\_\_\_

**Entrevistador:** \_\_\_\_\_

**Entrevistado:**

**Objetivo de la entrevista:** beneficios económicos, sociales, ambientales y de salud del uso de biodigestores implementados en la zona rural.

#### **Preguntas**

1. ¿Cuál fue la razón que lo motivó a implementar el proyecto de biodigestores en esta comunidad?
2. ¿Han sido capacitados los beneficiarios para el uso y mantenimiento de los biodigestores?
3. ¿Cuál es la percepción de las mujeres sobre el sistema de biodigestor?
4. ¿Cuáles son los beneficios económicos que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?
5. ¿Cuáles son los beneficios en salud que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?
6. ¿Cuáles son los beneficios ambientales que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?
7. ¿Cuáles son los beneficios sociales que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?
8. ¿De acuerdo a los resultados obtenidos, considera que el proyecto ha sido exitoso?

**Guía de Observación**

**Estado actual de los biodigestores**

**Fecha** \_\_\_\_\_

**Lugar** \_\_\_\_\_

Ejes	Acciones	Valoración				
		Mala	Regular	Buena	Muy buena	Excelente
<b>Estado del biodigestor</b>	Estado de la estructura del biodigestor					
	Filtro de absorción					
	Cerca perimetral del biodigestor					
	Estado del efluente					
	Estado del afluente					
	Estado actual de la pila de almacenamiento					
	Fugas visibles en la tubería de distribución de biogás					
	Estado actual de las llaves de seguridad					
	Color de la llama					
<b>Observaciones:</b>						

Anexo B 1 Matriz para la construcción de la entrevista

Objetivos específicos	Categoría	Código	Subcategorías	Definición	Informantes	Preguntas
Establecer el impacto económico, social, ambiental y de salud del uso de biodigestores en cuatro comunidades de Estelí.	Impacto económico	IE	Ahorro por consumo de leña o gas.	Cantidad de dinero (C\$) que ahorra por no comprar leña o gas butano.	Dueños de sistemas de biodigestores	
			Ahorro en consultas médicas y medicamentos	Cantidad de dinero (C\$) que ahorra en consultas médicas y medicamentos	Dueños de sistemas de biodigestores	
	Impacto social	IS	Satisfacción con la tecnología	Grado de satisfacción por el uso de biodigestores	Dueños de sistemas de biodigestores	
			Energía	El grado de bienestar de las personas por contar con energía para cocción de alimentos.	Dueños de sistemas de biodigestores	
	Impacto ambiental	IA	Reducción de tala de árboles	Es un proceso provocado generalmente por la acción humana, en el que se destruye la superficie	Dueños de sistemas de biodigestores	

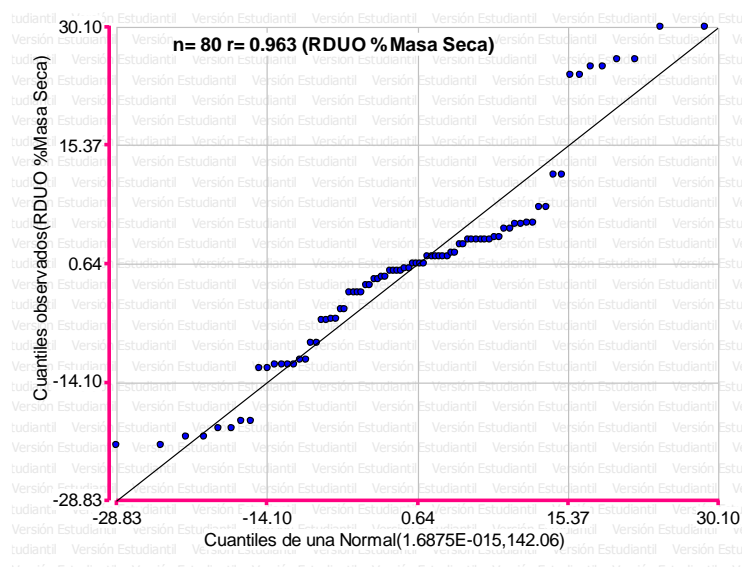
				forestal.		
	Impacto en salud	ISD	Reducción de enfermedades respiratorias y de visión causados por el humo.	Menor cantidad de enfermos.	Dueños de sistemas de biodigestores	

Anexo B 2 Matriz de análisis de datos de la entrevista aplicada

<b>Preguntas</b>	<b>Respuestas</b>	<b>Categoría</b>	<b>Análisis</b>
¿Cuál fue la razón que lo motivo a implementar el proyecto de biodigestores en esta comunidad?			
¿Han sido capacitados los beneficiarios para el uso y mantenimiento de los biodigestores?			
¿Cuál es la percepción de las mujeres sobre el sistema de biodigestor?			
¿Cuáles son los beneficios económicos que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?			
¿Cuáles son los beneficios en salud que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?			
¿Cuáles son los beneficios ambientales que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?			

<b>Preguntas</b>	<b>Respuestas</b>	<b>Categoría</b>	<b>Análisis</b>
<p>¿Cuáles son los beneficios sociales que se ha logrado con la implementación de esta tecnología?</p>			
<p>¿De acuerdo a los resultados obtenidos, considera que el proyecto ha sido exitoso?</p>			

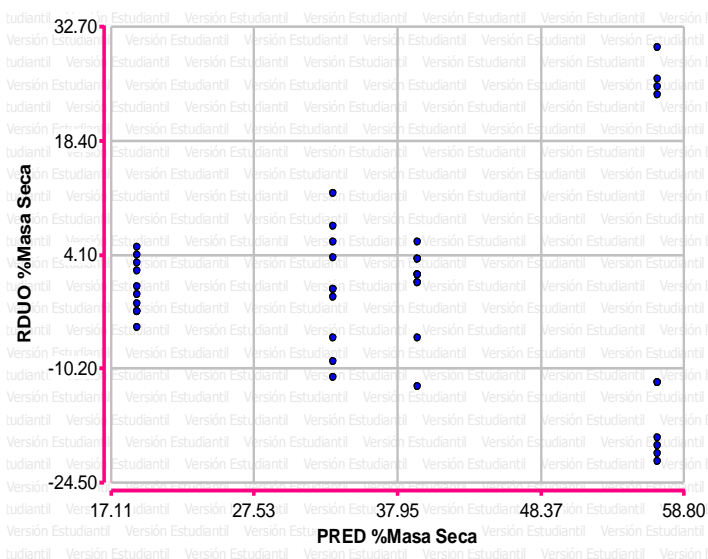
## Anexo C 1 Normalidad de los residuos ANOVA 1



### Prueba de Shapiro Francia.

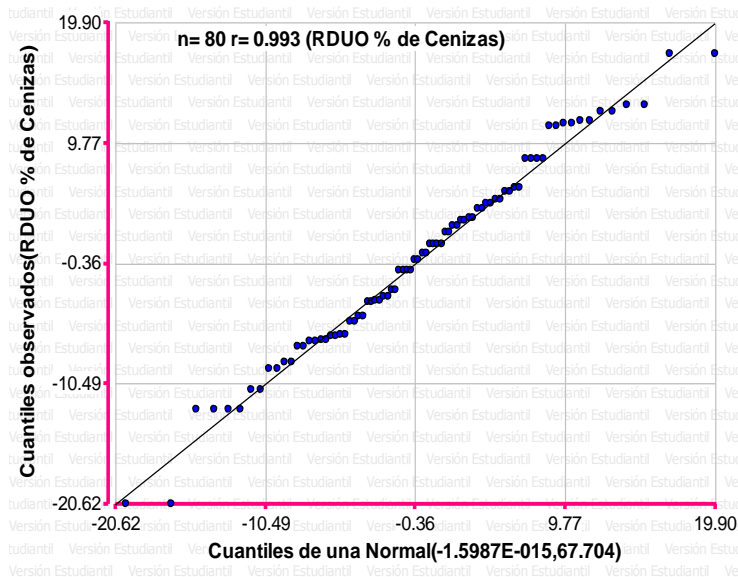
#### Prueba de Levene RDUO %Masa Seca

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	11222.80	76	147.67		
Total	11222.80	79			



### Prueba de Independencia de los residuos.

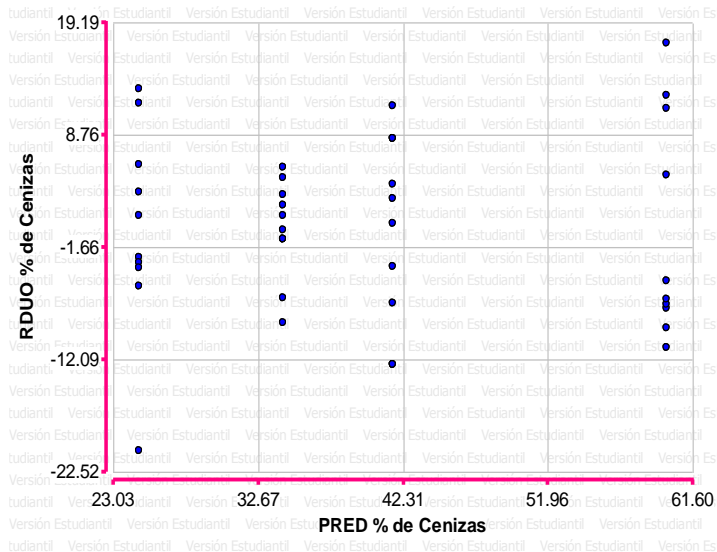
## Anexo C 2 Normalidad de los residuos ANOVA 2



Prueba de Shapiro Francia.

Prueba de Levene RDUO % de cenizas

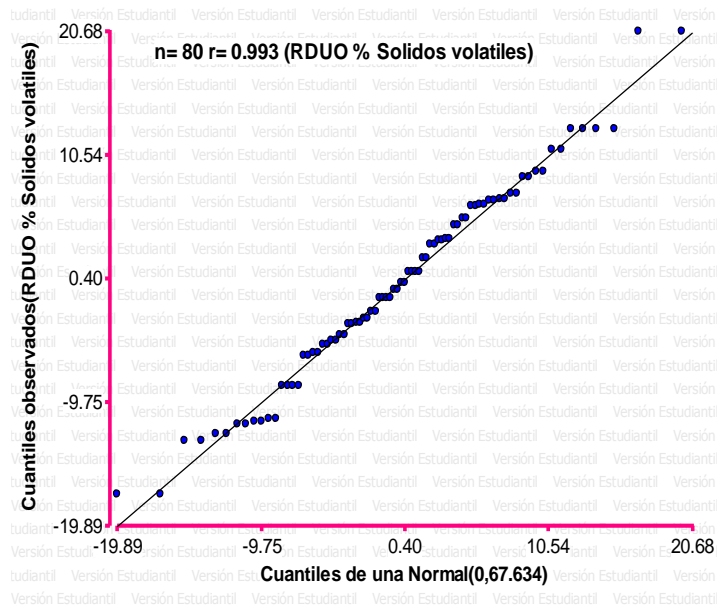
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	5348.61	76	70.38		
Total	5348.61	79			



Prueba de Independencia de los residuos.



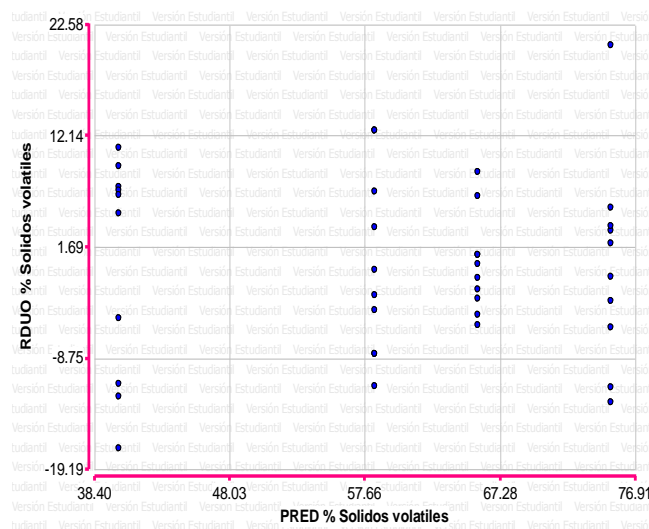
### Anexo C 3 Normalidad de los residuos ANOVA 3



Prueba de Shapiro Francia.

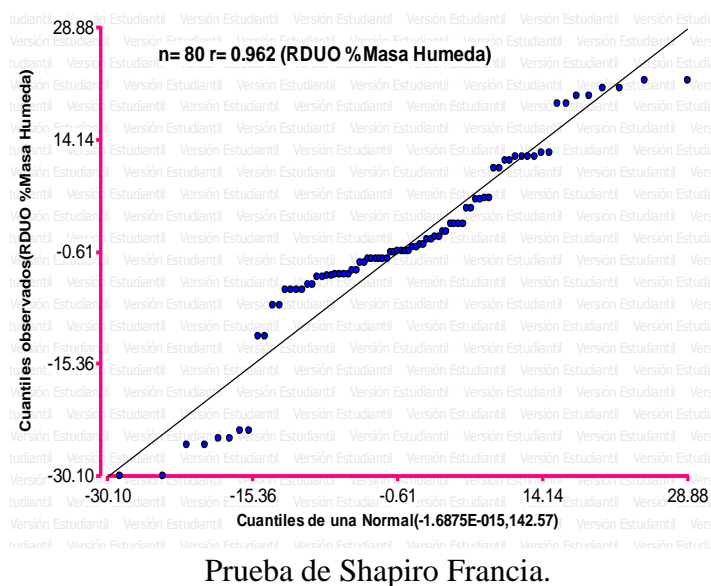
### Prueba de Levene RDUO % Sólidos Volátiles

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Error	5343.05	76	70.30		
Total	5343.05	79			



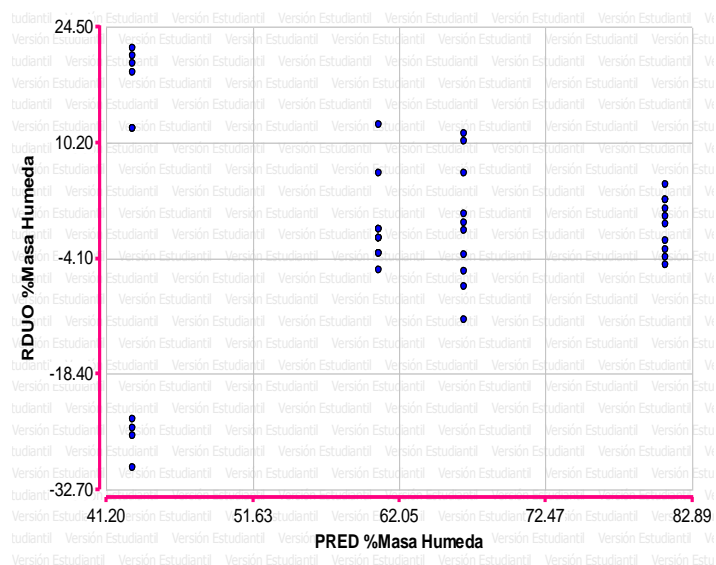
Prueba de independencia de los residuos.

## Anexo C 4 Normalidad de los residuos ANOVA 4

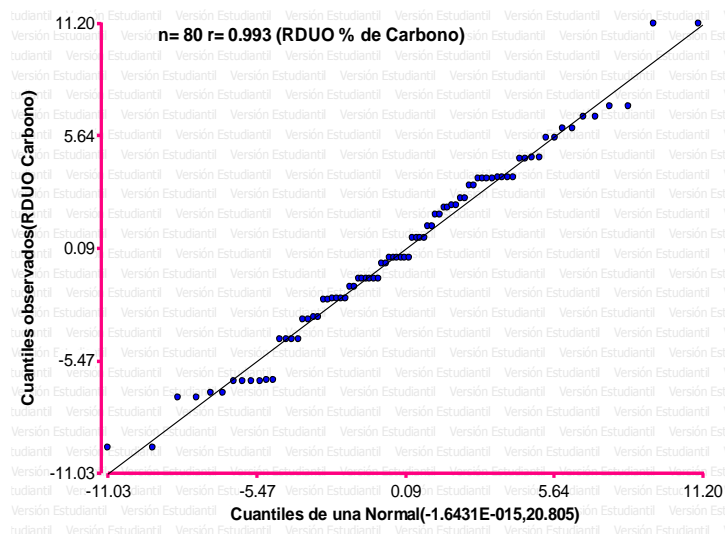


### Prueba de Levene RDUO % Masa húmeda

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	11262.80	76	148.19		
Total	11262.80	79			



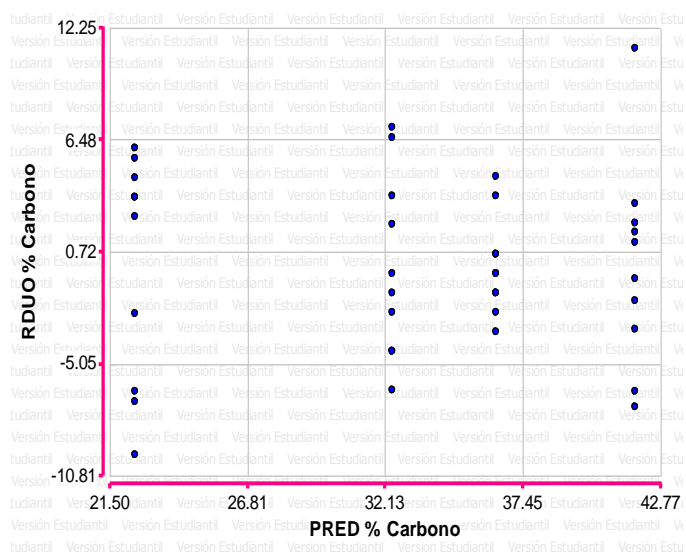
## Anexo C 5 Normalidad de los residuos ANOVA 5



### Prueba de Shapiro Francia.

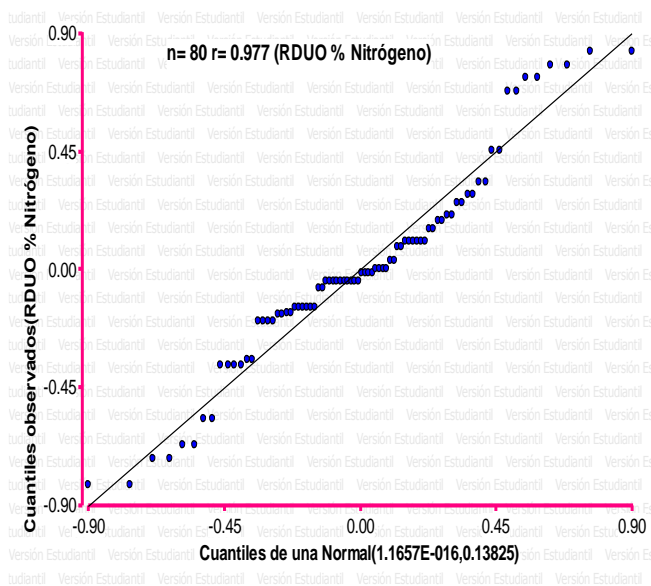
#### Prueba de Levene RDUO carbono

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	1643.61	76	21.63		
Total	1643.61	79			



### Prueba de independencia de los residuos.

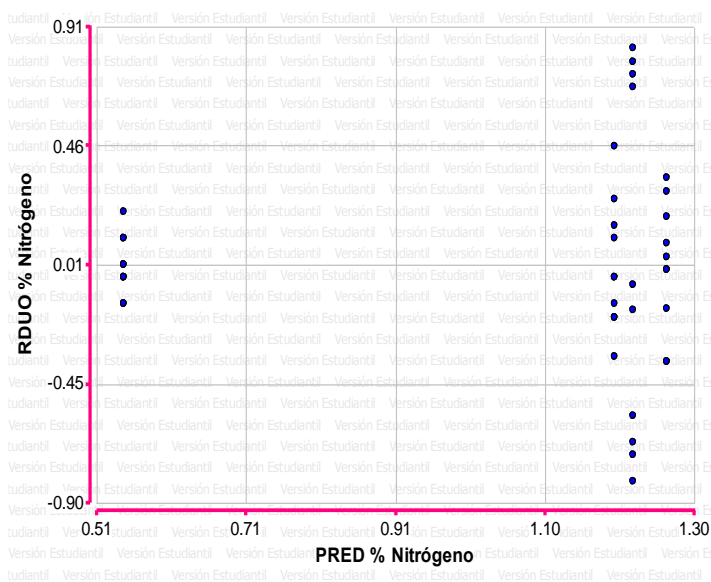
## Anexo C 6 Normalidad de los residuos ANOVA 6



Prueba de Shapiro Francia.

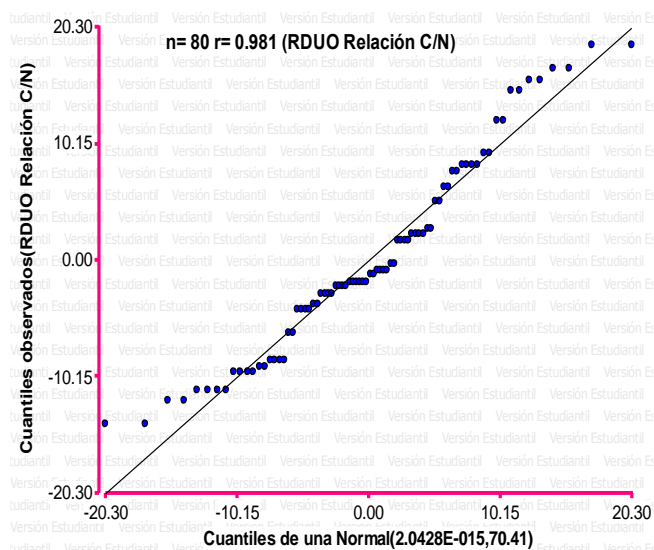
Prueba de Levene RDUO nitrógeno

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	10.92	76	0.14		
Total	10.92	79			



Prueba de independencia de los residuos.

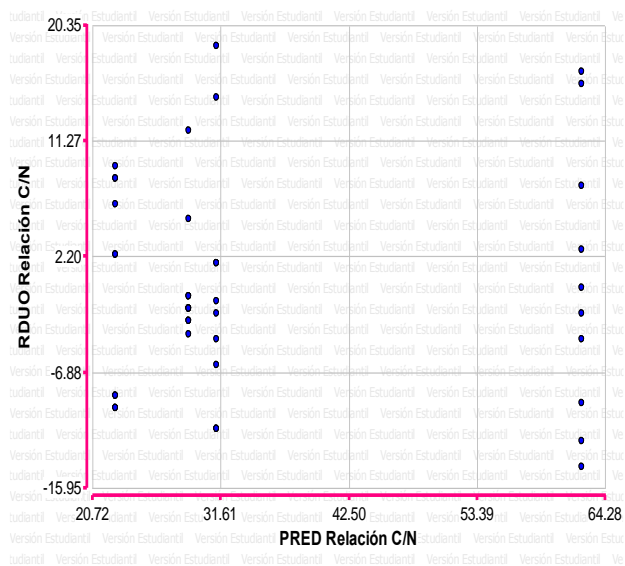
## Anexo C 7 Normalidad de los residuos ANOVA 7



### Prueba de Shapiro Francia.

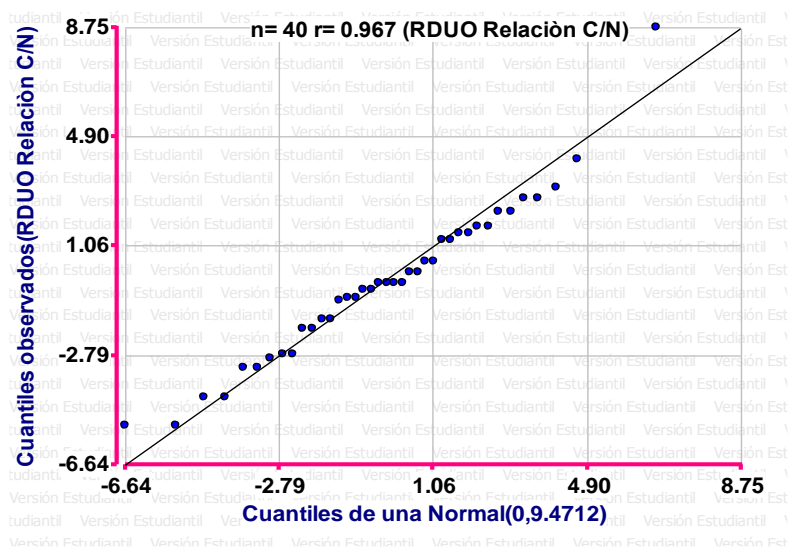
#### Prueba de Levene RDUO Relación C/N

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.00	3	0.00	0.00	>0.9999
Tratamientos	0.00	3	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	5562.40	76	73.19		
Total	5562.40	79			



### Prueba de independencia de los residuos.

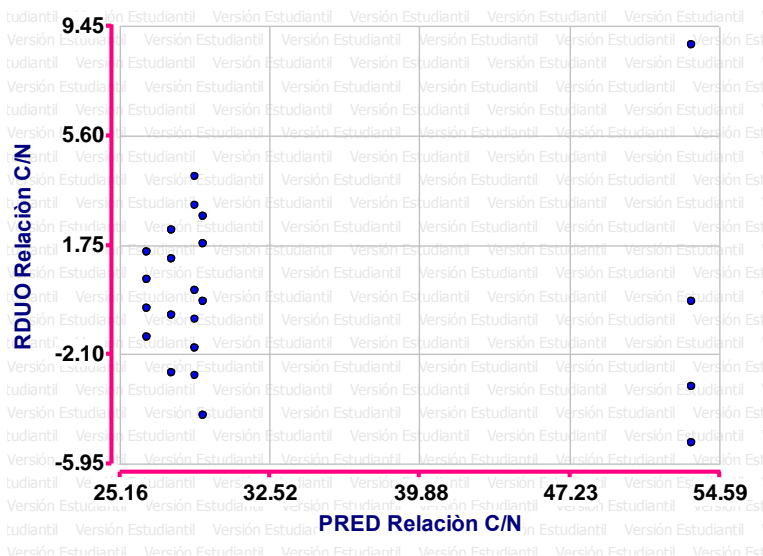
## Anexo C 8 Normalidad de los residuos ANOVA 8



### Prueba de Shapiro Francia

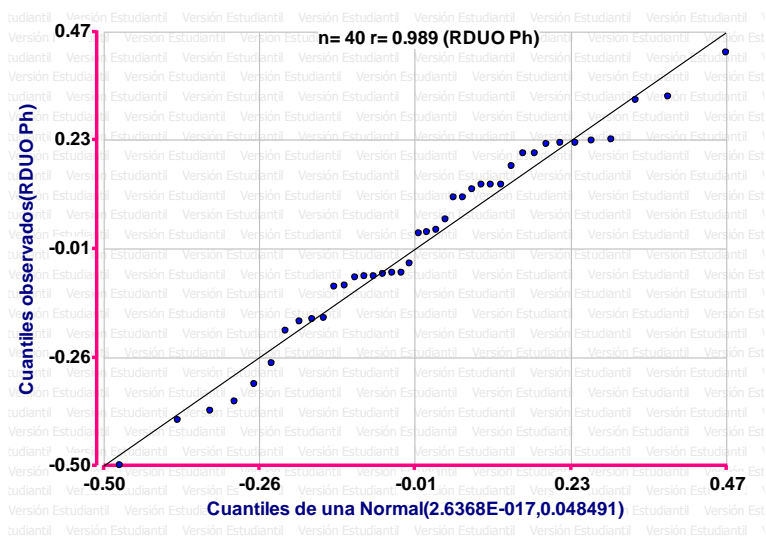
#### Prueba de Levene RDUO Relación C/N

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Sustratos (Tratamiento)	0.00	4	0.00	0.00	> <b>0.9999</b>
Error	369.38 35	10.55			
Total	369.38 39				



### Prueba de independencia de los residuos.

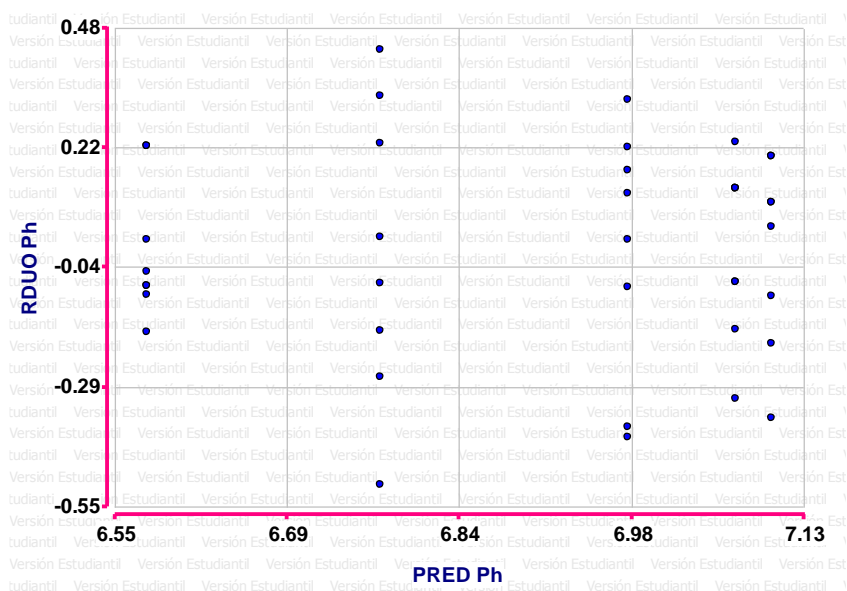
## Anexo C 9 Normalidad de los residuos ANOVA 9



Prueba de Shapiro Francia.

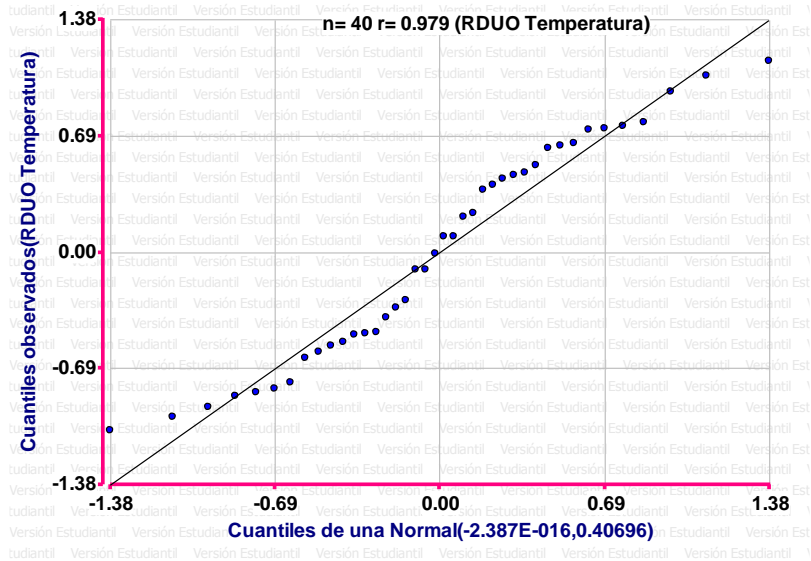
### Prueba de Levene RDUO pH

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Sustratos (Tratamiento)	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Error	1.89	35	0.05		
Total	1.89	39			



Prueba de independencia de los residuos del pH.

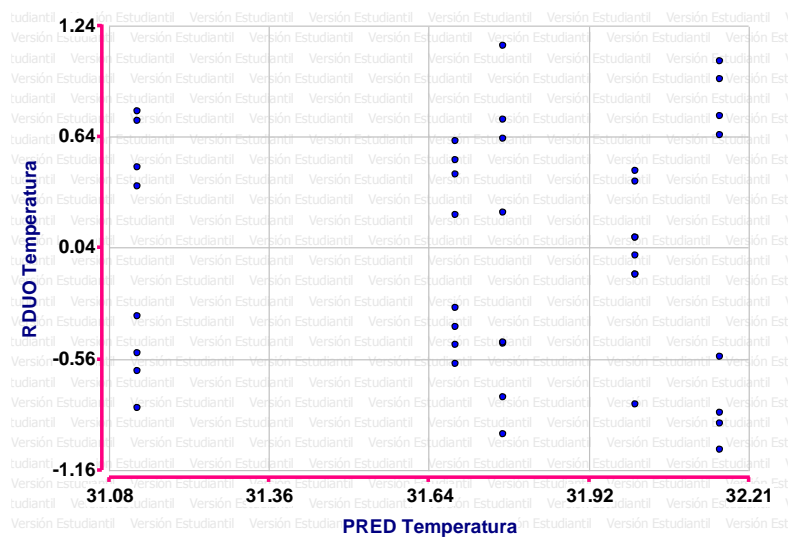
## Anexo C 10 Normalidad de los residuos ANOVA 10



Prueba de Shapiro Francia.

Prueba de Levene RDUO temperatura

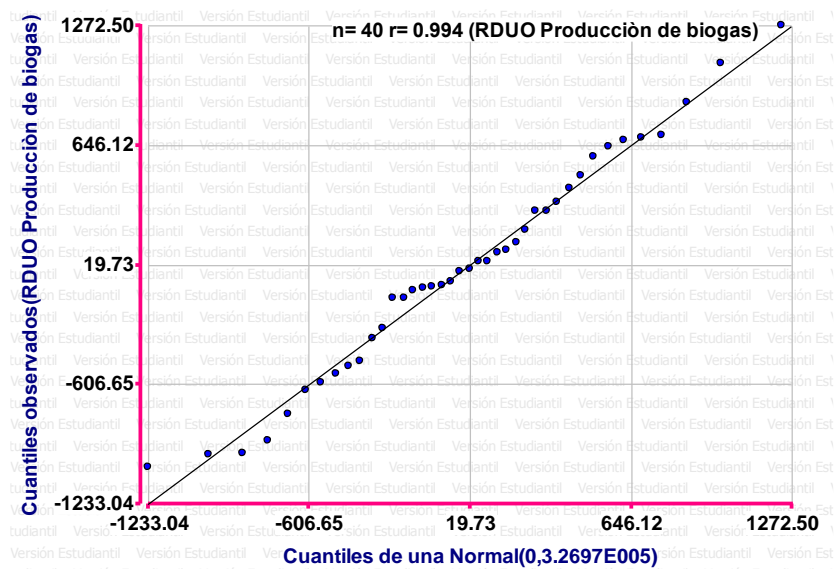
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Sustratos (Tratamiento)	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Error	15.87	35	0.45		
Total	15.87	39			



Prueba de independencia de los residuos.



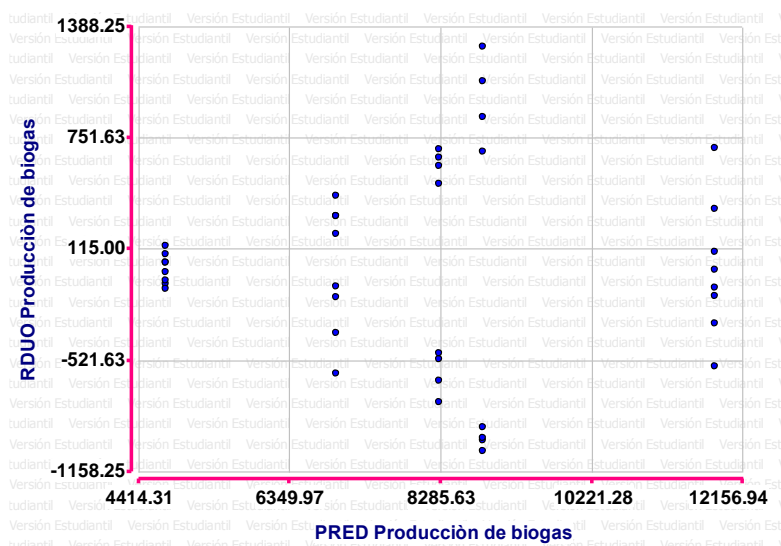
## Anexo C 11 Normalidad de los residuos ANOVA 11



Prueba de Shapiro Francia.

Prueba de Levene RDUO Producción de biogás

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Sustratos (Tratamiento)	0.00	4	0.00	0.00	>0.9999
Error	15.87	35	0.45		
Total	15.87	39			



Prueba de independencia de los residuos.