

**Alternativa para la valorización energética de los residuos agroindustriales generados en la
finca La Esperanza –Guapota, Santander--**

Viviana Marcela Pinzón Díaz

**Trabajo de grado presentado como requisitos para optar al título de Magíster en
Ingeniería Ambiental**

Director:

Mabel Quintero

Mcs. Ciencias Básicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2019

*E*n todo el camino que recorrí para llegar a cumplir esta meta quiero resaltar el acompañamiento, guía, dedicación y conocimientos de la profesora Mable Quintero, también porque en el pregrado fue la persona que me dio la primera oportunidad de trabajar en el grupo de investigación, el cual después sería otra casa para mí. A su esposo el ingeniero Franklin Patiño quien también me asesoro y acompañó en las largas reuniones.

Adicionalmente quiero dar gracias a mi familia, amigos y compañeros que de una u otra forma me ayudaron, apoyaron en este logro. Especialmente quiero agradecer a mi tía Nancy Pinzón Acevedo por estar ahí en los peores momentos, en ayudarme cuando las circunstancias no me permitían seguir estudiando. De igual forma quiero agradecer el apoyo incondicional de Olivo Augusto Villamizar Sanabria y Juan José Landínez Cruz, doy gracias por tener la oportunidad de haberlos conocido y haber tenido su ayuda en todo momento en la realización de esta meta.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo general	20
1.2 Objetivos específicos	20
2. Marco teórico	21
2.1 Lactosuero	21
2.2 Estiércol bovino	22
2.3 Digestión anaeróbica	23
2.3.1 Etapas de la digestión anaeróbica	23
2.3.2 Efluente	27
2.3.3 Parámetros claves del proceso de digestión anaeróbica	27
2.4 Potencial de biometanización	30
2.5 Co-Digestión anaeróbica	30
2.6 Digestores	31
2.6.1 Biodigestores Discontinuos o Tipo Batch	32
2.6.2 Biodigestores Semi-Continuos	33
2.6.3 Biodigestores Continuos	36

3. Metodología	37
3.1 Análisis bibliométrico	38
3.2 Caracterización del lactosuero y estiércol bovino	39
3.3 Cálculo del potencial de biometanización teórico	39
3.4 Selección de un tipo de biodigestor	40
3.5 Diseño de un prototipo del biodigestor	41
3.5.1 Determinación de los parámetros del biodigestor.....	41
3.6 Alternativa de valorización	47
3.6.1 Poder calorífico	48
3.6.2 Potencial Energético	48
3.6.3 Eficiencia de eliminación de materia orgánica	49
3.6.4 Alternativas de usos del biogás y efluente de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol bovino.....	49
3.6.5 Costos.....	50
4. Resultados	51
4.1 Análisis bibliométrico	51
4.1.1 Digestión Anaeróbica.....	52
4.1.2 Digestión anaeróbica del lactosuero	55
4.1.3 Digestión anaeróbica del estiércol bovino	58
4.1.4 Digestión anaeróbica del LS y el EB	60
4.2 Caracterización del lactosuero y el estiércol bovino.....	62
4.2.1 Caracterización de LS	62
4.2.2 Composición elemental del LS	63

4.2.3 Caracterización del EB	65
4.2.4 Composición elemental del EB.....	66
4.3 Cálculo del potencial de biometanización teórico	67
4.4 Selección de un tipo de biodigestor	68
4.5 Diseño de un prototipo del biodigestor rural	73
4.5.1 Descripción del área de estudio	73
4.5.2 Descripción de los elementos necesarios para la construcción del sistema anaerobio de tratamiento de residuos para la finca La Esperanza.....	74
4.5.3 Parámetros de diseño del biodigestor	76
4.6 Alternativa de valorización para los residuos de la finca La Esperanza.....	80
4.6.1 Poder calorífico.....	80
4.6.2 Potencial energético	81
4.6.3 Alternativas de uso del biogás de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol bovino	82
4.6.4 Alternativas de uso del efluente de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol bovino	87
4.6.5 Eficiencia de eliminación de materia orgánica	89
4.7 Costos.....	90
4.7.1 Costos para el efluente	92
5. Conclusiones	94
Referencias bibliográficas.....	95
Apéndices.....	104

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Etapas de la digestión anaerobia.....	24
<i>Figura 2.</i> Etapa hidrolítica de la digestión anaeróbica.	25
<i>Figura 3.</i> Biodigestor tipo batch.....	33
<i>Figura 4.</i> Biodigestor tipo chino.....	34
<i>Figura 5.</i> Biodigestor tipo hindú.	35
<i>Figura 6.</i> Biodigestor tipo Taiwán.....	36
<i>Figura 7.</i> Biodigestor tipo mixto.	37
<i>Figura 8.</i> Esquema metodológico de la tesis.....	38
<i>Figura 9.</i> Esquema de la metodología para calcular las dimensiones de un biodigestor.	42
<i>Figura 10.</i> Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores.....	47
<i>Figura 11.</i> Relación de los artículos de digestión anaeróbica.	52
<i>Figura 12.</i> Documentos publicados sobre digestión anaeróbica.	53
<i>Figura 13.</i> Publicaciones en el tema de DA en diferentes países los últimos 18 años.	54
<i>Figura 14.</i> Publicaciones en el tema de DA con LS.....	56
<i>Figura 15.</i> Países de mayor publicación sobre la DA con LS otros sustratos.	57
<i>Figura 16.</i> Publicaciones en el tema de DA con EB.	58
<i>Figura 17.</i> Países de mayor publicación sobre la DA utilizando estiércol bovino.....	59

<i>Figura 18.</i> Publicaciones en el tema de DA con LS y EB.....	60
<i>Figura 19.</i> Países de mayor publicación sobre la DA utilizando LS y EB.....	61
<i>Figura 20.</i> Vista lateral de los prototipos.	77
<i>Figura 21.</i> Vista frontal de los prototipos.....	77
<i>Figura 22.</i> Vista frontal de los prototipos.....	79
<i>Figura 23.</i> Variables del proceso.....	81
<i>Figura 24.</i> Alternativa de valoración energética.	82

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de la digestión anaeróbica	43
Tabla 2. Factores de producción para el cálculo del PB.	45
Tabla 3. Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores.	47
Tabla 4. Rangos reportados por la literatura para el lactosuero.....	63
Tabla 5. Caracterización del sustrato e inóculo utilizados en el diseño del biodigestor rural.	64
Tabla 6. Rangos reportados por la literatura para el estiércol bovino.....	65
Tabla 7. Rendimientos teóricos de producción de metano del LS y el EB.....	67
Tabla 8. Matriz DOFA.	68
Tabla 9. Criterios ponderados para la matriz DOFA.....	72
Tabla 10. Análisis de la Matriz DOFA.	72
Tabla 11. Especificaciones del biodigestor	76
Tabla 12. Condiciones de operación del biodigestor	78
Tabla 13. Producción de biogás.	79
Tabla 14. Variables de salida.	80
Tabla 15. Cantidad de energía por unidad de masa.....	80
Tabla 16. Potencial energético.	81
Tabla 17. Tiempo y consumo de biogás en estufas adaptadas.	84

Tabla 18. <i>Tiempo y consumo de biogás en lámparas adaptadas.</i>	85
Tabla 19. <i>Consumo en vatios de diferentes electrodomésticos.</i>	87
Tabla 20. <i>Eficiencia del biodigestor.</i>	90
Tabla 21. <i>Componentes económicos utilizado en el cálculo de los costos de inversión total para la DA del LS y el EB.</i>	91
Tabla 22. <i>Nutrientes comparativos entre abonos.</i>	92
Tabla 23. <i>Potencial valor económico del efluente como posible remplazo de sintéticos.</i>	93

Lista de apéndices**Pág.**

Apéndice A. Cuestionario Finca La Esperanza.	104
Apéndice B. Tabla de los parámetros de diseño para los prototipos de los biodigestores tipo taiwán.	106
Apéndice C. Cotización de los materiales necesarios para la construcción de los prototipos de biodigestores tipo taiwán.	107
Apéndice D. Cotización de equipos sugeridos para uso de biogás como alternativa.	109

Lista de abreviaturas

AH: Actividad hidrolítica

AGV: Ácido graso volátil

AME: Actividad metanogénica

AT: Alcalinidad total

Co-DA: Co-digestión anaeróbica

DA: Digestión anaeróbica

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

EB: Estiércol bovino

LS: Lactosuero

MO: Materia orgánica

PBM: Potencial de biometanización

RIS: Relación inóculo/sustrato

SS: Sólidos en suspensión

SST: Sólidos suspendidos totales

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulica

TRS: Tiempo de retención sólidos

Resumen

Título: Alternativa para la valorización energética de los residuos agroindustriales generados en la finca La Esperanza –Guapota, Santander—*

Autor: Viviana Marcela Pinzón Díaz**

Palabras Claves: Codigestión Anaeróbica, Estiércol Bovino, Lactosuero, Poder Calorífico.

Descripción:

El objetivo de este trabajo fue proponer una alternativa para la valorización energética de los residuos agroindustriales generados en la Finca la Esperanza; para ello se buscaron en la literatura datos sobre caracterizaciones fisicoquímicas de los residuos LS y EB, a partir de los datos del análisis elemental se calculó el potencial de biometanización ($PBM_{teórico}$). El $PBM_{teórico}$ obtenido fue de $0,43 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Posteriormente se realizó una matriz DOFA para seleccionar el biodigestor más acorde con las características físicas, climáticas, económicas, entre otras de la finca. El biodigestor seleccionado fue el biodigestor tipo taiwán, con una capacidad de $9,4 \text{ m}^3$ (unid), generando una producción de biogás de $4,2 \text{ m}^3$ por día teóricamente, con un poder calorífico ($PCI_{biogás}$) de $21,5 \text{ kJ/m}^3$ y una potencia energética ($PE_{biogás}$) de $25,09 \text{ kJ/s}$ o $25,09 \text{ kw}$, una eficiencia de eliminación de la materia orgánica del 70,8%. Se revisaron alternativas para el aprovechamiento de ña energía generada como: lámparas de iluminación, quemadores domésticos e industriales, calderas. Electrodomésticos, entre otros usos mediante tecnologías apropiadas. Adicionalmente se genera $312,3 \text{ m}^3/\text{día}$ de efluente. Se evaluaron alternativas para el uso de este efluente como: puede ser usado directamente para acondicionamiento de suelos o para la obtención de compuestos secundarios como la estruvita.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Mabel Quintero

Abstract

Title: Alternative for the energetic valorisation of the agroindustrial waste generated in the farm Esperanza –Guapota, Santander—*

Author: Viviana Marcela Pinzón Díaz**

Keywords: Anaerobic Codigestion, Bovine Manure, Lactosuero.

Description:

The objective of this work was to propose an alternative for the energetic valorization of the agroindustry residues generated in the estate la Esperanza; to do this, data on physicochemical characterization of the LS and EB residues were searched in the literature, based on the elemental analysis data the biomethanization potential (theoretical PBM) was calculated. The theoretical PBM obtained was $0.43 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg SV}$. Subsequently, a SWOT matrix was made to select the biodigester more in line with the physical, climatic, and economic characteristics, among others, of the farm. The biodigester selected was the taiwán-type biodigester, with a capacity of 9.4 m^3 (unit), generating a biogas production of 4.2 m^3 per day theoretically, with a calorific value (PCI biogas) of $21.5 \text{ kJ} / \text{m}^3$ and an energy power (PE biogas) of $25.09 \text{ kJ} / \text{s}$ or 25.09 kw , an efficiency of elimination of organic matter of 70.8%. Alternatives were reviewed for the use of generated energy such as: lighting lamps, domestic and industrial burners, boilers. Appliances, among other uses through appropriate technologies. Additionally, $312.3 \text{ m}^3 / \text{day}$ of effluent is generated. Alternatives were evaluated for the use of this effluent as: it can be used directly for soil conditioning or for the production of secondary compounds such as struvite.

* Thesis

** Faculty of physicochemical engineering. School of Chemical Engineering. Directos: Mabel Quintero

Introducción

En la actualidad la ganadería colombiana, participa con cerca de 3,6% del PIB Nacional, un porcentaje apreciable para una actividad individual y sobre todo rural. Dentro del sector agropecuario su importancia es indiscutible, con un 27% de participación dentro del PIB agropecuario y un 64% de PIB pecuario.

Estructuralmente el inventario ganadero bovino está compuesto por un total de 22'689.420 de cabezas de ganado, de los cuales 56% son hembras y 44% son machos (ICA, s.f.). De acuerdo con cifras del DANE, 60% del hato se destina a la producción de carne (cría, levante y ceba), el 38% al doble propósito (producción de carne y leche) y el restante 2% a la lechería especializada.

Generalmente, en nuestro país existen dos tipos de producción para la actividad ganadera: ganadería intensiva y ganadería extensiva. El sistema de crianza intensivo es aquel que se realiza en pequeñas extensiones de terreno, donde la carga de animales esta entre 4 – 30 animales/hectárea. El sistema de crianza extensivo, por el contrario, es llevado a cabo en grandes extensiones de terreno donde la carga de animales esta <2 animales/hectárea. Un ejemplo de crianza en un sistema extensivo se puede observar en la finca la Esperanza ubicada en la vereda las Flores del Municipio de Guapota, Santander. Esta finca de tradición ganadera cuenta con 140 cabezas de ganado de la raza Brahman, de los cuales son 120 hembras y 20 machos. La principal actividad económica de esta propiedad es la producción doble propósito de carne y leche. La leche producida es enviada al Municipio de Oiba, Santander, para ser procesada en una empresa de queso. Estas dos actividades económicas generan una gran cantidad de residuos agroindustriales, principalmente de dos tipos: lactosuero y estiércol bovino.

Particularmente, el estiércol bovino (EB) es uno de los principales residuos generados en Colombia, que al no ser aprovechado produce impactos en el ambiente, en el 2010 se generó 99'168.608 [t/año] de EB (Escalante Hernández, 2011). En la mayoría de las fincas almacenan el estiércol en un periodo de tiempo antes de darle una disposición final. En estas condiciones el estiércol acumulado se convierte en fuente de vectores como moscas y helmintos, que cumplen parte de su ciclo biológico y se multiplican en el estiércol frescos (García, Suárez, Hernández, & Betancuourt, 2009), afectando la salud animal. Para evitar este tipo de inconvenientes existen varios tipos de tratamientos, los cuales son:

Físico. Calor. Con la elevación de la temperatura se eliminan muchos microorganismos. Es poco utilizado porque requiere de combustible fósil. Se emplea ante la existencia de una enfermedad altamente contagiosa (García, Suárez, Hernández, & Betancuourt, 2009).

Químico. Aplicación de desinfectantes químicos, entre ellos cal viva y formaldehído. Elevan su efectividad con la homogenización, permitiendo que las partículas sólidas se disuelvan y los microorganismos se pongan en contacto con los desinfectantes (García, Suárez, Hernández, & Betancuourt, 2009). Tienen el inconveniente económico de que el volumen de desinfectante a utilizar depende de la cantidad de estiércol a tratar.

Biológico. Relacionado a microorganismos aerobios y anaerobios que descomponen la materia orgánica presente en el estiércol. Hay dos métodos muy utilizados, el silo de estiércol y el biodigestor (García, Suárez, Hernández, & Betancuourt, 2009).

Los biodigestores se fundamentan en el uso de la digestión anaeróbica (DA) como una alternativa para el tratamiento del estiércol, debido a que, además de permitir reducir al mínimo el potencial de contaminación y los riesgos sanitarios de los efluentes, es útil para la recuperación de energía

en forma de biogás y la estabilización de la materia orgánica (MO) (Mata-Alvarez, y otros, 2014). La MO manejada mediante DA puede provenir de diferentes actividades, pues una gran variedad de residuos son aptos como sustrato para ser tratados mediante esta tecnología (Kwietniewska & TYS, 2014).

El estiércol bovino es considerado un excelente sustrato en la DA, por su alto contenido de humedad y la variedad de nutrientes, pero también presenta un alto contenido de nitrógeno y esto causa un desequilibrio de nutrientes que ocasiona una inhibición por amoníaco. Como estrategia para evitar esto el EB se trabaja en co-digestión con otros residuos orgánicos (Dias Fragoso & Rodríguez Fuerte, 2014).

Por otro lado, el lactosuero (LS) es *“el producto residual obtenido a partir de la leche en la elaboración del queso o la mantequilla”*. También conocido como suero de leche o suero de queso, es el líquido que se separa de la leche cuando ésta se coagula y contiene todos los componentes que no se integran al queso (carbohidratos (4,5-5%), proteínas (0,6-0,8%). Lípidos (0,4-0,5%), sales (0,7%) y agua). Para producir 1,1 kilos de queso se necesitan 11 litros de leche y se generan 9,9 litros de lactosuero (Jelen, 2003).

En Colombia la producción de leche en el año 2018 fue de aproximadamente 288'727.901 litros (ASOLECHE, 2018). Se estimó que solamente un 45% de la leche se procesó en productos por canales formales registrados. El 35% del total de la producción de leche fue destinado a la elaboración de queso, generando un total de 90'949.289 de litros de suero por año, de los cuales se estimó que el 70% se utilizó como alimentación animal o fue vertido como efluente líquido (Juliano, Blanca, & Castells, 2017).

La relación de DQO/SV de este residuo indica que es una biomasa altamente biodegradable (Angelidaki, y otros, 2009) y su eliminación constituye un problema ambiental importante para la

industria láctea, debido a la elevada carga orgánica la cual contribuye sustancialmente a la contaminación de aguas superficiales y del suelo (Rivas, Prazeres, Carvalho, & Beltrán, 2010). Por esta razón, su vertimiento o disposición se ha catalogado como el primer impacto ambiental en las pequeñas y medianas empresas, segundo impacto de mayor importancia en las industrias lácteas de mediano y gran tamaño, después del consumo energético (Lozano, 2014).

De igual forma que para el EB, se han propuesto alternativas para el uso del LS como: obtención de suero liofilizado con usos alimentarios en granjas y en la industria (Aguirre, Ramírez, Aguilar, & Álvarez, 2009), la reutilización en la elaboración de otros productos, la recuperación de compuestos valiosos, tales como proteínas y lactosa; así como el desarrollo de tecnologías que permitan estabilizar y valorizar el LS mediante la aplicación de procesos biológicos, termoquímicos o químicos (Prazeres, Carvalho, & Rivas, 2012).

La composición y elevada biodegradabilidad del LS representada en valores de relación DQO/DBO₅ menor a 3, indica que una de las tecnologías más adecuadas para la estabilización de este residuo es el tratamiento biológico, considerándose así como un residuo útil para su bioconversión y aprovechamiento energético (Lozano, 2014).

De esta forma estos dos productos analizados por separado y en diferentes investigaciones ambientales, en Colombia y en el mundo, pueden ser estabilizados mediante la DA permitiendo a su vez el aprovechamiento de la biomasa residual, el reciclaje de nutrientes y la generación de energía a un bajo costo operacional.

Con la creciente demanda de energía renovable y protección ambiental este trabajo se enfocó en evaluar la viabilidad de la DA como alternativa de tratamiento biológico, para la estabilización de los residuos LS y EB generados en la finca La Esperanza.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer una alternativa para la valorización energética de los residuos agroindustriales generados en la finca La Esperanza, municipio de Guapota, Santander.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar teóricamente los valores de rendimiento de metano y de energía del lactosuero y estiércol bovino.
- Selección de un tipo de biodigestor apto para la co-digestión anaeróbica del lactosuero y estiércol bovino ajustado a los parámetros y condiciones de la finca La Esperanza.
- Plantear una estrategia integral para la valorización energética de los residuos lactosuero y estiércol bovino generados en la finca La Esperanza.

2. Marco teórico

2.1 Lactosuero

El lactosuero es el producto residual obtenido en la elaboración del queso o la mantequilla, presenta un elevado contenido de nutrientes, aproximadamente un 20% de proteínas, la mayor parte es lactosa, minerales y caseína, contiene reservas de proteínas alimentarias, aminoácidos y vitaminas. El lactosuero representa entre 85 – 95% del volumen de la leche y retiene cerca del 55% de sus nutrientes. Por consiguiente, el lactosuero contiene elevada carga orgánica que se manifiesta en concentraciones de SV entre 45 y 65 g/kg y contenido de DQO entre 68 y 94 g/l (Saddoud, Hassaíri, & Sayadi, 2007)

En Colombia es un reto la disposición final del lactosuero, debido a que para producir 1,1 kilogramo de queso se necesita aproximadamente 11 litros de leche y se generan 9,9 litros de lactosuero como subproducto (Tirado, Acevedo, & Montero, 2015). En este sentido, el LS, al ser considerado como un residuo contaminante, ha sido objeto de investigación en busca de diversas alternativas de aprovechamiento. Estas alternativas son: tratamientos biológicos sin valorización, tratamientos biológicos con valorización; tratamientos fisicoquímicos y vertimiento al suelo. En el primer caso, se reporta la digestión anaeróbica. En el segundo caso, se describen seis procesos principales en la literatura: digestión anaeróbica, hidrólisis de la lactosa, fermentación en etanol, hidrógeno o ácido láctico y producción directa de electricidad a través de celdas de combustible microbianas. Térmica e isoelectrica, la precipitación termocállica, la coagulación/floculación, la precipitación ácida, las tecnologías electroquímicas y de membrana se han considerado como

posibles procesos fisicoquímicos atractivos para valorizar o tratar el suero de queso. El vertimiento directo sobre la tierra es una práctica común y requieren algunas precauciones (Prazeres, Carvalho, & Rivas, 2012).

2.2 Estiércol bovino

La ganadería es una actividad que se desarrolla en muchos países, así como en Colombia. Esta actividad genera una cantidad de estiércol, superior a la requerida como fertilizante, ocasionando impactos ambientales como emisión de gases de efecto invernadero (GEI), olores ofensivos, problemas de salud cuando llega por escorrentía a corrientes de agua potable, entre otro (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015). Este tipo de residuo ha sido utilizado como materia prima para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica, por ser una fuente importante de nutrientes, sin embargo, este material presenta un alto contenido de nitrógeno que causa un desequilibrio que ocasiona una inhibición por amoníaco. No obstante, este material es considerado un excelente sustrato pues el alto contenido de humedad y de materia orgánica que favorece el crecimiento óptimo de población microbiana (Marañon, Castrillón, Quiroga, Fernández, & García, 2012). Como estrategia para contrarrestar el desequilibrio de nutrientes del estiércol bovino se ha trabajado en co-digestión con otros residuos orgánicos que ayudan a equilibrar la relación C/N y favorecer el proceso de DA (Dias Fragoso & Rodríguez Duarte, 2014).

2.3 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica (DA) de biomasa es un proceso bioquímico, mediante el cual se descompone la materia orgánica por la acción de un consorcio microbiano bajo condiciones libres de oxígeno, se estabiliza el residuo y se produce biogás (Li, Abraham, Chen, Graf, & Yu, 2015). La DA es una tecnología que minimiza los problemas de efecto invernadero. Los microorganismos que intervienen en la degradación anaerobia se caracterizan por tener alta actividad hidrolítica (AH), es decir tiene la capacidad de degradar las moléculas orgánicas complejas y alta actividad metanogénica (AME), mecanismo de transformación de los compuestos formados en la actividad hidrolítica en metano (Angelidaki, Karakashev, Batstone, Plugge, & Alfons, 2011).

2.3.1 Etapas de la digestión anaeróbica. En la DA las bacterias descomponen la materia orgánica para producir biogás y un líquido (digerido). Diariamente se puede producir un volumen de biogás entre el 15% y 30%, con relación al volumen de la fase líquida total, alcanzando un contenido de 60 a 70% de metano, combustible renovable.

El digerido posee alto contenido de macro y micronutrientes, el cual puede ser empleado como enmienda para los terrenos de cultivo. La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

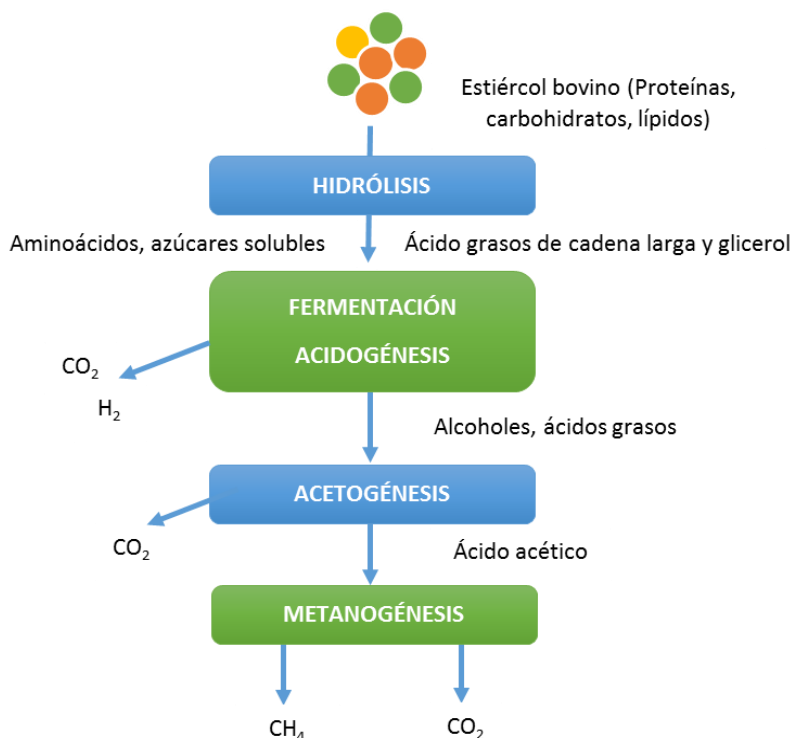


Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia. Adaptado de: Angelidaki I. Karakashev D. Batstone D. Plugge C. & Stams A. (2011). Biomethanation and Its Potential. *Methods in Enzimología*. 494(16). p. 327-351.

Cada etapa de la digestión anaeróbica requiere un grupo de microorganismos con funciones específicas. Se ha encontrado que los microorganismos usados durante la hidrólisis y la fermentación pueden ser facultativos o anaerobios estrictos; mientras que, en la producción de metano, las arqueobacterias, son anaerobios estrictos (Angelidaki, Karakashev, Batstone, Plugge, & Alfons, 2011).

2.3.1.1 Etapa hidrolítica. En esta etapa se da una degradación de los compuestos orgánicos complejos como lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos inorgánicos. Estos son despolimerizados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y fácilmente

degradables como ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos y compuestos inorgánicos. Estas nuevas moléculas al ser más simples se solubilizan más fácilmente en el medio. Los microorganismos encargados de esto son las bacterias hidrolíticas-acidogénicas.

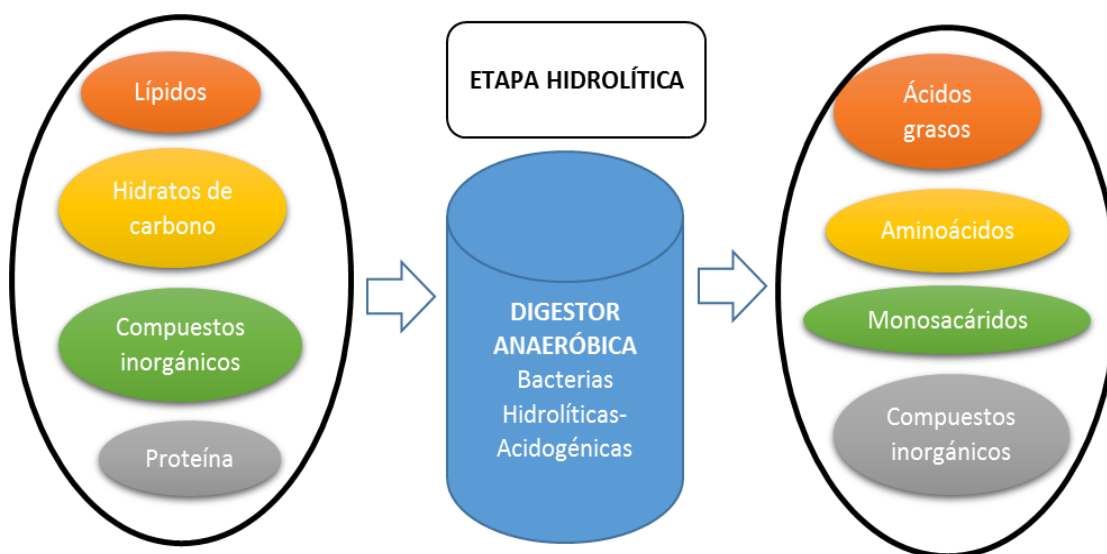


Figura 2. Etapa hidrolítica de la digestión anaeróbica.

2.3.1.2 Etapa acidogénica. Los compuestos solubles resultantes de la etapa hidrolítica van a ser transformados por la acción de microorganismos y bacterias fermentativas a través de un proceso de fermentación, dando como resultado ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) principalmente, en menor proporción intermedios como: alcoholes, ácidos grasos volátiles y ácidos orgánicos (Angelidaki, Karakashev, Batstone, Plugge, & Alfons, 2011). En esta etapa intervienen bacterias acidogénicas tales como: *Bacteroides*, *Bifidobacterium*, *Butyivibrio*, *Clostridium*, *Enterobacterias*, *Lactobacillus*, *Propionbacterium*, *Ruminococos* y *Streptococos*.

2.3.1.3 Etapa acetogénica. Los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica van a ser transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose como principales productores hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Este último compuesto aparece directamente por la acción de estas bacterias por la transformación de alcoholes, ácidos grasos, ácidos volátiles, adicionalmente el hidrógeno y dióxido de carbono que por acción de las bacterias *Homoacetogénicas* lo transforman en ácido acético. El metabolismo acetogénico es dependiente de las concentraciones de estos productos.

Las bacterias acetogénicas que participan son: *Syntrophobacterwolunii*, la cual descompone el ácido propiónico, *Syntrophomonaswolfei* descompone el ácido butírico. Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies. Las bacterias que hacen parte del grupo de las *Homoacetogénicas* presentes en esta etapa son los géneros: *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium*.

2.3.1.4 Etapa metanogénica. Es la etapa final del proceso en la cual la biomasa microbiana, bacterias y arqueas metanogénicas, actúan para transformar hidrógeno, acetato y propionato en metano. En esta etapa se distinguen dos tipos principales de microorganismos; los que degradaron el ácido acético produciendo el metano y dióxido de carbono *Metanógenosacetoclásticos*, las otras son conocidas como *Metanógenoshidrogenotrofos*.

La principal vía de formación del metano va a ser la vía acetoclásica, con alrededor del 70% del metano producido de forma general. A pesar de ser esta vía la más importante, sólo microorganismos de los géneros *Methanosarciana* y *Methanothrix* son capaces de producir metano a partir de ácido acético. Los géneros principales dentro de la vía de los *Hidrogenotrofos* son: *Methanobacterium*, *Methanococos*, *Methanobrevibacter* o *Methanogenium*, entre otros.

2.3.2 Efluente. Subproducto de la digestión anaeróbica el cual es una solución orgánica estabilizada que puede ser utilizada como fertilizante, para riego y piscicultura. Dependiendo de la cantidad de materiales no digeribles de la materia prima, se metaboliza hasta un 60% de la materia orgánica introducida en el digestor (Riveros D., 2013).

El efluente es estable biológicamente, por el hecho de que no presenta malos olores ni atracción de moscas. La mayor parte de la materia orgánica que queda sin digerir se transforma lentamente por acción de las bacterias aerobias del suelo o del agua y así evitando ser alimento para insectos u otras plagas dañinas para la agricultura.

El nitrógeno, fósforo y el potasio son considerados los nutrientes más importantes en un programa de fertilización, esta cantidad de nutrientes en un efluente es el resultado de la variación y el comportamiento de factores como son:

- La especie del animal que provee la materia orgánica
- La clase y cantidad de la alimentación de los animales
- El efecto del tiempo sobre el grado de maduración de la materia orgánica (excretas de animales o desechos vegetales) (Riveros D., 2013).

2.3.3 Parámetros claves del proceso de digestión anaeróbica

2.3.3.1 Carga orgánica. La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica tratada mediante el proceso de DA en un biodigestor con un volumen determinado en un tiempo definido. Al aumentar la carga orgánica se incrementa el rendimiento del biogás hasta llegar a un límite, al pasar este límite puede causar la inhibición. Cuando la carga orgánica es muy alta se da una actividad de

hidrólisis/acidogénesis que supera la capacidad de las bacterias metanogénicas para transformar los productos de estas dos etapas, de manera que se aumenta la concentración de ácidos grasos volátiles (AGVs) que pueden conducir a una acidificación irreversible (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015); cuando la carga orgánica es muy baja las concentraciones de AGVs son bajas, las bacterias no tienen mucho alimento, hay poca producción de acetato y a su vez de metano, el rendimiento también disminuye. La carga orgánica se determina de acuerdo con el contenido de SV del sustrato y es un parámetro determinante para el diseño de un sistema de DA (Varnero Moreno, 2011), este influye en la estabilidad del proceso y la tasa de producción de biogás.

2.3.3.2 Tiempo de retención hidráulico. El tiempo de retención hidráulico TRH es el periodo que permanece el sustrato dentro del biodigestor bajo la acción de los microorganismos. El TRH depende de la biodegradabilidad del sustrato, de la tasa de crecimiento microbiano y de la temperatura del proceso (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015). Cuando el TRH es corto puede conducir a la acumulación de AGVs, en tiempos prolongados ocasionan un uso ineficiente de los componentes del digestor.

2.3.3.3 pH. El pH es un parámetro muy importante durante la DA que no solo afecta la actividad microbiana, sino que también determina las vías metabólicas (Yan, Selvam, & Wong, 2014). Su importancia se debe a que las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento. Las bacterias fermentativas, por ejemplo, se adaptan a pH entre 4.0 – 8.5; las metanogénicas son más estrictas, el rango favorable está entre 6.5 a 7.2 (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014).

2.3.3.4 Temperatura. La temperatura es otro parámetro que también afecta el proceso DA. Este parámetro repercute en la actividad de enzimas y co-enzimas, en el rendimiento de metano y en la calidad del material digerido o efluente. Algunos autores señalan que la DA presenta mejores rendimientos a condiciones termofílicas (50 – 60 °C), aunque otros mencionan que bajo estas condiciones el proceso es más sensible a cambios ambientales que cuando se maneja en condiciones mesofílicas (30 – 40 °C) (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014). Además, bajo condiciones termofílicas se presenta una menor diversidad microbiana, una baja calidad en el efluente, el sistema requiere mayor inversión, se da una metanogénesis pobre y un mayor consumo de energía (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

2.3.3.5 Inóculo. Otro factor clave en la marcha de la DA es la calidad y cantidad de inóculo. Una cantidad de inóculo adecuada mejora la etapa hidrolítica, acelera la producción de biogás, reduce el tiempo de funcionamiento y contribuye a evitar la acidificación (Kawai, Nagao, Tajima, Matsuyama, & Toda, 2014). La relación Inóculo/Sustrato (RI/S) varía de acuerdo con el sustrato empleado en el proceso de DA. Autores recomiendan diferentes valores dependiendo del sustrato utilizado, así: para la hierba, 1,0 Sólidos Volátiles (SV) (SV/SV); el estiércol, 0,02 (SV/SV) y 0,13 (SV/SV) para los residuos de alimentos (Xu Su, Karthikeyan, Selvam, & Wong, 2012). Cuando la cantidad de inóculo no es adecuada se puede presentar inhibición por la alta concentración de sustrato (Raposo, Borja, Martín, Rubia, & Rincón, 2009).

2.3.3.6 Relación C/N. La relación carbono/nitrógeno (C/N) es el factor relacionado con el equilibrio de nutrientes requeridos por las bacterias anaerobias. Una relación C/N muy alta no proporciona el nitrógeno suficiente para mantener la biomasa celular. Por otro lado, una relación

C/N muy baja aumenta el riesgo de inhibición por amoníaco, que es tóxico para la metanógenos y causa insuficiente utilización de fuentes de carbono. Cantidades insuficientes de carbono o nitrógeno pueden limitar el rendimiento de DA (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015). Un contenido óptimo de carbono tiene un efecto positivo para evitar la inhibición por amoníaco (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014).

2.4 Potencial de biometanización

El potencial de biometanización (PBM) permite determinar la cantidad de metano generado por masa de sustrato (en términos de sólidos volátiles o DQO alimentados) (Angelidaki, y otros, 2009). El PBM permite evaluar la viabilidad del proceso anaerobio y proyectar su diseño en función de los parámetros operacionales: producción de metano, tiempo de adaptación del consorcio microbiano y fracción de materia degradable (Jensen, Ge, & Batstone, 2011).

Los rendimientos y parámetros cinéticos del proceso de DA obtenidos a partir del PBM dependen principalmente de la fuente de inóculo, relación inóculo/sustrato y la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso anaeróbico (Moset, Al-Zo, & Moller, 2015).

2.5 Co-Digestión anaeróbica

La co-digestión anaeróbica se define como la DA de dos o más sustratos de diferente origen, que permite el desarrollo eficiente del proceso debido al comportamiento sinérgico de los sustratos utilizados (Cendales Ladino, 2011), los cuales compensan las falencias que cada uno presenta al realizar el proceso de DA por separado (Lin, Wang, Li, & Xiao, 2011).

La co-digestión anaeróbica se desarrolló como consecuencia de los problemas generados en la DA de sustratos individuales. Algunos de estos problemas, son: las altas concentraciones de nitrógeno del estiércol de animales, que pueden inhibir los microorganismos metanógenos; los materiales indebidos, como una alta concentración de metales pesados, presentes en la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y la escasez de nitrógeno de los desechos de cultivo, agroindustriales, entre otros. La co-digestión anaeróbica ayuda a resolver estos problemas gracias a la adición de co-sustratos (Mata-Alvarez, y otros, 2014).

La co-digestión de residuos orgánicos genera beneficios como: equilibra la concentración de nutrientes (relación C/N, macro y micro nutrientes) (Zarkadas, Sofikiti, Voudrias, & Pilidis, 2015); diluye inhibidores de compuestos tóxicos; genera mayor capacidad de amortiguamiento gracias al aumento de amoníaco a partir de los residuos orgánicos; mejora las tasas máximas aceptables de CO₂; aumenta el rendimiento de biogás con respecto al obtenido de un solo sustrato; incrementa la calidad del efluente y mejora la estabilidad del proceso (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

2.6 Digestores

Son sistemas diseñados para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales, también llamado digerido, permitiendo la obtención de energía limpia y de bajo costo a partir de una fuente renovable. El uso de esta tecnología es nuevo, en los últimos años ha cobrado interés debido al aumento de contaminación, el efecto invernadero, el cambio climático, entre otros.

Otra forma de definir un digestor anaeróbico es un recipiente diseñado para contener la biomasa a digerir y los microorganismos que llevan a cabo el proceso. Debe permitir la carga y descarga de

materiales, poseer un dispositivo para recoger el gas producido. Para la elaboración de un digestor se deben tener en cuenta varios factores, uno de ellos es con respecto al tipo de materia a digerir (cantidad, contenido en sólidos y digestibilidad), otro tipo depende del sistema de digestión (frecuencia de alimentación, sistemas auxiliares, medida y control).

Los biodigestores se clasifican en tres tipos principalmente entre de los cuales se encuentran:

2.6.1 Biodigestores Discontinuos o Tipo Batch. Este tipo de biodigestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir biogás, no se descarga completamente, se retira una cierta cantidad, esto con el fin de producir el biogás de las cargas subsecuentes en menos tiempo, debido a la presencia de la mezcla ya fermentada y por consecuencia se acelera la obtención del biogás.

Normalmente este tipo de biodigestores consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a una bolsa donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente.

Son fáciles de construir y son también ideales a nivel de laboratorio por si se desea evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla (Riveros D., 2013). Estos biodigestores han sido aplicados para la digestión anaeróbica de residuos con una alta concentración de sólidos, como los residuos de ganado vacuno como el picado de paja, que dificultarían la adopción de sistemas de bombeo (Moncayo Romero, 2013).

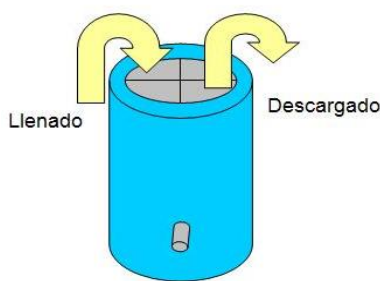


Figura 3. Biodigestor tipo batch. Adaptado de: <http://ricardo.bizhat.com/rmr-prigeds/biodigestores-biogas.htm>

2.6.2 Biodigestores Semi-Continuos. Estos biodigestores son alimentados diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación con el contenido total. Este se carga y se descarga con un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante. Generalmente producen biogás casi permanentemente, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias.

Los digestores semi-continuos más usados en digestión anaeróbica, son:

2.6.2.1 Biodigestor tipo chino. Se originó en China y consiste en una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga contruidos de concreto o ladrillos debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma. Tiene una larga vida útil (mayor de 15 años) con un adecuado mantenimiento. Sin embargo, el costo es relativamente alto (Riveros D., 2013).

En este tipo de biodigestores el gas debe ser liberado continuamente para reducir la presión interna, se utilizan en instalaciones donde el consumo sea continuo o para almacenar el biogás en un depósito aparte. (Olaya, 2006)

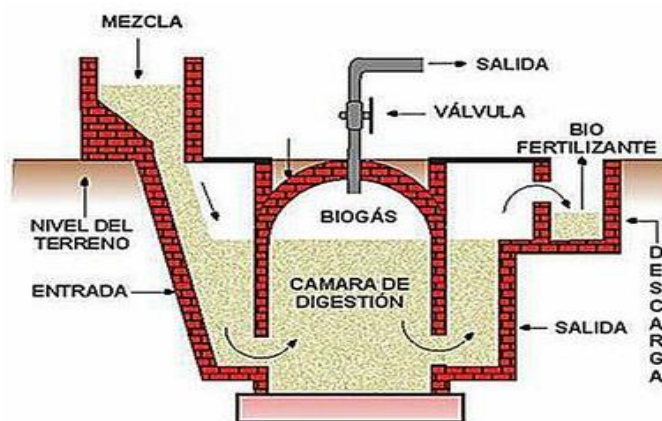


Figura 4. Biodigestor tipo chino. Adaptado de: <http://ricardo.bizhat.com/rmr-prigeds/biodigestores-biogas.htm>

2.6.2.2 Biodigestor tipo hindú. El biodigestor hindú fue desarrollado en la India después de la Segunda Guerra Mundial en los años 50, surgió por necesidad, debido a la falta de combustible para los tractores y calefacción para los hogares. Al finalizar la guerra volvieron a conseguir combustible fósil y dejaron los biodigestores. Este biodigestor trabaja a presión constante y es muy fácil de operar, fue ideado para ser manejado por campesinos de poca preparación (Martí, 2008). Este biodigestor también es llamado biodigestor de cúpula (o domo) flotante porque la cámara de recolección de biogás no está fija, sino que se desplaza hacia arriba cuando el gas se acumula o hacia abajo cuando se extrae, guiada por un bastidor para evitar que se incline. Es decir, el depósito de biogás es una campana flotante sellada con la mezcla de agua y materia orgánica que se está degradando.

El modelo está disponible en un amplio rango de capacidades desde 1 m^3 hasta 112 m^3 en términos del gas producido por día. El modelo comúnmente usado es el de una capacidad de $3,2\text{ m}^3$ con 55 días de tiempo de retención de sólidos (TRS) (Tauseef S., Premalatha, Abbasi, & Abbasi S., 2013).

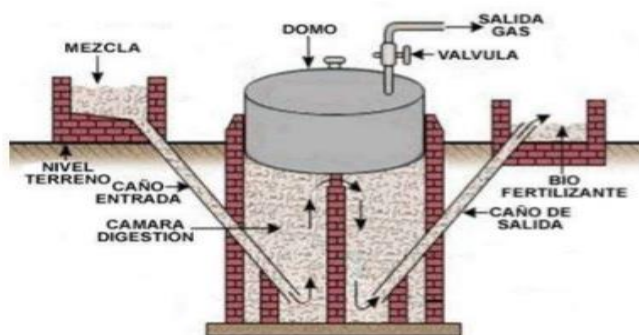


Figura 5. Biodigestor tipo hindú. Adaptado de: <http://ricardo.bizhat.com/rmr-prigeds/biodigestores-biogas.htm>

2.6.2.3 Biodigestor tipo Taiwán. Este tipo de digestor (digestor de bolsa, balón o tubular) fue introducido en Taiwán en 1960. Está hecho de plástico inflable y es especialmente popular en China. Estos digestores vienen en volúmenes desde 2,2 a 13,5 m³, siendo los de 6 m³ los utilizados comúnmente (Tauseef S., Premalatha, Abbasi, & Abbasi S., 2013).

Los biodigestores familiares de bajo costo han sido desarrollados y están ampliamente implementados en países del sureste asiático, Sudamérica, en países como Cuba, Colombia, Brasil y Costa Rica. Estos modelos se caracterizan por: materiales de construcción fáciles de transportar, su instalación y adecuación del sitio son sencillas, es apropiado en sitios que presentan inestabilidad geológica o un nivel freático alto. Entre los tipos de biodigestores, es el de menor costo de construcción y operación. Pueden ser instalados por la comunidad beneficiada, sin que ésta tenga conocimientos sobre construcción. El biodigestor tipo taiwán presenta baja presión de gas, vida útil corta, dependiendo del material que se seleccione (Olaya Y., 2009).

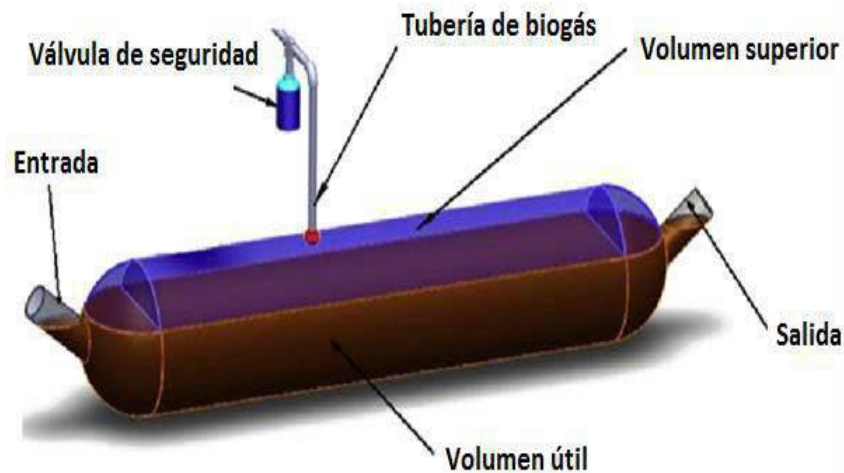


Figura 6. Biodigestor tipo Taiwán. Adaptado de: Ferrer I., Garfi M., Uggetti E., Ferrer-Martí L., Calderón A., & Velo E. (2011). Biogas Production in low –cost household digesters at the Peruvian Andes. Biomass and Bioenergy. p. 1668-1674.

2.6.3 Biodigestores Continuos. Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, de tipo industrial, donde se genera una gran cantidad de biogás.

2.6.3.1 Biodigestor tipo Mixto. El biodigestor de tipo mixto es una fusión del biodigestor tipo chino y tipo hindú; el cual tiene ventaja de alta durabilidad y permite un buen mantenimiento, se puede saber la cantidad de biogás que se está generando y qué cantidad de biogás hay, además la extracción del sustrato será eficiente.

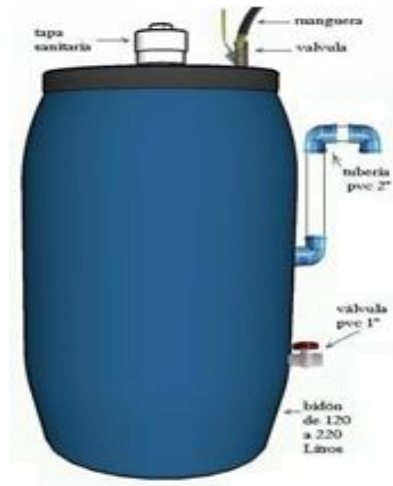


Figura 7. Biodigestor tipo mixto. Adaptado de:

<https://energiacasera.wordpress.com/2010/01/23/biodigestor-de-bidon-pautas-de-uso/>

3. Metodología

Este trabajo de aplicación se realizó teniendo en cuenta las siguientes etapas metodológicas resumidas en 6 actividades (figura 8).

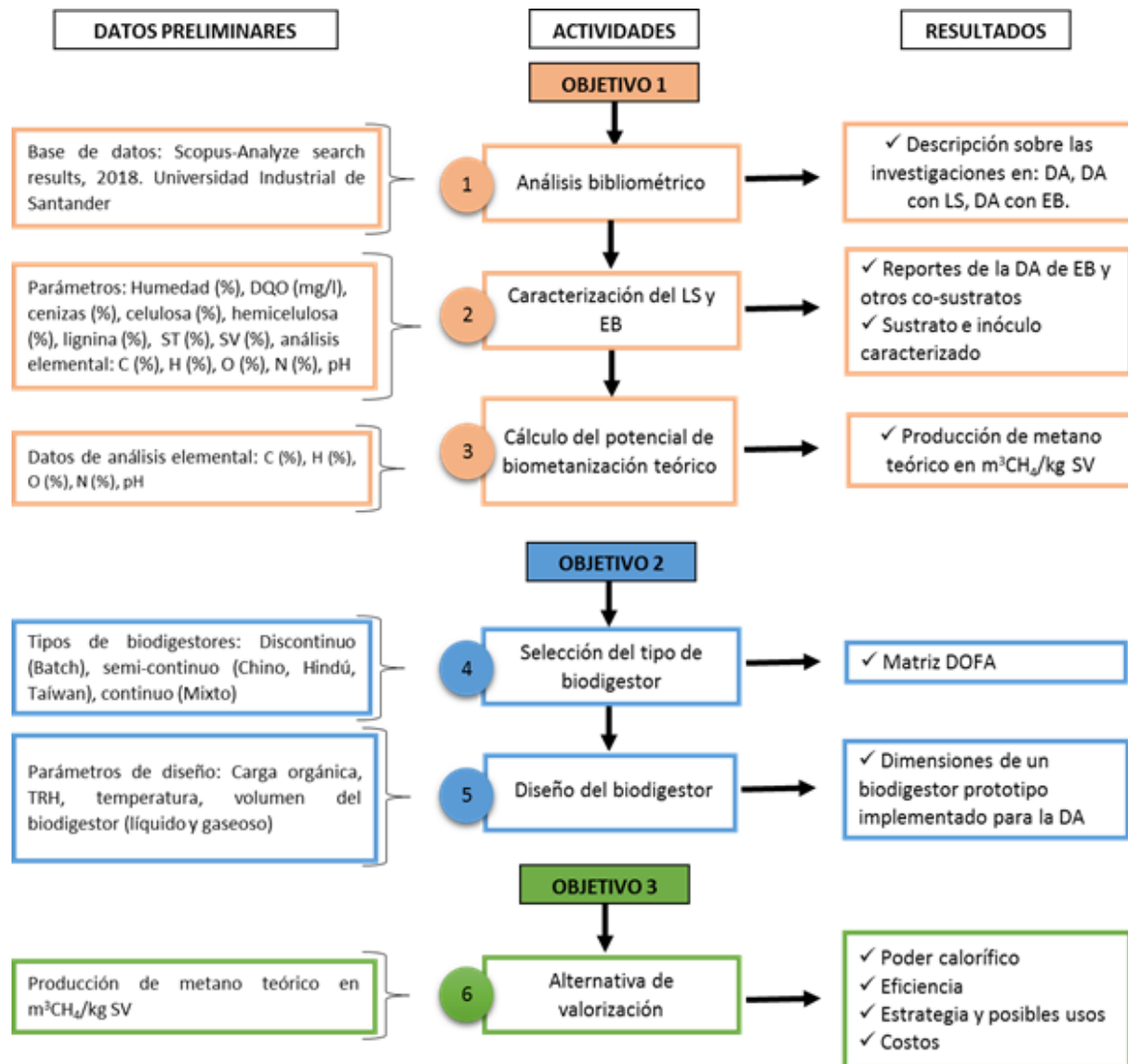


Figura 8. Esquema metodológico de la tesis.

3.1 Análisis bibliométrico

Para la recopilación de la información se hizo una revisión de la literatura preexistente mediante vigilancia tecnológica usando la base de datos Scopus-Analys. Se realizó una búsqueda bibliográfica de los diferentes artículos, tesis y demás documentos sobre la digestión anaeróbica,

a su vez se correlaciono la co- digestión con el lactosuero, el estiércol bovino por separado con otros sustratos y entre ellos.

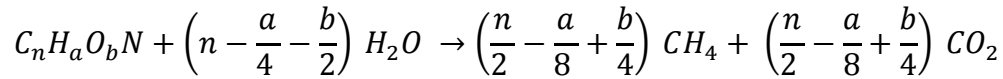
3.2 Caracterización del lactosuero y estiércol bovino

El tipo de sustrato e inóculo que se emplea para alimentar los biodigestores tiene una gran importancia en el proceso de digestión anaeróbica. Con el objetivo de conocer la composición de estos y el contenido de materia orgánica susceptible de degradación por acción de los microorganismos se recopilaron datos caracterizaciones física, química y microbiológica del LS y EB realizados en diferentes investigaciones. Después de realizar dicha revisión, se seleccionó para trabajar la información obtenida de la base de datos de caracterizaciones de propiedad del laboratorio de biotecnología. Lo anterior debido a que los residuos trabajados en este laboratorio muestran características similares o cercanas a las del área de estudio. Gracias a la información proporcionada se realizó un diseño de un prototipo de biodigestor rural para la finca la Esperanza.

3.3 Cálculo del potencial de biometanización teórico

Para realizar el cálculo del potencial de biometanización tanto del LS como del EB fue necesario determinar la fórmula empírica de estos, mediante la aplicación de la ecuación 1, donde se consideraron los índices estequiométricos promediados de las biomoléculas. El rendimiento teórico de producción de metano PBM se calculó usando una aproximación teórica basada en la fórmula de Buswell (Buswell E. & Neave, 1930) (Ecuación 2), el principal problema de esta fórmula es que la materia biodegradable y no biodegradable son tenidos en cuenta para el cálculo,

mientras que sólo la primera se metaboliza en metano. Por lo tanto, el rendimiento de metano se sobreestima (Lesteur, 2011).



Ecuación 1.

$$PBM_{teo} = \left(\frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}}{12n + a + 16b} \right) * 22,4 \text{ (m}^3\text{CH}_4\text{/ kgSV)}$$

Ecuación 2.

Este cálculo permite comprobar la capacidad de producción de metano que tiene un sustrato, gracias a la DA.

3.4 Selección de un tipo de biodigestor

Para seleccionar un tipo de biodigestor entre varias alternativas, se elaboró una matriz DOFA, para evaluar las oportunidades, debilidades, fortalezas y amenazas de cada una de las opciones de biodigestores a instalar en la finca la Esperanza. Adicionalmente, se estableció un patrón numérico de ponderación contra el cual se compararon.

Los principales requerimientos considerados para la elaboración de la matriz DOFA fueron:

- El diseño debe ser simple tanto para la construcción como para la operación y mantenimiento.

- Los recursos para su producción deben estar disponibles (materia prima, equipos y habilidades de los operarios)
- Se debe emplear un tipo de material resistente a la corrosión, con propiedades de aislamiento efectivas. Este requerimiento afecta en el precio, por lo tanto, se busca un material que sea resistente y se recubre para evitar la corrosión.
- Larga vida útil
- Fácil de desmontar y montar todas sus partes sin posibilidad de error
- Se debe tener accesibilidad a cada una de sus partes
- Se deben implementar dispositivos de seguridad
- Debe cumplir con las especificaciones de producción de biogás
- Se debe tener en cuenta el nivel freático (Geografía del lugar de instalación)

3.5 Diseño de un prototipo del biodigestor

Para la construcción de un sistema anaeróbico es necesario tener en cuenta los siguientes elementos: tanque de mezcla, biodigestor, reservorio y accesorios. El dimensionamiento de estos elementos requiere información acerca de la cantidad de residuos generados en el lugar de estudio, así como los datos de temperatura diurna y nocturna del mismo, datos de consumo energético. La obtención de esta información se realizó a través de una encuesta (ver Apéndice A).

3.5.1 Determinación de los parámetros del biodigestor. En la figura se presenta una descripción de los pasos y los parámetros que se consideraron para hacer el dimensionamiento del biodigestor.

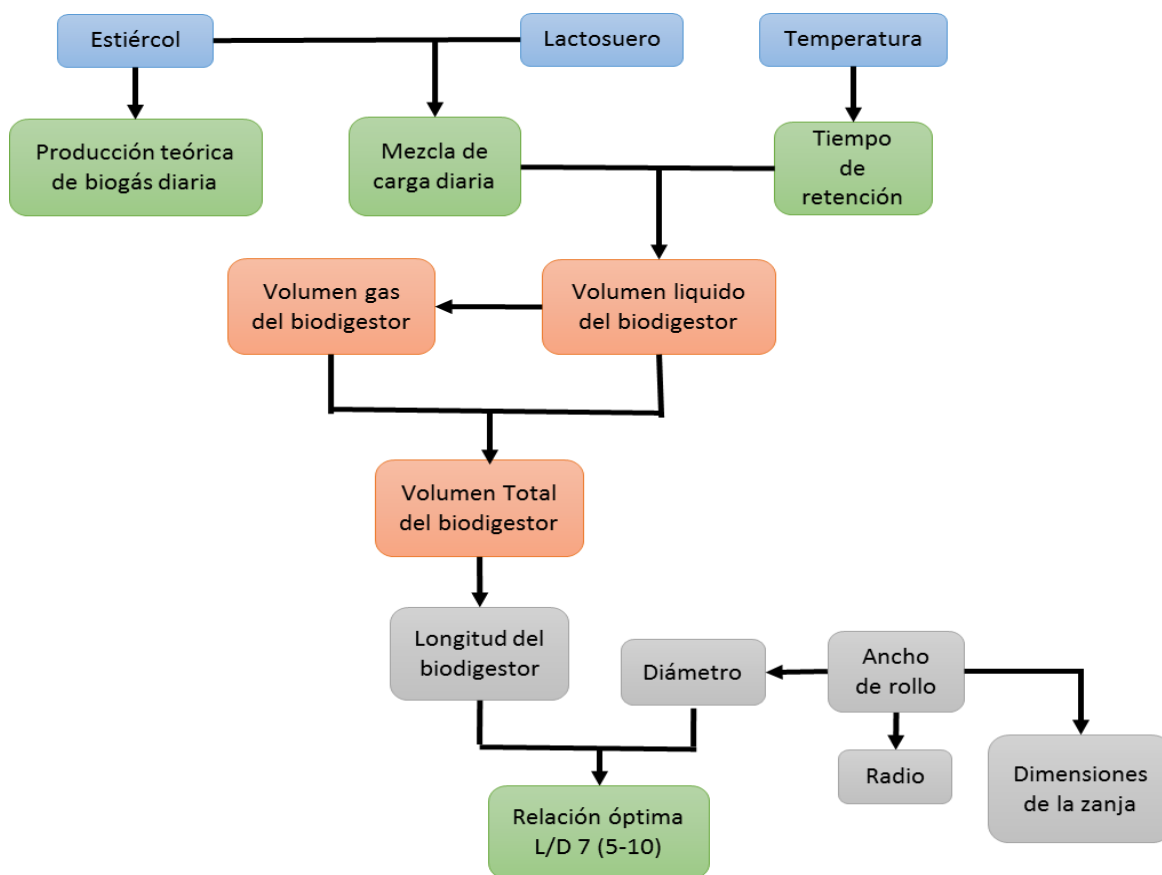


Figura 9. Esquema de la metodología para calcular las dimensiones de un biodigestor. Adaptado de: Martí-Herrero J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. (Vol. 53).

3.5.1.1 Temperatura del proceso. La temperatura es uno de los principales factores que afectan el proceso de digestión anaeróbica. Se considera uno de los parámetros importantes al momento de diseñar un biodigestor.

La temperatura marca la actividad bacteriana del proceso, esta actividad indica el tiempo de retención, a menor temperatura menor será la actividad, son directamente proporcionales. Las bacterias metanogénicas tienen rangos de acuerdo a la temperatura del lugar.

Existen tres rangos de temperatura (los límites de estos rangos varían para algunos autores)

Tabla 1.

Rangos de temperatura y tiempo de la digestión anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención hidráulica
Psicrofílica	4 – 10 °C	15 – 18 °C	20 – 25 °C	Sobre 100 días
Mesofílica	15 – 20 °C	25 – 35 °C	35 – 45 °C	30 – 60 días
Termofílica	25 – 45 °C	50 – 60 °C	75 – 80 °C	10 – 15 días

Nota: Arrieta W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánica- Eléctrica). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

Por esto, que fue necesario verificar la temperatura media de la región en donde se proponía instalar el prototipo (Arrieta Palacios, 2016).

3.5.1.2 Carga orgánica. La carga orgánica propuesta para este estudio es una mezcla del lactosuero y el estiércol bovino. Esta determinará la producción de biogás por día. Por esto fue necesario determinar la cantidad disponible y la requerida de cada uno de estos residuos.

El diseño del biodigestor se realizó con base a la máxima cantidad de estiércol disponible en el establo de la finca la Esperanza.

La cantidad de lactosuero a utilizar se estableció con base en los estudios realizados por Jaimes J. (2018) (Jaimes, 2018) usando una RIS de 1,5.

3.5.1.3 Tiempo de retención hidráulica (TRH). Es el tiempo que necesitan los residuos para ser degradados por la acción de los microorganismos dentro del biodigestor. El tiempo de retención está inversamente relacionado con la temperatura, es decir a menor temperatura mayor tiempo de

retención y a mayor temperatura se requiere un menor tiempo de residencia de los residuos dentro del biodigestor. El TRH seleccionado para diseñar el reactor se tomó teniendo en cuenta la información contenida en la tabla 1.

3.5.1.4 Volumen total de biodigestor. El volumen total que debe tener el biodigestor se calculó determinando el volumen del líquido y el volumen del gas, teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. $V_L = TRH * Carga\ diaria$

Ecuación 4. $V_G = V_L/3$

Ecuación 5. $V_T = V_L + V_G$

3.5.1.5 PB: Producción de biogás ($m^3/kg\ SV\ m^3/día$): La mezcla de estiércol en el interior del biodigestor, en ausencia de aire, producirá biogás. Esta producción no es constante y es un proceso, más o menos, el tiempo de retención estimado según la temperatura de trabajo. De esta forma, los kilogramos de estiércol irán produciendo biogás poco a poco a lo largo del tiempo de retención al que esté sometido.

La producción de biogás diario depende de la cantidad de sólidos volátiles que haya en la carga de estiércol. Para conocer la producción de biogás fue necesario conocer previamente la cantidad de estiércol que se iba a introducir diariamente al biodigestor. A partir de esa cantidad, se estimó la concentración de ST usando la ecuación 6. Con ese resultado de ST se estimaron los SV usando la ecuación 7. Conociendo los SV y dependiendo del tipo de estiércol que se esté empleando, la

producción de biogás será mayor o menor (tabla 2). El cálculo del PB se realizó utilizando la ecuación 8.

- **ST: Sólidos totales (kg/m³):** los sólidos totales representan el peso del estiércol una vez seco y por tanto es la carga real de materia sólida que se estará introduciendo en el biodigestor. Para calcular los sólidos totales que se introducen diariamente en el biodigestor se utilizó la ecuación 6.

Ecuación 6.
$$ST = Carga\ de\ estiércol * 17\%_{Estiércol\ fresco} / V_L$$

- **ST: Sólidos volátiles (kg/m³día):** los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales del estiércol que están sujetos a pasar a fase gaseosa. Su valor se determina en la ecuación 7.

Ecuación 7.
$$SV = ST * 77\%$$

Tabla 2.

Factores de producción para el cálculo del PB.

Ganado	Factor de producción	Factor general
Cerdo	0,25 – 0,50	0,39
Bovino	0,25 – 0,30	0,27

Nota. Martí-Herrero J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. (Vol. 53)

Ecuación 8. $PB = SV * 0,27$

3.5.1.6 Perímetro y longitud del biodigestor: El biodigestor es un cilindro por esta razón se trabajó con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 9. $p = 2 * \pi(pi) * r$

Ecuación 10. $V_T = \pi * r^2 * L$

Ecuación 11. $L = V_T / (\pi * r^2)$

3.5.1.7 Relación optima entre longitud y diámetro del biodigestor: Los anchos de rollos más grandes exigirán menores longitudes para alcanzar el volumen deseado. No conviene biodigestores demasiados cortos o largos, para ello hay una relación óptima entre el diámetro y la longitud de 7 (Martí, 2008). Para el cálculo de la relación longitud / diámetro se usó la siguiente ecuación:

Ecuación 12. $L / d = 7$ Rango flexible de (5 – 10)

3.5.1.8 Dimensiones de la Zanja: Las dimensiones de la zanja dependen del ancho de rollo que se decida usar (tabla 3). El largo dependerá del tamaño obtenido en el diseño y variará dependiendo del volumen (Martí, 2008).

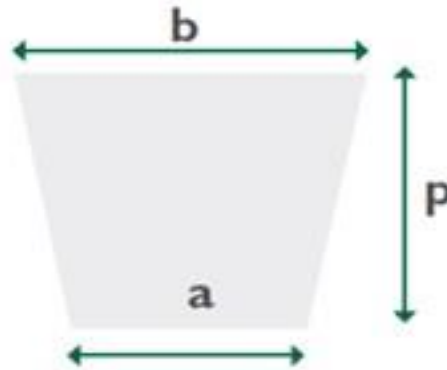


Figura 10. Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores. Adaptado de: Martí-Herrero J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. (Vol. 53)

Tabla 3.

Dimensiones de la zanja para implementación de biodigestores.

Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)					
AR (m)	2,0	1,75	1,5	1,25	1,0
a(m)	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
b(m)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
p(m)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Nota. Martí-Herrero J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. GTZ-Energía. Bolivia. (Vol. 53)

3.6 Alternativa de valorización

Para establecer una alternativa de valorización de los residuos LS y EB generados en la finca la Esperanza fue necesario realizar un análisis energético, técnico y económico para evaluar viabilidad, rentabilidad, ventajas y desventajas, que acarrearían la implementación de un sistema de digestión anaeróbica dentro de la finca.

Dentro del análisis energético fue necesario determinar los siguientes parámetros:

3.6.1 Poder calorífico. El poder calorífico de un gas es la cantidad de energía por unidad de masa o volumen desprendido al producirse la oxidación de dicho gas, durante el proceso de combustión. Las unidades de medición más comúnmente utilizadas en la industria para expresar este parámetro se refieren a cantidad de energía por masa o volumen de combustible, por ejemplo, kilo joule por kilo gramo (kJ/kg) o por metro cúbico (kJ/m³), kilo caloría por kilo gramo (kcal/kg) o por metro cúbico (kcal/m³) (Clavin, 2017).

El cálculo del poder calorífico inferior (PCI) del biogás se realizó por medio de la ecuación 11. Este valor es útil para comparar su rendimiento con el del gas de pipeta (propano) (Mantilla & Rojas, 2016).

Ecuación 13.
$$PCI_{biogás} = PCI_{metano} * \frac{\%metano}{100}$$

3.6.2 Potencial Energético: la energía producida a partir de la biomasa es diversa y sus impactos se generan de acuerdo al sitio específico en que se emplea. Las materias primas utilizadas para generar energía pueden provenir de residuos de cultivos o pueden ser subproductos de otros procesos agroindustriales, como es el caso para el lactosuero y el estiércol bovino.

Para estimar el potencial energético de la biomasa residual del sector agropecuario se han utilizado diferentes modelos matemáticos (García, 2008). Sin embargo, en nuestro caso, no se estimó el potencial energético de cada una de las biomasas como tal, sino el potencial energético del biogás generado a partir de estas. Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 14.

Ecuación 14.
$$PE_{Biogás} = \dot{m} * PCI_{CH_4}$$

En donde:

$PE_{Biogás}$: Potencial energético Biogás (kJ/h)

$\dot{m}$: Flujo de Biogás (m³/h)

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano (kJ/m³),

3.6.3 Eficiencia de eliminación de materia orgánica. La ecuación para calcular la eficiencia de eliminación de la materia orgánica es la siguiente:

Ecuación 15.
$$\eta(\%) = \frac{CO_S - CO_E}{CO_S} * 100$$

Donde:

CO_S = Concentración de materia orgánica del sustrato, en kg DQO o SV/m³.

CO_E =Concentración de materia orgánica del efluente, en kg DQO o SV/m³.

3.6.4 Alternativas de usos del biogás y efluente de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol bovino.

3.6.4.1 Alternativas de usos del biogás. La energía del biogás se puede utilizar de varias maneras: producción de calor, producción de electricidad, calor y potencia combinados, combustibles de transporte, inyección en la red principal de electricidad o gas después de la actualización.

Dentro de las principales motivaciones para el consumo de biogás que se trabajaron, fueron:

- Aprovechamiento energético del biogás para la cocción de alimentos
- Utilización del biogás en lámparas de iluminación
- Aprovechamiento del biogás como energía eléctrica
- Utilización del biogás para el accionamiento de motores.

3.6.4.2 Alternativas de uso del efluente. El efluente generado mediante procesos de digestión anaeróbica puede tener diferentes alternativas de uso como: fertilizante líquido para el acondicionamiento de suelos para cultivos, Precipitación de minerales como estruvita, incineración, compostaje entre otros.

La implementación de una u otra alternativa para el efluente depende de la composición fisicoquímica y la presencia o ausencia de agentes patógenos de este; además del costo de adquisición de la misma.

En este trabajo se consideraron dos alternativas para el efluente, Uso directo como acondicionador de suelos y precipitación de estruvita.

3.6.5 Costos. Se realizó una aproximación de los costos correspondientes a la elaboración e instalación de los prototipos de biodigestor tipo taiwán, considerando las características de la finca la Esperanza, además de los costos de implementación para cada una de las alternativas de aprovechamiento evaluadas tanto para el biogás como para el efluente.

4. Resultados

4.1 Análisis bibliométrico

Para revisión de literatura preexistente sobre este tema se realizó vigilancia tecnológica usando la base de datos Scopus. Se realizó una búsqueda bibliográfica de los diferentes artículos, tesis y demás documentos sobre la digestión anaeróbica, a su vez se correlaciona la co-digestión de varios compuestos y la interrelación entre el lactosuero, el estiércol bovino por separado con otros residuos y entre ellos. Las combinaciones en la digestión en la mayoría de los trabajos son con un tipo de estiércol como: estiércol de cerdo, bovino, gallinaza entre otros, o mezclas tales como: residuos alimenticios + glicerina, estiércol de cerdo + ensilaje de pasto, residuo lignocelulósico + estiércol y sus variaciones en las cargas orgánicas.

Los resultados para esta búsqueda de información se resumen en la figura 11, a partir del cual se realizó el análisis bibliométrico. Para este análisis se tomaron los datos desde 2000 hasta el 2018, debido a la cobertura de temas correlacionados se realizó una búsqueda a partir de los siguientes temas:

- Digestión anaeróbica
- Digestión anaeróbica del lactosuero
- Digestión anaeróbica del estiércol bovino
- Digestión anaeróbica del LS y el EB

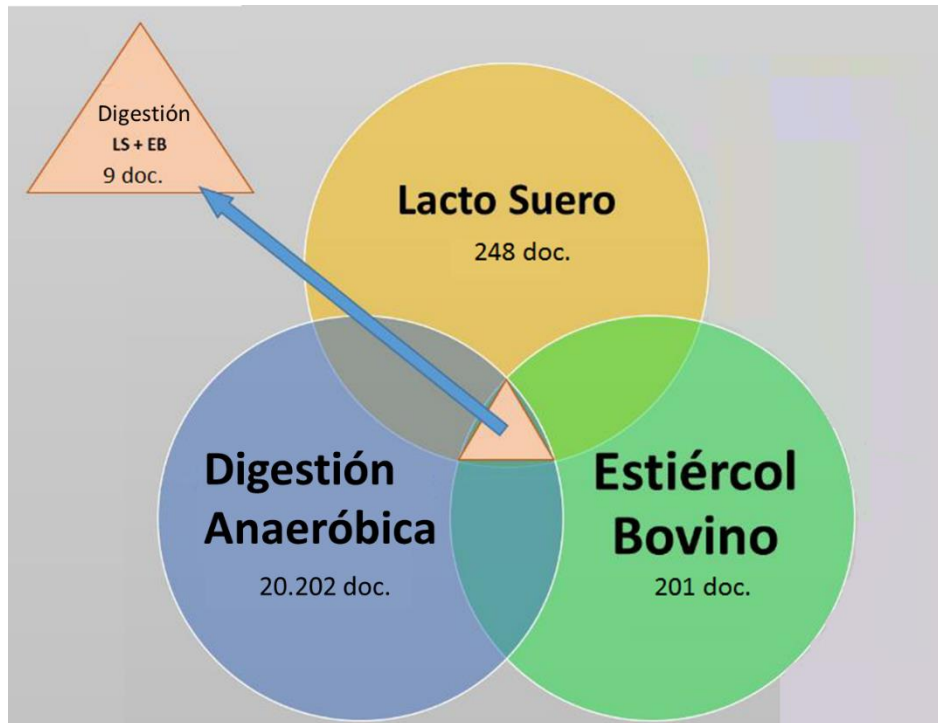


Figura 11. Relación de los artículos de digestión anaeróbica. Adaptado de: Scopus – Analyze search results, (2018)

Con ayuda de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, se recopiló la siguiente información:

4.1.1 Digestión Anaeróbica. La DA es, ampliamente utilizada a nivel mundial (Zarkadas I. , Sofikiti, Voudrias, & Pilidis, 2015). Se encontró 25.396 documentos sobre la digestión anaeróbica, de los cuales 20.202 fueron publicados en los últimos 18 años. De acuerdo con la figura 12, la tendencia desde el año 2000 al 2018 es creciente; pasando de 400 artículos a 2.609.

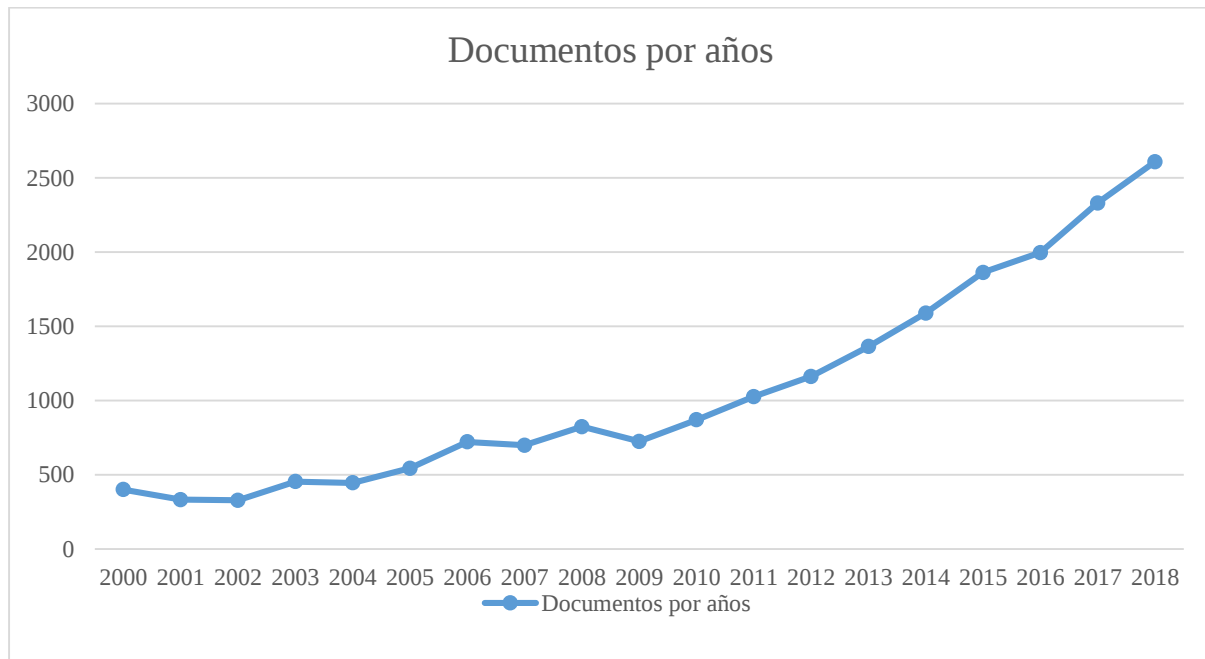


Figura 12. Documentos publicados sobre digestión anaeróbica. Adaptado de: Scopus – Analyze search results, (2018)

En países desarrollados como Estados Unidos, China, Alemania y otros, se ha implementado significativamente esta tecnología. Por el contrario, en países subdesarrollados el avance en la implementación de esta tecnología es escaso (Ruiz Bastidas, 2017). Prueba de ello es la gran diferencia en el número de publicaciones científicas entre los países desarrollados y subdesarrollados sobre este tema (figura 13).

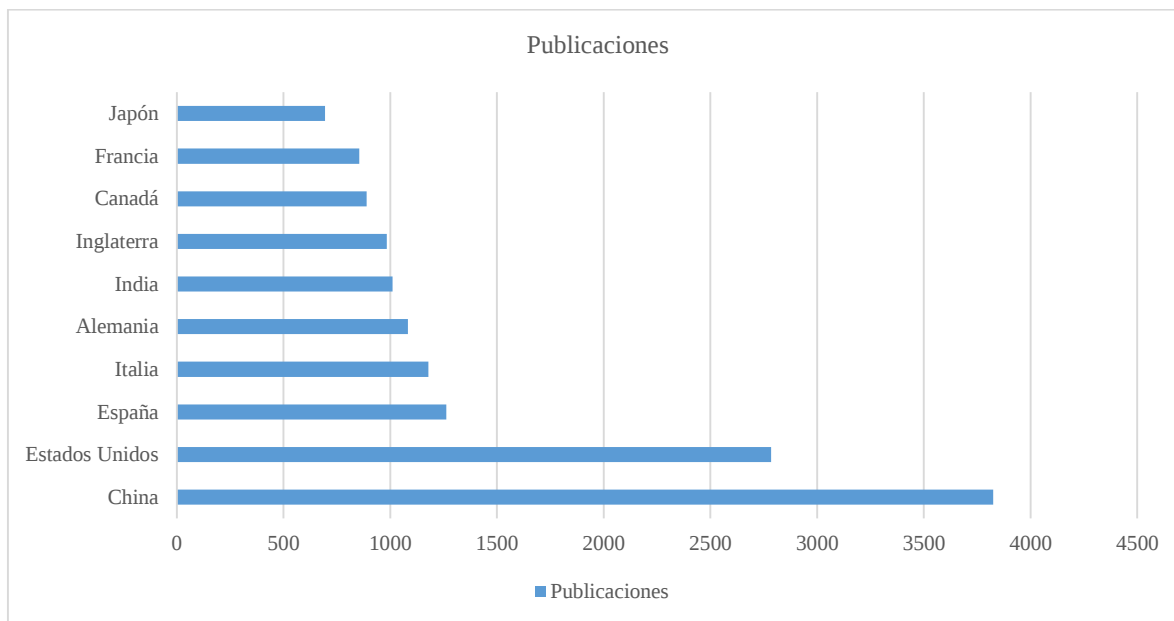


Figura 13. Publicaciones en el tema de DA en diferentes países los últimos 18 años. Adaptado de: Scopus – Analyze search results, (2018)

Sin embargo, es importante destacar, que las publicaciones por parte de algunos países son escasas en comparación con los países desarrollados, esto no significa que no haya estudios sobre el tema, ya que muchas publicaciones se realizan en coautoría y se registran en un país diferente al del autor. Los autores más relevantes y que más han contribuido al desarrollo y entendimiento de esta tecnología son: Steyer J. con (179), Angelidaki I. (157), Borja R. (88), Batstone (85) y Dong R. (79), Li Y. (71), entre otros. Por otra parte, un gran número de trabajos sobre la tecnología de DA a pequeña escala se han desarrollado en diferentes países como Argentina, Brasil, Chile, Perú, entre otros; implementado diferentes tipos de digestores como: cúpula fija, tambor flotante y tubulares (Garfí, Martí-Herrero, Garwood, & Ferrer, 2016), también conocidos como; chino, hindú y Taiwán respectivamente, con la utilización de diversos sustratos.

En Colombia, es importante reconocer que diferentes universidades colombianas se dedican a la investigación en temas de DA como son: la Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia, Universidad del Valle, Universidad de Cartagena, Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad Industrial de Santander, entre otras (Ruiz Bastidas, 2017). Además, también es importante destacar la creación de la Red Colombiana de Energía de la Biomasa (RedBioCol), la cual está conformada por organizaciones no gubernamentales, universidades, agremiaciones campesinas e indígenas y voluntarios activistas. Esta red, busca contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad colombiana mediante la promoción del aprovechamiento energético de residuos orgánicos con la gestión del conocimiento.

4.1.2 Digestión anaeróbica del lactosuero. Estudios sobre DA de LS se han reportado desde 1974, no obstante, para este trabajo se tomaron los últimos 18 años, encontrándose un total de 248 publicaciones. En la figura 14 se observa que desde el 2004 hay un aumento constante en el número de documentos publicados, lo que refleja el creciente interés por este sustrato en diversas investigaciones; las cuales abordaron temas como: las propiedades bioquímicas del lactosuero, sólidos en suspensión, la etapa limitante metanogénica, la biodegradabilidad anaeróbica y la solubilidad, contribuyendo a la selección de esta tecnología para darle un valor agregado y disminuir la contaminación.

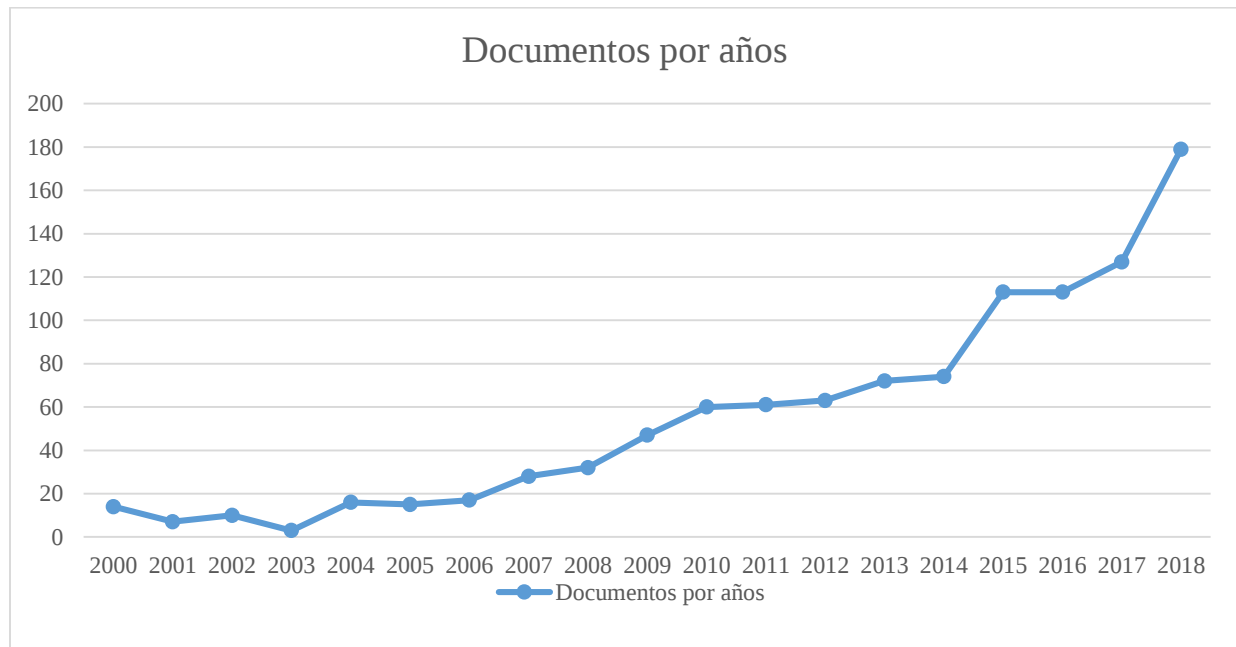


Figura 14. Publicaciones en el tema de DA con LS. Adaptado de: Scopus – Analyze search results, (2018)

Al tomar las publicaciones realizadas desde 2000 al 2018, sobresalen países como: Italia (29), Estados Unidos (24), Grecia (20), Polonia (16), Corea del Sur (12), España (10), entre otros. En Latinoamérica también se presenta este interés por el LS, sobre todo en Brasil (8), y México (4).

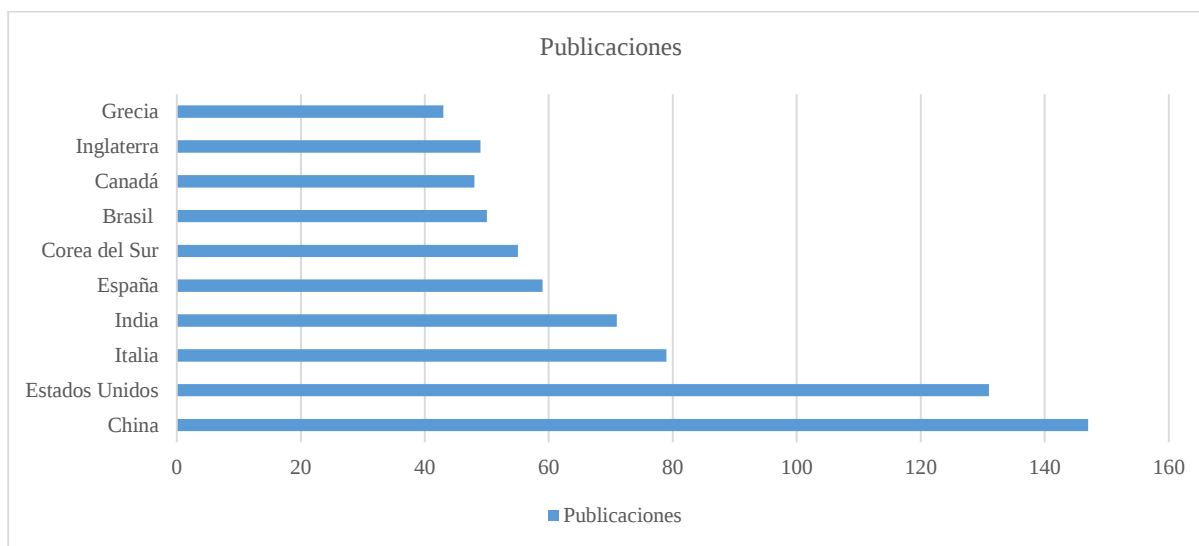


Figura 15. Países de mayor publicación sobre la DA con LS otros sustratos. Adaptado de: Scopus – Analyze results, (2018)

Los investigadores más representativos son: Kim J. (9), Lee C. (8), Ratusznei S. (7), Rodríguez J. (7), Lovato G. (6), Comino E. (5), Hwang S (5), Kornaros M. (5), entre otros.

En Colombia universidades como la Universidad nacional, la Universidad industrial de Santander, la Universidad del Valle y la Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia han realizado investigación sobre el aprovechamiento del lactosuero usando digestión anaeróbica. Estos trabajos reportan trabajos con lactosuero ácido y después de la elaboración del requesón, para la obtención de metano, utilizaron TRH de un día, con eficiencias de remoción promedio de 76 y 77,3 % y una producción de metano promedio de 0,3 y 0,43 L/día, respectivamente (Guerrero & Castilla, 2012). Otro tipo de trabajo evaluó el comportamiento del sistema de depuración anaerobio cuando se incorporaban altas cargas puntuales de lactosuero. Se manejaron 3 cargas constantes de 5.200 mg DQO/L día, 7.800 mg DQO/L día y 10.500 mg DQO/L día, con TRH de 29 días, donde observaron que el sistema propuesto es una buena opción para el tratamiento de agua residual con lactosuero, el cual soporto descargas de lactosuero puro (Parra, 2010).

4.1.3 Digestión anaeróbica del estiércol bovino. La ganadería es una actividad que se desarrolla en muchos países. Esta actividad genera una cantidad de estiércol, superior a la requerida como fertilizante, ocasionando impactos ambientales (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

Por esta razón, el estiércol bovino se ha empleado como sustrato en diversos trabajos de investigación y la digestión anaeróbica, con la intención de buscar alternativas para su tratamiento (Dias Fragoso & Rodríguez Fuerte, 2014). Sin embargo, el número de publicaciones es menor al reportado para el lactosuero, esto puede deberse a que por sus propiedades fisicoquímicas el EB, suele trabajarse en mezclas junto con otros residuos con el objetivo aumentar los rendimientos de metano.

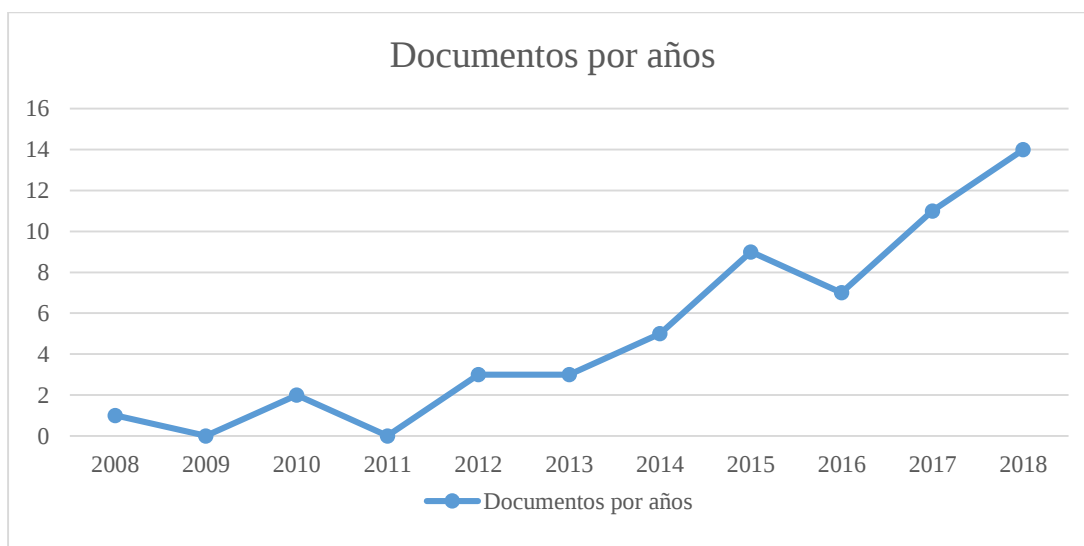


Figura 16. Publicaciones en el tema de DA con EB. Adaptado de: Scopus – Analyze results, (2018)

Uno de los casos donde se ha usado como sustrato es en la implementación de biodigestores de bajo costo en países en desarrollo, entre ellos algunos latinoamericanos como: Colombia, Perú, Bolivia, Ecuador y Argentina (Martí-Herrero & Cipriano, 2012), pero en mayor medida se

encontró a Brasil (5); en estos países los biodigestores de bajo costo ha sido adaptada a diferentes condiciones climáticas logrando obtener resultados positivos de implementación incluso en climas fríos (Perrigault, Weatherford, Martí-Herrero, & Poggio, 2012). No obstante, el país de mayor interés en los últimos años en la digestión del estiércol bovino es China (9), seguido de Alemania (7), India (5), Canadá (4), Estados Unidos (4), esto debido a que son potencias mundiales en la producción ganadera. En la figura 15 se presentan los países de mayor publicación en la DA del estiércol bovino.

Entre los artículos publicados en el 2018 se evidenciaron grandes autores como: Massé D. (8), Angelidaki I. (6), Ince B. (5), Ince O. (5), Saady N. (5), Akyol C. (4), entre otros.

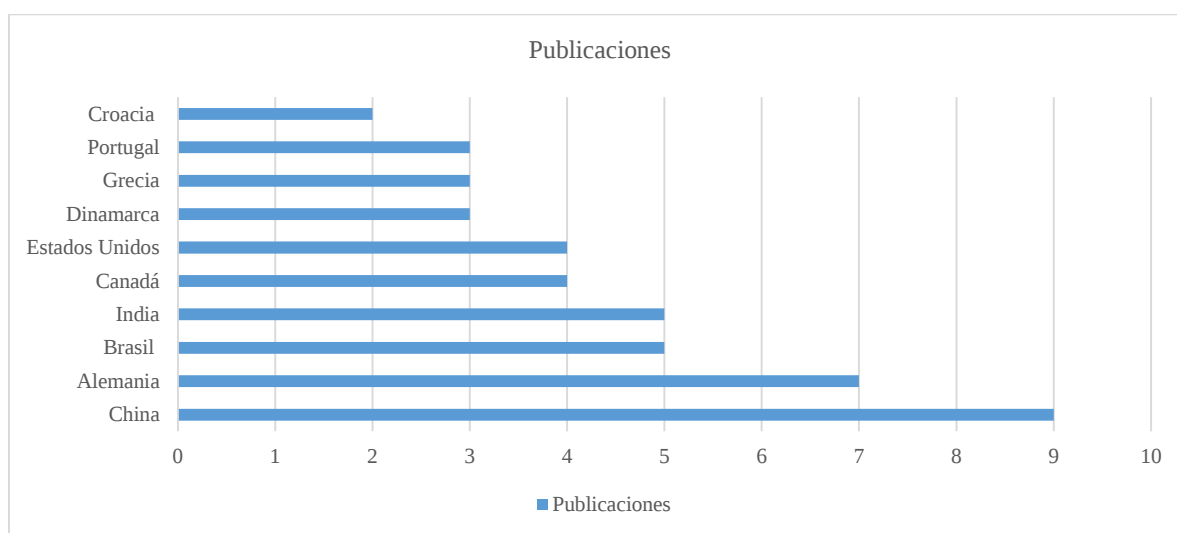


Figura 17. Países de mayor publicación sobre la DA utilizando estiércol bovino. Adaptadp de: Scopus – Analyze results, (2018)

En Colombia universidades y entidades como la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), organización no gubernamental, sin ánimo de lucro creado para formular alternativas de uso a los residuos generados en la producción

pecuaria, en la actualidad trabajan en investigaciones aplicadas y participativas en los procesos agroindustriales, sumando iniciativas de divulgación, comunicación y capacitación (Espinell, 1997).

4.1.4 Digestión anaeróbica del LS y el EB. Las características y condiciones del estiércol bovino y el lactosuero son ideales para la DA, las carencias del uno son el complemento del otro, adicionalmente se ve la necesidad de generar más estudios sobre estos para motivar su utilización, de esta manera disminuir la contaminación que los mismos generan.

Como se mencionó anteriormente, las publicaciones no son muchas, como se observa en la figura 18, en el 2017 se publicaron 2 artículos, y en los últimos 7 años se encontró un total de 9 documentos publicados.



Figura 18. Publicaciones en el tema de DA con LS y EB. Adaptado de: Scopus – Analyze results, (2018)

Los países con mayor motivación en el tratamiento de este tipo de residuos son los europeos (figura 19), aunque esto no indica que los países latinoamericanos no estén interesados, si no que no publican en muchos casos los resultados de sus trabajos.

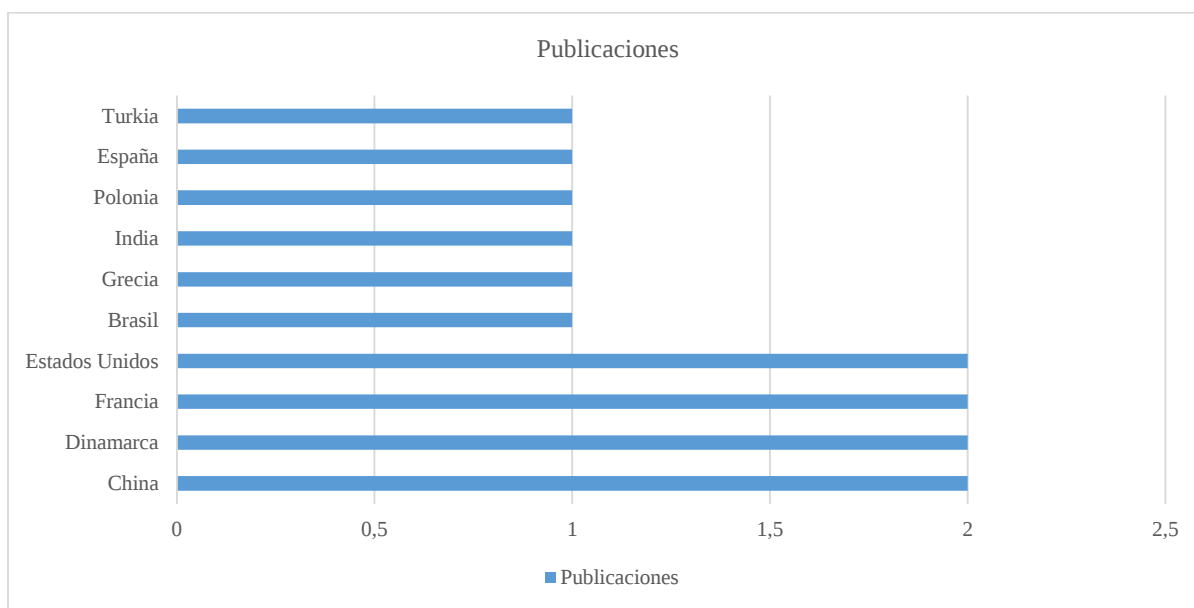


Figura 19. Países de mayor publicación sobre la DA utilizando LS y EB. Adaptado de: Scopus – Analyze results, (2018)

China continuo a la cabeza de las investigaciones (4 artículos). Las áreas de mayor investigación sobre el aprovechamiento del LS y el EB en procesos de digestión anaeróbica son principalmente en el medio ambiente, seguido por ingeniería química, bioquímica, energía e inmunología y microbiología.

También, se encontró estudios de varias universidades como: la universidad de Cantabria, Universidad Industrial de Santander, entre otras. En las cuales se investigó cargas bajas y altas en reactores tipo UASB, con pH de 7,5 y de 8, logrando rendimientos de metano de 48 y 50% (Moset,

Al-Zo, & Moller, The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates, 2015).

4.2 Caracterización del lactosuero y el estiércol bovino

4.2.1 Caracterización de LS. En la tabla 4 se presenta la variación en las principales propiedades del LS de algunos artículos reportados por la literatura. Se muestran los valores de DQO, SV y pH para el LS, reportados por diferentes autores. Al analizar la desviación estándar (*ds*) de estos valores se encontró que para la DQO la *ds* es igual a 21,37 g/L.

En cuanto a los SV, la variación de los datos fue de 1,1 g/kg y para el pH la *ds* fue de 0,4. Se evidencio que la mayor variación se presentó para los valores de DQO. Estas variaciones pueden deberse a la procedencia de la leche la cual es de diferentes lugares o simplemente porque es de diferentes animales con diferentes patrones de alimentación. Por esta razón se decidió trabajar no con un promedio de los datos encontrados como se había contemplado inicialmente, si no se escogieron para trabajar únicamente datos reportados por Jaimes J. (2018), por ser unos datos de una investigación realizada en Santander - Colombia, se asumió son los más cercanos a la realidad del área de estudio para este trabajo (finca la Esperanza) por las características geográficas, climáticas, entre otras.

Tabla 4.

Rangos reportados por la literatura para el lactosuero.

Autor	DQO [g/L]	SV [g/kg]	pH
¹ Dareioti M.; Kornaros M. (2015)	93,21 ± 2,99	62,4 ± 1,62	6,12 ± 0,04
² Gelegenis J.; Georgakakis D.; Angelidaki I., Vassilis M. (2007)	74,90	48,00	3,50
³ Riggio V.; Comino E.; Rosso M. (2015)	74,40	45,00	4,12
⁴ Saddoud A.; Hassaïri I.; Sayadi S. (2007).	68,6 ± 3,3	59,30 ± 3,8	4,9 ± 0,27
⁵ Jaimes J. (2018)	51,03 ± 0,76	55,1 ± 3,25	4,1 ± 0,3

Nota. ¹Dareioti M.; Kornaros M. (2015). Co-digestión anaeróbica mesofílica de sorgo ensilado, suero de queso y estiércol de vaca líquido en un sistema CSTR de dos etapas: efecto del tiempo de retención hidráulica. *Tecnología Bioambiental*, 175, 553-562. ²Gelegenis J.; Georgakakis D.; Angelidaki I., Vassilis M. (2007). Optimización de la producción de biogás mediante la digestión conjunta de suero con estiércol de aves de corral diluido, 32 (13), 2147 – 2160. ³Riggio V.; Comino E.; Rosso M. (2015). Parte sobre el suelo de la caña común para mejorar la Co-digestión anaeróbica de las biomásas agrícolas: potencial, monitoreo y eficiencia, 79, 35 – 41. ⁴Saddoud A.; Hassaïri I.; Sayadi S. (2007). Reactor anaerobio de membrana con separación de fases para el tratamiento del suero de queso, 98 (11), 2101 – 2108. ⁵Jaimes J. (2018). Diseño de un proceso integral de la Co-digestión anaeróbica del lactosuero mediante la optimización de la sinergia de sustratos, que permita la producción de biogás y estruvita. Tesis de maestría en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.

4.2.2 Composición elemental del LS. En cuanto a la composición elemental del LS, se muestra en la tabla 5. Se pueden observar los altos niveles de NH_4^+ y PO_4^{3-} en el LS, indicando que tienen un alto potencial para la recuperación de nutrientes. Sin embargo, al analizar la relación de C/N, se reporta un valor bajo (11,9) con respecto al reportado por la literatura. Por lo tanto, se ratifica la decisión de trabajarlo en codigestión con EB. Las concentraciones de carbono y oxígeno del LS son adecuados, ya que estos valores favorecen las reacciones de óxido reducción del residuo, necesarias dentro del proceso de digestión anaeróbica. Lo anterior, se corrobora con la alta concentración de carbohidratos que también indican el alto grado de biodisponibilidad del residuo.

En cuanto al contenido de proteínas puede llegar a ser inhibidor del proceso de DA, por los iones amonio que se liberan, esto se correlaciona con el alto contenido de nitrógeno.

Tabla 5.

Caracterización del sustrato e inóculo utilizados en el diseño del biodigestor rural.

Variables	Unidades	Lactosuero	Estiércol bovino
C	%p/p	38,36	39,89
H	%p/p	5,02	4,78
O	%p/p	38,94	33,50
N	%p/p	3,21	1,44
C/N	-----	11,90	23,90
Carbohidratos	%p/p	55,33	47,74
Lípidos	%p/p	1,92	2,44
Proteínas	%p/p	23,00	9,00
Na	[g/kg]	ND	0,11
Mg	[g/kg]	ND	0,07
Ca	[g/kg]	ND	0,12
K	[g/kg]	ND	0,44
Zn	[g/kg]	ND	0,01
Cr	[g/kg]	ND	0,81
Ni	[g/kg]	ND	1,14
NH ₄	[mg/L]	41,5 ± 3,54	12 ± 1,41
PO ₄ ⁻³	[mg/L]	1438,58 ± 85,36	325 ± 28

*ND: no determinado

Nota: Jaimes J. (2018). Diseño de un proceso integral de la Co-digestión anaeróbica del lactosuero mediante la optimización de la sinergia de sustratos, que permita la producción de biogás y estruvita. Tesis de maestría en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.

4.2.3 Caracterización del EB. En la tabla 6 se presenta la variación en las principales propiedades del EB de algunos artículos reportados por la literatura. Los resultados del EB muestran que tiene un pH favorable para el proceso de DA, de esta manera se pueden llegar a disminuir los problemas de inhibición del LS por acidificación, mejorando la estabilidad del proceso.

De igual forma, se muestran los valores de DQO, SV y pH para el EB, reportados por diferentes autores. Al analizar la desviación estándar (*ds*) de estos valores se encontró que para la DQO la *ds* es igual a 30,2 g/L, el cual es más alta que la *ds* del LS. Para los SV, la variación de los datos fue de 53,9 g/kg y para el pH la *ds* fue de 0,5. Se evidencio que la mayor variación se presentó en los valores de SV. Esta variación es 52,8 g/kg mayor a la *ds* del LS, puede ser por condiciones del lugar, clima, cuidado de los animales, entre otros factores que varíen del sitio donde son criados (Guapota, Santander) al lugar donde elaboran el queso (Oiba, Santander).

Tabla 6.

Rangos reportados por la literatura para el estiércol bovino.

Autor	DQO [g/L]	SV [g/kg]	pH
¹ Arrieta W. (2016)	128,90	102,10	7,02
	71.00	40,50	7,20
	103,20	68,40	7.00
	100,30	57,70	7,10
² castro L.; Escalante H.; Gómez O.; Jiménez D. (2016)	74,67	70.00	7,70
³ jaimes J. (2018)	59,41 ± 2,52	132,47 ± 1,09	7,84

Nota. ¹Arrieta W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Tesis de grado, Ingeniería Mecánico-Eléctrico. ²Castro L.; Escalante H.; Gómez O.; Jiménez D. (2016). Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica. DYNA, 83 (199). ³Jaimes J. (2018).

Diseño de un proceso integral de la Co-digestión anaeróbica del lactosuero mediante la optimización de la sinergia de sustratos, que permita la producción de biogás y estruvita. Tesis de maestría en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.

Nuevamente se seleccionan los datos reportados por Jaimes J. (2018) para el EB, por ser una investigación realizada en Santander - Colombia, asumiendo condiciones cercanas a la realidad del área de estudio para este trabajo (finca la Esperanza).

4.2.4 Composición elemental del EB. En cuanto a la composición elemental del EB, se muestra en la tabla 5. La relación C/N presentó un valor de 23,9, siendo esta adecuada para el proceso de DA, considerando que la literatura reporta valores entre 20 y 30 para este proceso (Chen, Romano, & Zhang, 2010), en cuanto al contenido de materia orgánica del EB reportado como macromoléculas, se puede observar un alto contenido de carbohidratos y a diferencia del LS un bajo contenido de proteínas. Por otro lado, el EB presenta una concentración significativa de micro y macronutrientes, los cuales son necesarios para un buen desempeño metabólico de los microorganismos. Los macronutrientes y los iones de metales pesados juegan un papel importante tanto en la síntesis como en la actividad enzimática de los microorganismos anaeróbicos (Zhang, Su, Baeyens, & Tan, 2014).

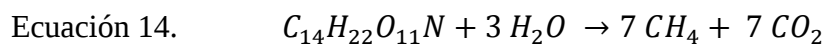
Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que una codigestión LS y EB puede mejorar el proceso de degradación de ambos residuos ya que las características de uno pueden compensar las falencias del otro en cuanto a su composición y de esta manera se puede lograr un balance entre nutrientes que favorezca un mejor desarrollo de los microorganismos metanogénicos, y por tanto se aumenten los rendimientos en la producción de biogás.

4.3 Cálculo del potencial de biometanización teórico

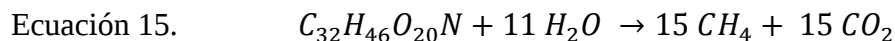
Para calcular el potencial de biometanización de un residuo es necesario conocer la fórmula empírica del mismo. Esto se realiza teniendo como base la caracterización elemental. En este trabajo, se tuvieron en cuenta las caracterizaciones elementales presentadas en la tabla 5.

A continuación, se presentan la estequiometría de las reacciones, para la generación de metano a partir de cada uno de los residuos, tanto del LS como del EB.

- Lactosuero:



- Estiércol bovino:



En la tabla 7 se resumen los datos obtenidos para el cálculo del metano teórico producido por los residuos en m^3CH_4/kg SV, así como las formulas empíricas.

Tabla 7.

Rendimientos teóricos de producción de metano del LS y el EB.

Sustancia	Formula empírica	Metano teórico m^3CH_4/kg SV
Lactosuero	$C_{14}H_{22}O_{11}N$	0,43
Estiércol bovino	$C_{32}H_{46}O_{20}N$	0,5

Los resultados obtenidos en el cálculo del metano teórico a producir por el LS y el EB, indicaron que poseen buenas características para ser biodegradables anaeróbicamente y así aprovechar su materia orgánica para la producción de metano (Sierra Rios, 2013)

4.4 Selección de un tipo de biodigestor

A continuación, se presenta la matriz DOFA elaborada para la selección del biodigestor a instalar en la finca La Esperanza.

Tabla 8.

Matriz DOFA.

Tipos de biodigestores					
Discontinuos		Semi-Continuos		Continuos	
Batch	Chino	Hindú	Taiwán	Mixto	
Fortalezas	Disminuye la tala de bosques, reemplaza la utilización de leña	Menor costo de construcción que uno de cúpula flotante	Volumen del gas almacenado es visible directamente	Facilidad de manejo y bajo costo	Disminuye la tala de bosques, reemplaza la utilización de leña
	Elimina los desechos orgánicos	Tiempo de vida muy largo (20 años)	Materiales duraderos y resistentes	Facilidad de transporte e instalación	Control de los parámetros
	Disminuye la contaminación del medio ambiente	Materiales duraderos y resistentes	Larga vida útil (15 años)	La reparación puede ser rápida y accesible	Disminuye la contaminación del medio ambiente
	Sistema simple	Fuente de empleo	Fuente de empleo	Materiales locales	Mezcla homogénea

Tabla 8. *Continuación*

Tipos de biodigestores					
Discontinuos		Semi-Continuos			Continuos
Batch		Chino	Hindú	Taiwán	Mixto
Fortalezas	El mantenimiento del sistema es bajo, sin elementos que se oxiden	El mantenimiento del sistema es bajo, sin componentes móviles ni elementos que se oxiden	Construcción relativamente fácil y el volumen de almacenamiento es visible	Puede ser reubicado, fácil limpieza y vaciado	Capacidad para grandes volúmenes
	Producción de energía eléctrica, calórica y transporte automotor	Por su construcción debajo del suelo no ocupa espacio en la superficie	Presión del gas almacenado es constante ya que es regulado por el peso del gasómetro	Facilidad para alcanzar mayores temperaturas de digestión (puede utilizar energía solar)	Utilización para tratamientos de agua residuales
	Produce biofertilizante rico en: N,P,K capaz de competir con abonos químicos	Produce biofertilizante rico en: N,P,K capaz de competir con abonos químicos	Construcción subterránea ahorra espacio y protege al digestor del clima, animales		Produce biofertilizante rico en: N,P,K capaz de competir con abonos químicos
	Lugares planos, llanos y clima caluroso	Utilización de la heces humanas	Es el único biodigestor con depósito de biogás interior	Puede ser de utilidad en lugares de clima variante y se puede implementar en zonas geográficas de poco acceso	Generación de grandes cantidades de biogás
	Elimina malos olores	Elimina malos olores	Elimina malos olores	Elimina malos olores	Elimina malos olores
Oportunidades					

Tabla 8. Continuación

Tipos de biodigestores				
Discontinuos		Semi-Continuos		Continuos
Batch	Chino	Hindú	Taiwán	Mixto
Debilidades	Mayor complejidad en construcción y mantenimiento (vaciarlo cada cierto tiempo para identificar las posibles fisuras en la cúpula)	La cúpula de acero implica un costo sustancial	Requiere de una cantidad de agua mayor que el modelo chino	Necesita acumular los desechos orgánicos cerca de la zona de consumo
	Tiempos muy largos (40 - 100 días)	Necesidad de personal experto en su construcción	La pintura del tambor implica mayores costos de mantenimiento	Ocupa espacio en la superficie porque no está completamente enterrado
	Necesita acumular los desechos orgánicos cerca de la zona de consumo	A pesar de que la construcción bajo el suelo amortigua las temperaturas extremas, la temperatura de fermentación al interior del biodigestor es baja	Problema de limpieza y de espuma	Debe ser implementado en una cama de tierra para proteger el material
		Es común que se presente fracturas y agrietamientos	Necesita acumular los desechos orgánicos cerca de la zona de consumo	Es común que se presente fracturas y agrietamientos
				Necesita acumular los desechos orgánicos cerca de la zona de consumo

Tabla 8. *Continuación*

Tipos de biodigestores				
Discontinuos		Semi-Continuos		Continuos
Batch	Chino	Hindú	Taiwán	Mixto
Amenazas	Riesgo de explosión en caso de no cumplir las normas de seguridad para gases de combustibles	Debido a la presión del gas, incluso una pequeña grieta en la mampostería del domo puede causar grandes pérdidas de biogás	La parte de acero es susceptible de corrosión por lo que estas plantas tienen un menor tiempo de vida que las de domo fijo	Alta sensibilidad del material, por lo que requiere protección externa para evitar daños ocasionados por animales u otros objetos y los rayos solares
	Generación de subproductos de SH ₂ , es tóxico y corrosivo	La presión del gas varía enormemente dependiendo del volumen de éste almacenado	Si el alimento contiene material flotante (como fibra o paja) el gasómetro puede atascarse	Tiempo de vida es de 5 años o menos, puede dañarse antes
	No hay control en las variables del proceso	Alto consumo de agua	Alto consumo de agua	Generación de subproductos de SH ₂ , es tóxico y corrosivo
	Es necesario la supervisión por técnicos experimentados para evitar pérdidas de biogás	Riesgo de explosión en caso de no cumplir las normas de seguridad para gases de combustibles	Es necesario la supervisión por técnicos experimentados para evitar las pérdidas de biogás	Alto consumo de agua
				La presión del gas varía enormemente dependiendo del volumen de éste almacenado

Para poder finalizar con la selección del tipo de biodigestor a instalar, se elaboró una tabla de criterios ponderada, donde se asignó un valor numérico a las características con el objetivo de facilitar la selección, donde 4 es la mejor cualidad y 1 la peor. Lo anterior se muestra en la tabla 8.

Tabla 9.

Criterios ponderados para la matriz DOFA.

Criterios	Valor ponderado
Fortalezas	4
Oportunidades	3
Debilidades	2
Amenazas	1

Posteriormente, se tomaron las características de diseño del biodigestor presentadas en la matriz DOFA elaborada previamente; junto con las ponderaciones de la tabla 9 y se obtuvo la siguiente tabla de análisis.

Tabla 10.

Análisis de la Matriz DOFA.

	Biodigestores	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Total de puntos
1	Batch	4	3	4	4	3	3	4	2	1	28
2	Chino	3	2	4	2	4	3	3	2	1	24
3	Hindú	3	2	4	2	4	3	3	2	1	24
4	Taiwán	3	4	4	4	1	2	3	4	4	31

Tabla 10. *Continuación*

	Biodigestores	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Total de puntos
5	Mixto	4	2	4	2	4	3	4	2	1	27
a	Facilidad de carga y descarga										
b	Sistema fácil de operar										
c	Sistema sin fugas										
d	Facilidad de mantenimiento										
e	Larga vida útil										
f	Confiabilidad en la producción de gas										
g	Sistema seguro en su operación										
h	Economía (Precio)										
i	Nivel freático (Geografía del lugar de instalación)										

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla anterior, se puede concluir que la mejor alternativa de biodigestor para instalar en la finca la Esperanza es el biodigestor tipo Taiwán, el cual obtuvo una sumatoria de puntos igual a 31. Esto debido a que es un sistema fácil de operar, económico y que puede ser instalado en lugares de difícil acceso o de inestabilidad geológica; los cuales son factores de calidad requeridos para la finca la Esperanza.

4.5 Diseño de un prototipo del biodigestor rural

4.5.1 Descripción del área de estudio. La finca la Esperanza está ubicada en la vereda las Flores del Municipio de Guapota, Santander, Colombia (Lat: 6°21'3.39"N Long: 73°19'0.13"O), presenta una temperatura promedio de 15 ± 1 °C, 30 ± 1 °C en el diurna y $22,5 \pm 1$ °C nocturna. Esta finca cuenta con 140 cabezas de ganado de la raza Brahman, de las cuales 110 vacas son para el

pastoreo, las otras 30 cabezas están semiestabuladas (solo se recoge el estiércol en horas de la noche, donde están en el resguardo de la finca), de las 30 reses, 10 son vacas y 20 son terneras, la cantidad de estiércol producido es menor.

Para calcular la disponibilidad de los residuos a tratar en el biodigestor, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El peso aproximado de las hembras es de 550 kg cada una, los terneros 200 kg.
- Se estimó una producción de estiércol por animal de 11,3 kilos para los terneros y 30 kilos para las hembras adultas (Mantilla & Rojas, 2016),
- Se consideró una producción total de estiércol de 216 kg para los terneros y 300 kg para las hembras.
- Se tuvo en cuenta que sólo se puede recoger el 25% del estiércol generado ya que son animales semiestabulados (Martí, 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, la materia orgánica disponible para cargar el biodigestor será de 120 kilos diarios.

4.5.2 Descripción de los elementos necesarios para la construcción del sistema anaerobio de tratamiento de residuos para la finca La Esperanza. A continuación, se describen los elementos o unidades que se requieren para la construcción del sistema anaerobio de tratamiento de residuos para la finca La Esperanza, esto teniendo en cuenta que además del biodigestor es necesario hacer otras adecuaciones, así como construir otras unidades anexas que son necesarias para el buen funcionamiento del reactor.

4.5.2.1 Zanja: es el lugar donde se acomodará el biodigestor plástico, se debe tener en cuenta que las paredes de esta sustentarán toda la presión del volumen líquido del biodigestor. El volumen del biogás estará en la parte superior. En la tabla 11 se encuentran las dimensiones calculadas para el tamaño de la zanja.

4.5.2.2 Biodigestor: el cuerpo del biodigestor se diseñó en polietileno tubular calibre 8 de 4 m de perímetro y protección UV (según especificaciones del mercado). En la tabla 11 se encuentran las especificaciones y dimensiones calculadas para el biodigestor.

4.5.2.3 Reservorio: lugar de almacenamiento del biogás, el reservorio se realiza con el mismo material del cuerpo del biodigestor. El volumen del reservorio correspondió al 50% del volumen del biodigestor. En el numeral 4.5.3.2 se describen los parámetros de diseño del reservorio.

4.5.2.4 Tanque de mezcla: este tanque es utilizado para realizar la mezcla de estiércol bovino y lactosuero. El tanque se puede diseñar en forma cubica. La dimensión del tanque se calculó teniendo en cuenta un sobredimensionamiento del 40% sobre el caudal de afluente.

4.5.2.5 Accesorios: el biodigestor debe constar de 2 tubos de 4" pulgadas para la entrada (afluente) y la salida (efluente) respectivamente. La salida del biogás y la tubería de conexión hacia el reservorio se puede hacer con tubería de ½ pulgada (Mantilla & Rojas, 2016). En el Apéndice B, se representó una lista de los materiales con especificaciones y costos para el prototipo.

4.5.3 Parámetros de diseño del biodigestor. En la tabla 11 se reportaron los parámetros del diseño del biodigestor propuesto para la finca la Esperanza. En la figura se muestra el prototipo de biodigestor.

Tabla 11.

Especificaciones del biodigestor

Parámetros	Valor
Volumen total	18,75 m ³
Volumen efectivo	14,05 m ³
Diámetro	1,3 ,m
Longitud	7,3 m
Relación (L/D)	6,6
Dimensiones de la zanja	Ancho sup: 0,9 m
	Ancho inf: 0,7 m
	Largo: 7,3 m
	Profundidad: 1 m

El tamaño del biodigestor es de una longitud de 14,6 m y un volumen de 18,75 m³. Al revisar la relación L/D se obtuvo una relación superior a 10, máximo sugerido por la literatura, por tal motivo, se propuso la implementación de dos biodigestores de 7,3 m de longitud con volúmenes de 9,5 m³ (figura 20 y 21).

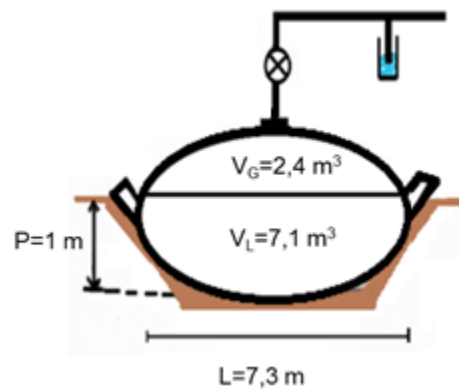


Figura 20. Vista lateral de los prototipos.

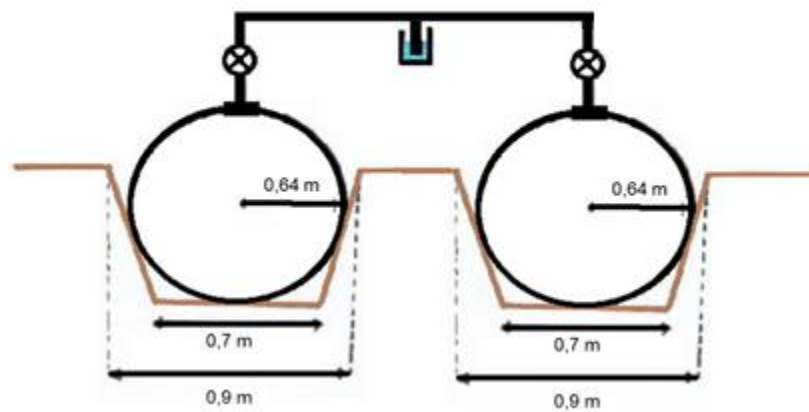


Figura 21. Vista frontal de los prototipos.

4.5.3.1 Carga diaria: para la carga diaria se mantuvo una RIS de 1,5. La carga de alimentación diaria de 120 kg de estiércol y 192,3 litros de lactosuero. Esta mezcla tiene una concentración de 44,2 g SV/L.

4.5.3.2 Reservorio: se debe construir un reservorio para almacenar 7,4 metros cúbicos de biogás.

4.5.3.3 Cantidad de polietileno tubular necesario para cada biodigestor: 7,3 m para el biodigestor + 1 m para amarres (15 m para las dos capas) + 5,5 para reservorio incluidos los 80 cm necesarios para los amarres. En total para cada biodigestor se usarán 18,75 m de polietileno tubular.

En la tabla 12 se reportan las condiciones de operación para los prototipos de biodigestor.

Tabla 12.

Condiciones de operación del biodigestor

Variables	Valor
Temperatura diurna	$30,0 \pm 1$
Temperatura nocturna	$15,0 \pm 1$
Temperatura promedio	$22,5 \pm 1$
Tiempo de retención	45 días
RIS	1,5
Volumen total de alimentación	312,3 L/día
Volumen de efluente	312,3 L/día

4.5.3.4 Producción de biogás. Para el cálculo de la producción de biogás se tomó en base a los valores de SV y ST del estiércol producido. En la tabla 13 se resumen los datos y resultados obtenidos.

Tabla 13.

Producción de biogás.

Variables	Valor
Carga de EB	120 kg
Sólidos volátiles (SV)	1,12 kg m ³ /día
Sólidos totales (ST)	1,45 kg m ³ /día
Producción de biogás	4,215 m ³ CH ₄ /día

Los productos que se generan y sus cantidades se reportan en la tabla 14 y en la figura 22, se encuentra las variables de salida y de entrada para el biodigestor.

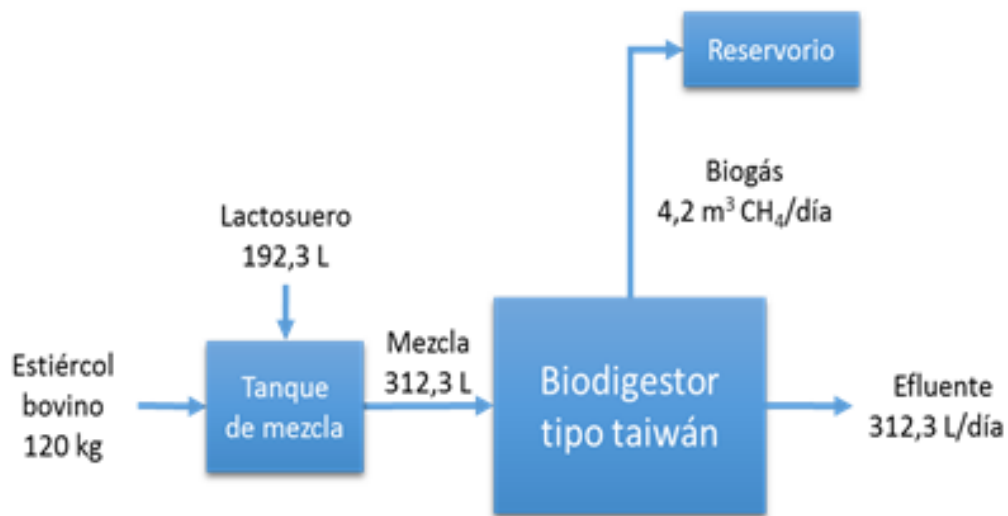


Figura 22. Vista frontal de los prototipos.

Tabla 14.

Variables de salida.

Variables	Valor
Volumen de efluente	312,3 L/día
Volumen de biogás	4,2 m ³ CH ₄ /día

4.6 Alternativa de valorización para los residuos de la finca La Esperanza

Para poder plantear alternativas de uso para el biogás generado con la digestión anaeróbica del LS y EB, fue necesario cuantificar el poder calorífico del biogás y el potencial energético de este, con el objetivo de conocer cuanta energía almacenada presentaba este recurso.

4.6.1 Poder calorífico. En la tabla 15 se presentó un resumen de los datos para calcular el poder calorífico del biogás generado por el prototipo de biodigestor rural, propuesto para la finca la Esperanza.

Tabla 15.

Cantidad de energía por unidad de masa.

Variables	Valor
PCI _{metano}	32,78 kw*s/m ³
PCI _{biogás}	21,5 kJ/m ³

4.6.2 Potencial energético. En la tabla 16 se presentó un resumen de los datos para calcular el potencial energético del biogás generado por el prototipo de biodigestor rural, propuesto para la finca la Esperanza.

Tabla 16.

Potencial energético.

Variables	Valor
PE biogás	25,09 kJ/s o 25,09 kw
PCI biogás	21,5 kJ/m ³
m	0,0012 m ³ /s

En la figura 23 se resumen los parámetros de operación de biodigestor (variables de entrada y salida) así como alternativas propuestas de valorización propuestas para el biogás.

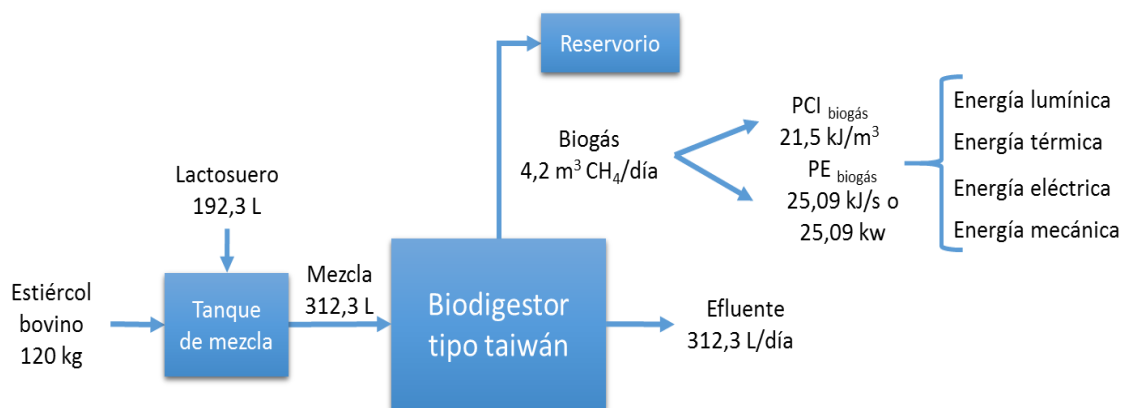


Figura 23. Variables del proceso.

4.6.3 Alternativas de uso del biogás de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol

bovino: El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, el metano almacena una considerable cantidad de energía que puede ser aprovechada mediante la combustión, lámparas de iluminación, quemadores domésticos e industriales, calderas y en sistemas de refrigeración, mediante tecnologías apropiadas. En cuanto al uso del efluente las opciones también son variadas e incluyen, compostaje, incineración, uso directo en suelos y obtención de nutrientes secundarios por precipitación. Considerando lo anterior se proponen 4 alternativas para el uso del biogás como son: cocción de alimentos, iluminación, uso en motores y generación de electricidad. De igual manera se presentan como alternativas de usos para el efluente el uso directo como acondicionamiento de suelos y la precipitación de nutrientes como estruvita. En la figura 24 se puede observar el esquema general propuesto con las diferentes alternativas de utilización del biogás y del lodo efluente subproductos del proceso de DA de los residuos LS y EB generados en la finca la Esperanza.

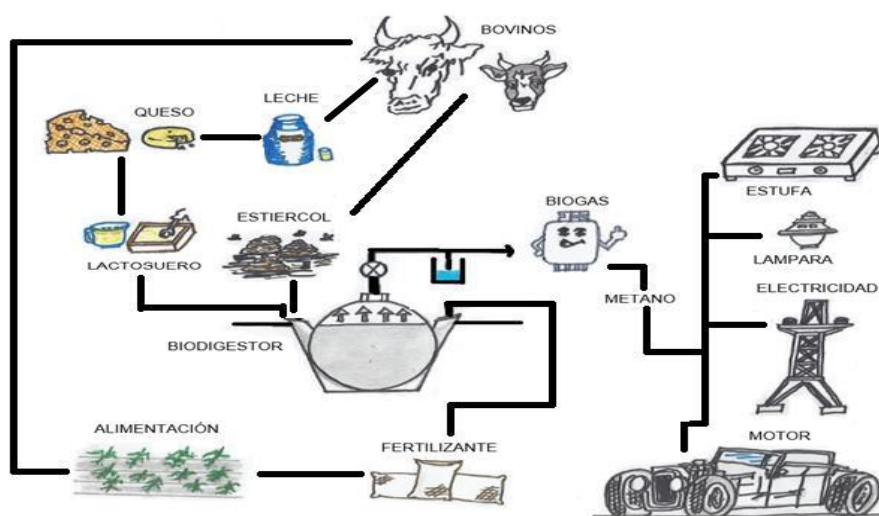


Figura 24. Alternativa de valoración energética.

4.6.3.1 Aprovechamiento energético del biogás en la cocción de alimentos. Esta alternativa se plantea, teniendo en cuenta que en la Finca La Esperanza al igual que en muchas fincas colombianas, se utilizan leña y gas propano para la cocción de alimentos. En el caso del uso del gas propano, se genera un gasto mensual de \$61.800 pesos de GLP (Inversiones de Nordeste, s.f.) para cocinar durante 6 horas diarias (desayuno, almuerzo y comida).

El biogás es un combustible con alto valor calórico (19 MJ/m^3). Existen lugares donde se implementan pequeños sistemas de uso directo del biogás (Matí-Herrero, Andrade De Santiago, Hidalgo, & Parra, 2015). Estos sistemas emplean la energía calórica para actividades como: cocción, calefacción de agua, e iluminación.

En las cocinas los quemadores de gas convencional se pueden adaptar para el uso de biogás al cambiar la relación aire-gas puesto que se requiere menos aire para el proceso. Sin embargo, esta es una modificación muy sencilla que se puede realizar de manera local en nuestro país. En cuanto al mantenimiento de este sistema, solamente se requiere de un filtro de H_2S , esto con el objetivo de evitar la inhalación de este gas por parte de los usuarios y para evitar también que este cause corrosión a los componentes de la estufa. Este filtro normalmente está construido con óxido de hierro el cual reacciona con el ácido neutralizando su acción corrosiva. Para el buen funcionamiento se necesita tener una presión de gas de 8 a 25 mbar, esto ayuda a mantener niveles de H_2S inferiores a 100 ppm en el filtro (Matí-Herrero, Andrade De Santiago, Hidalgo, & Parra, 2015). El material filtrante puede ser removido y remplazado por material nuevo fácilmente. El material filtrante residual, puede ser adicionado a materiales orgánicos que se encuentren en compostaje.

En términos generales, un quemador de una cocina familiar consume alrededor de 300 litros de biogás por hora; mientras que, una industrial requiere de 350 litros de biogás por hora (Matí-Herrero, Andrade De Santiago, Hidalgo, & Parra, 2015).

Para los cálculos de este estudio se trabajó asumiendo las características del biogás obtenidas iguales a las reportadas en la literatura, con el fin de relacionar los datos y establecer un valor de consumo.

Tabla 17.

Tiempo y consumo de biogás en estufas adaptadas.

Tipo de estufa	Tiempo	Consumo
Convencional	1 h	0,13 – 0,17 m ³
	6 h	0,78 – 1,02 m ³

4.6.3.2 Utilización del biogás en lámparas de iluminación. El uso del biogás como alternativa para iluminación se plantea considerando que en la finca la esperanza se genera un consumo de electricidad por este concepto cercano a \$200.000 pesos. Si se considera que este valor se puede disminuir reemplazando las bombillas incandescentes por lámparas de iluminación que funcionan con biogás, se generaría un ahorro económico.

El principio para la utilización del biogás en lámparas específicas es que un gas en combustión al pasar a través de un filamento le produce incandescencia. Una lámpara de gas, como algunas de gasolina, para producir iluminación utiliza una caperuza, preferiblemente impregnada de algún material radiactivo el cual incrementa la intensidad lumínica por incandescencia (Hernández, 1996).

Una lámpara de gasolina o de gas de tipo comercial se puede adaptar a biogás haciendo una ampliación o sustitución de la tobera de descarga del gas a aproximadamente 1,5 mm de diámetro.

Esta modificación también es sencilla de realizar y se puede hacer localmente.

En la tabla 19 se presenta información sobre el tipo de caperuza que debe usarse y el consumo de biogás por hora.

Tabla 18.

Tiempo y consumo de biogás en lámparas adaptadas.

Tiempo	potencia	caperuzas	Consumo
60 min	100 lux	1	0,09 – 0,13 m ³ /h
240 min	100 lux	3<	0,36 – 0,52 m ³ /h

4.6.3.3 Aprovechamiento del biogás como energía mecánica. El biogás puede utilizarse como fuente de energía mecánica, para la generación de Par y velocidad angular en un eje. Esto se puede aprovechar en motores de combustión interna, los cuales son de uso frecuente en maquinaria agrícola. Para realizar esto, se debe tener en cuenta la calidad del biogás y la cantidad disponible para no generar competencia con el uso primario que es la cocción de alimentos. Para evaluar la calidad del biogás existen diferentes métodos como la cromatografía de gases. Sin embargo, en campo esta no se puede realizar y se requiere de pruebas más sencillas como la prueba de “Llama” del gas, en la cual la llama debe permanecer encendida, sin necesidad de una llama piloto y aumentar la presión. Dicho biogás es tomado de un reservorio donde es almacenado.

Para el caso de la finca la esperanza, la propuesta es usar el biogás excedente para generar energía mecánica que accione el motor de una máquina picadora para ensilar pasto para el alimento de los animales de la finca.

El requerimiento de material procesado es de 475 kilos que corresponde a la mitad del alimento que consumen los animales semiestabulados teniendo en cuenta que las vacas pastorean medio día. Teniendo en cuenta los datos de productividad obtenidos para la máquina con la que cuenta la finca la cual funciona con un motor de combustión interna de 6,5 hp, monocilíndrico, de encendido por chispa de 198 cc, la cual fue adaptada a biogás, se encontró que esta procesa 7,5 kilos de pasto por minuto. Por tanto, para abastecer los 475 kilos se requieren 63,3 minutos de operación. Al revisar el consumo de biogás de esta máquina se obtuvo que es de 22,7 litros/minuto, es decir, se requieren 1.437 litro de biogás en total para realizar este trabajo.

4.6.3.4 Utilización del biogás para la generación de energía eléctrica. El biogás puede utilizarse como fuente de energía térmica, para la generación de electricidad. Esto se realiza a través de un motogenerador que transforma la energía química del biogás en energía eléctrica.

Se recomienda que esta energía eléctrica generada no sea de uso continuo, sino que sea una alternativa de respaldo para cuando la red eléctrica nacional falle. Lo anterior teniendo en cuenta que el costo de la energía generada a partir del uso del biogás es mayor porque se requiere de un mantenimiento constante del motogenerador utilizado ya que al usar biogás como combustible y al estar sometido a uso constante las piezas se desgastan más rápido. Por el contrario, si este motogenerador se usa de manera discontinua puede alcanzar hasta 500 horas de uso o más, lo que en el ámbito agrícola sería entre 10 y 20 años con un promedio de uso entre 2 y 4 horas por mes (Maizonnasse, Plante, Oh, & Laflamme, 2013).

Se determinó el consumo de un motogenerador similar modelo GG 2800 marca bauker de gasolina adaptado a biogás, el cual es de 34 litros/minuto y genera 1000 vatios de potencia eléctrica. Si se considera que una vez al mes se requiere generar electricidad durante 2 horas por motivos de falla de la red eléctrica nacional se consumirían 4.080 litros de biogás.

Esta energía serviría para hacer funcionar los siguientes electrodomésticos durante las 2 horas de apagón:

Tabla 19.

Consumo en vatios de diferentes electrodomésticos.

Electrodomésticos	Potencia (vatios)
Licuadaora	600
Nevera	200
Congelador	120
Ventilador de techo	95
Televisor	87
Bombillos ahorradores	20
Bombillos Led	6

4.6.4 Alternativas de uso del efluente de la co-digestión anaeróbica del lactosuero y el estiércol bovino. Las alternativas planteadas para el aprovechamiento industrial del lodo efluente de procesos de digestión anaeróbica se muestran a continuación:

4.6.4.1 Uso directo para acondicionamiento de suelos: las ventajas de utilizar el efluente como acondicionamiento para los suelos es: restauración orgánica del suelo, reducción de nutrientes del suelo, reciclado de la materia orgánica, ahorro de fertilizantes, entre otros. Las desventajas que puede presentar esta alternativa son: esparcimiento no controlado de metales no caracterizados, requiere tratamiento de estabilización previo para generar el biosólido, requiere almacenamiento largo y bajo condiciones controladas, requiere transporte.

Es una alternativa de baja complejidad y por lo tanto es sencilla de implementar. Los costos generados por la implementación de esta alternativa también son bajos, teniendo en cuenta que solamente se requiere un tanque de almacenamiento del efluente y la mano de obra de la persona que haga la labor de fertirriego (ver tabla 21). Se puede llegar a considerar la adquisición de una bomba estacionaria para apoyar esta actividad en las zonas más alejadas de la finca. Por otra parte, el ahorro que puede llegar a generar implementar esta alternativa en la finca si puede ser significativo, ya que este efluente al usarlo como abono puede llegar a reemplazar la gallinaza que es el abono utilizado actualmente en la finca y la cual hay que comprar.

4.6.4.2 Obtención de nutrientes precipitación de estruvita. Como alternativa para mejorar la estabilización del efluente y de igual forma que el acondicionamiento de suelos, de darle un valor agregado a este tipo de residuo, existe un gran interés en la recuperación de minerales esenciales como lo son el P y el N. una técnica sencilla para recuperar estos nutrientes es mediante la precipitación de fosfato de magnesio de amonio hexahidratado ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), más conocido como Estruvita (ES) (Stolzenburg, Capdevielle, Teychené, & Biscans, 2015). La ES se considera un recurso renovable y en algunos casos es utilizada como fertilizante, mejorando el rendimiento de la biomasa de diferentes cosechas, previniendo el daño en las plantas y evitando la eutrofización

(aporte excesivo de nutrientes que afecta negativamente un ecosistema) (Karak, y otros, 2015).

Una de las ventajas que tiene la obtención de estruvita como alternativa de uso para un efluente es la remoción de patógenos, la extracción de estruvita retira totalmente la presencia de patógenos en su proceso, si se tiene un residuo con este tipo de problema esta alternativa es la más viable. Esto a su vez presenta una desventaja, porque este tipo de proceso se ajusta más a residuos con altas concentraciones de coliformes fecales que producen enfermedades infecciosas, capaces de causar hasta la muerte en los humanos (Soria, y otros, 2001).

Para realizar el proceso de precipitación de estruvita se requiere una infraestructura compuesta de secado, separación magnética y ensacado, adicionalmente se requieren la utilización de varios reactivos, tales como: HCl, $MgCl_2$ y NaOH, principalmente. Y por tanto los costos de obtención son un poco mayores comparados con el uso directo. Esta alternativa se recomienda implementar en el caso en que los cultivos que se van a fertilizar generen productos que se deseen llevar a exportar a la unión europea, en donde por normatividad se limita el uso directo del efluente. Teniendo en cuenta lo anterior, como el requerimiento de fertilización es para cultivo de pastos de corte para el ganado y no para un producto de exportación, se considera que la mejor alternativa para la finca la Esperanza, de manera costo/efectiva es el uso directo como acondicionador de suelos.

4.6.5 Eficiencia de eliminación de materia orgánica. Al comparar los datos de DQO de la entrada y de la salida del proceso se puede obtener la eficiencia de remoción de carga orgánica del mismo.

Tabla 20.

Eficiencia del biodigestor.

Variables	Valor
CO _s	14,98 g DQO/L
CO _e	51,3 g DQO/L
η	70,8 %

El resultado de 70,8% confirma la viabilidad del proceso de DA del LS y el EB, para las condiciones de la finca la Esperanza. Este valor se considera bueno al compararlo con la literatura, donde reportar un promedio de 67,2% de eficiencia de remoción de materia orgánica, en una situación de contaminación producido por la industria láctea (Reina, 2015).

4.7 Costos

Con base a la información recolectada y teniendo en cuenta el rendimiento de producción de metano (PBM), el potencial energético (PE), se realizó un análisis económico. Con base en lo anterior fue con el fin de hacer una escala real del proceso de digestión anaeróbica del LS y el EB.

Tabla 21.

Componentes económicos utilizado en el cálculo de los costos de inversión total para la DA del LS y el EB.

Parámetros	Unidades	Valor	Parámetro	Unidades	Valor	Cantidad
Consideraciones para el diseño			Consideraciones para el cálculo económico			
Flujo de LS	L/d	192,3	Costos del biodigestor y accesorios	US\$	423,1	1
Flujo de EB	kg/d	120	Costo equipo reservorio	US\$	96,9	1
TRH	Días	45	Costos equipos de almacenamiento	US\$	215	2
% de contenido en el biodigestor	%	60	Costo equipo de alternativa lumínica	US\$	8	1
			Costo equipo de alternativa térmica	US\$	10	1
			Costo equipo de alternativa eléctrica	US\$	1.000	1
			Costo equipo de alternativa mecánica	US\$	375	1
			Precio biogás	US \$/M³	0,65	-
			Vida útil de los equipos	Años	7	-
			Inflación	%	4	-
			Tasa de descuento	%	6	-

Los costos de los equipos propuestos en la alternativa de uso, fueron considerados con base al mercado Internacional y colombiano. Los costos del biogás fueron estimados de acuerdo a la literatura (Romero, Wahid, Hernández, Moller, & Fernandez, 2017).

En la tabla 21 se presentaron los costos de los prototipos de biodigestor, en el Apéndice C se encuentra los detalles del costo, en el Apéndice D se da información sobre los equipos, así como

una ilustración de los mismos. Con base a lo presentado en la tabla se puede observar que este tipo de propuesta para el aprovechamiento de los residuos generados en la finca la esperanza no es muy altos.

Para implementar un biodigestor tipo taiwán, un tanque de almacenamiento, un reservorio y los accesorios (Apéndice C), tiene un costo de \$735 (UD), los costos de mantenimiento no se tomaron en cuenta porque son ocasionales y bajo costo (entre \$ 1 - \$ 2 UD).

4.7.1 Costos para el efluente. Se realizó una comparación nutricional entre el efluente, el estiércol como abono y como compostaje.

Tabla 22.

Nutrientes comparativos entre abonos.

Nutrientes	Estiércol compostado		Estiércol como abono		Biol	
	Rango de valor en %	Valor promedio en %	Rango de valor en %	Valor promedio en %	Rango de valor en %	Valor promedio en %
Nitrógeno	0,5 – 1,5	1,0	0,5 – 1,0	0,8	1,4 – 1,8	1,6
Fósforo	0,4 – 0,8	0,6	0,5 – 0,8	0,7	1,1 – 2,0	0,6
Potasio	0,5 – 1,9	0,5 – 0,8	0,5 – 0,8	0,7	0,8 – 1,2	1,0

Fuente: Sistema biobolsa.

A partir del potencial del efluente se sacó un valor estimado económico.

Tabla 23.

Potencial valor económico del efluente como posible remplazo de sintéticos.

Fertilizante	Nutrientes en el fertilizante	Concentración en el fertilizante %	Disponibilidad anual del nutriente en efluente (kg)	Precio del kg de fertilizante (\$)	Potencial ahorro anual al sustituir fertilizante convencional con efluente (\$)
Urea	Nitrógeno	46	3245,58	0,52	3668,92
NPK 18 -16	Nitrógeno	18	3245,58	0,75	7349,59
- 0	Fosforo P_2O_5	46	4507,75	0,75	7349,59
Muriato de potasio	Potasio K_2O	60	540,93	0,55	495,85

Nota. Sistema biobolsa.

5. Conclusiones

- Los PBM teóricos del LS y del ES calculados permiten ver la viabilidad del proceso y la disponibilidad fija del biogás por día, estos valores según la literatura están en los rangos aceptables para la digestión anaeróbica, de esta manera confirma la selección del tratamiento biológico según las condiciones de la finca.
- Evaluando las condiciones de la finca, los requerimientos que debe tener un biodigestor por seguridad y calidad se seleccionó el biodigestor tipo Taiwán como la mejor opción.
- A partir de una producción teórica de $4,2 \text{ m}^3/\text{día}$ de biogás, esta producción generaría un poder calorífico ($\text{PCI}_{\text{biogás}}$) de $21,5 \text{ kJ/m}^3$ de biogás, los cuales pueden ser aprovechados en diferentes tecnologías. Así mismo se generaría un efluente que puede ser usados directamente para acondicionamiento de suelos.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, E., Ramírez, M., Aguilar, Y., & Álvarez, M. (2009). Producción de proteínas y biomasa probiótica de lactobacillus caseilofilizadas a partir de suero de leche de cabra. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1), p. 67 - 76.
- Agyeman, F.; Tao, W. (2014). Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*, 133, p. 268 - 274.
- Angelidaki, I., Alvaes, M., Bolzonella, D., Borzacc, L., Campos, J., Guwy, A., . . . Van, L. (2009). Defining the biomethane potencial (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59(5), p. 927 - 934.
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D., Plugge, C., & Alfons, S. (2011). Biomethanation and Its Potential. *Methods Enzymology*, 494(16), p. 327 - 351.
- Arrieta Palacios, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánica-Eléctrica. Universidad de Piura, Perú.
- Asa, J., & Anna, S. (2009). Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar. Svenskt Gastekniskt Center AB and Avfall Sverige.
- ASOLECHE. (2018). Boletín Lácteo de Asolehce. Bogotá, Colombia .
- Buswell E., S., & Neave. (1930). Laboratory studies of sludge digestion. Illinois: Division fo State Water Survey.

- Cendales Ladino, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización com fuente de energía renovable. Tesis de magíster en Ingeniería Mecánica, p. 1 - 92.
- Chen, X., Romano, R., & Zhang, R. (2010). Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. Department of Biological and Agricultural Engineering, 3(4), p. 61 - 71.
- Clavin, M. (2017). Medición continúa de poder calorífico en gas natural. Tecnología NDIR.
- Dias Fragoso, T., & Rodriguez Duarte, E. (2014). Anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and pear waste. Bioresource Technology, 164, p. 420 - 423.
- Escalante Hernández, H. (2011). Atlas del potencial energético de la biomasa reisual en Colombia. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Espinel, R. (1997). La Fundación CIPAV y su participación como ONG Colombiana en el desarrollo agropecuario sostenible para el trópico. Livestock Research for Rural Development, 9(5), p. 33 - 35.
- Garcia, L., Suárez, Y., Hernández, R., & Betancuourt, A. (2009). Estiércol bovino Mitos y realidades. Asociación Cubana de Producción Animal (ACPA)(4), p. 36 - 37.
- García, N. (2008). El consumo de energía durante el proceso de biodiesel y el etanol en Colombia. Universidad de los Andes. Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica).
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, p. 599 - 614.
- Guerrero, W., & Castilla, P. (2012). Degradación anerobia de dos tipos de lactosuero en reactores UASB. Tecnología Química, p. 99 - 106.

- Hernández, L. (1996). Tecnologías para el aprovechamiento del gas producido por la digestión anaeróbica de la materia orgánica. *Agronomía Colombiana*, XIII(1), p. 76 - 90.
- Humberto, E., & Janneth, O. (2011). *Atlas de potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá, Colombia: UPME.
- ICA. (s.f.). Secretaría Distrital de Hacienda. Recuperado el 4 de 7 de 2017, Obtenido de: <http://www.shd.gov.co/shd/publicaciones-shd>
- Ileleji, K.; Martin, C.; Jones, D. (2015). Basics of Energy Production through Anaerobic Digestion of Livestock Manure. *Bioenergy*, 7, p. 287 - 295.
- Inversiones de Nordeste. (s.f.). Colgas. Recuperado el 8 de 1 de 2019, Obtenido de: <https://insa.com.co/>
- Jaimes, J. (2018). Diseño de un proceso integral de la Co-digestión anaeróbica del lactosuero mediante la optimización de la sinergia de sustratos, que permita la producción de biogás y estruvita. Bucaramanga, Santander: Tesis de maestría en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.
- Jelen, P. (2003). Low lactose and lactose-free milk and dairy products - prospects, technologies and applications. *Australian Journal Technology*, 58(2), p. 161 - 165.
- Jensen, P., Ge, H., & Batstone, D. (2011). Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Science & Technology*, 64(4), p. 880 - 886.
- Juliano, P., Blanca, G., & Castells, M. (2017). *Valorización del lactosuero*. Bucaramanga, Santander: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

- Karak, T., Sonar, I., Nath, J., Paul, K., Das, S., Boruah, R., . . . Das, K. (2015). Struvite for composting of agricultural wastes with termite mound: Utilizing the unutilized. *Bioresource Technology*, p. 49 - 59.
- Kavacik, B.; Topaloglu, B. (2010). Biogas production form co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and bioenergy*, 34(9), p. 1321 - 1329.
- Kawai, M., Nagao, N., Tajima, N. N., Matsuyama, T., & Toda, T. (2014). The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield. *Bioresource Technology*, 157, p. 174 - 180.
- Kwietniewska, E. J., & TYS. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, p. 491 - 500.
- Lesteur, M. (2011). First step towards a fast analytical method for the determination of biochemical methane potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresour Technology*, 102(3), p. 2280 - 2288.
- Li, F., Abraham, C., Chen, P., Graf, J., & Yu, Z. (2015). Efecto de la carga orgánica sobre la microbiota en un sistema de digestión anaeróbica en fase de temperatura (TPAD) que digiere conjuntamente el estiércol de leche y el suero de desecho. *ICIDCA*, XXXIX(1), p. 35 - 48.
- Lin, Y., Wang, D., Li, Q., & Xiao, M. (2011). Mesophilic batch anaerobic co-digestion of pulp and paper sludge and monosodium glutamate waste liquor for methane production in a bench-scale digester. *Bioresource Technology*, 102(4), p. 3673 - 3678.
- Lozano, S. (2014). Estabilización de la materia orgánica presente en el lactosuero mediante el proceso de codigestión anaerobia. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.

- Maizonnas, M., Plante, J., Oh, D., & Laflamme, C. (2013). Investigation of the degradation of a low-cost untreated biogas engine using preheated biogas with phase separation for electric power generation. *Renewable Energy*, 55, p. 501 - 513.
- Mantilla, L., & Rojas, G. (2016). Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino en la finca Marcella. Bucaramanga, Santander: Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, p. 540 - 555.
- Marañón, E., Castrillón, L., Quiroga, G., Fernández, Y., & García, M. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Management*, 32(10), p. 1821 - 1825.
- Martí, J. (2008). Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación. Bolivia: GTZ - Energía.
- Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, p. 21 - 70.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, p. 412 - 427.
- Martí-Herrero, J., Andrade De Santiago, E., Hidalgo, E., & Parra, G. (2015). Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador. Un aporte a la mitigación y adaptación del cambio climático y su aplicación. Quito, Ecuador.
- Moncayo Romero, G. (2013). Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás. Aqualimpia Beratende Ingenieure.

- Moset, V., Al-Zo, H., & Moller, H. (2015). The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates. *Biomass and Bioenergy*, 83, p. 474 - 482.
- Olaya Y., G. L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira.
- Olaya, Y. (2006). Diseño de un biodegestor de cúpula fija. Palmira, Colombia: Trabajo de grado.
- Parra, R. (2010). Digestión Anaerobia de lactosuero: Efectos de altas cargas puntuales. *Facultad Nacional de Agronomía*, 63(1), p. 5385 - 5394.
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: a heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, p. 259 - 268.
- Plata, L.; Rivera, D.; Castro, L.; Guzmán, C.; Escalante, H. (2011). Jerarquización de tecnologías para el aprovechamiento industrial del subproducto de la digestión anaerobia del bagazo de fique. *UIS Ingenierías*, 11(2), p. 171 - 185.
- Prazeres, A., Carvalho, F., & Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, p. 48 - 68.
- Putri, D.A.; Saputro, R.R.; Budiyo. (2012). Biogas Production from Cow Manure. *Journal of Renewable Energy Development*, 1(2), p. 61 - 64.
- Raposo, F., Borja, R., Martín, A., Rubia, M., & Rincón, B. (2009). Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 149, p. 70 - 77.
- Reina, J. (2015). Evaluación de la eficiencia y cinética de remoción de materia orgánica en un reactor biológico aerobio horizontal con medio de soporte PET. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de ingeniería ambiental.

- Ribeiro, S.; Silva, L. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 33, p. 1101 - 1107.
- Rivas, J., Prazeres, A., Carvalho, F., & Beltrán, F. (2010). Treatment of cheese whey wastewater: combined coagulation - flocculation and aerobic biodegradation. *Journal of Agricultural and food chemistry*, 58(13), p. 7871 - 7877.
- Riveros D., C. N. (2013). Diseño y construcción de un prototipo biodigestor tipo mixto para la producción y almacenamiento de gas metano. Bogotá, Colombia: Trabajo de grado.
- Romero, M., Wahid, R., Hernández, H., Moller, B., & Fernandez. (2017). Improvement of wheat straw anaerobic digestion through alkali pre-treatment: Carbohydrates bioavailability evaluation and economic feasibility. *Science of the total Environment*, p. 651 - 659.
- Ruiz Bastidas, R. C. (2017). Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobica. Tesis de Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Saddoud, A., Hassaíri, I., & Sayadi, S. (2007). Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey. *Bioresource technology*, 11(ISSN 0960-8524), p. 2102 - 2108.
- Saunders, O.; Harrison, J.; Fortuna, A.; Whitefield, E., Bary, A. (2012). Effect of anaerobic digestion and application method on the presence and survivability of E. coli and fecal coliforms in dairy waste applied to soil. *Water, Air & Soil Pollution*, 223, p. 1055 - 1063.
- Sierra Rios, A. (2013). Obtención de Biogás a partir de gallinza producida en la granja Bellavista Horizontes a servicio de la incubadora Santander S. A., Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga: Maestría en Química Ambiental.

- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcatar, G., Trinidad, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Biodigestion of Hog Slurry to Produce Biomanure*, 19(4), p. 353 - 362.
- Stolzenburg, P., Capdevielle, A., Teychené, S., & Biscans, B. (2015). Struvite precipitation with MgO as a precursor: Application to waste water treatment. *Chemical Engineering Science*, 133, p. 9 - 15.
- Tauseef S., M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi S., A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 15(117), p. 187 - 207.
- Teglia, C.; Tremier, A.; Martel, J. (2011). Characterization of Solid Digestates: Part 1. *Waste Biomass Valor*, 2, p. 43 - 58.
- Tirado, D. F., Acevedo, D., & Montero, P. M. (2015). Extracción de proteínas del lactosuero de la leche de cabra mediante la aplicación de campos eléctricos pulsantes de alta intensidad (CEPAI). *Información Tecnológica*, 26(5), p. 71 - 80.
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago, Chile.
- Xu Su, Y., Karthikeyan, O., Selvam, A., & Wong, J. (2012). Effect of inoculum to substrate ratio on the hydrolysis and acidification of food waste in leach bed reactor. *Bioresource Technology*, 126, p. 425 - 430.
- Yan, B., Selvam, A., & Wong, J. (2014). Application of rumen microbes to enhance food waste hydrolysis in acidogenic leach-bed reactors. *Bioresource Technology*, 168, p. 64 - 71.
- Zarkadas, I., Sofikiti, A., Voudrias, E., & Pilidis, G. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of pasteurised food wastes and dairy cattle manure in batch and large volume laboratory digesters: Focussing on mixing ratios. *Renewable Energy*, 80, p. 432 - 440.

- Zarkadas, I., Sofikiti, A., Voudrias, E., & Pilidis, G. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of pasteurised food wastes and dairy cattle manure in batch and large volumen laboratory digesters: Focussing on mixing ratios. *Renewable Energy*, 80, p. 432 - 440.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, p. 383 - 392

Apéndices

Apéndice A. Cuestionario Finca La Esperanza.

1. Nombre del propietario de la finca.
2. Ubicación de la finca.
3. Número de personas que viven en la finca.
4. Número de personas que visitan constantemente la finca, pero no viven en ella.
5. ¿Cuáles son las actividades que realizan las personas ajenas a la finca?
6. ¿Cuál es su gasto mensual aproximado de luz, en el recibo cuántos kwh reporta y el costo de este?
7. ¿Cuántas hectáreas tiene la finca?
8. ¿Cuántas hectáreas tiene la finca para el pastoreo de los animales?
9. Del número de cabezas de ganado que tiene la finca, ¿cuántos son?
Hembra: _____ Macho: _____
10. ¿Cuál es el peso aproximado del ganado?
Hembra: _____ Macho: _____
11. Dimensiones del establo: _____
12. Clima aproximado de la región: _____
13. ¿Cantidad y cuántas veces alimentan al ganado bovino? _____
14. ¿Cómo alimentan al ganado bovino y si le adicionan suplementos, describirlos?
15. Se le proporciona algún tipo de medicamento, antibiótico al ganado bovino.

SI ____ NO _____. Si se le suministra describa la frecuencia.

16. Cantidad de leche producida al día

17. ¿Cuántas veces salen las vacas a pastoreo?

18. ¿Dónde se deposita el estiércol del ganado bovino?

Apéndice B. Tabla de los parámetros de diseño para los prototipos de los biodigestores tipo taiwán.

Parámetros	Prototipo 1	Prototipo 2
Volumen líquido	7,3 m ³	7,3 m ³
Volumen gaseoso	2,4 m ³	2,4 m ³
Volumen total	9,7 m ³	9,7 m ³
Ancho del rollo	2 m	2 m
Longitud de biodigestor y de la zanja	7,5 m	7,5 m
Longitud plástico por capa (se agrega 1 m para amarre)	8,5 m	8,5 m
Plástico total (con reservorio)	14,6 m	14,6 m
Ancho inferior de la zanja	0,7 m	0,7 m
Ancho superior de la zanja	1 m	1 m
Profundidad de la zanja	0,9 m	0,9 m

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C. Cotización de los materiales necesarios para la construcción de los prototipos de biodigestores tipo taiwán.

Producto	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Metros de polietileno tubular, calibre 8, transparente perímetro del rollo de 4 m.	30	\$21.000	\$630.000
Metros de tubo de PVC de 4 pulg.	12	\$13.000	\$156.000
Adaptador macho en PVC de ½ pulg.	2	\$600	\$1.200
Adaptador hembra en PVC de ½ pulg.	2	\$600	\$1.200
Codo en PVC de ½ pulg.	2	\$700	\$1.400
Te en PVC de ½ pulg.	2	\$800	\$1.600
Válvula en PVC de ½ pulg.	2	\$8.000	\$16.000
Metros de tubo en PVC de ½ pulg.	12	\$1.850	\$3.900
Frasco de soldadura para PVC.	1	\$3.900	\$3.900
Frasco de limpiador para PVC.	1	\$2.700	\$2.700
RESERVORIO Y TUBOS DE CONEXIÓN DE BIOGÁS			
Metros de polietileno tubular, calibre 8, transparente, perímetro de rollo de 4m.	5	\$21.000	\$105.000
Metros de tubo en PVC de ½ pulg.	48	\$1.850	\$88.800

	TOTAL	\$1.040.000
--	-------	-------------

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice D. Cotización de equipos sugeridos para uso de biogás como alternativa.

Lámpara de biogás



Características	Unidad	valor
Precio	UD \$	8
Tiempo respuesta	h	24
Tas de respuesta	%	67,9

Generador eléctrico a gasolina 6'000W



Características	Unidad	valor
Precio	UD \$	1.000
Tiempo respuesta	h	8
Potencia	kw	6

Motor gasolina y eléctrico Ducson

Características	Unidad	Valor
Precio	UD \$	375
Modelo	-	DE211
Potencia	Hp	6,5
Motor de	cc	211
	Rpm	3.600
Eje	Cuña y rosca	3/4
Cap. combustible	L	2,5

Estufa adaptada a biogás

Características	Unidad	valor
Precio	UD \$	8
Tiempo respuesta	h	24
Tas de respuesta	%	67,9